

С.М.Жучков, А.А.Горбанев, П.В.Токмаков

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНЫХ УСИЛИЙ МЕЖДУ  
КОМПЛЕКТАМИ ПРИВОДНЫХ И НЕПРИВОДНЫХ ВАЛКОВ  
ТРЕХОЧАГОВОГО ПРОКАТНОГО МОДУЛЯ**

Показан алгоритм расчета продольных усилий в полосе, прокатываемой в трехочаговом прокатном модуле, которая одновременно деформируется в комплектах приводных и неприводных валков.

Трехочаговый прокатный модуль представляет собой две приводных клетки (ПК1 и ПК2), соединенных общим приводом валков, и расположенную между ними неприводную клетку. По сравнению с традиционным расположением оборудования современных станов с непрерывными группами, имеющих клетки с индивидуальным приводом, три клетки, выполненные в виде модуля, более компактны. Модуль клеток, приводная – неприводная – приводная клетки (ПК1–НК–ПК2), обладает меньшей массой оборудования и мощностью электроприводов, занимает меньшую площадь. По сравнению с комплексом приводная – неприводная клетки (ПК–НК), подробно описанным в литературе [1–9 и др.], в модуле используется резерв сил трения как в ПК1, так и в ПК2, поэтому неприводная клетка обладает большей вытяжной способностью.

Для расчета параметров сортовой прокатки при использовании трехочагового прокатного модуля в линии стана либо как автономного деформирующего средства, очень важен правильный учет особенностей силового взаимодействия очагов деформации, образованных комплектами приводных и неприводных валков модуля. Поэтому настоящая работа посвящена разработке адекватного метода аналитического определения продольных усилий, возникающих в модуле в процессе прокатки.

Продольные усилия в модуле определяются совместным решением системы уравнений постоянства секундных объемов для ПК1, НК и ПК2.

Для установившегося процесса прокатки в заполненном трехочаговом модуле удельное продольное усилие между первой приводной и неприводной клетками ( $\sigma_{ПК1-НК}$ ) рассчитываются по уравнению:

$$\sigma_{ПК1-НК} = \frac{\sigma_{НК-НК2} \left[ K_{S_{НК}}^{\Pi} - \frac{D_1 n_{\text{ос}}}{i_1 D_{НК} n_{НК}} (1 + S_{\text{отк1}}) K_{\mu_{НК}}^{\Pi} \right] - \frac{D_1 n_{\text{ос}} (1 + S_{\text{ОПК1}})}{i_1 D_{НК} n_{НК}} + 1}{\frac{D_1 n_{\text{ос}}}{i_1 n_{НК} D_{НК}} \left[ (1 + S_{\text{ОПК1}}) K_{\mu_{НК}}^3 + K_{S_{ПК1}}^{\Pi} \right] + K_{S_{НК}}^3} \quad (1)$$

а между неприводной и второй приводной клетью ( $\sigma_{\text{нк-пк2}}$ ) – по уравнению:

$$\sigma_{\text{нк-пк2}} = \frac{(1 + S_{\text{онк2}}) + \frac{D_{\text{нк}} n_{\text{нк}} i_2}{D_2 n_{\text{дв}}} (\mu_{\text{онк2}} K_{S_{\text{нк}}}^3 \sigma_{\text{пк1-нк}} - \mu_{\text{онк2}})}{\frac{D_{\text{нк}} n_{\text{нк}} i_2}{D_2 n_{\text{дв}}} (K_{\mu_{\text{нк2}}}^3 + K_{S_{\text{нк}}}^{\text{II}} \mu_{\text{онк2}}) + K_{S_{\text{нк2}}}^3}} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) содержат две неизвестных величины –  $\sigma_{\text{пк1-нк}}$  и  $\sigma_{\text{нк-пк2}}$ , поэтому решаются совместно.

