

УДК 621.771.25:621.771.06–II К:621.7.014.2

Лещенко А. И.
Воробей С. А.**МЕТОД РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО ДВУХВАЛКОВОЙ НЕПРИВОДНОЙ РАБОЧЕЙ КЛЕТЬЮ ПРИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ**

Процессы деформации металла с использованием неприводных рабочих клеток (НК) широко применяются в метизном производстве, при производстве сортового проката и труб [1, 2]. Одним из основных параметров, характеризующих такие процессы, является сопротивление, создаваемое НК при деформации в ней металла. Этот параметр используется при проектировании технологических процессов протяжки в роликовых волоках и прокатки в комплексе приводная-неприводная рабочие клетки (комплекс ПК-НК).

Анализ известных выражений для расчета сопротивления, создаваемого НК при деформации в ней металла, приведенный нами в работе [3] показал, что при горячей прокатке в комплексе ПК-НК с двухвалковыми рабочими клетями погрешность расчета мощности прокатки возрастает с увеличением обжатия в НК и может достигать 40 % и более. Одной из причин этого может являться использование авторами известных выражений упрощенного определения величины нейтрального угла γ как половины угла контакта металла с валком α_0 . Использование такой зависимости, определяющей затраты энергии на преодоление трения скольжения на поверхности контакта полоса-валок, не позволяет достаточно точно определять величину сопротивления, создаваемого НК. Следовательно, использование существующих методов расчета при проектировании технологических процессов прокатки с применением НК не позволяет с достаточной точностью рассчитывать энергосиловые параметры процесса и определять необходимые характеристики основного технологического оборудования прокатного стана.

Целью настоящей работы является разработка надежного метода расчета сопротивления, создаваемого двухвалковой неприводной рабочей клетью при прокатке в комплексе приводная-неприводная рабочие клетки.

Для определения сопротивления, создаваемого НК, нами использованы положения энергетической теории прокатки [4, 5].

Прокатка в комплексе ПК-НК характеризуется проталкиванием раската через неприводные валки (НВ) предыдущей приводной рабочей клетью (ПК). Активной составляющей баланса мощностей при этом процессе является мощность заднего подпора, создаваемого ПК, которая расходуется на собственно формоизменение раската в НК, на преодоление сил трения на контактных поверхностях полоса-валки и на преодоление сил трения, возникающих в опорах НВ.

Исходя из этого, уравнение энергетического баланса при прокатке в НК запишем в виде:

$$N_0 = N_\phi + N_{mp} + N_{uu} \quad , \quad (1)$$

где N_0 – мощность заднего подпора [5]:

$$N_0 = \sigma_0 F_1 V_1 \quad ; \quad (2)$$

N_ϕ – мощность формоизменения с учетом мощности среза в плоскости входа [5]:

$$N_\phi = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s F_1 V_1 \left[\sqrt{1-k+k^2} \ln \lambda + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left(\frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left(k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left(k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} \right]; \quad (3)$$

N_{uu} – мощность, расходуемая на преодоление сил трения в опорах НВ [4]:

$$N_{uu} = \alpha_0 b_{cp} n_\sigma \sigma_s V_1 \frac{f_{uu} d_{uu}}{1+S} \quad . \quad (4)$$

В выражениях (2)–(4) приняты следующие условные обозначения:

σ_0 – напряжение заднего подпора, необходимое для деформации металла в НК;

σ_s – среднее значение напряжения текучести в очаге деформации НК;

F_1 – сечение раската на выходе из НК;

V_1 – скорость раската на выходе из НК;

k – коэффициент распределения деформации, определяемый отношением скоростей линейной деформации в направлениях уширения и обжатия;

λ – коэффициент вытяжки в НК;

m – поправочный коэффициент, определяющий интенсивность скорости деформации сдвига, $m = 0,35$;

α_0 – угол контакта металла с валком в очаге деформации НК;

ζ – корректирующий коэффициент;

R – радиус НВ;

n_σ – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации НК;

$f_{ш}$ – коэффициент трения в опорах НВ;

$d_{ш}$ – диаметр шейки НВ;

S – опережение в НВ;

h_0, b_0 – геометрические размеры раската перед НК;

h_1 – высота раската после НК;

h_{cp}, b_{cp} – средняя высота и ширина полосы в очаге деформации НК.

