

Экспериментальные исследования

ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ НА УМЕНЬШЕНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Л.С. КОХАН, *д-р техн. наук, профессор*

Б.Ф. БЕЛЕЛЮБСКИЙ, *канд. техн. наук, доцент*

М. И. ЛАПТЕВА, *аспирант*

Московский Государственный Вечерний Металлургический институт

111250, Москва, Лефортовский вал, т. 361-14-80, факс 361-16-19,

nis_mgvti@mail.ru

В работе исследуется распределение затрачиваемой мощности привода на прокатку при деформационном процессе без натяжения и с натяжением.

Ключевые слова: горячая прокатка, межклетьево натяжение, энергозатраты.

Многочисленные исследования показывают, что при горячей прокатке полос и листов применения натяжения значительно снижает нагрузку на валки до 25-30%. Натяжение также уменьшает энергозатраты на деформационный процесс прокатки, но требует дополнительных мощностей на реализацию натяжения. Проанализируем влияние натяжения на энергозатраты. При прокатке полос без натяжения ($\xi_0 = \xi_1 = 1$) требуются мощности на продольную силу $N_{пр} = \sigma_x \cdot h_1 \cdot B \cdot V_1$ и трение $N_{тр} = \tau \cdot l \cdot B \cdot V_1$, где продольное напряжение $\sigma_x = \sigma_{ср} - \sigma_{\tau}$, высота полосы после выхода из валков $h_1 = h_0(1 - \varepsilon)$, B – ширина полосы, скорость после валков $V_1 = \frac{V_0 \cdot h_0}{h_1} = \frac{V_0}{1 - \varepsilon}$ или $\frac{V_0}{V_1} = (1 - \varepsilon)$, ε – обжатие, $\tau = \sigma_{ср} \cdot f$ – среднее касательное напряжение. Тогда общая мощность на процесс

$$N = N_{пр} + N_{тр} = \sigma_x \cdot h_1 \cdot B \cdot V_1 + \sigma_{ср} \cdot f \cdot l \cdot B \cdot V_1 = (\sigma_x \cdot h_1 + \sigma_{ср} \cdot f \cdot l) \cdot B \cdot V_1. \quad (1)$$

Применение заднего ξ_0 и переднего ξ_1 натяжений уменьшает нормальное, продольное и касательное напряжения при прокатке. Однако вызывает дополнительное суммарное повышение мощностей на их осуществление:

$$N_{нат} = [\sigma_0 \cdot h_0 \cdot B \cdot V_0 + \sigma_1 \cdot h_1 \cdot B \cdot V_1] = \left[\sigma_0 \cdot h_0 \cdot \frac{V_0}{V_1} + \sigma_1 \cdot h_0(1 - \varepsilon) \right] \cdot B \cdot V_1, \quad (2)$$

где σ_0 и σ_1 – напряжения натяжения полосы на входе и выходе из валков.

С целью уточнения расхода мощностей ниже проведены исследования отдельных видов прокатки. При тонколистовой горячей прокатке стальной полосы 3×400 мм с обжатием 30% при натяжении $\xi_0 = 0,8$, $\xi_1 = 0,7$ на валках диаметром 300 мм последовательно определяется коэффициент нейтрального сечения:

$$z = \left[\frac{\sqrt{k^2 + \frac{(\xi_0 \delta - k)(\xi_1 \delta + k)}{(1 - \varepsilon) \delta}} - k}{(\xi_0 \delta - k)} \right]^{\frac{1}{\delta}} = 1,205,$$

где с углом захвата $\alpha = \sqrt{H_0 \cdot \frac{\varepsilon}{R}} = 4,438^\circ$, основной параметр прокатки равен

$\delta = \frac{2f}{\varepsilon g \alpha} = \frac{0,7}{0,0711} = 9,019$ и k – средний коэффициент упрочнения металла

$k = \frac{2 + \varepsilon}{2} = 1 + 0,5\varepsilon = 1,15$. Далее проверяем напряжения в нейтральном сечении

$$\bar{\sigma}_{от.н} = \frac{1}{9,019} [6,065 \cdot 5,3755 + 1,15] = 3,742 \quad \text{и}$$

$\bar{\sigma}_{оп.н} = \frac{1}{9,019} \left[7,4633 \cdot \left(\frac{3}{1,205 \cdot 2,1} \right)^{9,019} - 1,15 \right] = 3,713$. Отличие напряжений менее 1%, поэтому определяем передний угол $\gamma = \arccos \left[1 - \frac{H_H - H_z}{D} \right] = 2,92^\circ$, длину зоны опережения $x_H = R \cdot \sin \gamma = 7,642$ мм, длину захвата $l = 11,619$ мм, середину зоны отставания $x_{сер.от} = 9,63$ мм, высоту $H_{сер.от} = 2,719$ мм, напряжение $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,76$ и среднее относительное давление в зоне $\bar{\sigma}_{сер.от} = \frac{2\bar{\sigma}_{сер.от} + 1 + \bar{\sigma}_{оп.н}}{4} = 2,065$. Для зоны опережения по средней координате $x_{сер.оп} = \frac{x_H}{2} = 3,821$, $H_{сер.оп} = 2,197$ мм и соответственно давления $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 1,116$ и $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 1,813$. При $\frac{x_H}{l} = 0,658$ среднее давление $\bar{\sigma}_{ср} = 1,90$.