Здесь:  $n_{\text{дв}}$  – частота вращения якоря двигателя, приводящего в движение валки ПК1 и ПК2;

$D_1, D_2, D_{\text{нк}}$  – катающие диаметры приводных клеток ( $D_1$  и  $D_2$ ) и неприводной клетки ( $D_{\text{нк}}$ );

$i_1$  и  $i_2$  – передаточное число от электропривода к валкам первой и второй приводной клетки;

$n_{\text{нк}}$  – частота вращения валков неприводной клетки;

$S_{\text{онк1}}$  и  $S_{\text{онк2}}$  – опережение при свободной прокатке в ПК1 и ПК2;

$\mu_{\text{онк2}}$  – коэффициент вытяжки в ПК2 при свободной прокатке;

$K_{S_{\text{нк}}}^{\text{II}}$  и  $K_{S_{\text{нк}}}^3$  – технологические коэффициенты влияния удельных переднего и заднего натяжений на опережение в неприводной клетке;

$K_{\mu_{\text{нк}}}^{\text{II}}$  и  $K_{\mu_{\text{нк}}}^3$  – технологические коэффициенты влияния удельных переднего и заднего натяжений на коэффициент вытяжки в неприводной клетке;

$K_{S_{\text{пк1}}}^{\text{II}}$  – технологический коэффициент влияния удельных переднего натяжения на опережение в первой приводной клетке;

$K_{\mu_{\text{пк2}}}^3$  и  $K_{S_{\text{пк1}}}^3$  – технологические коэффициенты влияния заднего удельного натяжения на коэффициент вытяжки и опережения во второй приводной клетке.

Так как прокатка в НК происходит за счет заднего, переднего или совместного заднего и переднего продольного усилия, то при свободной прокатке  $\mu_{\text{онк}} = 1$  и  $S_{\text{онк}} = 0$ .

Продольные удельные усилия  $\sigma_{\text{пк1-нк}}$  и  $\sigma_{\text{нк-пк2}}$  являются натяжениями между клетями ПК1 – НК и НК – ПК2, поэтому в случае, когда в результате расчета они имеют знак «минус», это означает наличие подпора.

При заполнении модуля металлом, когда передний конец раската не достиг ПК2, уравнение (1) будет иметь вид:

$$\sigma_{\text{ПК1-ПК}} = \frac{1 - \frac{D_1 n_{\text{дв}}}{i_1 D_{\text{НК}} n_{\text{НК}}} (1 + S_{\text{онк1}})}{\frac{D_1 n_{\text{дв}}}{i_1 n_{\text{НК}} D_{\text{НК}}} \left[ (1 + S_{\text{ОПК1}}) K_{\mu_{\text{НК}}}^3 + K_{S_{\text{ПК1}}}^{\text{II}} \right] + K_{S_{\text{НК}}}^3} \quad (3)$$

При освобождении модуля от металла после выхода заднего конца раската из первой приводной клетки уравнение (2) запишется в виде:

$$\sigma_{\text{НК-ПК2}} = \frac{(1 + S_{\text{онк2}}) + \frac{D_{\text{НК}} n_{\text{НК}} i_2}{D_2 n_{\text{дв}}} \mu_{\text{онк2}}}{\frac{D_{\text{НК}} n_{\text{НК}} i_2}{D_2 n_{\text{дв}}} (K_{\mu_{\text{НК}}}^3 + K_{S_{\text{НК}}}^{\text{II}} \mu_{\text{онк2}}) + K_{S_{\text{НК}}}^3} \quad (4)$$

Величины опережения при свободной прокатке в приводных клетях  $S_{\text{онк1}}$  и  $S_{\text{онк2}}$  можно определить известной формулой:

$$S_o = \frac{R}{h_1} \gamma_o^2 C_o, \quad (5)$$

где  $C_o$  – коэффициент, учитывающий влияние ширины раската на опережение при свободной прокатке;

$h_1$  – высота раската на выходе из клетки;

$\gamma$  – нейтральный угол;

Высота ( $h_1$ ) рассчитывается по приведенной полосе, коэффициент  $C_o$  – по графикам или формулам, полученным в работе [10]. Так как при прокатке на сортопробочных станах  $b_{\text{ср}} < 1$ , где  $b_{\text{ср}}$  – средняя ширина полосы,  $l$  – длина очага деформации, то обычно  $C_o < 1,0$ , т.е. опережение при тех же параметрах для узкой полосы будет меньше, чем для широкой. Нейтральный угол при свободной прокатке определяется по уравнению, полученному при условии распределения удельных сил трения по Э. Зибелю и замене дуги некоторой кривой [11]  $h_\gamma = h + R\gamma\alpha$ . Тогда

$$\frac{h_{\gamma_o}}{h} = \eta^{0.5 + \frac{1}{\delta(\eta-1)}} e^{-\frac{1}{\delta}}, \quad (6)$$

