ХОЛОДНАЯ ПРОКАТКА ПОЛОС С ОДНОВАЛКОВЫМ ПРИВОДОМ*Запорожская государственная инженерная академия*

Наведено результати теоретичних досліджень параметрів процесу прокатки полоси з використанням одновалкового приводу. Показано можливість використання одновалкового приводу на ділянках перехідних процесів для поліпшення якості штаби.

Приведены результаты теоретических исследований параметров процесса прокатки полосы при использовании одновалкового привода. Показана возможность использования одновалкового привода на участках переходных процессов для улучшения качества полосы.

Введение. Для снижения отходов металла в обрезь и улучшения технико-экономических показателей работы станов холодной прокатки полосы необходима разработка технологий, обеспечивающих уменьшение ее продольной разнотолщинности на участках переходных процессов. Таковыми являются передний участок полосы, который заправляют в стан и моталку; участок прокатки сварного шва; задний участок полосы, который выпускают из стана.

Анализ практических данных и достижений. Основным недостатком процесса холодной прокатки тонких полос является существенное влияние контактных касательных напряжений на усилие и мощность прокатки, а, следовательно, и на толщину прокатываемой полосы. Особенно это влияние проявляется в переходных процессах при снижении окружной скорости валков до $v < 5$ м/с для выпуска заднего участка полосы и прокатки участка сварного шва. Повышение энергосиловых параметров при $v < 5$ м/с обусловлено увеличением коэффициента трения и контактных касательных напряжений.

Компенсировать влияние контактного трения в переходных процессах на толщину полосы можно различными способами, в том числе:

- применением дополнительного обжатия утолщенных участков полосы в двух или во всех клетях стана;
- регулированием натяжений по длине прокатываемой полосы;
- применением несимметричного процесса в период снижения скорости вращения валков при прокатке утолщенных участков полосы.

Первый метод с точки зрения снижения продольной разнотолщинности эффективен, но одновременно с применением дополнительного обжатия происходит увеличение коэффициента трения, усилия и мощности прокатки, модуля жесткости полосы, а также поперечной разнотолщинности полос. Второй способ обеспечивает устранение небольшой продольной разнотолщинности при прокатке участков со сварным швом.

Наиболее рациональными являются способы воздействия на толщину полосы в переходных процессах, которые позволяют снизить усилие прокатки, например, прокатка утолщенных участков полосы в переходных процессах в клетях с одновалковым приводом. Использование такого процесса позволяет уменьшить влияние контактных касательных напряжений а, следовательно, нормальных контактных напряжений, усилий прокатки и толщины полосы [1-10]. Реализация рассматриваемого способа выполняется в начале переходного процесса путем отключения одного главного электропривода (в случае индивидуального привода рабочих валков).

Задача исследования. Задачей работы является теоретическое исследование параметров процесса прокатки при использовании одновалкового привода и их влияние на качество полосы.

Основная часть исследований. При несимметричной прокатке тонких полос в клети с одновалковым приводом усилие прокатки, по экспериментальным данным, в ряде случаев оказывается на 10...50% меньше, чем при прокатке с приводом на оба валка. При прокатке алюминиевой полосы в клети с одновалковым приводом в контакте с холостым валком существенно снижается коэффициент трения (до $f_x \approx 0,062$) и возрастает угол критического сечения (до $\gamma_x/\alpha = 0,4...0,55$; (α - угол контакта; γ_x - угол критического сечения со стороны холостого валка) [4-6], подобно протягиванию металла через роликовую волоку [9]. На контакте с приводным валком при относительном обжатии $\varepsilon > 0,2$ коэффициент трения составляет $f_{II} \approx 0,11$, а отношение $\gamma_{II}/\alpha = 0,1...0,2$ (технологическая смазка – эмульсол Т). Увеличение отношения γ_x/α со стороны холостого валка происходит вследствие принудительного транспортирования полосы приводным валком, создающим в слоях металла со стороны холостого валка продольные растягивающие напряжения. При симметричной прокатке алюминиевой полосы в приводных валках диаметром $D = 100$ мм коэффициент трения при $\varepsilon = 0,2...0,3$ составляет $f = 0,063...0,079$ [11], что заметно меньше, чем на приводном валке, и несколько больше, чем на холостом валке.