При прокатке той же полосы без натяжения ($\xi_0 = \xi_1 = 1$) коэффициент нейтральной поверхности $z = 1,209$. Проверяем напряжения на нейтрале: $\bar{\sigma}_{от.н} = \frac{1}{9,019} [7,869 \cdot 5,5386 + 1,15] = 4,96$ и $\bar{\sigma}_{оп.н} = \frac{1}{9,019} [10,169 \cdot 4,505 - 1,15] = 4,951$. Их отличие менее 1%, поэтому определяем угол $\gamma = 2,89^\circ$, $x_H = 7,56$ мм, $l = 11,619$ мм, $x_{сер.от} = 9,589$ мм, $H_{сер.от} = 2,714$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 2,284$, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 2,632$, $x_{сер.оп} = 3,78$ мм, $H_{сер.оп} = 2,195$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 1,555$ и $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 2,34$. При $\frac{x_H}{l} = 0,651$ относительное среднее давление $\bar{\sigma}_{ср} = 2,442$ – отличие по напряжению составляет 22,2%.

Проверяем баланс мощностей на прокатку полосы. При прокатке без натяжения $\bar{N}_{об} = [1,442 \cdot 2,1 + 2,442 \cdot 0,35 \cdot 11,619] \cdot B \cdot V_1 = 12,959 \cdot V_1 \cdot B$. При прокатке с натяжением $\bar{N}_{об} = [0,9 \cdot 2,1 + 1,9 \cdot 0,35 \cdot 11,619 + (1 - 0,8) \cdot 3 \cdot (1 - 0,3) + (1 - 0,7) \cdot 2,1] \cdot B \cdot V_1 = 10,667 \cdot V_1 \cdot B$

С учетом перераспределения усилий общая мощность на прокатку уменьшается на $\frac{12,959 - 10,667}{12,959} = 17,7\%$. Таким образом, дополнительно к повышению качественных показателей, натяжение уменьшает расход потребляемой энергии.

Проверяем данный вывод для среднелистовой прокатки полосы 8×400. При горячей прокатке с натяжением $\xi_0 = 0,8, \xi_1 = 0,7$ и обжатием 30% на стане с вальками 400 мм по приближенной формуле $z = \left(1,736 - 0,410 \frac{\xi_0}{\xi_1} \right) \cdot \varepsilon + 0,95 = 1,331$ определяем $H_H = 6,01$ мм и, далее, $H_1 = 5,6$ мм, $\gamma = 2,596^\circ$, $\alpha = 6,277^\circ$ основные параметры $\delta_0 = \frac{f}{\varepsilon g^{\alpha+\gamma}} = 4,511$ и

$\delta_1 = \frac{f}{\varepsilon g^{\frac{\alpha}{2}}} = 15,447$, коэффициент упрочнения $k_1 = \frac{(H_0 - H_H^2)_{+2}}{H_0} = 1,124$, $k_2 = k_1 + \frac{\varepsilon}{2} = 1,274$. Проверяем нейтральные напряжения: $\bar{\sigma}_{от.н} = 2,25$ и $\bar{\sigma}_{оп.н} = 2,248$. Отличие напряжений менее 1%, поэтому $x_H = 9,0586$ мм, $l = 21,909$ мм, $x_{сер.от} = 15,484$ мм, $H_{сер.от} = 6,8$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,396$ и $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,51$. При $x_{сер.оп} = \frac{x_H}{2} = 4,529$ мм, $H_{сер.оп} = 5,7026$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 0,953$ и $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 1,364$. При $\frac{x_H}{l} = 0,4135 \bar{\sigma}_{ср} = 1,45$.

При прокатке без натяжения: ($\xi_0 = \xi_1 = 1$) $z = 1,335$, $H_H = 5,9925$ мм, $\gamma = 2,538^\circ$, $\alpha = 6,277^\circ$, $\delta_0 = 4,540$, $\delta_1 = 15,8$, $k_1 = 1,125$ и $k_2 = 1,275$. Проверяем напряжения на нейтрале: $\bar{\sigma}_{от.н} = 3,04$ и $\bar{\sigma}_{оп.н} = 3,07$. Тогда $x_H = 8,856$ мм, $l = 21,909$ мм, $x_{сер.от} = 15,383$ мм, $H_{сер.от} = 6,785$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,837$ и $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,9285$.

