

УДК 621.771.23

Василев Я. Д.
Дементенко А. В.
Самокиш Д. Н.
Клипин Я. А.
Дурманов В. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ТЕКУЧЕСТИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Напряжение текучести входит прямым сомножителем в любой теоретической формуле для определения контактных нормальных напряжений и оказывает решающее влияние на точность расчета данного диаметра, а через него и на точность прогнозирования энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной прокатки. Поэтому полученные количественных данных о влиянии параметров технологии холодной прокатки на точность и надежность расчета напряжения текучести актуально.

Пластическая деформация на промышленных станах холодной прокатки осуществляется с большими частными ($\varepsilon \leq 0,3 \div 0,5$) и суммарными ($\varepsilon_{\Sigma} \leq 0,75 \div 0,93$) относительными обжатиями при температуре полосы на выходе из очага деформации t_{ln} , достигающей 150–250 °С и с высокой средней скоростью деформации ($u_{cp} \leq 10^2 \div 10^3 \text{ с}^{-1}$) [1–3]. Высокий уровень параметров ε , ε_{Σ} , t_{ln} , u_{cp} свидетельствует о том, что пластическая деформация металла при холодной прокатке происходит в очень жестких деформационных и температурно-скоростных условиях. Из опубликованных в литературе данных [1, 2, 4–6] известно, что в рассматриваемых условиях деформации на величину напряжения текучести, наряду с упрочнением материала полосы, зависящего от частного и суммарного относительного обжатия, существенное (до 15–45 %) влияние оказывают температура и скорость деформации при холодной прокатке. Однако, не смотря на то, что этот факт установлен давно [1, 2, 4], в теоретических исследованиях и в инженерной практике влиянием температуры и скорости деформации при определении напряжения текучести материала полосы пренебрегают, что приводит к большим (до 20–50 %) погрешностям при прогнозировании энергосиловых параметров на станах холодной прокатки [3, 6].

Целью работы является получение количественных данных о влиянии скорости деформации на напряжение текучести материала полосы при холодной прокатке и дрессировке на промышленных станах.

Для решения поставленной задачи воспользовались опубликованными в литературе [1–3, 6, 7] данными о деформационных, температурно-скоростных и силовых параметрах процессов холодной прокатки и дрессировки, которые были получены на современных скоростных непрерывных станах. По этим данным определяли среднюю величину напряжения текучести материала полосы в очаге деформации σ_{Tcp} с учетом совместного влияния степени, температуры и скорости деформации. Используемая для определения σ_{Tcp} модель приведена в работах [6, 8] и записывается в виде:

$$\sigma_{Tcp} = \sigma_{Tucx} k_{\varepsilon cp} k_{t cp} k_{u cp}, \quad (1)$$

где
$$k_{\varepsilon cp} = 1 + \frac{m \cdot 100^k}{\sigma_{Tucx} \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varepsilon_{np}) (1 + k)} \left[(\varepsilon_{np} + \varepsilon - \varepsilon \cdot \varepsilon_{np})^{1+k} - \varepsilon_{np}^{1+k} \right]; \quad (2)$$

$$k_{t cp} = a_0 + a_1 \left(\frac{t_{cpn} - t_{cm}}{t_{nl}} \right) + a_2 \left(\frac{t_{cpn} - t_{cm}}{t_{nl}} \right)^2 + \dots + a_n \left(\frac{t_{cpn} - t_{cm}}{t_{nl}} \right)^n; \quad (3)$$

$$k_{u cp} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{\varepsilon_{\Sigma}})}{1 + 1,75\sqrt{\varepsilon_{\Sigma}}} \sqrt{\frac{t_{cm}}{t_{cpn}}} \left[1 - \frac{3(t_{cpn} - t_{cm})}{t_{nl}} \right]^4 \left(\ln \frac{u_{cp} + u_{cm}}{u_{cm}} \right)^{c_1}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = 1 - (1 - \varepsilon_{np})(1 - \varepsilon); \quad (5)$$

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_{cnp}}{t_{cm}}} - 1; \quad (6)$$

$$t_{cnp} = \frac{1}{3}(t_{0n} + 2t_{1n}); \quad (7)$$

$$u_{cp} = \frac{v_1 \cdot \varepsilon}{l_c}; \quad (8)$$

$$l_c = x_1 + \sqrt{R\Delta h + x_1^2}; \quad (9)$$

$$x_1 = x_{1n} + 6 \frac{1 - \nu_6^2}{\pi E_6} p_{cpc} R \left(1 - 2 \frac{x_{1n}}{l_c} \right) \left[4 \frac{x_{1n}}{l_c} \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right) + 1 \right]; \quad (10)$$

$$\frac{x_{1n}}{l_c} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon E_n}{(1 - \varepsilon)\beta\sigma_{Tucx}\xi_1}}}; \quad (11)$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{q_1}{\beta\sigma_{T1}}, \quad (12)$$

