

УДК 621.771.23

Василев Я. Д.
Дементиденко А. В.
Завгородний М. И.
Кожухарь А. Г.
Самокиш А. Н.

АНАЛИЗ И СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ

Из теории и практики листопрокатного производства известно, что с уменьшением толщины прокатываемой полосы эффективность процесса холодной прокатки снижается. Более того, во многих случаях получение требуемой толщины полосы прокаткой затрудняется, либо становится практически невозможным. Эта проблема особенно актуальна при производстве тонких и особо тонких полос.

Холодная прокатка тонких и особо тонких полос осуществляется с малыми абсолютными обжатиями ($\Delta h < 0,01-0,10$ мм), отличается большими значениями параметра R/h_0 ($R/h_0 \geq 1000-5000$, где R, h_0 – радиус рабочего вала и толщина полосы на входе в очаг деформации) и характеризуется высоким уровнем средних контактных нормальных напряжений ($p_{срс} \geq 500-1250$ Н/мм²). В этих условиях прокатки упругие деформации валков и полосы становятся одним из основных факторов, определяющих уровень силовых параметров процесса [1, 2]. При определенном соотношении абсолютных величин толщины и ширины полосы, радиуса, длины бочки и упругих свойств материала рабочих валков, силы предварительного прижатия валков и силы прижатия концевых участков бочек последних в процессе прокатки, коэффициента трения, удельных натяжений и модуля жесткости рабочей клетки, создаются условия, когда относительное обжатие полосы при холодной прокатке уменьшается или практически прекращается. Эти условия определяют предельную или наименьшую толщину полосы, которая может быть прокатана на данном стане. В литературе [3–5] эта предельная толщина известна как «минимальная толщина прокатываемой полосы» h_{1min} . Определению h_{1min} посвящены исследования многих авторов. Большинство предложенных ими моделей h_{1min} содержится в работах [3–6]. Модели h_{1min} подвергались неоднократно анализу [3–7] и экспериментальной проверке [3, 5, 7, 8]. Однако сделанные в этих исследованиях выводы, имеют, на наш взгляд, частный характер, а сами модели h_{1min} представляются спорными и недостаточно обоснованными, что ставит под сомнение возможность их практического применения.

Целью данной работы является анализ и сравнительное исследование точности моделей минимальной толщины прокатываемой полосы.

Все известные модели минимальной толщины делятся на две группы – на модели, когда полоса прокатывается при нулевом (h_{1min}) или с определенным относительным обжатием ε ($h_{1min\varepsilon}$). Модели h_{1min} и $h_{1min\varepsilon}$ связаны уравнением:

$$h_{1min} = h_{1min\varepsilon}(1 - \varepsilon). \quad (1)$$

Общим для моделей h_{1min} и $h_{1min\varepsilon}$ является то, что их авторы определяют минимальную толщину прокатываемой полосы исходя только из величины радиального сжатия («сплющивания») рабочих валков. Они полагают, что начиная с какой-то определенной толщины, с ростом погонной силы прокатки $P_{сног}$ упругое сжатие рабочих валков в зоне контакта с полосой приводит к такому увеличению длины очага деформации l_ε , в результате которого средняя величина нормальных контактных напряжений $p_{срс}$ либо вообще не увеличивается, либо увеличивается в меньшей мере, чем это необходимо для пластического обжатия полосы.

Для определения длины очага деформации l_ε при прокатке полосы минимальной толщины без обжатия h_{1min} и допущении, что последняя является идеально жесткой, используют известное уравнение Герца [5]:

$$l_g^2 = 16\theta_B P_{сноз} R; \quad (2)$$

$$\theta_B = \frac{1 - \nu_B}{\pi E_B}, \quad (3)$$

где ν_B , E_B – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала рабочих валков. Учитывая, что $P_{сноз} = P_{срс} l_g$ уравнение (2) записывают в виде:

$$l_g^2 = 16\theta_B P_{срс} R. \quad (4)$$

Далее решают совместно уравнение (4) с одним из уравнений для определения $P_{срс}$. Целью решения полученной системы является нахождение того единственного значения $h_{ср}$, после достижения которого дальнейшее увеличение l_g за счет обжатия невозможно. Это значение $h_{ср}$ принимают равным h_{1min} . Более подробно методика определения h_{1min} изложена в работах [3–5]. Некоторые исследователи (Г. Форд и Д. Александер, А. Трост и др.) при определении h_{1min} учитывали влияние упругих деформаций валков и полосы.

