

УДК 621.771.252:621.771.06-II К.001.24

Лещенко А. И.  
Воробей С. А.**МЕТОДЫ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО НЕПРИВОДНЫМИ КЛЕТЯМИ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ**

Одним из путей повышения эффективности производства прокатной продукции, в частности, снижения энергозатрат при прокатке, является использование в линии непрерывного прокатного стана средств деформации металла с неприводным рабочим инструментом (неприводных рабочих клетей). Сопротивление, создаваемое неприводной клетью (НК) при деформации в ней металла, является важным фактором, определяющим условия реализации процесса прокатки с использованием неприводных рабочих клетей. К настоящему времени известен ряд методов расчета величины сопротивления, создаваемого НК, которые существенно различаются между собой [1–7].

Целью данной работы является оценка возможности использования этих методов для расчета параметров процесса прокатки с применением неприводных рабочих клетей.

Метод Выдрина-Березина-Серебренникова [1]. На основе энергетической теории взаимодействия полосы и валков, авторы получили выражение для расчета величины продольного деформирующего усилия применительно к процессу прокатки-прессования круглой заготовки в квадратном калибре, образованном четырьмя неприводными валками:

$$T_0 = n\sigma_s F_0 \ln \lambda + 1,6\tau_s R h_k \alpha_0 \left( \frac{\lambda^{0,8}}{\cos(0,2\alpha_0)} - \frac{\lambda^{0,3}}{\cos(0,7\alpha_0)} \right), \quad (1)$$

где  $T_0$  – продольное деформирующее усилие (задний подпор для НК);

$n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации и деформацию сдвига в плоскости входа в валки ( $n = 1,2$  [1]);

$\sigma_s$  – среднее значение напряжения текучести в очаге деформации;

$F_0$  – площадь поперечного сечения заготовки;

$\lambda$  – коэффициент вытяжки;

$\tau_s$  – средняя величина касательных напряжений на контактной поверхности неприводных валков;

$R$  – радиус вала;

$h_k$  – высота калибра;

$\alpha_0$  – угол захвата.

После преобразований, выражение (1) нами представлено в относительных напряжениях:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = n \ln \lambda + 1,6f_\sigma R \alpha_0 \frac{1}{h_k} \left( \frac{1}{\lambda^{0,2} \cos(0,2\alpha_0)} - \frac{1}{\lambda^{0,7} \cos(0,7\alpha_0)} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение заднего подпора;

$f_\sigma$  – показатель сил трения.

Особенности данного метода заключаются в следующем: выражение (1) получено для конкретных условий деформации круглого раската в квадратном четырехвалковом калибре; посредством коэффициента  $n$  учитывается неравномерность деформации в очаге деформации и деформация сдвига в плоскости входа в валки; уширение отсутствует; при иных форме заготовки, форме калибра и числе валков требуется составление нового выражения для определения величины заднего подпора.

Метод Фастыковского-Перетяшко [2–4]. Для определения коэффициента подпора, создаваемого неприводной клетью, авторы получили следующие выражения:

– при деформации металла в четырехвалковом калибре [2]:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = \ln \lambda + \frac{2fR\alpha_0}{h_2} \left( \frac{1}{\lambda^{0,25} \cos(0,25\alpha_0)} - \frac{1}{\lambda^{0,75} \cos(0,75\alpha_0)} \right), \quad (3)$$

– при деформации металла в двухвалковом калибре [4]:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = \ln \lambda + \frac{fR\alpha_0}{h_2} \left( \frac{1}{\lambda^{0,25} \cos(0,25\alpha_0)} - \frac{1}{\lambda^{0,75} \cos(0,75\alpha_0)} \right), \quad (4)$$

где  $h_2$  – высота полосы после деформации в неприводных валках.

Выражение (3) отличается от выражения (4) только наличием дополнительного коэффициента, равного 2, который учитывает, что деформация раската происходит в неприводной клети с четырехвалковым калибром.