где $k_{еср}$, $k_{тср}$, $k_{иср}$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние средней степени, температуры и скорости деформации при холодной прокатке на напряжение текучести; σ_{Tucx} , σ_{T1} – исходный предел текучести подката и предел текучести материала полосы на выходе из очага деформации, Н/мм²; m , k – коэффициенты, определяющие интенсивность (Н/мм²) и характер упрочнения материала полосы при холодной прокатке; t_{0n} , t_{1n} , t_{cnp} – температура полосы на входе и выходе из очага деформации и её среднее значение в очаге, °C; ε_{np} , ε , ε_{Σ} – предварительное (на входе в очаг деформации), частное и суммарное (на выходе из очага) относительное обжатие полосы; $a_0 \dots a_n$ – коэффициенты полинома (3); t_{nl} – температура плавления материала полосы, °C; v_1 – скорость полосы на выходе из очага деформации, мм/с; l_c , x_1 , p_{cpc} – длина очага деформации (мм), её приращение за линией, соединяющей центры валков (мм) и среднее контактное нормальное напряжение (Н/мм²), рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; R , Δh – радиус рабочих валков и абсолютное обжатие полосы при холодной прокатке, мм; x_{1n} – приращение длины очага деформации, вызванное упругим восстановлением полосы, мм; E_6 , E_n – модуль упругости материала рабочих валков и полосы, Н/мм²; q_1 – переднее натяжение при холодной прокатке, Н/мм²; ν_6 , β – коэффициент Пуансона материала рабочих валков и коэффициент Лоде.

Пользуясь моделями (1)–(4) и исходными данными, приведенными в работах [1–3, 6, 7] рассчитывали значения коэффициентов $k_{еср}$, $k_{тср}$, $k_{иср}$ и среднюю величину напряжения текучести σ_{mcp} материала полосы при холодной прокатке. В расчетах принимали $t_{cm} = 20$ °C и $u_{cm} = 10^{-3}$ с⁻¹. Значения σ_{mucx} , m , k , коэффициентов $a_0 \dots a_n$ полинома (3) и t_{nl} для наиболее распространенных сталей, прокатка которых осуществляется в холодном состоянии, приведены в работе [8].

О влиянии средней скорости деформации на среднюю величину напряжения текучести при холодной прокатке и дрессировке судили по величине коэффициента $k_{иср}$, т. е. по относительному увеличению напряжения текучести $\sigma_{Tср}$ в результате учета влияния скорости деформации. В табл. 1 представлены расчетные величины коэффициента $k_{иср}$ при холодной прокатке и дрессировке тонких полос и жести со скоростью 7–30 м/с на непрерывных станах 1320, 1400 и 1700, полученные в ходе выполнения настоящего исследования.

Из табл. 1 видно, что значения коэффициента $k_{иср}$ при холодной прокатке (режимы 1–3) изменяются в диапазоне 1,029–1,218. Более высокие значения коэффициента $k_{иср}$ имеют место в первых клетях непрерывных станов, т. е. при холодной прокатке ненаклепанных полос с относительно низкой температурой деформации.

Таблица 1

Значения коэффициента $k_{иср}$, рассчитанные по модели (4) с использованием экспериментальных данных о параметрах холодной прокатки (дрессировки) на промышленных станах

№ клетки	h_0 , мм	ε	v_l , м/с	$t_{он}$, °C	P_c , МН	l_c , мм	ε_Σ	$u_{ср}^1$, с ⁻¹	$t_{срн}$, °C	$k_{иср}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Режим 1. Прокатка полосы 0,5 × 1020 мм из стали 08кп на непрерывном четырехклетевом стане 1700 [2]										
1	1,91	0,340	2,75	50	6,44	14,01	0,340	66,7	74	1,126
2	1,26	0,292	3,89	76	9,70	11,96	0,533	95,0	98	1,087
3	0,892	0,379	6,25	94	9,25	11,54	0,710	205,0	137	1,058
4	0,554	0,123	7,13	124	10,39	8,47	0,746	103,5	134	1,050
Режим 2. Прокатка полосы 0,33 × 810 мм из малоуглеродистой стали на непрерывном пятиклетевом стане 1320 [1]										
1	2,40	0,167	3,05	20	10,90	14,26	0,167	35,7	38	1,218
2	2,00	0,340	5,07	37	13,15	17,42	0,450	99,0	86	1,107
3	1,32	0,409	8,63	83	16,80	17,05	0,675	207,0	150	1,051
4	0,78	0,37	13,72	117	16,10	14,54	0,796	351,0	178	1,038
5	0,49	0,327	20,30	133	15,90	13,10	0,863	506,7	181	1,037
Режим 3. Прокатка жести 0,22 × 855 мм из стали 08кп на шестиклетевом стане бесконечной холодной прокатки 1400 [6]										
1	2,44	0,098	3,00	39	4,57	10,89	0,098	27	47	1,213
2	2,20	0,400	5,01	48	9,86	18,39	0,459	109	100	1,099
3	1,32	0,386	8,16	123	9,95	15,36	0,668	205	161	1,051
4	0,81	0,383	13,22	177	9,31	12,63	0,795	401	191	1,037
5	0,50	0,310	19,22	194	8,95	10,68	0,859	558	196	1,031
6	0,345	0,362	30,05	193	10,26	10,80	0,910	1007	203	1,029
Режим 4. Прокатка жести 0,15 × 890 мм из стали 08кп на двухклетевом прокатно-дрессировочном стане 1400 [6]										
1	0,220	0,055	8,70	35	3,04	4,35	0,055	110	39	1,342
2	0,208	0,302	12,48	39	6,17	8,02	0,341	470	55	1,231
Режим 5. Прокатка жести 0,145 × 890 мм из стали 08кп на двухклетевом прокатно-дрессировочном стане 1400 [7]										
1	0,220	0,170	11,90	40	4,16	5,43	0,170	372,6	51	1,271
2	0,183	0,200	14,90	50	5,81	7,40	0,340	402,7	59	1,201
Режим 6. Дрессировка жести 0,22 × 890 мм из стали 08кп на двухклетевом прокатно-дрессировочном стане 1400 [6]										
1	0,220	0,010	28,39	40	2,49	4,11	0,010	69	40	1,394
2	0,217	0,004	28,50	40	2,24	4,95	0,014	23	40	1,295
Режим 7. Дрессировка жести 0,25 × 855 мм из стали 08кп на двухклетевом дрессировочном стане 1400 [6]										
1	0,250	0,012	24,90	25	3,12	4,55	0,012	65,7	25	1,462
2	0,247	0,004	25,00	25	2,62	5,30	0,016	18,9	25	1,199
Режим 8. Дрессировка жести 0,25 × 855 мм из стали 08кп на двухклетевом дрессировочном стане 1400 [6]										
1	0,250	0,012	24,90	40	2,48	4,07	0,012	72,9	40	1,382
2	0,247	0,004	25,00	40	2,21	4,89	0,016	20,4	40	1,294
Режим 9. Дрессировка жести 0,25 × 855 мм из стали 08кп на двухклетевом дрессировочном стане 1400 [6]										
1	0,250	0,012	24,90	60	1,80	3,51	0,012	85,4	60	1,307
2	0,247	0,004	25,00	60	1,78	3,39	0,016	22,7	60	1,233