Зависимости для расчета коэффициентов k и ζ приведены в работе [5].

Мощность N_{mp} , расходуемая на преодоление сил трения на контакте полоса-валок в НК, определяется согласно [5] как сумма мощностей:

$$N_{mp} = N_{mx} + 0,35N_{my} \quad (5)$$

где N_{mx} – мощность трения, расходуемая на скольжение металла по контактной поверхности в продольном направлении (в направлении вытяжки);

N_{my} – мощность трения, расходуемая на скольжение металла по контактной поверхности в поперечном направлении (в направлении уширения).

Мощность трения скольжения по контактной поверхности в продольном направлении зависит от протяженности зон отставания и опережения. Для случая прокатки в приводных валках известны выражения для определения этой мощности, полученные с использованием положений энергетической теории прокатки [4, 5].

Определение мощности трения скольжения на контактной поверхности при прокатке в НК выполнили по методике, изложенной в работе [4] для случая прокатки в ПК. На рис. 1 показана схема к определению мощности трения скольжения в продольном направлении при прокатке в НК.

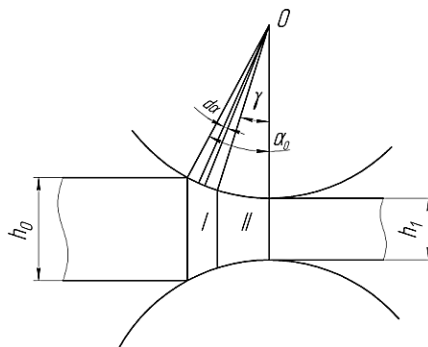


Рис. 1. Схема к определению мощности трения скольжения в продольном направлении при прокатке в НК:

I – зона отставания; II – зона опережения

Элементарная мощность трения скольжения в продольном направлении для зоны отставания определяется из выражения:

$$dN_{m1} = 2t_i b_i R \left(1 - \frac{F_\gamma \cos \gamma}{F_i \cos \alpha}\right) V_\delta d\alpha, \quad (6)$$

где t_i – касательные напряжения на элементарной площадке контактной поверхности полоса-валок;

b_i – ширина элементарной площадки;

F_γ – площадь поперечного сечения раската в нейтральном сечении очага деформации НК;

F_i – площадь поперечного сечения раската, соответствующая углу α ;

α – текущий угол контакта металла с валком;

γ – нейтральный угол в очаге деформации НК;

V_δ – окружная скорость НВ.

Имея ввиду, что $F_i = h_i b_i$, где h_i – высота раската, соответствующая углу α , получим:

$$dN_{m1} = 2t_i R \left(b_i - \frac{F_\gamma \cos \gamma}{h_i \cos \alpha}\right) V_\delta d\alpha. \quad (7)$$

Аналогично получим выражение для определения мощности трения скольжения в продольном направлении для зоны опережения:

$$dN_{m2} = 2t_i R \left(\frac{F_\gamma \cos \gamma}{h_i \cos \alpha} - b_i\right) V_\delta d\alpha. \quad (8)$$

Полную мощность трения скольжения на контактной поверхности полоса-валок в продольном направлении N_{mx} определим как:

$$N_{mx} = \int_{\gamma}^{\alpha_0} dN_{m1} + \int_0^{\gamma} dN_{m2} = 2RV_\delta \left[\int_{\gamma}^{\alpha_0} t_i \left(b_i - \frac{F_\gamma \cos \gamma}{h_i \cos \alpha}\right) d\alpha + \int_0^{\gamma} t_i \left(\frac{F_\gamma \cos \gamma}{h_i \cos \alpha} - b_i\right) d\alpha \right]. \quad (9)$$

