

**С.М. Жучков, А.А. Горбанев, П.В. Токмаков,
А.П. Киселев, Б.Н. Колосов**

ПРЕДЕЛЫ ОСУЩЕСТВИМОСТИ ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ В ТРЕХОЧАГОВОМ ПРОКАТНОМ МОДУЛЕ

Приведены особенности взаимодействия клетей и пределы осуществимости процесса сортовой прокатки в трехочаговом прокатном модуле, представляющего собой две приводные горизонтальные клетки с общим приводом и установленную между ними неприводную клетку, которая, в зависимости от прокатываемого профиля может быть вертикального или горизонтального исполнения.

В Институте черной металлургии (ИЧМ) НАН Украины разработан процесс сортовой прокатки, предусматривающий использование неприводных клетей (НК), устанавливаемых в межклетевых промежутках линии 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, что особенно важно при прокатке малотоннажных партий проката [1–3].

В отличие от комплекса приводная клетка – неприводная клетка (ПК–НК), разработанного ИЧМ, трехочаговый модуль представляет собой две приводные клетки, имеющих общий привод, между которыми установлена неприводная клетка. Прокатка при установившемся процессе в неприводной клетке осуществляется за счет усилия подпора, создаваемого первой приводной клетью, и усилия натяжения, создаваемого второй приводной клетью. Таким образом, в отличие от процесса ПК–НК, для деформации металла в неприводной клетке используется резерв сил трения двух приводных клетей, что повышает эффективность процесса прокатки

по сравнению с комплексом приводная – неприводная клеть. Неприводная клеть компактна, может быть установлена на станине первой приводной клетки, как в вертикальном, так и в горизонтальном исполнении. При установке неприводной клетки с вертикальными валками исключается необходимость кантовки раската между клетями ПК1 и ПК2. Общий привод двух приводных клеток трехочагового модуля уменьшает его габариты и требуемые площади при размещении модуля в потоке стана. Высокая вытяжная способность модуля позволяет сократить количество клеток и уменьшить общую мощность приводов стана. При установке трехочагового модуля (ПК–НК–ПК) 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 клеток трехочагового модуля в линии непрерывного стана является то, что при установившемся 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, интенсивности 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 при исчерпании резерва сил поверхностного (внешнего) трения в очагах деформации этих клеток.

Неприводная рабочая клетка работает в режиме заднего подпора, создаваемого ПК1, и переднего натяжения, создаваемого ПК2, энергия на деформацию металла в неприводной клетке подводится через прокатываемую полосу. Предельное состояние процесса прокатки в неприводной клетке – потеря продольной устойчивости проталкиваемой полосы на участке ПК1–НК.

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

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

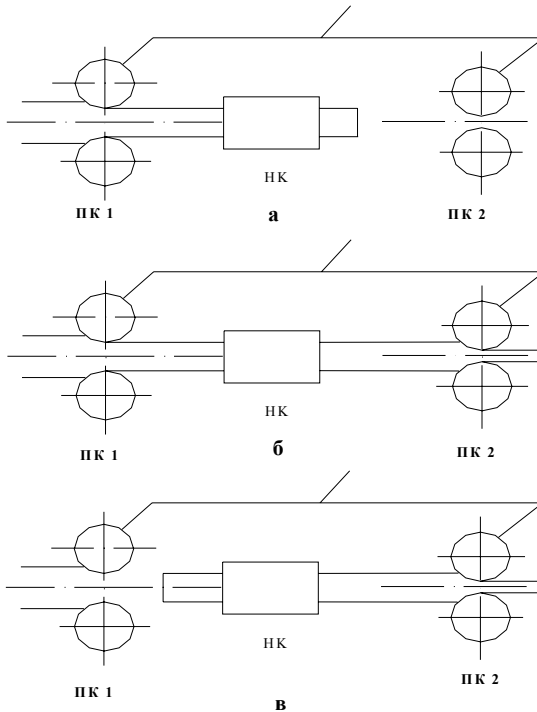


Рис. 1 – Схема прокатки раската в трехочаговом модуле. а) заполнение модуля металлом; б) установившийся процесс прокатки; в) выход раската из модуля; ПК – приводная клеть; НК – неприводная клеть

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

Таким образом, для разработки параметров технологии прокатки при использовании исходных данных для проектирования трехочагового модуля, 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 продольного изгиба в межклетьевом промежутке и резерва сил трения в ПК1;

– максимальные натяжения в промежутке НК–ПК2, обеспечиваемые резервом сил трения в очаге деформации второй приводной клетки;

– усилия и моменты прокатки в ПК1 и ПК2 и усилия в неприводной клетки;

– 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 повышения его деформирующей способности расстояние между ПК1 и НК должно быть как можно меньше. В этом случае, несмотря на возникновение пластических деформаций еще в стадии простого сжатия, т.е. до потери продольной устойчивости, раскат в промежутке ПК1–НК сохраняет особенности поведения, связанного с явлением продольной устойчивости.