С увеличением температуры полосы, частного и суммарного относительного обжатия значения коэффициента $k_{иср}$ уменьшаются и в последних клетях непрерывных станов холодной прокатки обычно не превышают 1,03–1,05. Наиболее высокие значения коэффициента $k_{иср}$, равные 1,359–1,462, зафиксированы при дрессировке жести с низкой температурой полосы (режим 7). При холодной прокатке тонкой жести на двухклетевом прокатно-дрессировочном стане 1400 (режимы 4,5) значения коэффициента $k_{иср}$ составляет 1,201–1,342.

Из вышеизложенного следует, что пренебрежение влиянием скорости деформации при холодной прокатке (дрессировке) приводит к получению заниженных значений среднего напряжения текучести материала полосы: до 10–22 % на прокатных станах; до 20–34 % на прокатно-дрессировочных станах; до 23–46 % – на дрессировочных станах.

ВЫВОДЫ

Получены количественные данные о влиянии средней скорости деформации на величину среднего напряжения текучести материала полосы на промышленных станах холодной прокатки и дрессировки. Показано, что скорость деформации формирует до 10–22 % средней величины напряжения текучести материала полосы при холодной прокатке и до 23–46 % при дрессировке. Поэтому учет влияния скорости деформации на напряжение текучести при выполнении технологических расчетов обеспечивает более высокую точность и надежность прогнозирования параметров процесса на станах холодной прокатки (дрессировки).

Установлено, что скорость деформации вызывает наибольшее увеличение напряжения текучести при дрессировке и при холодной прокатке полосы из ненаклепанной стали с низкой температурой и с малыми частными относительными обжатиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Робертс В. *Холодная прокатка стали* / В. Робертс; пер. с англ. – М. : Металлургия, 1982. – 544 с.
2. Белосевич В. К. *Совершенствование процесса холодной прокатки* / В. К. Белосевич, Н. П. Нетесов. – М. : Металлургия, 1971. – 272 с.
3. Василев Я. Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки* / Я. Д. Василев. – М. : Металлургия, 1995. – 368 с.
4. *Precision and Lubrication in High Speed Cold Rolling of Low Carbon Sreel Strip* / Gokyn J., Kichara J., Arinura T., Okado N. // *J. Japan Soc. Technol. Plast.* – 1973. – V. 14. – № 145. – P. 160–167.
5. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник* / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
6. Василев Я. Д. *Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос : коллективная монография* / Я. Д. Василев, А. В. Дементюенко. – Дніпропетровськ : Дніпро-ВАЛ, 2002. – С. 137–293.
7. Василев Я. Д. *Производство жести методом двойной прокатки* / Я. Д. Василев, А. В. Дементюенко, С. Г. Горбунков. – М. : Металлургия, 1994. – 125 с.
8. Василев Я. Д. *Теория продольной прокатки* / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. – Донецк : УНИТЕХ, 2010. – 456 с.

Василев Я. Д. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Дементюенко А. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;

Самокиш Д. Н. – аспирант НМетАУ;

Клипин Я. А. – студент НМетАУ;

Дурманов В. С. – студент НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: samokyshdmitriy@gmail.com