Приняв допущения о равномерном распределении контактных напряжений на контактной поверхности и принимая, что $b_i \approx b_{cp}$, выполнив необходимые математические преобразования, получим выражение (9) в следующем виде:

$$N_{mx} = 2RV_\delta [t_{cp} b_{cp} (\alpha_0 - 2\gamma) + t_{cp} F_1 (1+S) \frac{1}{R} \sqrt{\frac{R}{h_1}} (2 \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}})]. \quad (10)$$

В выражении (10) произведение $2RV_\delta t_{cp} b_{cp} (\alpha_0 - 2\gamma)$ представляет собой мощность на бочке валков N_δ , передаваемую от привода [4]. Учитывая, что для процесса прокатки в НК эта величина равна нулю, запишем выражение для определения мощности трения скольжения на контактной поверхности неприводных валков в продольном направлении в виде:

$$N_{mx} = 2RV_\delta t_{cp} F_1 (1+S) \frac{1}{R} \sqrt{\frac{R}{h_1}} (2 \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}}) = 2t_{cp} F_1 V_1 \sqrt{\frac{R}{h_1}} (2 \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}}). \quad (11)$$

Мощность трения скольжения по контактной поверхности в поперечном направлении определяем аналогично случаю прокатки с приводными валками [5] по выражению:

$$N_{my} = \frac{1}{2} f_\sigma \sigma_s F_1 V_1 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{1+n} - 1 \right], \quad (12)$$

где f_σ – показатель сил трения;

n – коэффициент пропорциональности, определяемый отношением уширения полосы и ее обжатия [5].

Теперь выражение (5) для определения мощности, расходуемой на преодоление сил трения на контакте полоса-валок при прокатке в НК, запишем с учетом зависимостей (11) и (12):

$$N_{mp} = N_{mx} + 0,35N_{my} = 2t_{cp}F_1V_1 \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(2\arctg\sqrt{\frac{R}{h_1}}\gamma - \arctg\sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right) + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right] \right\}. \quad (13)$$

Принимая распределение сил трения на контакте по условию Э. Зибеля ($t_{cp} = f_{\sigma}\sigma_s$), запишем выражение для определения мощности, расходуемой на преодоление сил трения на контакте полоса-валок при прокатке в НК, в окончательном виде:

$$N_{mp} = 2f_{\sigma}\sigma_s F_1V_1 \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(2\arctg\sqrt{\frac{R}{h_1}}\gamma - \arctg\sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right) + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right] \right\}, \quad (14)$$

где Δh – абсолютное обжатие в НК.

Перепишем уравнение энергетического баланса (1) с учетом зависимостей (2), (3), (4), (14):

$$\begin{aligned} \sigma_0 F_1 V_1 = & \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s F_1 V_1 \left[\sqrt{1-k+k^2} \ln \lambda + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left(\frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left(k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left(k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} \right] + \\ & + 2f_{\sigma}\sigma_s F_1 V_1 \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(2\arctg\sqrt{\frac{R}{h_1}}\gamma - \arctg\sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right) + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right] \right\} + \alpha_0 b_{cp} n_{\sigma} \sigma_s V_1 \frac{f_{uu} d_{uu}}{1+S}. \end{aligned} \quad (15)$$

Решая уравнение (15) относительно σ_0 , получим выражение для определения величины сопротивления Ψ_0 , создаваемого неприводной клетью при прокатке с задним подпором:

$$\begin{aligned} \psi_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_s} = & \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1-k+k^2} \ln \lambda + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left(\frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left(k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left(k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} + \\ & + 2f_{\sigma} \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(2\arctg\sqrt{\frac{R}{h_1}}\gamma - \arctg\sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right) + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right] \right\} + \alpha_0 b_{cp} n_{\sigma} \frac{f_{uu} d_{uu}}{F_1(1+S)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Выражение (16) можно привести к виду:

$$\psi_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 + 2f_{\sigma} \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(2\arctg\sqrt{\frac{R}{h_1}}\gamma - \arctg\sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right) + A_2 \right\} + \alpha_0 b_{cp} n_{\sigma} \frac{f_{uu} d_{uu}}{F_1(1+S)}, \quad (17)$$

$$\text{где } A_1 = \sqrt{1-k+k^2} \ln \lambda + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left(\frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left(k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left(k \frac{b_0}{h_0} \right)^2}; \quad (18)$$

$$A_2 = 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right]. \quad (19)$$