Для разработки методики оценки сопротивления 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. Он основан на анализе устойчивости нелинейно–упругих систем, по которому для расчета критических усилий в уравнении Эйлера используют приведенный модуль упругости, при данной температуре $E_{кр}$, в основу которого положены выводы Энгессера–Кармана при упруго–пластическом изгибе толстых коротких стержней [4,5].

С учетом условий защемления раската в очагах деформации клеток рассматриваемого межклетьевого промежутка уравнение для определения критического напряжения при этом подходе, имеет вид:

$$\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_T} = \frac{4}{\left(1 + \frac{K_L L}{\pi \rho_i} \sqrt{\frac{\sigma_T}{E_1}}\right)^2}, \quad (1)$$

где K_L – коэффициент приведения длины, учитывающий условия защемления раската в очагах деформации клеток; L – длина стержня; σ_m – предел текучести; E_1 – модуль упругости металла при данной температуре.

Используя выражение (1), выполнен расчет устойчивости раската в межклетьевом промежутке ПК1–НК трехочагового модуля для стали 3.

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, выполнены расчеты процесса прокатки при размерах исходного сечения на входе в модуль 25x25 мм, материал – сталь 3, температура прокатки – 1100°С, 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 свободный. В этом случае коэффициент приведения длины K_L равен 2. Варьировались значения коэффициента обжатия $\eta = \frac{h_0}{h_1}$ в пределах 1,1...1,6 и длина межклетьевого промежутка

ПК1–НК в пределах 0,5...4,0 м. Модуль E принят по литературным данным. Радиусы валков приводной клетки R равен 110мм, неприводной – 100мм, что соответствует радиусам валков, используемым в клетях промежуточных и чистовых групп. Предел текучести 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 разрушение горячего металла за счет динамической и статической рекристаллизации, т.е. принят неблагоприятный случай, когда σ_T минимально. Не учитывали также влияние выводной из ПК1 и вводной в НК арматуры, повышающей продольную устойчивость раската в этом промежутке.

Расчеты показали, что с увеличением межклетьевого расстояния от 0,5...4,0м радиус инерции снижался от 6,3 до 3,8мм, а гибкость раската возрастала. При малых значениях гибкости, соответствующих расстоянию между ПК1 и НК $L=0,5$ м, сопротивление продольному изгибу увеличивается. Чем больше коэффициент обжатия η при заданной начальной высоте $h_0=25$ мм, тем меньше σ_{cp} и сопротивление продольному изгибу.

При межклетьевом промежутке, равном 0,5..1,0м раскат, с исходным сечением 25x25мм и более, не потеряет продольной устойчивости во всем диапазоне степеней деформации, применяемом в промежуточных проволочных и чистовых группах мелкосортных станов. Исключение могут составить случаи прокатки на мелкосортных станах мелких профилей, например, круглых и периодических профилей диаметром 10...12мм при $L \approx 1,0$ м и более. В этом случае трехочаговый модуль следует устанавливать в начале чистовой группы или в конце промежуточной группы. При увеличении межклетьевого расстояния ПК1–НК до 2м и более, критические напряжения $\sigma_{кр}$, определяющие

предел продольной устойчивости раската невелики и возможен изгиб раската даже при малом коэффициенте обжатия $\eta_{\text{ПК1}} \leq 1,2$.

Граничными условиями 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 очаге деформации является нулевое значение нейтрального угла γ , т.е. $\frac{h\gamma}{h_1} = 1,0$.

Первая приводная и предшествующая ей клетки работают в согласованном режиме, когда $\Psi_{\text{онк1}} = 0$. Принимая $\frac{h\gamma}{h_1} = 1$, определяли резерв сил трения в ПК1, т.е. максимальное усилие подпора после клетки ПК1, которое находится на границе полного исчерпания резерва сил трения, дальнейшее увеличение подпора приводит к пробуксовке металла в валках ПК1.

При сортовой прокатке $\frac{P_{cp}}{2K}$ находится в пределах 1,1...1,3. Тогда, рассчитав коэффициент трения f по Эжелунду и приняв $\frac{P_{cp}}{2K} = 1,2$, получили значение показателя сил трения $f_{\sigma} = 0,35$.