Особенности данного метода: выражения (3) и (4) получены с использованием положений энергетической теории взаимодействия полосы и валков, однако с некоторыми упрощениями, что может снизить точность расчетов в сравнении с выражением (1); структурно выражения (3) и (4) аналогичны (1); для случая прокатки в двухвалковом калибре, возникают затруднения в определении величины  $\lambda = F_0 / F_1$ , которая, в свою очередь, зависит от отношения  $\sigma_0 / \sigma_s$ .

Метод Полякова-Никифорова-Гуна [5]. Исходя из решения дифференциального уравнения равновесия элементарного объема, выделенного в очаге деформации, авторы получили формулу для определения напряжения проталкивания раската через многовалковый калибр с холостыми валками [5]:

$$\sigma_0 = \frac{m - \sigma_{T0}}{\delta} \left( \frac{2}{\lambda_\gamma^\delta} - \frac{\mu^\delta}{\lambda_\gamma^{2\delta}} - 1 \right) + \sigma_{Tk} \frac{\lambda^\delta}{\lambda_\gamma^{2\delta}} - \sigma_{T0}, \quad (5)$$

где  $m$  – модуль упрочнения деформируемого металла,  $m = \frac{\sigma_{Tk} - \sigma_{T0}}{\lambda - 1}$ ;

$\sigma_{T0}$ ,  $\sigma_{Tk}$  – напряжение текучести металла на входе и выходе очага деформации;

$\lambda_\gamma$  – коэффициент вытяжки в нейтральном сечении. Величина  $\lambda_\gamma$  определяется по выражениям, приведенным в работе [5];

$\delta$  – показатель деформации,  $\delta = 2f / \alpha_0$ .

Особенности данного метода: выражение (5), как и выражения (2) и (3), получено для условий деформации раската в четырехвалковом калибре с неприводными валками; возможность применения выражения (5) ограничена прокаткой симметричных профилей; авторы не учитывают неравномерность деформации в очаге деформации и деформацию сдвига в плоскости входа в валки.

По выражениям (2), (3) и (5) для условий деформации, аналогичных [1], выполнили расчеты величины сопротивления, создаваемого неприводной клетью с четырехвалковым калибром. Варьирование химическим составом стали, геометрическими, деформационными и температурными параметрами показало, что выражения (2), (3) и (5) качественно правильно отражают влияние этих факторов на процесс прокатки (прессования) в неприводной клети. Вместе с тем, анализ результатов расчетов показал, что величина сопротивления, определяемая по выражению (2), больше на 5–10 %, чем по выражению (3), и на 25–30 %, чем по выражению (5). Это объясняется тем, что в выражениях (3) и (5) не учитывается неравномерность деформации в очаге деформации и деформация сдвига в плоскости входа в валки, а также напряженное состояние металла в очаге деформации.

Таким образом, для процесса деформации в клети с четырьмя неприводными валками целесообразно применять выражение (2), поскольку оно наиболее полно учитывает влияние факторов, характеризующих процесс деформации металла. Однако оно применимо только для условий деформации круглого раската в квадратном четырехвалковом калибре.

Методы Института черной металлургии (ИЧМ). В работе [6] приведены следующие выражения для определения сопротивления, создаваемого НК с двухвалковым калибром.

Зависимость, полученная путем анализа уравнения энергетического баланса в комплексе ПК-НК, имеет вид:

$$\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{SH}} = 2f_{\sigma} \left\{ \frac{R}{h_1} \frac{b_{cp}}{b_1} \frac{\alpha_0 - 2 \frac{b_1}{b_{cp}} q \gamma}{1+i} - \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left( \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - 2q \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1} \gamma} \right) + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[ \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{f_{\sigma}} \left( \sqrt{1-k+k^2} \ln \frac{h_0}{h_1} + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left( \frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left( k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left( k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} \right) + \frac{b_{cp} R}{F_1(1+i)} (2\gamma - \alpha_0) \right\}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{III} / \sigma_{SH}$  – отношение сопротивления, создаваемого неприводной клетью к напряжению текучести деформируемого металла в неприводной клетке;

$F_1$  – 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;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие;

$q$  – показатель, характеризующий распределение касательных напряжений в очаге деформации;

$\gamma$  – нейтральный угол;

$n$  – коэффициент распределения деформации;

$k$  – коэффициент распределения скорости деформации;

$m$  – поправочный коэффициент,  $m = 0,35$ ;

$\xi$  – корректирующий коэффициент.

