

А.П.Лохматов, А.И.Лещенко, П.В.Токмаков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО ДВУХВАЛКОВЫМИ НЕПРИВОДНЫМИ КЛЕТЯМИ ПРИ ПРОКАТКЕ

Выполнен анализ известных методов для расчета сопротивления, создаваемого двухвалковой неприводной клетью при деформации в ней металла в процессе прокатки. проведены расчеты с определением мощности, затрачиваемой на прокатку в комплексе «приводная – неприводная рабочие клетки». Соавнение полученных значений с экспериментальными данными показали, что разница между ними достигает 10-50%. Сделано вывод о необходимости совершенствования методов расчета с определением сопротивления, создаваемого двухвалковой неприводной рабочей клетью в процессе прокатки.

неприводные рабочие клетки, сопротивление, создаваемое неприводной клетью, метод расчета

Постановка задачи. Одним из путей повышения эффективности производства прокатной продукции является использование в линии непрерывного прокатного стана средств деформации металла с неприводным рабочим инструментом (неприводных рабочих клеток, неприводных деформационно–делительных устройств и др.). Сопротивление, создаваемое неприводной рабочей клетью (НК) при деформации в ней металла, является важным фактором, определяющим условия реализации процесса сортовой прокатки с использованием НК. К настоящему времени известен ряд зависимостей для расчета величины сопротивления, создаваемого НК [1–6]. Эти зависимости получены с использованием разных подходов (энергетического и силового равновесия) и рекомендованы для анализа и описания различных схем деформации в неприводных устройствах (двухвалковые и многовалковые калибры, горячая и холодная прокатка, прокатка–прессование, прокатка–волочение).

Изложение основного материала. В работе [3] приведены следующие выражения для определения сопротивления, создаваемого НК с двухвалковым калибром:

–Зависимость, полученная из условия равновесия сил прокатного вала при двухмерной деформации,

$$\psi_0 = \frac{\sigma_{II}}{\sigma_{НК}} = \frac{1+k_1\delta}{k_1} \frac{1}{\eta} \left(\frac{1}{\eta} - 2 \left(\frac{1}{\eta} \right)^A e^B + 1 \right) \quad (1),$$

где ψ_0 – коэффициент заднего подпора, определяемый отношением напряжения, создаваемого НК при деформации в ней раската, к напряжению текучести деформируемого металла в очаге деформации НК; k_1 – показатель, характеризующий условия трения в валковых опорах НК и на

контакте металла с валком, $k_1 = f_{ur} / f_{\sigma} R$; f_{ur} – коэффициент трения в опорах неприводных валков; r – радиус опор неприводных валков; f_{σ} – показатель сил трения на поверхности касания деформируемого металла и неприводного валка; R – радиус неприводного валка; δ – показатель деформации (загрузки НК), $\delta = 2f_{\sigma} / \alpha_0$; α_0 – угол касания металла и валка

в НК; $\frac{1}{\eta}$ – коэффициент высотной деформации раската в НК, $\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}$; A –

показатель степени, $A = 0,5 + \frac{1}{\delta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)}$; B – показатель степени,

$$B = \frac{\psi_0 + 2}{2\delta}.$$

– Зависимость, полученная из уравнения энергетического баланса процесса прокатки в НК,

$$\psi_0 = \frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_{SHK}} = 2f_{\sigma} \left\{ \frac{R b_{cp}}{h_1 b_1} \frac{\alpha_0 - 2 \frac{b_1}{b_{cp}} q \gamma}{1+i} - \sqrt{\frac{R}{h_1} \left(\arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - 2q \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1} \gamma} \right) + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right]} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{f_{\sigma}} \left(\sqrt{1-k+k^2} \ln \frac{h_0}{h_1} + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left(\frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^2} \right) + \frac{b_{cp} R}{F_1(1+i)} (2\gamma) \right. \quad (2)$$

где F_1 – площадь раската на выходе из НК; i – опережение в НК; h_1, b_1 – размеры раската на выходе из НК; h_{cp}, b_{cp} – средняя высота и ширина полосы в очаге деформации НК; Δh – абсолютное обжатие; q – показатель, характеризующий распределение касательных напряжений в очаге деформации и определяемый отношением среднего значения касательных напряжений в зоне опережения к среднему значению касательных напряжений на всей поверхности контакта; γ – нейтральный угол; n – коэффициент пропорциональности, определяемый отношением уширения полосы и ее обжатия; k – коэффициент распределения деформации, определяемый отношением скоростей линейной деформации в направлениях уширения и обжатия; m – поправочный коэффициент, определяющий интенсивность скорости деформации сдвига, $m = 0,35$; ξ – корректирующий коэффициент.