Таким образом, при прокатке в клети с одним приводным валком средний коэффициент трения в 1,07...1,35 раза больше, чем при симметричной прокатке в двух приводных валках. Это способствует повышению средних нормальных напряжений в очаге деформации.

С другой стороны, при прокатке с одновалковым приводом вследствие различия коэффициентов трения и кинематических параметров деформации [12-15] возникает скоростная несимметрия и для $\varepsilon > 0,2$ отношение скоростей составляет $v_{II}/v_x = 1,06...1,11$, что обуславливает возникновение в очаге деформации продольных напряжений растяжения, достаточных для снижения нормальных контактных напряжений (v_{II} и v_x - скорости слоев полосы соответственно со стороны приводного и холостого валков).

Кроме того, изменение протяженности зон отставания и опережения на дуге контакта изменяет значения средних контактных касательных, и следовательно, и нормальных контактных напряжений. Это происходит вследствие различия величин касательных контактных напряжений в указанных зонах. Так, по данным исследований, приведенным в работе [12], при $l_d/h_{cp} = 3,0...6,6$ величина средних касательных напряжений в зоне отставания в 1,86...3,0 раза больше, чем в зоне опережения. Очевидно, это обусловлено тем, что на контакте в зоне отставания течение металла осуществляется против направления движения поверхности инструмента (валка), тогда как в зоне опережения - по направлению движения поверхности валка, где сопротивление скольжению меньше. Эти особенности трения в очаге деформации не учитываются известными теоретическими формулами. Следовательно, уменьшение длины зоны отставания (увеличение γ/α) в некоторой степени способствует снижению средних нормальных контактных напряжений.

Совместное воздействие на напряженное состояние рассмотренных трех факторов и определяет, в итоге, различие средних нормальных контактных напряжений (усилий) при прокатке с одним и двумя приводными валками. В зависимости от условий деформации усилие прокатки с одним приводным валком может быть больше или меньше, чем при использовании двухвалкового привода клети. Применение одновалкового привода может быть целесообразно при небольших обжатиях полосы с использованием в паре рабочих валков разного диаметра с уменьшенным диаметром приводного валка.

Эффективность деформации металла в клетки с одновалковым приводом можно оценить с использованием теоретической модели, представленной в работах [4-6,8]. При использовании итерационного процесса модель позволяет рассчитать геометрические, кинематические и энергосиловые параметры прокатки.

В первую очередь, рассчитывают среднее значение коэффициента трения f в очаге деформации, используя модель для симметричного процесса прокатки [11,13].

Принимают:

$$f_{\Pi X} = 0,5(f_{\Pi P} + f_X); \quad c_X = \frac{f_{\Pi P}}{f_X}; \quad f_{\Pi P} = f_X \cdot c_X; \quad (1)$$

$$f_X = \frac{2f_{\Pi X}}{(1+c_X)}; \quad f_{\Pi X} \approx 1,25f,$$

где $f_{\Pi X}$, $f_{\Pi P}$, f_X - коэффициенты трения, соответственно, средний в очаге деформации, со стороны приводного и холостого валков; f - коэффициент трения в симметричном процессе.

Средний коэффициент c_X при $\varepsilon > 0,1$ не зависит от относительного обжатия ε и в первом приближении по экспериментальным данным работы [6] равен $c_X \approx 1,75$. Средний коэффициент трения $f_{\Pi X}$ в несимметричном процессе несколько больше, чем в симметричном, очевидно, вследствие увеличения зоны отставания на приводном валке и увеличения скорости скольжения на контакте.