При $x_{сер.оп} = 4,428$ мм, $H_{сер.оп} = 6,785$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 1,341$ и $\bar{\sigma}_{ср.оп} = 1,763$. Тогда при $\frac{x_H}{l} = 0,404\bar{\sigma}_{ср} = 1,862$. Таким образом, натяжение уменьшает давление на 22%.

Далее анализируем баланс мощностей. При прокатке без натяжения: $\bar{N}_{об} = [0,862 \cdot 5,6 + 1,862 \cdot 0,35 \cdot 21,909] \cdot B \cdot V_1 = 19,105 \cdot V_1 \cdot B$.

При прокатке с натяжением $\bar{N}_{об} = [0,45 \cdot 5,6 + 1,45 \cdot 0,35 \cdot 21,909 + 0,2 \cdot 8 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 5,6] \cdot B \cdot V_1 = 16,4388 \cdot V_1 \cdot B$

Таким образом общая мощность уменьшается на $\frac{19,105 \cdot B \cdot V_1 - 16,4388 \cdot B \cdot V_1}{19,105 \cdot B \cdot V_1} \cdot 100\% = 14\%$.

Для сравнения исследуем толстолистовую прокатку полосы 20×500 мм с обжатием 30% в валках диаметром 500 мм. При прокатке без натяжения принимаем $z = 1,35$, соответственно, $H_H = 14,815$ мм, $H_2 = 14$ мм, $\gamma = 3,271^\circ$, $\alpha = 8,877^\circ$, $\delta_0 = 3,289$ и $\delta_1 = 12,258$, $k_1 = 1,13$, $k_2 = 1,28$. Проверяем напряжения в нейтральном сечении: $\bar{\sigma}_{от.н} = 2,105$ и $\bar{\sigma}_{оп.н} = 2,104$. Их отличие менее 1%, поэтому определяем $x_{сер.от} = \frac{x_H + l}{2} = \frac{14,265 + 35,73}{2} = 26,497$ мм, $H_{сер.от} = 16,816$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,505$ и $\bar{\sigma}_{ср.от} = 1,528$. В зоне опережения $x_{сер.оп} = 7,132$ мм, $H_{сер.оп} = 14,203$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 1,214$ и $\bar{\sigma}_{ср.оп} = 1,458$. При $\frac{x_H}{l} = 0,368$ относительное среднее давление $\bar{\sigma}_{ср} = 1,502$. При прокатке с натяжением $\xi_0 = 0,8, \xi_1 = 0,7$ принимаем $z = 1,345$, тогда $H_H = 14,87$ мм, $\gamma = 3,38^\circ$, $\delta_0 = 3,26$, $\delta_1 = 11,862$, $k_1 = 1,128$ и $k_2 = 1,278$. Проверяем напряжения: $\bar{\sigma}_{от.н} = 1,539$ и $\bar{\sigma}_{оп.н} = 1,544$. Их отличие менее 1%, поэтому $x_{сер.от} = \frac{14,739 + 38,73}{2} = 26,734$ мм, $H_{сер.от} = 16,867$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,111$ и $\bar{\sigma}_{ср.от} = 1,19$. При $x_{сер.оп} = 7,37$ мм, $H_{сер.оп} = 14,217$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 0,862$ и $\bar{\sigma}_{ср.оп} = 1,142$. При $\frac{x_H}{l} = 0,388\bar{\sigma}_{ср} = 1,172$ – или натяжение уменьшает давление на 22%.

Составляем баланс мощностей. При прокатке без натяжения $\bar{N}_{об} = [0,502 \cdot 14 + 1,502 \cdot 38,73 \cdot 0,35] \cdot B \cdot V_1 = 27,388 \cdot V_1 \cdot B$. При прокатке с натяжением

$\bar{N}_{об} = [0,172 \cdot 14 + 1,172 \cdot 0,35 \cdot 38,73 + 0,2 \cdot 20 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 14] \cdot B \cdot V_1 = 25,295 \cdot V_1 \cdot B$

Затраты мощности на деформационный процесс уменьшились на 7,65%. Ниже на рис.1 приведена величина уменьшения энергозатрат $\Delta_{зат}$ в процентах от толщины полосы.