где  $\delta$  – коэффициент, равный  $\frac{2f'}{\alpha}$ ;

$\alpha$  – угол захвата;

$f'$  – показатель сил трения, равный  $f' = f \frac{P_{cp}}{\sigma_s}$ ;

$f$  – коэффициент трения;

$\frac{P_{cp}}{\sigma_s}$  – коэффициент напряженного состояния, усредненный в очаге

деформации, рассчитанный по приведенной полосе.

$\eta$  – коэффициент обжатия, равный  $\eta = \frac{h_0}{h_1}$ ,

где  $h_0$  – высота раската на входе в клеть.

Для определения коэффициента вытяжки при свободной прокатке в ПК2  $\mu_{\text{онк2}}$  необходимо рассчитать уширение ( $\Delta b$ ) и затем определить этот коэффициент.

Известно много формул для расчета уширения при сортовой прокатке. Основными из них являются формулы А.И. Целикова [12], Целикова–Гришкова [13], Б.П. Бахтинова [14], С.И. Губкина [15], А.П. Чекмарева [16], М.С. Мутьева [17], Чекмарева – Фирсова [18] и других авторов.

Для оценки возможности использования формул для расчета уширения и затем коэффициента вытяжки были выполнены расчеты по указанным методикам. Моделировались условия прокатки в клетях черновой и двух промежуточных групп непрерывного проволочного стана 150МакМК.

Результаты расчетов сравнивали с экспериментальными значениями уширения, которые были получены в указанных условиях практически без натяжения. Рассчитаны уширения, определены фактические коэффициенты вытяжки по клетям и погрешности по определению коэффициентов вытяжек, рассчитанных по различным методикам.

На основании результатов сравнения расчетных и экспериментальных данных по уширению металла в процессе прокатки разработаны рекомендации по методике определения коэффициентов вытяжки в клетки ПК2 в широком диапазоне изменения размеров раската и других параметров прокатки.

Основную трудность для расчета межклетевых усилий в трехочаговом модуле представляет определение технологических коэффициентов влияния удельного натяжения на опережение и вытяжку в клетях.

Экспериментально влияние различных факторов на технологические коэффициенты определены в работах А.П. Чекмарева, В.П. Гречко, М.Д. Куцыгина, Ю.Т. Батина, М.П. Топоровского и др. [19–22]. Теоретически технологические коэффициенты определены в работах [22–23]. Следует отметить большое различие в значениях технологических коэффициентов, определенных экспериментально. Так, коэффициенты влияния переднего

$K_{S_{ПК1}}^{\Pi}$  и заднего  $K_{S_{ПК2}}^3$  натяжения по Ю.Т. Батину в десятки раз превышает эти величины, определенные М.Д. Куцыгиным и М.П. Топоровским. Это, по-видимому, объясняется различными условиями проведения экспериментов. Например, Ю.Т. Батин прокатывал свинцовые образцы на гладкой бочке с малой скоростью. В.П. Гречко, М.П. Топоровский и др. проводили эксперименты при горячей сортовой прокатке в калиброванных валках на мелкосортном стане 250. У Ю.Т. Батина количественно влияние удельных и задних натяжений на опережение одинаково, различие только в знаках. У М.П. Топоровского и М.Д. Куцыгина влияние переднего натяжения на опережение в 1,5...2,0 раза выше. Разработаны рекомендации по выбору технологических коэффициентов при расчете продольных усилий между клетями модуля по формулам (1)...(4).

### Выводы

Показан алгоритм расчета продольных усилий в полосе, прокатываемой в трехочаговом прокатном модуле, которая одновременно деформируется в комплексах приводных и неприводных валков. Даны рекомендации по выбору технологических коэффициентов при расчете, учитывающих влияние различных факторов на параметры процесса непрерывной прокатки. На основании результатов выполненного анализа разработаны рекомендации по выбору технологических коэффициентов при расчете продольных усилий между клетями модуля.