Углы критического сечения в несимметричном процессе прокатки определяют из условия равновесия горизонтальных (продольных) сил с учетом влияния внутренних продольных растягивающих напряжений в очаге деформации и влияния сил трения в подшипниках рабочего и опорного валков [4-6]:

– для приводного валка

$$P_{\Pi} \cdot \sin \varphi_{\Pi} - P_X \cdot \sin \varphi_X + T_{\Pi 1} \cdot \cos \frac{(\alpha_{\Pi} + \gamma_{\Pi})}{2} - T_{\Pi 2} \cdot \frac{\cos \gamma_{\Pi}}{2} - P_X \cdot \frac{f_T \cdot r_{\Pi}}{R_{\Pi}} - \sigma_{\Pi} \cdot H = 0; \quad (2)$$

– для холостого валка

$$P_{\Pi} \cdot \sin \varphi_X + T_{X1} \cdot \cos \frac{(\alpha_X + \gamma_X)}{2} - T_{X2} \cdot \frac{\cos \gamma_X}{2} - P_X \cdot f_{OT} \cdot \frac{r_{O\Pi}}{R_O} \cdot \left(\frac{R_X}{R_O}\right) + \sigma_X \cdot h = 0, \quad (3)$$

где P_i - усилие прокатки; T_{i1} и T_{i2} - силы трения, соответственно, в зонах отставания и опережения; α_i - углы контакта; φ_i - угол, соответствующий точке приложения сил на дугах контакта валков; γ_i - углы критического сечения в очаге деформации; f_i - коэффициенты внешнего трения на контактных поверхностях очага деформации; f_T и f_{OT} - соответственно коэффициенты трения в шейках рабочего и опорного валков; r_{Π} и $r_{O\Pi}$ - соответственно радиусы шеек рабочего и опорного валков; R_{Π} - радиус приводного рабочего валка; R_O - радиус опорного валка; H и h - соответственно толщина полосы до и после прокатки; σ_i - внутренние продольные растягивающие напряжения; i - индекс для приводного валка « Π », для холостого валка « X ».

После традиционного решения и преобразований уравнений (1) и (2) можно записать (с учетом внешнего натяжения):

$$\gamma_{II} = \frac{\alpha_{II}}{2} \left[1 - \frac{\varphi_{II}}{f_{II}} (1 + n_B \cdot a) - n_B \cdot a \frac{f_T}{f_{II}} \cdot \frac{r_{III}}{R_X} \right] - \frac{\sigma_{II} \cdot H}{2f_{II} \cdot p_{II} \cdot R_{II}} + \frac{\sigma_1 h (1 - \frac{\sigma_0 H}{\sigma_1 h})}{4f_{II} \cdot p_{cp.H} \cdot R}; \quad (4)$$

$$\gamma_X = \frac{\alpha_X}{2} \left[1 - \frac{\varphi_X}{f_X} - \frac{f_{OT}}{f_X} \cdot \frac{r_{OIII}}{R_O} \left(\frac{R_X}{R_O} \right) \right] + \frac{\sigma_X \cdot h}{2f_X \cdot p_X \cdot R_X} + \frac{\sigma_1 h (1 - \frac{\sigma_0 H}{\sigma_1 h})}{4f_{II} \cdot p_{cp.H} \cdot R}; \quad (5)$$

$$\varphi_{II} = \psi_{II} \cdot \alpha_{II} = 0,9 \cdot \psi \cdot \alpha_{II}; \quad \varphi_X = \psi \cdot \alpha_X; \quad a = \frac{\alpha_X}{\alpha_{II}} = \sqrt{\frac{\Delta h_X \cdot R_{II}}{\Delta h_{II} \cdot R_X}},$$