Выражения для расчета коэффициентов  $q, n, k$ , и  $\xi$  приведены в работе [8].

Зависимость, полученная путем анализа равновесия сил в комплексе ПК-НК:

$$\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{SH}} = \psi_0 = \frac{1+k_1 \delta}{k_1 \frac{1}{\eta}} \left( \frac{1}{\eta} - 2 \left( \frac{1}{\eta} \right)^A e^B + 1 \right). \quad (7)$$

Авторы [6] на основе зависимости (7) получили упрощенное выражение:

$$\psi'_0 = 2 \left( \frac{\delta \ln \frac{2 \left( \frac{1}{\eta} \right)^A}{\frac{1}{\eta} + 1} - 1}{\frac{1}{\eta}} \right), \quad (8)$$

где  $\frac{1}{\eta}$  – коэффициент высотной деформации,  $\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}$ ;

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

Отметим, что значения величин  $\psi_0$  и  $\psi'_0$ , рассчитанных по выражениям (7) и (8), отличаются в 1,1–2 раза [6], поскольку упрощенное выражение (8) не учитывает показатель  $k_1$ , характеризующий условия трения в валковых опорах НК и на контакте металла с валком.

В работе [7] сотрудниками ИЧМ на основе рассмотрения уравнения энергетического баланса в комплексе ПК-НК получены следующие выражения для определения сопротивления, создаваемого НК с двухвалковым калибром:

$$\psi_0 = 2f_\sigma \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left\{ 2 \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{\frac{1}{\eta}-1}}{2} \left( 1 + \frac{f_n r}{f_\sigma R} \frac{2n_\sigma}{\sqrt{3}} \right) \right] - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\eta}-1} \right\} +$$

$$+ \frac{2A_1}{\sqrt{3}} + mf_\sigma A_2 + \frac{\rho V_1^2}{2g\sigma_S} \left( 1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2f_n r \left( 1 + \frac{b_0}{b_1} \right) \sqrt{\frac{1}{\eta}-1} \frac{n_\sigma}{3Rh_1},$$
(9)

где коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  рассчитываются по выражениям:

$$A_1 = \sqrt{1-k+k^2} \ln \frac{1}{\eta} - \frac{m}{8} \left( \frac{1}{\eta} + 1 \right) \left[ (1+k) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\eta}-1} + \frac{2-k}{\frac{1}{\eta}} \sqrt{\frac{1}{\eta}-1} \right] \sqrt{\frac{h_1}{R} \left[ 1 + \left( k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2 \right]} +$$

$$+ 0,25 \sqrt{1 + \left( k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{h_1}{R} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)};$$
(10)

$$A_2 = \frac{m b_0}{2 h_0} \frac{n}{1+n} \left( \left( \frac{1}{\eta} \right)^{1+n} - 1 \right).$$
(11)

Обозначения, принятые в выражениях (9–11):

$h_0, h_1, b_0, b_1$  – геометрические размеры раската перед и после НК;

$f_n$  – коэффициент трения в валковых опорах неприводной клетки;

$r$  – радиус трения в валковых опорах неприводной клетки;

$n_\sigma$  – коэффициент напряженного состояния в очаге деформации неприводной клетки;

$\rho$  – плотность металла;  $g$  – ускорение силы тяжести;

$V_1$  – скорость раската на выходе из НК.

Выражения (6) и (9) учитывают влияние трения скольжения на контактной поверхности очага деформации, работу формоизменения и среза на входе в очаг деформации НК, а также работу на преодоление сил трения в валковых опорах неприводной клетки. В выражении (9) дополнительно учтена работа динамических сил.