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

$$-\psi_1 = -\frac{\sigma_1 \max}{2K} = \frac{\delta(\eta - 1) + 2}{\eta - 1} \ln \eta - 2 \quad (2)$$

В уравнении (2) знак «-» перед ψ_1 означает «подпор».

На рис.2 показана максимальная величина коэффициента подпора и напряжения подпора по резерву сил трения в ПК1 в зависимости от коэффициента обжатия η в ПК1 (размеры исходного сечения 25x25мм, сталь 3, скорость прокатки 9 м/с, температура раската 1000⁰С, диаметр валков 29,0мм). Расчеты выполнены в соответствии с параметрами деформации, приведенными в табл.1.

Сравнение полученных значений резерва сил трения в ПК1 с критическими напряжениями продольному изгибу показывает, что при малом расстоянии между ПК1 и НК равном 0,5м и коэффициенте обжатия $\eta_{\text{ПК1}} = 1,1$ резерв сил трения в очаге деформации приводной клетки исчерпается раньше, чем возникнет потеря продольной устойчивости ($\sigma_{кр} > \sigma_1 \max$). При $\eta_{\text{ПК1}} > 1,1$ потеря продольной устойчивости произойдет раньше, чем исчерпается резерв сил трения в ПК1. При межклетевых расстояниях, больших 0,5м, для всех значений коэффициента обжатия в приводной клетки ($\eta_{\text{ПК1}} = 1,1 \dots 1,6$) всегда $\sigma_1 \max > \sigma_{кр}$.

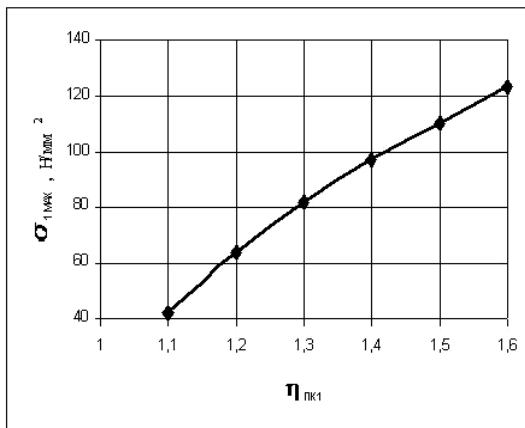


Рис. 2 – Зависимость напряжения, создаваемого резервом сил трения (напряжение подпора) в первой приводной клетки трехочагового модуля от коэффициента обжатия в этой клетки

Таблица 1. Параметры очага деформации первой приводной клетки трехочагового модуля

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

Принимая, что вторая приводная и последующая клетки также работают в согласованном скоростном режиме ($\psi_2 = 0$) и $\frac{h_\gamma}{h_2} = 1$, получили

максимальное значение коэффициента заднего натяжения $\psi_o \max$, при котором резерв сил трения в ПК2 будет исчерпан:

$$\psi_o = \frac{\delta(\eta - 1) + 2}{\eta - 1} \ln \eta - 2, \quad (3)$$

где η – коэффициент обжатия в ПК2;

$$\delta = \frac{2\alpha}{f_\sigma} - \text{коэффициент, рассчитанный для ПК2.}$$

При расчете диаметр валков и показатель сил трения в ПК2 были приняты такими же, как и в первой приводной клетки.

Максимальное заднее натяжение ($\frac{\sigma_{o \max}}{2R}$ и $\sigma_{o \max}$)

рассчитано после выхода заднего конца раската из ПК1, т.е. без учета взаимодействия межклетевых усилий в промежутках ПК1–НК и НК–ПК2. В этом случае деформация металла в неприводной клети осуществляется только за счет натяжения, создаваемого второй приводной клетью, т.е. происходит проволакивание металла во вращающихся неприводных валках НК.

Следует отметить, что площадь поперечного сечения на входе в ПК2 меньше, чем на выходе из ПК1, на величину вытяжки в неприводной клети, поэтому величина полного переднего подпора в промежутке ПК1–НК будет больше, чем величина полного натяжения перед ПК2, что следует учитывать при проектировании клеток модуля.

Нестационарными режимами работы трехочагового модуля являются процессы заполнения модуля до захвата переднего конца раската второй приводной клетью и освобождения модуля от металла, когда задний конец вышел из первой приводной клети. В этих режимах резерв сил трения в приводных клетях используется в максимальной степени.