С использованием описанной методики получены практически все модели для определения минимальной толщины прокатываемой полосы. Наиболее известными являются следующие модели h_{1min} (в нашей редакции и в наших обозначениях):

А. А. Королева [4]:

$$h_{1min} = 24,62 f \theta_B R \cdot 2k_{ср} \xi_{ср}; \quad (5)$$

В. Робертса [3, 5]:

$$h_{1min} = 4,037 f \theta_B R \cdot 2k_{ср} \xi_{ср}; \quad (6)$$

$$h_{1min} = 8,626 f \theta_B R \cdot 2k_{ср} \xi_{ср}; \quad (7)$$

Г. Форда и Д. Александера [3, 4, 6]:

$$h_{1min} = 28,44(1 + f \theta_{II} / \theta_B) f \theta_B R \cdot 2k_{ср} \xi_{ср}; \quad (8)$$

А. Троста [5]:

$$h_{1min} = 20(1 + 0,785 f E_B / E_{II}) f \theta_B R \cdot 2k_{ср} \xi_{ср}; \quad (9)$$

$$h_{1min} = 32,98 f \theta_B R \cdot 2k_{ср} \xi_{ср}; \quad (10)$$

где

$$\xi_{ср} = 1 - \frac{q_{ср}}{2k_{ср}}; \quad (11)$$

$$\theta_{II} = \frac{1 - \nu_{II}}{\pi E_{II}}, \quad (12)$$

f , $q_{ср}$ – коэффициент трения и среднее удельное натяжение при прокатке;

ν_n , E_n , $2k_{ср}$ – соответственно коэффициент Пуассона, модуль упругости и среднее значение сопротивления деформации материала полосы.

Для получения данных о преимуществах и недостатках определения минимальной толщины прокатываемой полосы h_{1min} по моделям (5)–(10) было выполнено сравнительное исследование их точности. С этой целью рассчитывали относительную величину минимальной толщины прокатываемой полосы h_{1min}/R для условий холодной прокатки стальных полос в стальных валках с различными величинами сопротивления деформации $2k_{ср} \xi_{ср}$ и коэффициента трения f . В расчетах принимали $\nu_g = \nu_n = 0,3$ и $E_g = E_n = 2,2 \cdot 10^5$ Н/мм². Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что расчетные значения параметра h_{1min}/R с ростом сопротивления деформации $2k_{cp}\xi_{cp}$ и коэффициента трения f по всем сравнительным моделям увеличивается. Видно также, что расчетные значения h_{1min}/R по моделям (5)–(10) отличаются между собой только количественно, причем очень существенно – более чем в 8 раз, т. е. почти на порядок. Это свидетельствует о низкой точности и надежности прогнозирования минимальной толщины прокатываемой полосы по сравниваемым моделям. Отсутствие корректных экспериментальных данных о минимальной толщине прокатываемой полосы не позволяет судить о преимуществах той или иной из сравниваемых моделей h_{1min} .

Таблица 1

Расчетные значения h_{1min}/R по анализируемым моделям

$2k_{cp}\xi_{cp}$, Н/мм ²	f	Значения h_{1min}/R по моделям, 10^{-5} , мм					
		(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
100	0,03	9,72	1,60	3,41	11,7	8,1	13,0
	0,05	16,2	2,66	5,68	20,2	11,7	21,7
	0,10	32,4	5,32	11,4	43,3	28,5	43,4
250	0,03	24,3	3,99	8,52	29,4	20,3	32,6
	0,05	40,5	6,66	14,2	50,4	34,3	54,3
	0,10	81,0	13,3	28,4	118	71,2	109
500	0,03	48,6	7,98	17,0	58,7	40,5	63,1
	0,05	81,0	13,3	28,4	101	68,6	109
	0,10	162	26,6	56,8	216	142	217
1000	0,03	97,2	15,9	34,1	118	81,1	130
	0,05	162	26,6	56,8	202	137	217
	0,10	324	53,2	114	433	283	434
1500	0,03	146	23,9	51,1	176	122	195
	0,05	243	39,9	85,2	303	206	326
	0,10	486	79,8	170	649	427	651

Из изложенного следует, что модели минимальной толщины полосы (5)–(10) являются очень грубыми. Поэтому нет оснований полагать, что рассчитанные по этим моделям значения h_{1min} соответствуют наименьшей толщине полосы, которая может быть прокатана на конкретном стане.

