

УДК 621.771

Николаев В. А.
Васильев А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ В КЛЕТИ С ОДНИМ ПРИВОДНЫМ ВАЛКОМ

Для снижения отходов металла в обреш и улучшения технико-экономических показателей работы станов холодной прокатки полос необходима разработка технологий, обеспечивающих снижение продольной разнотолщинности полос на участках переходных процессов. Таковыми являются: передний участок полосы, который заправляется в стан и моталку; участок прокатки сварного шва; задний участок полосы, который выпускается из стана.

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 вращения 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 влияния 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 такие 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 и, следовательно, нормальных контактных напряжений, усилий прокатки и толщины полосы [1–8]. Реализация рассматриваемого способа выполняется в начале переходного процесса путем отключения одного главного электропривода (в случае индивидуального привода рабочих валков).

Целью работы является теоретическое исследование параметров процесса прокатки при использовании одновалкового привода и его влияние на качество профиля полос.

При несимметричной прокатке тонких полос в клетях 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 алюминиевых полос в клетях с одновалковым приводом в контакте с холостым валком существенно снижается коэффициент трения до $f_x \approx 0,062$ и возрастает угол критического сечения (γ_x) до $\gamma_x/\alpha = 0,4...0,55$ [4–6], подобно протягиванию металла через роликовую волоку [8] (α – угол контакта; γ_x – угол критического сечения со стороны холостого валка). 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 вала происходит вследствие принудительного транспортирования полосы приводным валком, создающим в слоях металла со стороны холостого вала продольные растягивающие напряжения. При симметричной прокатке алюминиевых полос в приводных валках диаметром $D = 100$ мм коэффициент трения при $\varepsilon = 0,2 \dots 0,3$ составляет $f = 0,063 \dots 0,079$ [9], 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 $1,07 \dots 1,35$ 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 [10–12] возникает скоростная несимметрия и для $\varepsilon > 0,2$ отношение скоростей составляет $v_{II}/v_x = 1,06 \dots 1,11$, что обуславливает возникновение в очаге деформации продольных напряжений растяжения, достаточных для снижения нормальных контактных напряжений (v_{II} и v_x – скорости слоев полосы со стороны соответственно приводного и холостого валков).

Кроме того, само по себе изменение протяженности зон отставания и опережения на дуге контакта изменяет значения средних контактных касательных, и, следовательно, нормальных контактных напряжений. Это происходит вследствие различия величин касательных контактных напряжений в указанных зонах. Так, по данным исследований приведенных в работе [10], при $l_d/h_{cp} = 3,0 \dots 6,6$ средние касательные напряжения в зоне отставания в $1,86 \dots 3,0$ раза больше, чем в зоне опережения. Очевидно, это обусловлено тем, что на контакте в зоне отставания металл течет против направления движения поверхности инструмента (валка), тогда как в зоне опережения – по направлению движения поверхности вала, 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 приводным валком и с двумя приводными валками. В зависимости от условий деформации усилие прокатки с одним приводным валком, как правило, 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 вала.

Эффективность деформации металла в клети с одновалковым приводом можно оценить по теоретической модели, предоставленной в работах [4–7]. При использовании итерационного процесса модель позволяет рассчитать геометрические, кинематические и энерго-силовые параметры прокатки. Алгоритм расчета предоставлен ниже.

В первую очередь рассчитывают среднее в очаге деформации значение коэффициента трения f , используя модель для симметричного процесса прокатки [9, 11]. Принимаем:

$$f_{II} = 0,5(f_{II} + f_x); \quad c_x = \frac{f_{II}}{f_x}; \quad f_{II} = f_x \cdot c_x;$$

$$f_x = \frac{2f_{II}}{(1+c_x)}; \quad f_{II} \approx 1,25f, \quad (1)$$

где f_{II} , f_{II} , 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 [6] равен $c_x = (0,111 - 0,124) / (0,063 - 0,07) \approx 1,75$.

Средний коэффициент трения $f_{ПХ}$ 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 определяем из условия равновесия горизонтальных (продольных) сил с учетом влияния внутренних продольных растягивающих напряжений в очаге деформации и влияние сил трения в подшипниках рабочего и опорного валков [4–6]:

– для приводного валка ($B = 1$ м):

$$P_{П} \cdot \sin \varphi_{П} - P_{X} \cdot \sin \varphi_{X} + T_{П1} \cdot \cos \frac{(\alpha_{П} + \gamma_{П})}{2} - T_{П2} \cdot \frac{\cos \gamma_{П}}{2} - P_{X} \cdot \frac{f_T \cdot r_{ш}}{R_{П}} - \sigma_{П} \cdot H = 0; \quad (2)$$

– для холостого валка ($B = 1,0$ м):

$$P_{П} \cdot \sin \varphi_{X} + T_{X1} \cdot \cos \frac{(\alpha_{X} + \gamma_{X})}{2} - T_{X2} \cdot \frac{\cos \gamma_{X}}{2} - P_{X} \cdot f_{OT} \cdot \frac{r_{Oш}}{R_O} \cdot \left(\frac{R_X}{R_O}\right) + \sigma_X \cdot h = 0, \quad (3)$$

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} – коэффициенты трения в шейках соответственно рабочего и опорного валков; $r_{ш}$ и $r_{Oш}$ – радиусы шеек соответственно рабочего и опорного валков; $R_{П}$ – радиус приводного рабочего валка; R_O – радиус опорного валка; H и h – толщина полосы до и после прокатки; σ_i – внутренние продольные растягивающие напряжения; B – ширина полосы; i – индекс для приводного валка «П», для холостого валка «X».

