

Теория пластичности

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА ВИДА НАТЯЖЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

Л.С.КОХАН, *д-р техн. наук, профессор,*
Б.Ф.БЕЛЛЕЛЮБСКИЙ, *канд. техн. наук, доцент,*
Московский Государственный Вечерний Металлургический институт
(МГВМИ), 111250, Москва, Лефортовский вал, д. 26;
т. 361-14-80, факс 361-16-19, e-mail: nis_mgvmi@mail.ru

В работе исследуется выбор вида натяжения для стабилизации процесса прокатки и снижения динамических нагрузок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивость процесса прокатки, натяжение, величина обжатия, коэффициент динамичности, жёсткость.

Для стабилизации процесса прокатки широко применяется натяжение [1-3]. Используются два вида натяжений: одинаковые по величине заднее ξ_0 и переднее ξ_1 называются симметричными. При различной величине переднего и заднего натяжения, они называются несимметричными.

Ниже проведен анализ влияния натяжений на устойчивость работы прокатного стана. Так, на рис.1 приведены графики зависимости среднего относительного давления σ_{cp} от соотношения несимметричных натяжений ξ_0/ξ_1 .

Анализ графиков показывает, что при несимметричном натяжении среднее давление изменяется примерно по синусоидальной зависимости $\bar{\sigma}_{cp} = \bar{\sigma}_{cm} \left[1 + A \sin \left(\frac{\xi_0}{\xi_1} \cdot \lambda \cdot \frac{t}{t_{np}} + B \right) \right]$, где $\bar{\sigma}_{cm}$ - стабильная величина среднего напряжения, A - амплитуда колебания давления, B, λ - коэффициенты.

При начальном времени $t = 0$ из-за отсутствия амплитудного отклонения $\sin \left(\frac{\xi_0}{\xi_1} \cdot \lambda \cdot \frac{t}{t_{np}} + B \right) = 0$ и $B=0$. При максимальном амплитудном значении давления, соответствующим времени прокатки $t_{np} = \frac{l}{v_{np}}$, функция

$$\sin \left(\frac{\xi_0}{\xi_1} \cdot \lambda \cdot \frac{t_{np}}{t_{np}} \right) = 1 \text{ и } \lambda = \frac{\pi}{2} \text{ или } \sin \left(90^\circ \cdot \frac{t}{t_{np}} \right) = \sin kt.$$

Тогда дифференциальное уравнение движения полосы принимает вид:

$$m\ddot{z} + cz = P(1 + A \sin kt), \quad (1)$$

где $c = \frac{P}{H_0(1-\varepsilon)}$ жесткость системы «клеть-полоса», равная жесткости $c_{сис} = \frac{c}{1 + \frac{c}{c_{кл}}}$, так как отношение $\frac{c}{c_{кл}} \approx 0$. Усилие прокатки $P = \bar{\sigma}_{cp} \cdot \sigma_{cp} \cdot B_1 \cdot l$, где $l = \sqrt{H_0 \cdot \varepsilon \cdot R}$ - длина захвата и $B_1 = 0,412 \cdot \varepsilon \cdot l + B_0$ - ширина полосы после обжатия ε .

Решение уравнения (1) определяется зависимостью

$$z = C_1 \cos \sqrt{\frac{c}{m}} \frac{t}{t_{np}} + C_2 \sin \sqrt{\frac{c}{m}} \frac{t}{t_{np}} + P \left(\frac{1}{c} + \frac{A \sin kt}{c - k^2 m} \right).$$

Экспериментальные исследования показывают, что отношение $\frac{A}{c - k^2 m} \ll 1$, поэтому $z = C_1 \cos \sqrt{\frac{c}{m}} \frac{t}{t_{np}} + C_2 \sin \sqrt{\frac{c}{m}} \frac{t}{t_{np}}$. Постоянные коэффициенты определяются начальными условиями: при $t = 0, z = \dot{z} = 0$, откуда $C_1 = -\frac{P}{c}$ и $C_2 = 0$.