Выражение (8) значительно проще, чем (6) и (9), так как оно не учитывает ширины раската, деформируемого в НК, поэтому может использоваться для приближенной оценки силового взаимодействия раската в системе ПК-НК.

Особенности методов для определения сопротивления, создаваемого НК, которые разработаны в ИЧМ: выражения (6) и (9), полученные на основании уравнений энергетического баланса в комплексе ПК-НК, учитывают практически все факторы, влияющие на процесс деформации металла в неприводных валках; выражение (8) значительно проще, чем (6) и (9), однако не учитывает ширину полосы, прокатываемой в НК; возможность использования выражений (6), (8) и (9) для расчета параметров процесса прокатки в комплексе ПК-НК с применением двухвалковых клетей, составляющих основной парк на действующих сортопрокатных станах.

С использованием выражений (4), (6), (8) и (9) были выполнены расчеты мощности, затрачиваемой на прокатку в комплексе приводная-неприводная рабочие клетки (ПК-НК). Режимы деформации при расчете и экспериментальные значения мощности прокатки

(базовая мощность прокатки) приняты по данным работы [9]. На рис. 1 показана зависимость погрешности расчета мощности, затраченной на прокатку в комплексе ПК-НК, от величины логарифмического показателя высотной деформации в неприводной рабочей клетке.

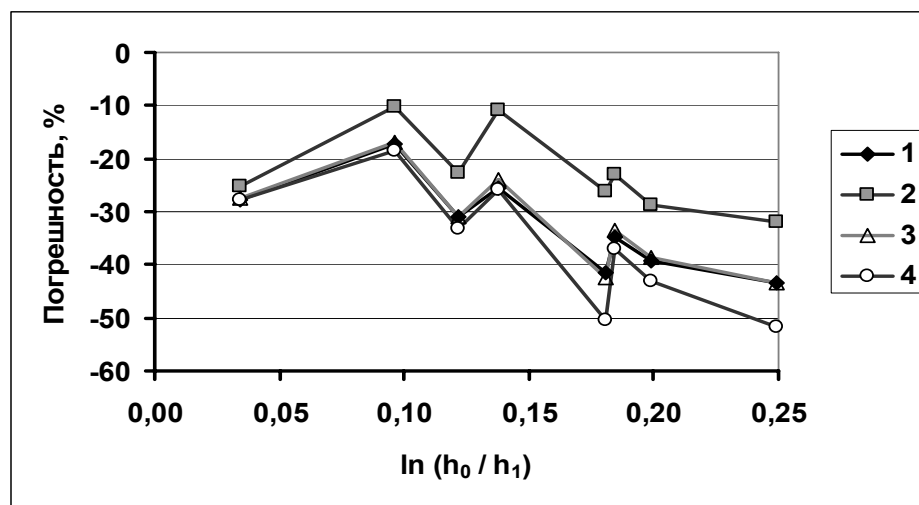


Рис. 1. Зависимость погрешности расчета мощности прокатки в комплексе ПК-НК от показателя высотной деформации при использовании выражений:

1 – (8); 2 – (6); 3 – (9); 4 – (4)

Анализ полученных результатов показал следующее. Величина сопротивления, создаваемого НК, которое определяется по выражению (6), больше, чем величины, определяемые по выражениям (4), (8) и (9) во всем исследуемом интервале. С увеличением значений логарифмического показателя высотной деформации в неприводной рабочей клетке, разница между расчетными значениями мощности, определяемыми с использованием выражений (4), (6), (8), (9) и экспериментальными увеличивается (до 30–50 %). Определение мощности прокатки с использованием выражения (4) дает наибольшие отклонения от экспериментальных данных.

Наименьшая погрешность расчета мощности прокатки в комплексе ПК-НК достигается при использовании выражения (6).