где σ_0, σ_1 - напряжения, соответственно, заднего и переднего натяжений; f_{II} - средний коэффициент трения в очаге деформации; $p_{cp.H}$ - среднее нормальное контактное напряжение в очаге деформации; R - средний радиус рабочих валков; ψ - коэффициент положения равнодействующей при симметричной прокатке [11]; ψ_{II} и ψ_X - коэффициенты положения равнодействующих сил при несимметричной прокатке; Δh_{II} и Δh_X - величины обжатий соответственно со стороны приводного и холостого валков (для двух валков); n_B, n_{II}, n_X - коэффициенты несимметрии деформации:

$$n_B = \frac{p_X R_X}{p_{II} \cdot R_{II}}; \quad n_{II} = \frac{\sigma_{II}}{p_{II}}; \quad n_X = \frac{\sigma_X}{p_X}. \quad (6)$$

Коэффициенты n_{II} и n_X находят из выражений [4-6]:

$$n_X = 2f_X (\sqrt{S_X} - \sqrt{S}) \sqrt{\frac{R_X}{h}};$$

$$n_{II} = 2f_{II} (\sqrt{S} - \sqrt{S_{II}}) \sqrt{R_{II} \cdot \frac{h}{H^2}}; \quad (7)$$

$$n_{II} = m \cdot n_X \cdot \frac{h}{H},$$

где S - опережение при симметричном процессе прокатки; S_X и S_{II} - величины опережения соответственно со стороны холостого и опорного валков.

Величину опережений S_X и S_{II} определяют из выражений:

$$S_X = S + 0,5 \left(\frac{v_{II}}{v_X} - 1 \right); \quad (8)$$

$$S_{II} = S - 0,5 \left(1 - \frac{v_X}{v_{II}} \right), \quad (9)$$

где v_{II} и v_X - скорости слоев полосы со стороны соответственно приводного и холостого валков, $Vn/Vx = 1 + 0,285 \varepsilon$, ε - относительное обжатие.

Расчет средних нормальных напряжений на валках осуществляют по формулам из работ [4-6]:

$$p_{II} = \frac{P_{cp}}{(1 + n_{II})}; \quad p_X = \frac{P_{cp}}{(1 + n_X)}; \quad p_{cp.H} = 0,5(p_{II} + p_X); \quad m = \frac{p_X}{p_{II}}, \quad (10)$$

где $p_{CP.H}$ - среднее нормальное контактное напряжение при несимметричной прокатке.

С использованием формул работ [4-6] рассчитывают величины абсолютных обжатий со стороны каждого из валков:

$$\Delta h_X = \frac{\Delta h}{\left(\frac{1+m^2 v_X}{v_{II}}\right)}; \quad \Delta h_{II} = \Delta h - \Delta h_X. \quad (11)$$

В формулы для расчета длины дуги контакта и радиуса валков с учетом упругих деформаций валков и полосы [11] подставляют удвоенные значения Δh_{II} и Δh_X . По расчетным величинам длин дуг контакта l_{CII} и l_{CX} определяют радиусы валков:

$$R_{\bar{I}} = \frac{l_{N\bar{I}}^2}{2\Delta h_{\bar{I}}}; \quad R_{\bar{O}} = \frac{l_{N\bar{O}}^2}{2\Delta h_{\bar{O}}}. \quad (12)$$

Средний радиус валков и длину контакта вычисляют как

$$R = \frac{2 \cdot R_{II} \cdot R_X}{R_{II} + R_X}; \quad l_{CP.H} = \sqrt{R \cdot \Delta h}. \quad (13)$$

Углы контакта рассчитывают с использованием выражений:

$$\alpha_{II} = \sqrt{\frac{2\Delta h_{II}}{R_{II}}}; \quad \alpha_X = \sqrt{\frac{2\Delta h_X}{R_X}}, \quad (14)$$

а усилие прокатки по формуле

$$P = p_{CP.H} \cdot l_{CP.H} \cdot B, \quad (15)$$

Где B - ширина полосы.