Выражение для определения величины нейтрального угла γ в НК при прокатке с задним подпором, входящее в зависимости (16) и (17), получим, решив выражение (15) относительно γ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{h_1}{R}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left[\arctg\sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \sqrt{\frac{h_1}{R}} \left(\frac{1}{2f_{\sigma}} \left\{ \frac{\sigma_0}{\sigma_s} - \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 - \alpha_0 b_{cp} n_{\sigma} \frac{f_{uu} d_{uu}}{F_1(1+S)} \right\} - A_2 \right) \right], \quad (20)$$

где величины A_1 и A_2 определяются по зависимостям (18) и (19).

Так как величина γ в выражении (20) зависит от отношения σ_0/σ_s , то уравнения (16) и (20) решаются методом последовательных приближений по аргументу σ_0/σ_s .

Наши расчеты и расчеты других авторов [6] показали, что если не учитывать расход энергии на преодоление сопротивления вращению в опорах неприводных валков (установленных в подшипниках качения), то это внесет погрешность в определение величины ψ_0 не более 2 %. Следовательно, выражения (17) и (20) можно записать в виде:

$$\psi_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 + 2f_\sigma \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} (2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}}) + A_2 \right\}; \quad (21)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{h_1}{R}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \sqrt{\frac{h_1}{R}} \left(\frac{1}{2f_\sigma} \left\{ \frac{\sigma_0}{\sigma_s} - \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 \right\} - A_2 \right) \right]. \quad (22)$$

С использованием выражений (21) и (22) выполнены расчеты мощности, затрачиваемой на прокатку в комплексе ПК-НК. Режимы деформации при расчете и экспериментальные значения мощности прокатки приняты на основании экспериментальных исследований энергозатрат при прокатке в комплексе ПК-НК, выполненных в прокатной лаборатории Института черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск). В качестве ПК использовалась первая клетка стана 250, на выходной стороне которой установлена НК (рис. 2).

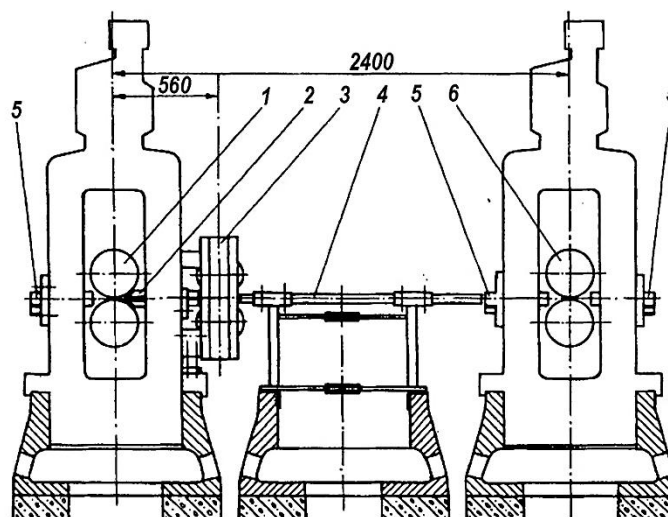


Рис. 2. Участок клетей стана 250, подготовленный к проведению экспериментов [2]:

1, 6 – приводные рабочие клетки; 2 – проводка; 3 – неприводная рабочая клетка; 4 – передающий желоб; 5 – проводковая арматура

Стан 250 представляет собой непрерывную чистовую шестиклетевую группу промышленного мелкосортно-проволочного стана [2]. Исходной заготовкой являлись образцы квадратного сечения со стороной 25 мм, длиной 1100 мм, материал – сталь марки СтЗсп. Температура нагрева образцов составляла 1000–1200 °С, истинная степень деформации в НК изменялась в пределах 0,09–0,27, скорость прокатки – 0,35–0,49 м/с. По результатам экспериментов определялась мощность, затрачиваемая на прокатку, а также характеристики формоизменения образцов.

