



*In clause the features of interaction mill and condition of realization proces sorter rolled in the three hearth rolling of the module performance by themselves two driving horizontal mill with a general drive and established between them no driving mill are given which, depending on the can rolling of a structure can be of vertical or horizontal execution.*

*С. М. ЖУЧКОВ, А. А. ГОРБАНЕВ, П. В. ТОКМАКОВ, Б. Н. КОЛОСОВ,  
Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины*

УДК 621.771.002.2.083.133

## УСЛОВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХОЧАГОВОГО ПРОКАТНОГО МОДУЛЯ В ПРОЦЕССЕ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

Повышение эффективности процесса непрерывной прокатки — одна из основных задач, всегда сохраняющих актуальность. В Институте черной металлургии НАН Украины разработан процесс сортовой прокатки, предусматривающий использование неприводных клетей (НК), устанавливаемых в межклетевых промежутках непрерывного сортового стана в качестве деформирующих средств. В основу этого процесса положена идея более полного использования резерва сил трения в очагах деформации приводных клетей (ПК). Разработаны теоретические основы процесса прокатки в комплексе ПК–НК, изучены силовое и энергетическое взаимодействие рабочих клетей. Разработана математическая модель этого процесса с учетом граничных условий его осуществимости. В прокатной лаборатории института на стане 250, оборудованном неприводной клетью, выполнен большой объем экспериментальных исследований энергосиловых и деформационных параметров прокатки в комплексе ПК–НК. Впервые показано, что при определенных условиях реализации этого процесса появляется возможность экономии энергии не столько за счет снижения потерь мощности на работу холостого хода и потерь в трансмиссии привода клетей, сколько за счет повышения коэффициента полезного действия самого процесса прокатки [1, 2].

Развитием этого процесса является непрерывная прокатка с использованием трехочаговых прокатных модулей. Трехочаговый модуль представляет собой две приводные клетки (ПК1 и ПК2), имеющие общий привод, между которыми установлена неприводная клеть. Прокатка при установленном процессе в неприводной клетке осуществляется за счет усилия подпора, создаваемого первой приводной клетью, и усилия натяжения, создаваемого второй приводной клетью. Таким образом, в этом процессе для деформации металла в неприводной клетке используется резерв

сил трения двух приводных клетей — предыдущей и последующей, что повышает эффективность процесса прокатки по сравнению с комплексом приводная–неприводная клеть. Неприводная клеть компактна и в зависимости от технологических задач может использоваться в вертикальном, горизонтальном или универсальном исполнении. При использовании неприводной клетки с вертикальным или универсальным калибром исключается необходимость кантовки раската между клетями ПК1 и ПК2 модуля. Общий привод двух приводных клетей трехочагового модуля уменьшает его габариты и требуемые площади при размещении модуля в потоке стана.

Высокая вытяжная способность модуля позволяет сократить количество клетей и уменьшить общую мощность приводов стана. При установке трехочагового модуля (ПК1–НК–ПК2) в линии новых и реконструируемых станов уменьшаются капитальные затраты, появляется возможность увеличения сечения исходных заготовок за счет повышения вытяжной способности стана, а также повышается технологическая гибкость агрегатов, что особенно важно при производстве малотоннажных партий проката. Особенностью взаимодействия клетей трехочагового модуля в линии непрерывного стана является то, что при установленном процессе прокатки мощность, необходимая для осуществления деформации в неприводной клетке, передается как за счет подпора в промежутке ПК1–НК, создаваемого первой приводной клетью, так и за счет натяжения в промежутке НК–ПК2, создаваемого второй приводной клетью. Уровень возможности передачи мощности в очаг деформации НК, а следовательно, степени деформации в этой клетке определяется резервом сил трения, образующегося при прокатке в ПК1 и ПК2. Предельным состоянием процесса прокатки в приводных клетях является пробуксовка валков по поверхности прокатываемого металла.

мого металла при исчерпании резерва сил поверхностного (внешнего) трения в очагах деформации этих клетей.