Выражения для расчета коэффициентов q, n, k , и ξ приведены в работе [7].

Величину нейтрального угла γ в выражении (2) авторы определяют с учетом трения в подшипниковых опорах валков НК [8]

$$\gamma = \frac{\alpha_0}{2} \left(1 + \frac{f_w}{f_\sigma} \frac{r}{R} n_\sigma \right) = \frac{\alpha_0}{2} \left(1 + \frac{f_w}{f} \frac{r}{R} \right),$$

где n_σ – коэффициент напряженного состояния в очаге деформации НК; f – коэффициент трения при установившемся процессе прокатки.

Расчет величины ψ_0 по выражению (1) выполняется методом последовательных приближений (методом итерации), так как оно в явном виде не решается.

Для определения ψ_0 в явном виде, авторы [3] на основе зависимости (1) получили упрощенное выражение (без учета трения в опорах НК)

$$\psi'_0 = 2 \left[\delta \ln \frac{2 \left(\frac{1}{\eta} \right)^A}{\frac{1}{\eta} + 1} - 1 \right]. \quad (3)$$

Согласно данным, приведенным в работе [3], значения величин ψ_0 и ψ'_0 , рассчитанных по выражениям (1) и (3), отличаются на 0,5–30% в зависимости от загрузки НК. Поэтому авторами [3] предложены соответствующие графики, позволяющие определять области использования выражений (1) и (3).

В работе [4] приведено следующее выражение для определения сопротивления, создаваемого НК с двухвалковым калибром:

$$\begin{aligned} \psi_0 = 2f_\sigma \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left\{ 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{\eta} - 1}}{2} \left(1 + \frac{f_w r}{f_\sigma R} \frac{2n_\sigma}{\sqrt{3}} \right) \right] - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\eta} - 1} \right\} + \\ + \frac{2A_1}{\sqrt{3}} + mf_\sigma A_2 + \frac{\rho V_1^2}{2g\sigma_s} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2f_w r \left(1 + \frac{b_0}{b_1} \right) \sqrt{\frac{1}{\eta} - 1} n_\sigma \end{aligned} \quad (4)$$

где коэффициенты A_1 и A_2 рассчитываются по выражениям:

$$\begin{aligned} A_1 = \sqrt{1 - k + k^2} \ln \frac{1}{\eta} - \frac{m}{8} \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right) \left[(1 + k) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\eta} - 1} + \frac{2 - k}{\eta} \sqrt{\frac{1}{\eta} - 1} \right] \sqrt{\frac{h_1}{R} \left[1 + \left(k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2 \right]} \\ + 0,25 \sqrt{1 + \left(k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{h_1}{R} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{m b_0}{2 h_0} \frac{n}{1+n} \left(\left(\frac{1}{\eta} \right)^{1+n} - 1 \right) \quad (6)$$

Обозначения, принятые в выражениях (4–6): h_0, h_1, b_0, b_1 – геометрические размеры раската перед и после НК; f_{ur} – коэффициент трения в валковых опорах НК; r – радиус трения в валковых опорах НК; ρ – плотность металла; g – ускорение силы тяжести; V_1 – скорость раската на выходе из НК.

Выполнив необходимые преобразования, выражение (4) можно привести к виду

$$\begin{aligned} \psi_0 = 2f_\sigma \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left\{ 2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \alpha_0 \right\} + \\ + \frac{2A_1}{\sqrt{3}} + mf_\sigma A_2 + \frac{\rho V_1^2}{2g\sigma_s} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2f_{ur} r \left(1 + \frac{b_0}{b_1} \right) \sqrt{\frac{1}{\eta} - 1} \frac{1}{3Rh_1} n_\sigma \end{aligned} \quad (7)$$

В целом, выражения (4) и (7) верно отражают особенности процесса прокатки в неприводных валках, однако остается вопрос об определении величины нейтрального угла γ , как одного из основных параметров, характеризующих процесс прокатки.