Анализ моделей минимальной толщины прокатываемой полосы h_{1min} и результатов сравнительного исследования их точности показал, что они обладают существенными недостатками.

Не обсуждая корректность конкретных теоретических решений по определению минимальной толщины прокатываемой полосы, отметим лишь принципиальные, на наш взгляд недостатки моделей (5)–(10). Эти недостатки заключаются в том, что они получены:

1. Из понимания, что радиальная жесткость рабочих валков является единственной причиной возникновения предельных условий прокатки, а, следовательно, и единственным параметром, определяющим минимальную толщину прокатываемой полосы. Это допущение не обосновано, поскольку радиальная жесткость рабочих валков превышает значительно жесткость рабочей клетки. Радиальная жесткость рабочих валков является только одним из параметров, влияющих на h_{1min} .

2. Без учета влияния ширины полосы или параметра b/L (где b , L – соответственно ширина полосы и длина бочки рабочих валков) на h_{1min} . Влияние параметра b/L на величину h_{1min} является очень существенным, о чем свидетельствуют экспериментальные данные [8] и практический опыт.

3. Без учета влияния модуля жесткости рабочей клетки $M_{кл}$ – важнейшего параметра, определяющего толщину прокатываемой полосы h_1 , в том числе и h_{1min} .

4. Без учета влияния силы прижатия («забоя») P_3 концевых участков бочек рабочих валков в процессе прокатки [2]. Сила P_3 , появляется во всех случаях прокатки, когда суммарная стрела прогиба активных образующих рабочих валков $2\delta_{ao}$ превышает толщину полосы на выходе из очага деформации. При малых значениях параметров b/L и h_1 сила P_3 становится соизмеримой с силой прокатки и оказывает решающее влияние на минимальную толщину прокатываемой полосы.

ВЫВОДЫ

Анализ показал, что модели минимальной толщины прокатываемой полосы h_{1min} не отражают особенности и закономерности взаимодействия металла с инструментом в предельных условиях прокатки. Поэтому они не могут быть рекомендованы для определения наименьшей толщины полосы, которая может быть прокатана на конкретном стане.

Выполнено сравнительное исследование точности моделей минимальной толщины прокатываемой полосы h_{1min} . Установлено, что расчетные значения минимальной толщины прокатываемой полосы по сравниваемым моделям отличаются более чем в 8 раз. Это означает, что модели h_{1min} являются очень грубыми и рассчитанная по этим моделям толщина, рекомендуемая в качестве минимальной толщины прокатываемой полосы, таковой не является, поскольку она не соответствует предельным условиям прокатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василев Я. Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки* / Я. Д. Василев. – М. : *Металлургия*, 1995. – 368 с.
2. Василев Я. Д. *Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос* / Я. Д. Василев, А. В. Дементиенко // *Непрерывная прокатка: коллективная монография*. – Днепропетровськ : РВА «Дніпро ВАЛ», 2002. – С. 137–293.
3. Робертс В. *Холодная прокатка стали* / В. Робертс; пер. с англ. – М. : *Металлургия*, 1982. – 544 с.
4. Королев А. А. *Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов* / А. А. Королев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : *Металлургия*, 1985. – 376 с.
5. Белосевич В. К. *Совершенствование процесса холодной прокатки* / В. К. Белосевич, Н. П. Нетесов. – М. : *Металлургия*, 1971. – 272 с.
6. Чернилевский В. Е. *К расчету минимальной толщины полосы при прокатке* / В. Е. Чернилевский, В. А. Белевский // *Научные труды МИСиС*. – М. : *Металлургия*, 1975. – № 85. – С. 42–46.
7. Белосевич В. К. *Минимальная толщина при холодной прокатке и ее зависимость от величины сил трения* / В. К. Белосевич, Н. М. Федосов, А. Г. Белостоцкий // *Научные труды МИСиС*. – М. : *Металлургия*, 1975. – № 81. – С. 26–32.
8. Флокса Ф. Д. *Исследование предела выкатываемости тонких полос* / Ф. Д. Флокса, В. М. Богатырев, А. М. Онищенко // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1983. – № 2. – С. 34–37.

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

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

Завгородний М. И. – аспирант НМетАУ;

Кожухарь А. Г. – студент НМетАУ;

Самокиш А. Н. – студент НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: samokyshdmitriy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.03.2012 г.