Таким образом, неприводная рабочая клетя работает в режиме заднего подпора, создаваемого ПК1, и переднего натяжения, создаваемого ПК2. При этом энергия на деформацию металла в неприводной клети подводится через прокатываемую полосу. Предельное состояние процесса прокатки в неприводной клети – потеря продольной устойчивости проталкиваемой полосы на участке ПК1–НК.

К числу основных факторов, определяющих условия реализации и устойчивости процесса прокатки в трехочаговом модуле, относятся наличие резерва сил трения в очагах деформации приводных клетей, а также продольная устойчивость раската в промежутке ПК1–НК. Следует также учитывать возможность разрыва полосы между клетями НК–ПК2 в случае, если удельные натяжения превысят предел текучести прокатываемого металла.

На рис. 1 показана схема прокатки в трехочаговом модуле при заполнении его клетей металлом при установившемся процессе и при выходе раската из модуля.

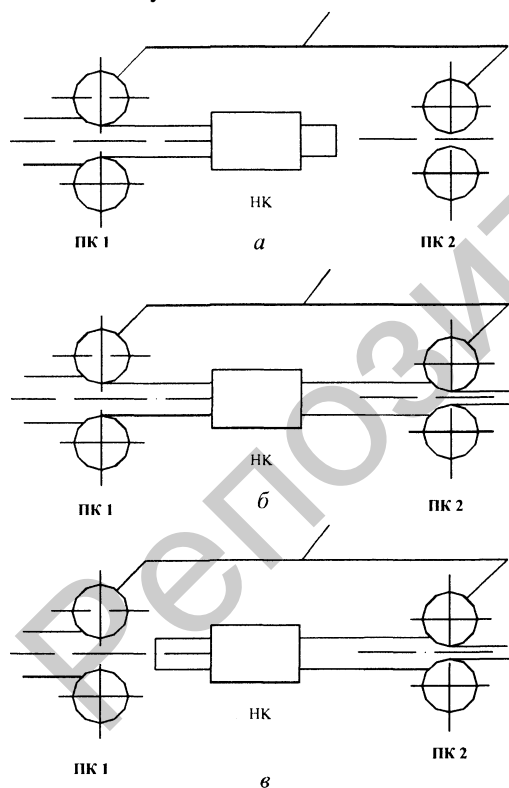


Рис. 1. Схема прокатки в трехочаговом модуле: а – заполнение модуля раскатом; б – установившийся процесс прокатки; в – выход раската из модуля; ПК – приводная клетя; НК – неприводная клетя

Наиболее неблагоприятными условиями прокатки в трехочаговом модуле с точки зрения устойчивости процесса являются заполнение модуля металлом и прокатка заднего конца раската (рис. 1, а, в) при освобождении модуля.

Для разработки параметров технологии прокатки при подстановке исходных данных для проектирования трехочагового модуля, используемого в промежуточных группах проволочных и мелкосортных станов, необходимо определить:

- максимальные усилия подпора в промежутке ПК1–НК, обеспечивающие устойчивость процесса прокатки в первой приводной и неприводной клетях по критериям устойчивости раската продольному изгибу в этом межклетьевом промежутке и резерву сил трения в ПК1;
- максимальные натяжения в промежутке НК–ПК2, обеспечиваемые резервом сил трения в очаге деформации второй приводной клети;
- усилия и моменты прокатки в ПК1 и ПК2 и усилия в неприводной клети;
- рациональные геометрические параметры трехочагового модуля (расстояния между клетями, диаметры валков, скорости прокатки, способ установки НК и др.).

Для повышения продольной устойчивости раската при прокатке в трехочаговом модуле и увеличения его деформирующей способности расстояние между ПК1 и НК должно быть сведено к минимуму. В этом случае будет обеспечена высокая устойчивость раската продольному изгибу в промежутке ПК1–НК.