В работах [5,6] для определения коэффициента подпора, создаваемого неприводной рабочей клетью при деформации металла в двухвалковом калибре, предложено следующее выражение

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = \ln \lambda + \frac{fR\alpha_0}{h_2} \left(\frac{1}{\lambda^{0,25} \cos(0,25\alpha_0)} - \frac{1}{\lambda^{0,75} \cos(0,75\alpha_0)} \right) \quad (8)$$

где σ_0 – напряжение подпора, создаваемого НК; σ_s – напряжение текучести металла, деформируемого в очаге деформации НК; λ – коэффициент вытяжки в НК; f – коэффициент трения при установившемся процессе прокатки; h_2 – высота полосы после деформации в НК.

Выражение (8) получено с использованием положений энергетической теории взаимодействия полосы и валков. Авторами использован подход, аналогичный приведенному в работе [1], с некоторыми упрощениями. В частности, при выводе выражения (8) не учитывается неравномерность деформации в очаге деформации НК и деформация сдвига в плоскости входа металла в валки, напряженное состояние металла в очаге деформации, расход энергии на преодоление сил трения на контакте полоса–валок в направлении уширения. Величину нейтрального угла в неприводных валках авторы работ [5,6] при выводе выражения (8) принимают постоянной и равной $\gamma = 0,5\alpha_0$.

С использованием выражений (2), (3), (4) и (8) нами выполнены расчеты мощности, затрачиваемой на прокатку в комплексе ПК–НК. Режимы

деформации при расчете и экспериментальные значения мощности прокатки (базовая мощность прокатки) приняты по данным работы [11].

На рис.1 показаны погрешности расчета мощности, затраченной на прокатку в комплексе ПК–НК, при изменении логарифмического показателя высотной деформации в НК.

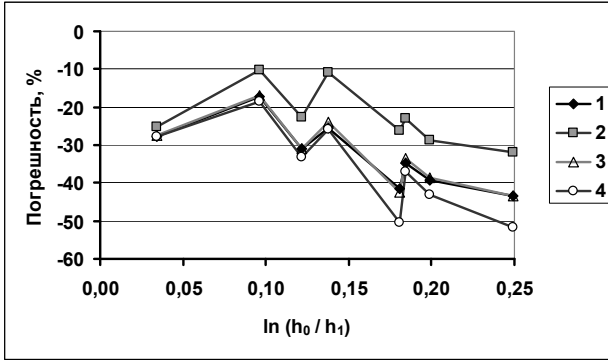


Рис. 1. Погрешности расчета мощности прокатки в комплексе ПК–НК при изменении логарифмического показателя высотной деформации в НК при использовании выражений: 1 – (3); 2 – (2); 3 – (4); 4 – (8)

Из графиков, приведенных на рис.1, можно установить, что с увеличением значений логарифмического показателя высотной деформации в неприводной рабочей клетке, разница между расчетными значениями мощности, определяемыми с использованием выражений (2), (3), (4), (8) и экспериментальными увеличивается (до 30–50%). Определение мощности прокатки с использованием выражения (8) дает наибольшие отклонения от экспериментальных данных.

Наименьшая погрешность расчета мощности прокатки в комплексе ПК–НК достигается при использовании выражения (2).

Выводы. Проведенный анализ известных зависимостей для расчета сопротивления, создаваемого двухвалковой неприводной рабочей клетью при деформации в ней металла, позволил сделать следующие выводы:

1. Выражения, полученные из условия равновесия сил при двухмерной деформации проще, чем выражения, полученные с использованием энергетической теории прокатки, однако они не учитывают ряд факторов, характеризующих процесс прокатки в неприводной рабочей клетке, и поэтому могут использоваться для приближенной оценки силового взаимодействия очагов деформации в системе приводная–неприводная рабочие клетки.

2. Выражения, полученные с использованием положений энергетической теории взаимодействия полосы и валков, имеют общую структуру: они учитывают, что энергия на деформацию металла в неприводных валках, подаваемая в очаг деформации неприводной рабочей клетки посредст-

вом заднего подпора, расходуется на работу деформации, на преодоление трения скольжения на контактной поверхности полоса–валок и на преодоление сопротивления, создаваемого опорами неприводных валков.