При этих значениях коэффициентов $C_1 u C_2$, а также учётом того, что угловая частота собственных колебаний $\omega = \sqrt{c/m}$, по величине силы инерции $P_{ин} = |-m\ddot{z}|$ определяется максимальное полное усилие прокатки $P_{max} = P + P_{ин}$. Тогда отношение P_{max}/P определяет коэффициент динамичности:

$$K_{\delta,max} = 1 + \frac{\sin \omega t_{np}}{\omega t_{np}}. \quad (2)$$

Средняя величина коэффициента динамичности составит:

$$K_{\delta,cp} = \frac{1+K_{\delta,max}}{2} = \frac{2 + \frac{\sin \omega t_{np}}{\omega t_{np}}}{2}. \quad (3)$$

При симметричных натяжениях зависимость среднего давления от натяжения $\xi = \xi_0 = \xi_1$ представлена на графиках рис.2.

Анализ этих графиков показывает, что среднее давление при $\xi = \xi_0 = \xi_1$ изменяется более устойчиво - линейно и без колебаний. Для трех типов полос, соответствующих тонколистовой, среднелистовой и толстолистовой прокатке отношение $\frac{A_1}{A_2}$ будет постоянным: $\frac{A_1}{A_2} = \frac{1,75}{2,5} = 0,7$ для $H_0 = 3$ мм, $\frac{A_1}{A_2} = \frac{1,4}{2} = 0,7$ - для среднелистовой прокатки $H_0 = 8$ мм и $\frac{A_1}{A_2} = \frac{0,88}{1,25} = 0,704$ - для толстолистовой прокатки $H_0 = 50$ мм. С этими данными средний коэффициент динамичности:

$$K_{max} = \frac{2 + \frac{A_1}{A_2} \frac{\sin \omega t_{np}}{\omega t_{np}}}{2} = \frac{2 + 0,7 \frac{\sin \omega t_{np}}{\omega t_{np}}}{2}. \quad (4)$$

Проведем исследование различных видов прокатки для определения стабильности технологического режима при применении симметричных и несимметричных натяжений.

При прокатке тонкой полосы 3×200 ($H_0 \times B$) мм с обжатием 30% и натяжением $\xi_0 = 0,7$, $\xi_1 = 0,8$ на стане с диаметров валков 300 мм и скоростью $V_{np} = 5$ м/с. По графику рис.1 при отношении $\xi_0/\xi_1 = 0,875$ определяем $\sigma_{cp} = 2,2$. При длине захвата $l = 11,62$ мм, ширине полосы после прокатки $B_1 = 200 + 0,3 \cdot 0,412 \cdot 11,62 = 201,4$ мм устанавливаем усилие прокатки $P = 283172,4$ Н. Величина пластического сжатия $\Delta H = \varepsilon \cdot H_0 = 0,9$ определяет жесткость системы $C = 314636$ Н/мм = $31463,6 \cdot 10^3$ кг/м. При весе двух валков 935 кг собственная угловая частота колебательной системы

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{31463,6 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{935}} = 580,1 \text{ 1/с},$$

и, наконец, время прокатки $t_{np} = \frac{l}{V_{np}} = 0,00232$ с. Тогда по формуле (3) коэффициент динамичности при несимметричном натяжении будет равен

$$K_{\delta 1} = \frac{2 + \frac{\sin(580,1 \cdot 0,00232 \cdot 57,3)}{580,1 \cdot 0,00232}}{2} = 1,362.$$

При переходе на симметричное натяжение аппроксимируем графическую линейную зависимость рис.2 для $H_0 = 3$ мм

$$\bar{\sigma}_{cp} = 2,115\xi + 0,3195 \quad (5)$$

и определяем величину ξ по среднему давлению с несимметричным натяжением $\bar{\sigma}_{cp} = 2,2$ или $\xi = \frac{2,2 - 0,3195}{2,115} = 0,89$. Затем по формуле (4) рассчитывается

средний коэффициент динамичности $K_{\delta 2} = \frac{2 + \frac{0,7 \sin(580,1 \cdot 0,00232 \cdot 57,3)}{580,1 \cdot 0,00232}}{2} = 1,253$. Отличие $K_{\delta 2}$ от несимметричного режима составляет $\Delta_{K\delta} = \frac{1,362 - 1,253}{1,362} \cdot 100 = 8\%$.