Напряжения σ_{II} и σ_X определяют из выражений (6)

$$\sigma_{II} = n_{II} \cdot p_{II}; \quad \sigma_X = n_X \cdot p_X. \quad (16)$$

Далее рассчитывают величины углов критического сечения по выражениям (4) и (5) опережения и соотношения скоростей [6]:

$$S_{II} = \frac{R_{II} \cdot \gamma_{II}^2}{h}; \quad S_X = \frac{R_X \cdot \gamma_X^2}{h}; \quad (17)$$

$$\frac{v_{II}}{v_X} = 1 + S_X - S_{II}. \quad (18)$$

В заключение осуществляют расчет параметров несимметричного процесса прокатки по формулам (4)-(18) до получения разности между соседними значениями V_{II}/V_X не более $\Delta = \pm 0,003$.

Выводы. Результаты выполненных теоретических исследований показали эффективность деформации металла в клети с одним приводным валком. Использование одновалкового привода может быть рекомендовано для станов холодной прокатки с целью уменьшения продольной разнотолщинности прокатываемой полосы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев А.А. О холодной прокатке с рассогласованием скоростей валков // Сталь. - 1973. - № 10. - С.906-910.

2. *Ширяев В.И., Пхайко Е.С.* К вопросу о прокатке с одним приводным валком / *Металлургия и коксохимия.* - Киев: Техника, 1979. - Вып.60. - С.36-38.
3. *Холодный В.П., Звонарев В.К., Устинов А.В. и др.* Экспериментальное исследование неустановившегося процесса прокатки в клети с одним холостым валком / *Металлургия и коксохимия.* - Киев: Техника, 1982. - Вып.78. - С.75-77.
4. *Николаев В.А.* Определение кинематических и энергосиловых параметров прокатки при одновалковом приводе // *Известия вузов. Черная металлургия.* - 1993. - № 1. - С.34-37.
5. *Николаев В.А., Скороходов В.Н., Полухин В.П.* Несимметричная тонколистовая прокатка. - М.: Металлургия, 1993. - 192 с.
6. *Николаев В.А.* Теория и практика процессов прокатки. - Запорожье: ЗГИА, 2002. - 232 с.
7. *Пименов А.Ф., Липухин Ю.В., Трайно А.И. и др.* Освоение технологии несимметричной горячей прокатки на НШС 2000 ЧерМК // *Сталь.* - 1988. - № 6. - С.37-42.
8. *Николаев В.А.* Силовые параметры в несимметричных условиях прокатки // *Известия вузов. Черная металлургия.* - 2007. - № 3. - С.20-22.
9. *Добров И.В., Грудев А.П., Коковихин Ю.И.* Сравнительный анализ процессов прокатки и волочения в роликовых волоках // *Известия вузов. Черная металлургия.* - 1987. - № 10. - С.44-48.
10. *Дронов О.Л., Кошаев В.В.* Экспериментальное исследование формоизменения и энергосиловых параметров при деформации катанки способом «прокатка-волочение» // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* - 2001. - № 1. - С.45-47.
11. *Николаев В.А.* Теория прокатки. - Запорожье, ЗГИА, 2007. - 228 с.
12. *Чекмарев А.П.* О некоторых вопросах теории прокатки / *Теория прокатки.* - М.: Металлургия, 1962. - С.31-56.
13. *Николаев В.А.* Оценка точности формул для расчета среднего нормального контактного напряжения при холодной прокатке // *Известия вузов. Черная металлургия.* - 2004. - № 11. - С.36-39.
14. *Чекмарев А.П., Нефедов А.А., Николаев В.А.* Теория продольной прокатки. - Харьков, ХГУ, 1965. - 210 с.
15. *Леванов А.Н., Спасский Ю.И., Аштур Ю.В.* Исследование механики контактного взаимодействия между полосой и валками при прокатке / *Теория прокатки.* - М.: Металлургия 1975. - С.37-40.

Стаття надійшла до редакції 22.12.2008 р.

Рецензент, проф. А.Я.Жук