1. *Непрерывная* прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток. / А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков и др. // Киев: ИЧМ НАН Украины. – 1998. – 240 с..
2. *Лохматов А.П., Жучков С.М., Кулаков Л.В.* Использование резерва втягивающих сил трения в очагах деформации рабочих клеток при непрерывной сортовой прокатке //»Сталь». – 1996. – № 5. – С.27–32.
3. *Исследование* закономерностей изменения энергосиловых параметров процесса деформации металла в функции распределения деформации в клетях комплексов «приводная–неприводная клетки» / С.М.Жучков, А.П.Лохматов, Л.В.Кулаков, Э.В.Сивак // «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 1998. – № 1. – С.35–38.
4. Лохматов А.П., Кулаков Л.В., Жучков С.М. Анализ изменения сопротивления деформации металла в комплексе «приводная – неприводная клеть» при непрерывной сортовой прокатке. / Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – №1. – с. 25–30.
5. Математическая модель и программа расчета на ПЭВМ параметров процесса прокатки в комплексе «приводная–неприводная клетки» /Л.В.Кулаков, А.П.Лохматов, С.М.Жучков и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 4. – С. 39–42.

6. *Анализ характеристик прокатки в непрерывном заготовочном стане с неподвижными вертикальными валками* / Shicano H. Tetst to hagane // Iron and Steel Inst. Jap. – 1993. – 78, № 12. – p. 1802–1809.
7. *Спиридонов Н.П., Куцыгина М.Д.* Влияние исходной ширины полосы на опережение при прокатке в гладких валках / Сб. «Прокатное производство», научн. тр. ИЧМ, т.29// М.: Metallurgia. – 1969. – С.83–89.
8. *Чекмарев А.П., Куцыгин М.Д.* Определение средних удельных давлений при прокатке с натяжением. / Непрерывная прокатка, научн.тр. ИЧМ. // М.: Metallurgia, 1969. – С. 7–15.
9. *Целиков А.И.* Теория расчета усилий в прокатных станах. / М.: Metallurgia, 1962. – С. 494.
10. *Целиков А.И., Гришков А.И.* Теория прокатки. / М.: Metallurgia, 1966. –358с.
11. *Бахтинов Б.П., Штернов М.М.* Калибровка прокатных валков. – М.: Metallurgizdat, 1953, – 783с.
12. *Губкин С.И.* Теория обработки металлов давлением. / М.: Metallurgizdat, 1954 – с.454.
13. *Чекмарев А.П.* Уширение при прокатке. / Научн.тр. ДМетИ, вып. XII. // Киев, Гостехиздат Украина, 1948. – С. 22–27.
14. *Мутьев М.С.* Калибровка черновых валков. / М.: Metallurgia, 1964. – с.190.
15. *Чекмарев А.П., Фирсов П.В.* Уширение при прокатке с углом захвата больше угла трения. / Научн.тр. ИЧМ АНУССР. // Днепропетровск. – 1957. – С. 32–41.
16. *Прокатка на мелкосортных станах* / А.П.Чекмарев, В.П.Гречко, В.В.Гетманец и др. // М.: Metallurgia, 1970. – 363 с.
17. *Чекмарев А.П., Гречко В.П., Куцыгин М.Д.* Влияние натяжения на прокатку в калибрах. / Сб. «Прокатное производство», научн.тр. ИЧМ // М.: Metallurgia, 1965. – С.237–239.
18. *Батин Ю.Т.* Исследование процесса прокатки с натяжением и подпором на гладкой бочке. / «Непрерывная прокатка». Сб. научн. тр. ИЧМ, т. 23 / М.: Metallurgia, 1966. – С.54–57.
19. *Чекмарев А.П., Топоровский М.П.* Взаимосвязь клетей и промежутков между ними при прокатке на непрерывном мелкосортном стане. / «Прокатное производство». Сб. научн. тр. ИЧМ, т. 22. // М.: Metallurgia, 1967. – С.55 – 64.
20. *Чекмарев А.П., Спиридонов Н.П., Куцыгин М.Д.* Аналитическое определение влияния натяжения и различных возмущений на параметры непрерывной прокатки. / Сб. «Прокатное производство». Сб. научн. тр. ИЧМ, т. 35. // М.: Metallurgia, 1971. – С.216–227.

*Статья рекомендована к печати к.т.н., И.Ю.Приходько*