Проведем анализ устойчивости среднелистовой прокатки на примере деформации полосы 8×200 мм из стали 20 с обжатием 30% и натяжениями $\xi_0 = 0,7, \xi_1 = 0,8$ на стане с диаметров валков 500 мм. Принимаем $z=1,325$ и определяем среднее давление $\bar{\sigma}_{cp} = 1,725$. Далее рассчитываем ширину полосы $B_1 = B_0 + 0,412 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{8 \cdot 0,3 \cdot 250} = 203$, длину дуги захвата $l = 24,49$ мм и при $\sigma_m = 55$ МПа усилие прокатки $P_{np} = 1,725 \cdot 55 \cdot 203 \cdot 24,49 = 471668,2$ Н. По усилию вычислим жесткость $c = \frac{P_{np}}{\varepsilon \cdot H_0} = 19652,84 \cdot 10^3$ кг/м, а по весу валков их массу $m = \frac{1048}{9,8} = 105 \frac{\text{кгс}^2}{\text{м}}$. Соответственно угловая частота собственных колебаний системы $\omega = \sqrt{c/m} = 432$ 1/с. При скорости прокатки 5 м/с время $t_{np} = 24,5/5000 = 0,0049$ с и средний коэффициент динамичности

$$K_{d,cp1} = \frac{2 + \frac{\sin \omega t_{np}}{\omega t_{np}}}{2} = 1,21.$$

Симметричный режим натяжения определяет через аппроксимацию графика рис.2 для $H_0 = 8$ мм:

$$\bar{\sigma}_{cp} = 1,867\xi + 0,183. \quad (6)$$

Откуда определяем величину $\xi = \xi_0 = \xi_1 = \frac{1,725 - 0,183}{1,867} = 0,826$ и коэффициент динамичности $K_{d,cp2} = \frac{2 + \frac{0,7 \sin(432 \cdot 0,0049 \cdot 57,3)}{432 \cdot 0,0049}}{2} = 1,141$. Отличие коэффициентов динамичности при исследуемых режимах натяжения составляет

$$\Delta_{Kd} = \frac{1,21 - 1,141}{1,21} \cdot 100 = 5,7\%.$$

При толстолистовой прокатке полосы 50×200 мм на стане с валками 600 мм при обжатии 30% и натяжением $\xi_0 = 0,7, \xi_1 = 0,8$ по расчету и графику рис.1 для $\xi_0/\xi_1 = 0,875$ среднее давление $\bar{\sigma}_{cp} = 1,0$. При ширине полосы $B_1 = B_0 + 0,412 \cdot l \cdot \varepsilon = 200 + 0,412 \cdot \sqrt{50 \cdot 0,3 \cdot 300} \cdot 0,3 = 208,3$ и сопротивлении пластической деформации $\sigma_m = 55$ МПа усилие прокатки $P_{np} = 1,55 \cdot 67,08 \cdot 208,3 = 768502$ Н. Тогда жесткость $c = 5123,35 \cdot 10^3$ кг/м, угловая частота собственных колебаний при весе валков 1470 кг составит $\omega = \sqrt{\frac{5123,35 \cdot 10^3}{150}} = 184,8$ 1/с. Время прокатки $t_{np} = 0,0134$ с. С этими данными

средний коэффициент динамичности: $K_{d,cp} = \frac{2 + \frac{\sin(184,8 \cdot 0,0134 \cdot 57,3)}{184,8 \cdot 0,0134}}{2} = 1,125$.

Для симметричного натяжения:

$$\bar{\sigma}_{cp} = 1,167\xi + 0,092. \quad (7)$$

Откуда $\xi = \frac{1 - 0,092}{1,167} = 0,778$. Проведем динамический расчет $K_{d,cp} = \frac{2 + 0,7 \frac{\sin(184,8 \cdot 0,0134 \cdot 57,3)}{184,8 \cdot 0,0134}}{2} = 1,087$. Различия коэффициентов динамичности составляет $\Delta_{Kd} = \frac{1,125 - 1,087}{1,125} \cdot 100 = 3,4\%$.