Для оценки устойчивости раската продольному изгибу в промежутке ПК1–НК в момент прокатки переднего конца раската до захвата его клетью ПК2, т.е. когда сопротивление, создаваемое неприводной клетью преодолевается только за счет заднего подпора, был использован приведенно-модульный подход, принятый в теории деформируемых систем [3]. Он основан на анализе устойчивости нелинейно-упругих систем, по которому для расчета критических усилий в уравнении Эйлера используют приведенный модуль упругости при данной температуре  $E_{пр}$ , в основу которого положены выводы Энгессера-Кармана при упругопластическом изгибе толстых коротких стержней.

С учетом условий защемления раската в очагах деформации клетей межклетьевого промежутка ПК1–НК модуля уравнение для определения относительного критического напряжения в этом случае имеет вид

$$\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{\tau}} = \frac{4}{\left(1 + \frac{K_L L}{\pi \rho_i} \sqrt{\frac{\sigma_{\tau}}{E_i}}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{кр}$  – критическое напряжение текучести металла;  $\sigma_{\tau}$  – предел текучести металла;  $K_L$  – коэффициент приведения длины, учитывающий условия защемления раската в очагах деформации клетей;  $L$  – длина стержня;  $E_i$  – модуль упругости металла при данной температуре;  $\rho_i = \sqrt{I_{мин} / F}$ ;

$\rho_i$  – радиус инерции сечения раската;  $I_{\min}$  – минимальный момент инерции сечения раската;  $F$  – площадь раската.

Для получения зависимости критического напряжения, возникающего в межклетьевом промежутке ПК1–НК при установке трехочагового модуля в промежуточных и чистовых группах стана от расстояния между этими клетями с использованием выражения (1), выполнены расчеты устойчивости раската продольному изгибу в межклетьевом промежутке ПК1–НК трехочагового модуля.

Размеры исходного сечения на входе в модуль 25x25 мм, материал – сталь 3, температура прокатки – 1100°C, скорость раската на входе в модуль – 9 м/с. Расчеты выполнены для наиболее неблагоприятного с точки зрения устойчивости продольному изгибу случая, когда происходит заполнение модуля металлом, и передний конец раската не вошел во вторую приводную клеть, т.е. раскат жестко закреплен одним концом в ПК1, а второй конец свободен. В этом случае коэффициент приведения длины  $K_L$  равен 2. Варьировали значения коэффициента обжатия

$\eta = \frac{h_0}{h_1}$  в пределах 1,1–1,6 и длину межклетьевого промежутка ПК1–НК модуля в пределах 0,5–4,0 м. Модуль упругости при данной температуре  $E_t$  принят по литературным данным. Радиусы валков приводной клетки  $\ell$  – 110 мм, неприводной – 100 мм, что соответствует радиусам валков, используемым в клетях промежуточных и чистовых групп. Предел текучести металла определен для скорости деформации  $U_{cp} = 10^{-1}$  1/с, соответствующей испытаниям на растяжение. Принято также, что при прокатке металла в ПК1 и в последующем межклетьевом промежутке произошло разупрочнение горячего металла за счет динамической и статической рекристаллизации, т.е. принят неблагоприятный случай, когда  $\sigma_t$  минимально. Влияние выводной из ПК1 и вводной в НК арматуры, повышающей продольную устойчивость раската в этом промежутке, не учитывалось.

Расчеты показали, что с увеличением межклетьевого расстояния от 0,5–4,0 м радиус инерции сечения раската ( $\rho_i$ ) снижался с 6,3 до 3,8 мм, а гибкость раската ( $\lambda$ ) возрастала. При малых значениях гибкости, соответствующих расстоянию  $L=0,5$  м, устойчивость раската продольному изгибу увеличивается. Чем больше коэффициент обжатия  $\eta$  при заданной начальной высоте  $h_0=25$  мм, тем меньше  $\sigma_{кр}$  и устойчивость раската продольному изгибу (рис. 2).