На рис. 3 показана погрешность расчета мощности, затраченной на прокатку в комплексе ПК-НК, при изменении логарифмического показателя высотной деформации в неприводной рабочей клетке. Для сравнения приведены данные расчета мощности прокатки с использованием выражения, полученного авторами работы [2], которое, как показано нами в работе [3], является наиболее точным из известных.

Из графиков, приведенных на рис. 3, можно установить, что применение разработанного метода для определения сопротивления, создаваемого НК при деформации в ней металла, позволяет достаточно точно анализировать энергосиловое взаимодействие приводной и неприводной рабочих клеток в процессе сортовой прокатки. При расчете мощности прокатки в комплексе ПК-НК, погрешность не превышает 15 % при значениях логарифмического показателя высотной деформации в НК до 0,11, а при значениях логарифмического показателя 0,12–0,27 не превышает 10 %.

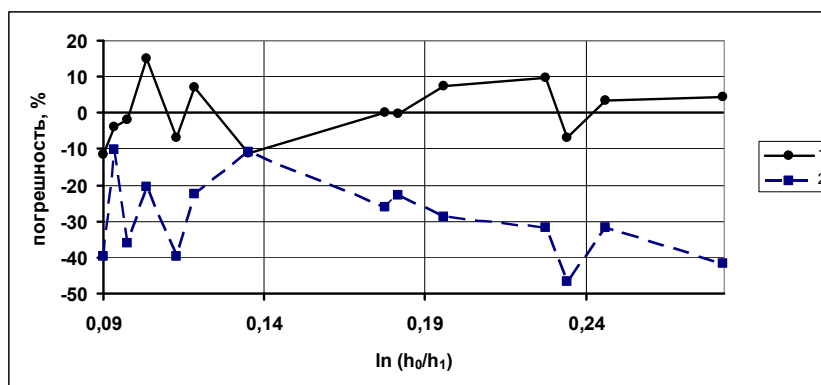


Рис. 3. Погрешность расчета мощности прокатки в комплексе ПК-НК при изменении логарифмического показателя высотной деформации в НК:

1 – по выражению (21); 2 – по выражению, предложенному в работе [2]

ВЫВОДЫ

Разработан метод определения сопротивления, создаваемого неприводной двухвалковой клетью при деформации в ней металла с задним подпором. Данный метод основан на положениях энергетической теории прокатки и учитывает, в отличие от известных методов, действительное положение нейтрального угла в очаге деформации неприводной рабочей клетки.

Применение разработанного метода позволяет с достаточно высокой точностью описывать силовое и энергетическое взаимодействие приводной и неприводной рабочих клеток для случая горячей сортовой прокатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битков В. В. *Технология и машины для производства проволоки* / В. В. Битков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 348 с.
2. *Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток* / [А. П. Лохматов, С. М. Жучков, Л. В. Кулаков и др.]. – Киев : Наукова думка, 1998. – 239 с.
3. Лещенко А. И. *Методы расчета сопротивления, создаваемого неприводными клетями в процессе прокатки* / А. И. Лещенко, С. А. Воробей // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3(28). – С. 136–141.
4. Выдрин В. Н. *Динамика прокатных станов* / В. Н. Выдрин. – Свердловск : Металлургиздат, 1960. – 256 с.
5. Выдрин В. Н. *Процесс непрерывной прокатки* / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М. : Металлургия, 1970. – 456 с.
6. Серебренников Г. З. *Определение продольного деформирующего усилия при прокатке-прессовании в четырехвалковом калибре с неприводными валками* / Г. З. Серебренников, Е. Н. Березин, В. Н. Выдрин // *Теория и технология прокатки : сборник научных трудов*. – Челябинск, 1972. – № 102. – С. 124–129.

Лещенко А. И. – мл. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Воробей С. А. – зав. отделом ИЧМ НАН Украины.

ИЧМ НАН Украины – Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Статья поступила в редакцию 11.04.2012 г.