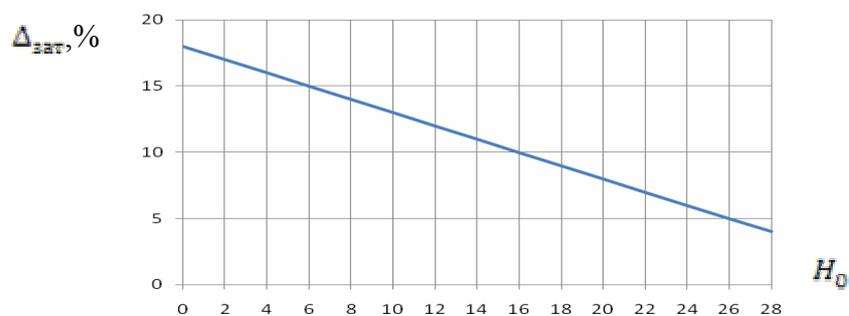


Рис.1. Уменьшение энергозатрат при прокатке с натяжением в зависимости от толщины полосы H_0

Проверим полученную линейность энергозатрат для полосы 30×400 при натяжении $\xi_0 = 0,8, \xi_1 = 0,7, \varepsilon = 0,3$ и $D = 700$ мм.

Определяем $z = 1,347, H_H = 22,272$ мм, $H_1 = 21$ мм, $\gamma = 3,454^\circ, \alpha = 9,198^\circ, \delta_0 = 3,159$ и $\delta_1 = 11,608, k_1 = 1,129, k_2 = 1,279$.

Проверяем

$$\bar{\sigma}_{от.н} = \frac{1}{3,159} [1,398 \cdot 2,5625 + 1,129] = 1,491$$

и

$$\bar{\sigma}_{оп.н} = \frac{1}{11,608} [9,4041 \cdot 1,979 - 1,279] = 1,493.$$

Отличие менее 1%, поэтому $x_H = 21,086$ мм, $l = 56,125$ мм, $x_{сер.от} = 38,605$ мм, $H_{сер.от} = 25,271$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,118$ и $\bar{\sigma}_{ср.от} = 1,182$.

При $x_{сер.оп} = 10,543$ мм, $H_{сер.оп} = 21,318$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 0,854$ и $\bar{\sigma}_{ср.оп} = 1,125$.

При $\frac{x_H}{l} = 0,376 \bar{\sigma}_{ср} = 1,16$.

Для прокатки без натяжения и обжатия 30% принимаем $z = 1,35$. Тогда $H_H = 22,222$ мм, $\gamma = 3,386^\circ, \delta_0 = 3,177, \delta_1 = 11,842, k_1 = 1,13$ и $k_2 = 1,28$.

Проверяем выбор z :

$$\bar{\sigma}_{от.н} = \frac{1}{3,177} [2,047 \cdot 2,595 + 1,13] = 2,037$$

и $\bar{\sigma}_{оп.н} = \frac{1}{11,842} [13,122 \cdot 1,953 - 1,28] = 2,056$ и $\Delta < 1\%$

Соответственно при $x_{сер.от} = \frac{20,672 + 56,135}{2} = 38,4$ мм высота $H_{сер.от} = 25,226$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.от} = 1,473$ и $\bar{\sigma}_{ср.от} = 1,496$. При $x_{сер.оп} = 10,336$ мм высота $H_{сер.оп} = 21,305$ мм, $\bar{\sigma}_{сер.оп} = 1,2065$ и $\bar{\sigma}_{ср.оп} = 1,442$.

Окончательно при

$$\frac{x_H}{l} = 0,368 \bar{\sigma}_{ср} = 0,632 \cdot 1,496 + 0,368 \cdot 1,442 = 0,9455 + 0,5306 = 1,476.$$

Определяем баланс мощностей. При прокатке без натяжения:

$$\bar{N}_{об} = [0,476 \cdot 21 + 1,476 \cdot 0,35 \cdot 56,125] \cdot B \cdot V_1 = 38,99 \cdot V_1 \cdot B.$$

При прокатке с натяжением:

$$\bar{N}_{об} = [0,16 \cdot 21 + 1,16 \cdot 0,35 \cdot 56,125 + 0,2 \cdot 30 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 21] \cdot B \cdot V_1 = 36,647 \cdot V_1 \cdot B.$$

Отличие мощностей составит $\Delta_N = \frac{38,99 - 36,647}{38,99} \cdot 100 = 6\%$. По линейной зависимости отличие Δ_N составляет около 4%. Таким образом, натяжение при тонколистовой и среднелистовой прокатке уменьшает электрозатраты до 20-25%. При толстолистовой прокатке значительно уменьшается влияние натяжения на энергозатраты при деформационных процессах.

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.

EFFECT OF TENSION ON THE REDUCE POWER CONSUMPTION DURING HOT ROLLING

Kohan L.S., Beleyubsky B.F., Lapteva M.I.

This paper investigates the distribution of drive power consumed in the deformation process during rolling without tension and with tension.

KEY WORDS: hot rolling, tension of rolled sheet metal between rolling mills, energy costs.