Другим граничным условием реализации процесса прокатки в трехочаговом модуле является полное исчерпание резерва сил трения в очагах деформации ПК1 и ПК2. Показателем полного исчерпания резерва сил трения при двухзонном

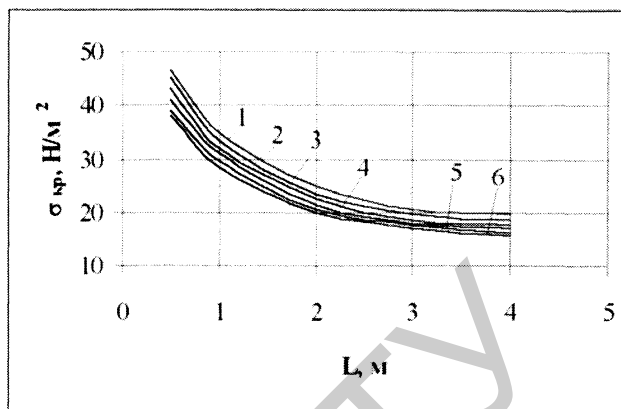


Рис. 2. Зависимость критического напряжения  $\sigma_{кр}$  продольного изгиба от длины межклетьевого расстояния ПК1–НК и коэффициента обжатия  $\eta$  в ПК1: 1 –  $\eta_{ПК1}=1,1$ ; 2 – 1,2; 3 – 1,3; 4 – 1,4; 5 – 1,5; 6 – 1,6

очаге деформации является нулевое значение

нейтрального угла  $\gamma$ , т.е.  $\frac{h_y}{h_1} = 1$ .

В качестве допущений известно, что за пределами модуля, перед ПК1 и после ПК2, отсутствуют межклетьевые усилия, т.е. первая приводная и предшествующая ей клеть стана, а также вторая приводная и последующая клеть стана работают в согласованном режиме, когда  $\psi_{0ПК1} = 0$ . Принимая

$\frac{h_y}{h_1} = 1$ , определяем резерв сил трения в ПК1, т.е.

максимальное усилие подпора после клетки ПК1, которое определяется полным исчерпанием резерва сил трения, а дальнейшее увеличение подпора приводит к пробуксовке металла в валках ПК1 [4].

Максимальное усилие подпора, определяющее полное исчерпание резерва сил трения в очаге деформации ПК1, находим следующим образом:

$$-\psi_{1ПК1} = -\frac{\sigma_{1\max,ПК1}}{2K_{ПК1}} = \frac{\delta_{ПК1}(\eta_{ПК1} - 1) + 2}{\eta_{ПК1} - 1} \ell \eta_{ПК1} - 2. \quad (2)$$

В выражении (2) знак «-» перед  $\psi_1$  означает «подпор».

На рис. 3 показана максимальная величина напряжения подпора по резерву сил трения в ПК1 в зависимости от коэффициента обжатия  $\eta$  в ПК1. Расчеты выполнены в соответствии с параметрами деформации, приведенными в таблице.

Сравнение полученных значений резерва сил трения в ПК1 с критическими напряжениями продольному изгибу показывает, что при расстоянии между ПК1 и НК, равном 0,5 м и коэффициенте обжатия  $\eta_{ПК1}=1,1$ , резерв сил трения в очаге деформации приводной клетки исчерпается раньше, чем произойдет потеря раскатом продольной устойчивости ( $\sigma_{кр} > \sigma_{1\max}$ ). При  $\eta_{ПК1} > 1,1$  потеря продольной устойчивости произойдет раньше, чем исчерпается резерв сил трения в ПК1. При межклетевых расстояниях, больших 0,5 м,

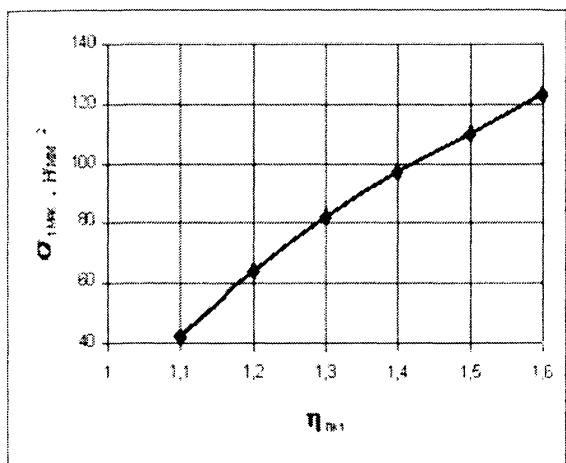


Рис. 3. Зависимость напряжения, создаваемого резервом сил трения (напряжение подпора) в первой приводной клетке трехочагового модуля от коэффициента обжатия в этой клетке

для всех значений коэффициента обжатия в приводной клетке ( $\eta_{пк1}=1,1-1,6$ ) всегда  $\sigma_{1max} > \sigma_{кр}$ .