Таким образом, при переходе на симметричное натяжение устойчивость повышается до 8% при обжатии 30%.

Исследуем устойчивость процесса при уменьшении натяжения. Например, для прокатки стальной полосы 3×200 мм при обжатии 30% и натяжении $\xi_0 = 0,9, \xi_1 = 0,95$ ($\xi_0/\xi_1 = 0,947$). По графику рис.1 $\bar{\sigma}_{cp} = 2,4$. При длине захвата $l = \sqrt{3 \cdot 0,3 \cdot 150} = 11,62$ мм и ширине $B_1 = 201,4$ мм усилие прокатки

$P_{np} = 308915,4$ Н, жесткость $C = 34323,9 \cdot 10^3$ кг/м и собственная угловая частота $\omega = \sqrt{\frac{34323,9 \cdot 10^3}{93,5}} = 605,8$ 1/с. При времени прокатки

$$t_{np} = \frac{11,62}{5000} = 0,00232 \text{ с}$$

коэффициент динамичности $K_{d,cp} = \frac{2 + \frac{\sin(605,8 \cdot 0,00232 \cdot 57,3)}{605,8 \cdot 0,002324}}{2} = 1,246$.

Различие устойчивости при уменьшении натяжения составит

$$\Delta_{Kd} = \frac{1,351 - 1,246}{1,351} \cdot 100 = 7,8\%.$$

По отношению же к большему натяжению коэффициент динамичности практически не увеличился.

В заключение исследуем на устойчивость процесса прокатки влияние величины обжатия. Проведем анализ силовых параметров при тонколистовой прокатке полосы 3×200 мм при обжатии 0,1с натяжениями $\xi_0 = 0,7$, $\xi_1 = 0,8$ на валках диаметром $D=300$ мм. Принимаем $z = 1,062$ тогда $H_n = 2,825$ мм, $H_1 = 2,7$ мм, $\gamma = 1,655^\circ$ и $\delta = \frac{0,35 \cdot 2}{\lg 2,562} = 15,64$. Проверяем напряжения в нейтральном сечении при коэффициенте упрочнения $k = 1 + \frac{\varepsilon}{2} = 1,05$: $\bar{\sigma}_{om,n} = \frac{1}{15,64} [9,898 \cdot 2,562 + 1,05] = 1,689$ и $\bar{\sigma}_{on,n} = \frac{1}{15,64} [13,565 \cdot 2,028 - 1,05] = 1,691$. Их отличие составляет 0,1%, поэтому определяем длину до нейтрального сечения $x_n = 4,332$ мм, $l=6,708$ мм, середину зоны отстаивания $x_{сep,om} = 5,52$ мм, высоту в середине зоны $H_{сep,om} = 2,903$ мм, наконец, давление $\bar{\sigma}_{сep,om} = 1,125$ и среднее давление в зоне $\bar{\sigma}_{сep,on} = 1,235$. При $x_{сep,on} = 2,166$ мм, высота полосы $H_{сep,on} = 2,731$ мм, $\bar{\sigma}_{сep,on} = 0,971$ и $\bar{\sigma}_{сp,on} = 1,183$. При отношении $\frac{x_n}{l} = 0,646$ общее среднее давление прокатки $\bar{\sigma}_{сp} = 0,437 + 0,762 = 1,201$. Соответственно