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

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

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

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

где σ_0 и σ_1 – напряжения соответственно заднего и переднего натяжений; $f_{ПХ}$ – средний коэффициент трения в очаге деформации; $p_{ср.Н}$ – среднее нормальное контактное напряжение в очаге деформации; R – средний радиус рабочих валков; ψ – коэффициент положения равнодействующей при симметричной прокатке [9]; $\psi_{П}$ и ψ_X – коэффициенты положения равнодействующих сил при несимметричной прокатке; $\Delta h_{П}$ и Δh_X – величины обжатий со стороны приводного и холостого валков (для двух валков); $n_B, n_{П}, n_X$ – коэффициенты несимметрии:

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

Коэффициенты n_{II} и n_X влияния несимметрии деформации найдем из выражений [4–6]:

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

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

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

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

где v_{II} и v_X – скорости слоев полосы со стороны соответственно приводного и холостого валков.

Отношение $\frac{v_{II}}{v_X}$ предварительно определяют из работ [4–6]:

$$\frac{v'_{II}}{v'_X} = 1 + 0,285\varepsilon, \quad (9)$$

где ε – относительное обжатие.

Расчет средних нормальных напряжений на валках выполняют по формулам [4–6]:

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

где p_{cp} – среднее нормальное контактное напряжение в симметричном процессе прокатки; $p_{CP.H}$ – среднее нормальное контактное напряжение при несимметричной прокатке.

По формулам работ [4–6] рассчитывают величины абсолютных обжатий со стороны каждого из валков:

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

В формулы для расчета длины дуги контакта и радиуса валков с учетом упругих деформаций валков и полосы [9] подставляют удвоенные значения Δh_{II} и Δh_X . По расчетным величинам длин дуг контакта l_{CII} и l_{CX} определяют радиусы валков:

$$R_{II} = \frac{l_{CII}^2}{2\Delta h_{II}}; \quad R_X = \frac{l_{CX}^2}{2\Delta h_X}. \quad (12)$$

Средние радиусы валков и длину контакта рассчитывают из выражений:

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

Углы контакта рассчитывают по выражениям:

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

а усилие прокатки по формуле:

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

$p_{CP.H}$ – в МПа; $l_{CP.H}$ – в м; B – в м.

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

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

Следующим шагом является расчет величин углов критического сечения по выражениям (4), (5), опережений и соотношения скоростей [6]:

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

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

Затем выполняют расчет параметров несимметричного процесса прокатки по формулам (4)–(18) до получения разницы между соседними значениями $\frac{v_{II}}{v_X}$ в пределах $\Delta = \pm 0,003$.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненных теоретических исследований показали эффективность деформации металла в клети с одним приводным валком. Показано влияние обжатия, шероховатости поверхности валков и скорости прокатки на коэффициент трения, опережение и среднее нормальное контактное напряжение при симметричной и несимметричной прокатке (с одним приводным валком) и их влияние на показатели работы стана. Использование одновалкового привода может быть рекомендовано для станков холодной прокатки, при прокатке утолщенных участков полос с целью уменьшения продольной разнотолщинности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А. А. О холодной прокатке с рассогласованием скоростей валков / А. А. Королев. – *Сталь*. – 1973. – № 10. – С. 906–910.
2. Ширяев В. И. К вопросу о прокатке с одним приводным валком / В. И. Ширяев, Е. С. Пхайко // *Металлургия и коксохимия*. – К. : Техника, 1979. – № 60. – С. 36–38.
3. Экспериментальное исследование неустановившегося процесса прокатки в клети с одним холостым валком / В. П. Холодный, В. К. Звонарев, А. В. Устинов [и др.] // *Металлургия и коксохимия*. Техника. – 1982. – № 78. – С. 75–77.
4. Николаев В. А. Определение кинематических и энергосиловых параметров прокатки при одновалковом приводе / В. А. Николаев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1993. – № 1. – С. 34–37.
5. Николаев В. А. Несимметричная тонколистовая прокатка / В. А. Николаев, В. Н. Скороходов, В. П. Полухин. – М. : Металлургия, 1993. – 192 с.
6. Николаев В. А. Теория и практика процессов прокатки / В. А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2002. – 232 с.
7. Николаев В. А. Силовые параметры в несимметричных условиях прокатки / В. А. Николаев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2007. – № 3. – С. 20–22.
8. Добров И. В. Сравнительный анализ процессов прокатки и волочения в роликовых волоках / И. В. Добров, А. П. Грудев, Ю. И. Коковихин // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1987. – № 10. – С. 44–48.
9. Николаев В. А. Теория прокатки / В. А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2007. – 228 с.
10. Чекмарев А. П. О некоторых вопросах теории прокатки / А. П. Чекмарев // *Теория прокатки. Материалы по теоретическим вопросам прокатки*. – М. : Металлургия, 1962. – С. 31–56.
11. Николаев В. А. Оценка точности формул для расчета среднего нормального контактного напряжения при холодной прокатке / В. А. Николаев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2004. – № 11. – С. 36–39.
12. Леванов А. Н. Исследование механики контактного взаимодействия между полосой и валками при прокатке / А. Н. Леванов, Ю. И. Спасский, Ю. В. Аишур // *Теория прокатки. Материалы научно-технической конференции (Днепропетровск)*. – М. : Металлургия, 1975. – С. 37–40.

Николаев В. А. – д-р техн. наук, проф. ЗГИА;

Васильев А. А. – аспирант ЗГИА.

ЗГИА – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

E-mail: senator0023@hotmail.ru