С учетом принятого допущения о том, что вторая приводная клетка модуля – последующая клетка стана также работают в согласованном

скоростном режиме ( $\psi_2=0$ ) и  $\frac{h_1}{h_2}=1$  получили

максимальное значение коэффициента заднего натяжения  $\psi_{0max}$ , при котором резерв сил трения в ПК2 будет исчерпан:

$$\psi_{0пк2} = \frac{\delta_{пк2} (\eta_{пк2} - 1) + 2}{\eta_{пк2} - 1} \ln \eta_{пк2} - 2, \quad (3)$$

где  $\eta$  – коэффициент обжатия в ПК2;

$\delta_{пк2} = \frac{2\alpha_{пк2}}{f_{\sigma_{пк2}}}$  – коэффициент, рассчитанный для

ПК2;  $f_{\sigma_{пк2}}=0,35$ .

### Параметры очага деформации первой приводной клетки трехочагового модуля

$\eta_{пк1}$	Обжатие, $\Delta h$ , мм	Длина очага деформации $l$ , мм	Угол захвата $\alpha$ , рад	Степень деформации $\epsilon$	$\delta$	Скорость деформации $U$ , 1/с	Сопротивление деформации $2K$ , Н/мм <sup>2</sup>	Максимальные напряжения подпора по резерву сил трения в ПК1	
								$\sigma_{1max}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_{1max}}{2K}$
								абсолют.	относит.
1,1	2,3	15,9	0,144	0,092	4,86	52,0	112,0	40,4	0,361
1,2	4,2	21,5	0,195	0,168	3,58	70,3	137,5	64,8	0,471
1,3	5,8	25,3	0,220	0,232	3,18	82,5	151,4	87,5	0,560
1,4	7,2	28,1	0,255	0,288	2,74	92,1	162,1	97,3	0,620
1,5	8,4	30,4	0,276	0,336	2,53	99,5	170,7	109,9	0,644
1,6	9,3	32,1	0,292	0,374	2,39	105,0	178,1	122,7	0,689

При расчете диаметр валков и показатель сил трения в ПК2 были приняты такими же, как и в первой приводной клетке [5].

Ниже приведены разработанные исходные данные для проектирования трехочагового модуля, предназначенного для установки в линии современного непрерывного сортового стана.

Расстояние между осями ПК1 и НК – 300–500 мм, между НК и ПК2 – 1000 мм. В первую приводную клетку задается раскат квадратного или круглого сечения площадью ~625 мм<sup>2</sup>. Прокатываются образцы из углеродистой стали с содержанием углерода 0,1–0,8%, температура прокатки 900–1100°C. Максимальная вытяжка в модуле 2,2. На выходе из ПК2 образцы могут иметь квадратное, прямоугольное, круглое или овальное сечение.

Скорость раската на выходе из модуля находится в пределах 5–10 м/с и регулируется изменением частоты вращения якоря электропривода. Клетки модуля выполняются с консольным расположением валков (по типу клетей вторых промежуточных групп станов 150 Макеевского, Криво-

рожского металлургических комбинатов и Белорусского металлургического завода). Валки дисковые, с максимальным диаметром валков в ПК1 и ПК2 – 250 мм, в НК – 200 мм, ширина дисковых валков – 100 мм. Необходимо предусмотреть радиальную регулировку межвалковых зазоров в пределах: в ПК1 – 10–20 мм, в НК – 10–25 мм, в ПК2 – 5–20 мм.