лине $P_{np} = 1,201 \cdot 55 \cdot 6,708 \cdot 200,8 = 88986,76$ Н, жесткость $c = \frac{8898,676 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,1} = 29662,25 \cdot 10^3$ кг/м и $\omega = 563,2$ 1/с. Наконец, средний коэффициент динамичности $K_{d,cp} = \frac{2 + \frac{\sin((563,2 \cdot 0,00232 \cdot 57,3))}{563,2 \cdot 0,00232}}{2} = 1,369$ и при симметричном натяжении $K_{d,cp} = 1,258$. Отличие в устойчивости составит

$$\Delta = \frac{1,369 - 1,258}{1,369} = 8,1\%.$$

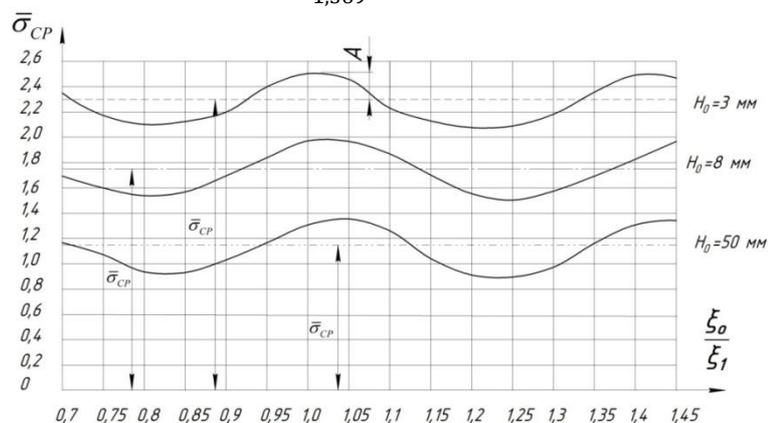


Рис.1. Изменение относительного среднего давления прокатки при несимметричном натяжении и разной толщине H_0 проката

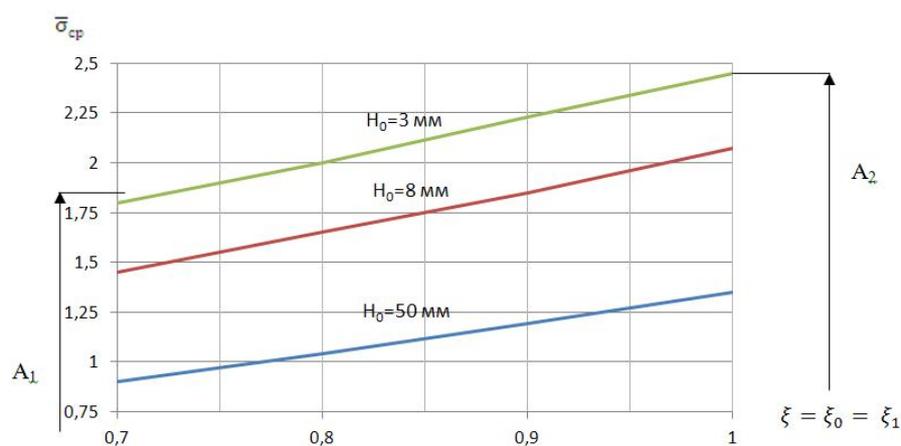


Рис.2. Изменение среднего давления от симметричного натяжения при разной толщине проката H_0

Анализ полученных результатов показывает, что симметричные натяжения повышают устойчивость процесса прокатки на 3-8% по сравнению с прокаткой при несимметричном натяжении, способствуют стабилизации процесса за счёт отсутствия скачков усилия и, соответственно, улучшают качество прокатки.

Л и т е р а т у р а

1. *Кохан Л.С., Роберов И.Г., Алдунин А.А., Гостев К.А.* Листовая прокатка металлов и заготовок из металлических порошков. – М.: МГВМИ, 2008. – 224 с.
2. *Кохан Л.С., Белелюбский Б.Ф.* Исследования механизма натяжения полос при холодной прокатке// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2012. - № 2. – С. 15-19.
3. *Кохан Л.С., Белелюбский Б.Ф., Лантева М. И.* Влияние натяжения на уменьшение расхода электроэнергии при горячей прокатке// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2012. - № 1. – С. 70-73.

TENSION TYPE EFFECT ON ROLLING STABILITY

Kohan L.S. ,Belelyubsky B.F.

In this paper, the tension type effect on rolling stability for the load impact reduction is analyzed.

KEY WORDS: rolling stability, tension, drafting value, coefficient of impact, coefficient of stiffness.