Также анализ результатов позволил выявить следующую особенность. Хотя выражения (6) и (9) получены с использованием энергетической теории взаимодействия валков и прокатываемой полосы, между ними имеются существенные различия. В выражении (6), в отличие от (9), учитывается неравномерность распределения касательных напряжений в очаге деформации показателем  $q$ . Кроме того, в выражение (6) входит величина нейтрального угла в неприводных валках (поскольку в работе [6] нет рекомендаций по определению угла  $\gamma$ , нами при расчетах принято  $\gamma = 0,5\alpha_0$ ).

Выражение (9) не учитывает величину нейтрального угла и неравномерность распределения касательных напряжений. Однако, как видно из зависимостей, приведенных на рис. 1, это снизило точность определения мощности прокатки, в сравнении с использованием выражения (6), в среднем на 10 %.

Необходимо отметить, что расчет сопротивления по выражениям (4), (6), и (9) невозможен без использования экспериментально полученных величин формоизменения деформируемого в комплексе ПК-НК раската. Однако при разработке технологического процесса прокатки с использованием неприводных рабочих клеток требуется предварительное аналитическое определение составляющих выражений (4), (6) и (9), зависящих от соотношения  $\sigma_0/\sigma_s$  ( $b_{0нк}$  и  $b_{1нк}$ ,  $f_\sigma$ ,  $\gamma_{нк}$ ). Рекомендаций или подходов по определению указанных величин в работах [2–4, 6, 7] не приведено.

## ВЫВОДЫ

Проведенный анализ выражений для расчета сопротивления, создаваемого неприводной клетью при деформации в ней металла, позволил сделать следующие выводы.

1. Выражения (2), (3), (5) получены для случая прокатки симметричных профилей в четырехвалковых неприводных калибрах, особенностью которых является отсутствие уширения. Причем, выражение (2) получено для конкретных условий формоизменения (круглая заготовка деформируется в квадратном калибре). При использовании заготовки или калибра с формой, отличной от рассмотренной при выводе выражения (2), требуется, по сути, составление нового выражения с использованием подхода, приведенного в работе [1]. Выражения (3) и (5) не учитывают неравномерность деформации и деформацию сдвига в плоскости входа металла в валки, поэтому они занижают значения сопротивления, создаваемого НК, в сравнении с выражением (2).

2. Выражения (4), (6), (8), (9) получены для случая деформации раската в неприводном двухвалковом калибре. Однако, выражения (6) и (9), равно как и (4), невозможно использовать для расчета сопротивления, создаваемого НК, без экспериментально полученных величин формоизменения раската в неприводной клетке. Выражение (8) не учитывает влияние ширины деформируемой полосы на сопротивление, создаваемое НК, и может быть использовано для приближенных расчетов.

3. Для определения величины сопротивления, создаваемого неприводной клетью, необходимо разработать метод расчета, который не требует предварительного экспериментального определения параметров деформации ( $b_{0нк}$  и  $b_{1нк}$ ,  $f_{\sigma}$ ,  $\gamma_{нк}$ ). При этом в качестве базовой зависимости целесообразно использовать выражение (6).

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Фастыковский А. Р. Неприводные универсальные калибры – новое направление в производстве рельсов / А. Р. Фастыковский, В. Н. Перетяцько // Металлург. – 2002. – № 5. – С. 48–50.
3. 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.
4. Фастыковский А. Р. Новые перспективы бескалиберной прокатки / А. Р. Фастыковский, В. Н. Перетяцько // Производство проката. – 2003. – № 6. – С. 18–20.
5. Поляков М. Г. Деформация металла в многовалковых калибрах / М. Г. Поляков, Б. А. Никифоров, Г. С. Гунн. – М. : Металлургия, 1979. – 240 с.
6. Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей / А. П. Лохматов, С. М. Жучков, Л. В. Кулаков и др. – Киев : Наукова думка, 1998. – 239 с.
7. Кулаков Л. В. Разработка основ энергосберегающей технологии непрерывной прокатки сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением» / Кулаков Леонид Васильевич. – Днепропетровск, 1998. – 20 с.
8. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М. : Металлургия, 1970. – 456 с.
9. 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. – 177 с. – Библиогр.: С. 143–151. – № ГР 0196U018480.

Лешенко 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