Соотношение частот вращения валков при максимальном их диаметре

$$\frac{n_{впк2}}{n_{впк1}} = 1,6,$$

где  $n_{впк2}$  – частота вращения валков в ПК2, с<sup>-1</sup>;  $n_{впк1}$  – частота вращения валков в ПК1, с<sup>-1</sup>.

По результатам расчетов максимальные усилия и моменты прокатки в модуле для указанных условий составили:

	ПК1	НК	ПК2
$P$ , кН	200	100	120
$M$ , кН·м	30	–	25

Между ПК1 и НК, НК и ПК2 должна быть установлена проводковая арматура. Прокатка в промежутке клетей ПК1 – НК происходит с подпором, обеспечивающим заданную деформацию металла в НК, а в промежутке НК – ПК2 – с натяжением, обеспечивающим деформацию заднего конца раската в НК после выхода его из ПК1.

Оси дисковых валков изготавливаются из хромомолибденовой стали, а валковые диски – из чугуна с шаровидным графитом твердостью 50–55 ед. по Шору или с пластинчатым графитом твердостью 50–70 ед. по Шору. Валковые диски охлаждаются водой под давлением 0,3 МПа.

Перспективы применения трехочаговых прокатных модулей следующие. На современных высокоскоростных сортовых и проволочных станах их целесообразно использовать как дополнительное деформирующее средство, позволяющее улучшать технологические возможности действующего оборудования, например, увеличение вытяжных особенностей непрерывных групп без установки новых клетей, расширение сортамента стана, особенно при изменении сечения исходной заготовки.

Кроме того, трехочаговые прокатные модули можно устанавливать на небольших сортовых станах как самостоятельное деформирующее средство при выпуске малотоннажных партий проката.

#### Выводы

1. Изучены особенности взаимодействия клетей и условия реализации процесса сортовой прокатки в трехочаговом прокатном модуле, представляющем собой две приводные клетки, имеющие общий привод, между которыми установлена неприводная клеть. Неприводная клеть компактна и в зависимости от технологических задач может использоваться в вертикальном, горизонтальном или универсальном исполнении.

2. Определено максимальное напряжение, не приводящее к потере продольной устойчивости

для различных температур и коэффициентов гибкости, зависящих от площади и формы сечения раската, длины стержня и предела текучести металла, при этом в расчетах принят наиболее неблагоприятный случай закрепления концов стержня. Расчеты продольной устойчивости раската выполнены для параметров прокатки в трехочаговом модуле, предназначенном для установки в промежуточных группах проволочных станов и в начале чистой группы мелкосортных станов. По результатам расчетов определено максимальное с точки зрения продольной устойчивости раската расстояние между осями валков первой приводной и неприводной клетями.

3. Резерв сил трения в приводных клетях, определяющий степень деформации и возможную вытяжку в неприводной клетке, рассчитан из условия, когда исчерпываются зоны опережения в ПК1 и ПК2 и нейтральные углы в очагах деформации этих клетей становятся равными нулю.

4. Полученные данные будут использоваться для проектирования трехочаговых модулей.

#### Литература

1. Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей / А.П. Лохматов, С.М. Жучков, Л.В. Кулаков и др. Киев: Наукова думка. 1998.
2. Жучков С.М., Лохматов А.П., Беклемешев Ю.М. Экспериментальные исследования технологий прокатки балочных профилей с использованием неприводных универсальных клетей // Черная металлургия. Бюл. Ин-та «Черметинформация». 1992. № 5. С. 27–30.
3. Жучков С.М., Лохматов А.П., Кулаков Л.В. Продольная устойчивость раската при прокатке балочных профилей с использованием неприводных универсальных клетей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1995. № 2. С. 31–33.
4. Продольная устойчивость раската в межклетьевом промежутке непрерывного сортового стана / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, В.А. Теряев и др. // Ин-т черной металлургии. Днепропетровск. 1988. Деп. в ВИНТИ. 1989. № 4916.
5. Жучков С.М., Лохматов А.П., Кулаков Л.В. Выбор методики оценки сопротивления раската продольному изгибу перед неприводной клетью при непрерывной прокатке сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей // Металл и литье Украины. 1995. № 7, 8. С. 45–49.