3. В выражениях, полученных с использованием положений энергетической теории взаимодействия полосы и валков, для учета влияния трения скольжения на поверхности контакта полоса–валок на величину сопротивления, создаваемого неприводной рабочей клетью, используется величина нейтрального угла γ . Эта величина определяется авторами по разным зависимостям, которые, однако, учитывают только влияние трения в подшипниковых опорах на изменение γ . При этом точность результатов расчета не повышается.

4. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных величин мощности, затрачиваемой на прокатку в комплексе приводная–неприводная рабочие клетки, подтверждают необходимость совершенствования метода расчета сопротивления, создаваемого двухвалковой неприводной рабочей клетью, с учетом особенностей этого процесса деформации (способ подведения мощности в очаг деформации, действительное положение нейтрального угла и пр.).

1. *Серебрянников Г.З.* Определение продольного деформирующего усилия при прокатке–прессовании в четырехвалковом калибре с неприводными валками / Г.З.Серебрянников, Е.Н.Березин, В.Н.Выдрин // Теория и технология прокатки: Сборник научных трудов № 102. – Челябинск, 1972. – С.124–129.
2. *Поляков М.Г.* Деформация металла в многовалковых калибрах / М.Г.Поляков, Б.А.Никифоров, Г.С.Гун // М.: Металлургия, 1979. – 240с.
3. *Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток.* / А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков и др. // Киев: Наукова думка, 1998. – 239с.
4. *Кулаков Л.В.* Разработка основ энергосберегающей технологии непрерывной прокатки сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением» / Кулаков Леонид Васильевич – Днепропетровск, 1998. – 20с.
5. *Фастыковский А.Р.* Теоретическая модель процесса бескалибровой прокатки с использованием резервных сил трения очага деформации / А.Р.Фастыковский, В.Н.Перетяцько // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2003. – №6. – С.18–20.
6. *Фастыковский А.Р.* Новые перспективы бескалиберной прокатки / А.Р.Фастыковский, В.Н.Перетяцько // Производство проката. – 2003. – №6. – С.18–20.
7. *Выдрин В.Н.* Процесс непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин, А.С.Федосиенко, В.И.Крайнов // М.: Металлургия, 1970. – 456с.
8. *Оптимизация энергосиловых параметров непрерывной прокатки сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток: отчет о НИР (заключ.) / Институт черной металлургии НАН Украины; рук. Лохматов А.П.; исполн.: Лохматов А.П. [и др.]. – Днепропетровск, 1995. – 323с. – Библиогр.: с.244–253. – № ГР 0192U007218.*

9. *Мутьев М.С.* О равновесии сил и крутящем моменте для стана дуо с верхним холостым валком / Прокатное производство. Научные труды. Выпуск XXVII. Металлургиздат, 1951г. С.77–100.
10. *Суворов И.К.* Опережение при прокатке в неприводных валках/ Суворов И.К. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1960. – №7. – С.99–102.
11. *Исследование закономерностей формоизменения металла в процессе непрерывной прокатки сортовой стали в двухочаговых рабочих клетях: отчет о НИР (заключ.) / Институт черной металлургии НАН Украины; рук. Лохматов А.П.; исполн.: Лохматов А.П. [и др.]. – Днепропетровск, 1998. – 177с. – Библиогр.: с.143–151. – № ГР 0196U018480.*

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук Л.Г.Тубольцевым*

О.П.Лохматов, О.І.Лещенко, П.В.Токмаков

Визначення опору, що створюється двошвалковими непривідними клітьми при прокатуванні

Виконано аналіз відомих методів для розрахунку опору, який створює двошвалкова непривідна кліть при деформації у ній металу в процесі прокатки. Проведено розрахунки з визначення потужності, що витрачається на прокатування у комплексі «привідна–непривідна робоча кліть». Порівняння отриманих значень з експериментальними даними показало, що різниця між ними досягає 10–50%. Зроблено висновок про необхідність уточнення методів розрахунку з визначення опору, який створює двошвалкова непривідна кліть в процесі прокатування.