Анализ результатов расчетов также показал, что с увеличением K_1 и уменьшением загрузки НК (уменьшением отношения $\alpha_{\text{НК}}/f_{\sigma}$ влияние трения в опорах НК на требуемое для проталкивания раската через НК возрастает. С увеличением загрузки НК влияние трения в подшипниковых опорах ее валков на ψ_0 уменьшается. Влияние параметра $f_{\sigma}^2 \frac{R_{\text{НК}}}{h_{1\text{НК}}}$

несущественно в диапазоне изменения $K_1=0,01 \dots 0,05$, характерном для неприводных клеток с опорами валков на подшипниках качения, используемых при горячей прокатке без смазки в некалиброванных валках при любой, возможной по условиям реализации процесса прокатки в комплексе ПК1–НК, устойчивости раската продольному изгибу перед неприводной клетью и резерву сил трения в очаге деформации ПК1. С уменьшением загрузки неприводной клети отношение ψ_0/ψ_0' возрастает, причем интенсивность возрастания наиболее высока при $\alpha_{\text{НК}}/f_{\sigma}$ менее 0,3.

С целью упрощения расчетов сопротивления, создаваемого НК с учетом сил трения в подшипниковых опорах НК были построены графики, позволяющие определять отношение ψ_0/ψ_0' и затем рассчитывать усилие подпора.

Кроме этого расчеты показали, что коэффициенты подпора в НК, определенные без учета сил трения в подшипниковых опорах (ψ_0') и с учетом сил трения в опорах НК для значений $\eta_{\text{ПК1}}$ в диапазоне 1,1...1,6 отличаются незначительно, однако влияние коэффициента обжатия в

неприводной клетки на ψ'_0 существенно (рис.3). При увеличении $\eta_{\text{нк}}$ от 1,1 до 1,6 нагрузка неприводной клетки (отношение $\alpha_{\text{нк}} / f_{\sigma}$) возрастает от 0,43 до 0,94, а параметр $f_{\sigma}^2 \frac{R_{\text{нк}}}{h_{1\text{нк}}}$, характеризующий

масштабный фактор очага деформации неприводной клетки, возрастает от 0,47 до 0,77. Показатель K_1 , характеризующий условия трения в валковых опорах и на контактной поверхности, равен 0,0057. Показатели $\alpha_{\text{нк}} / f_{\sigma}$ и $f_{\sigma}^2 R_{\text{нк}} / h_{1\text{нк}}$ практически не зависят от коэффициента обжатия в ПК1, изменяемых в пределах 1,1...1,6.

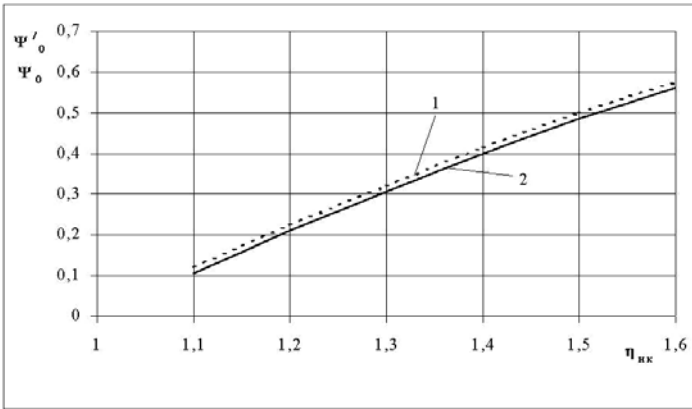


Рис.3 – Влияние коэффициента обжатия в неприводной клетке на сопротивление, создаваемое НК: 1 – ψ_0 ; 2 – ψ'_0

В работах В.И. Зюзина, П.И. Полухина, М.Я. Шварцбарта и др. [7, 10, 11] показано, что при достаточно высокой температуре металла и продолжительных паузах происходит полное разупрочнение металла, поэтому обоснован расчет сопротивления деформации на основе существующих опытных кривых деформационного упрочнения, полученных однократным нагружением. Это справедливо для черновых групп проволочных и мелкосортных станов. При установке модуля в конце промежуточных и начале чистовых групп непрерывных проволочных и мелкосортных станов, где скорость прокатки составляет 9...15 м/с, расстояние между НК и ПК2 равно 1,0м, поэтому полного разупрочнения в промежутке НК–ПК2 не происходит. Как показано в работе [8], паузы между проходами мене 0,1...0,3с, происходящие во время движения металла между клетями непрерывного стана, обычно не приводят к существенному разупрочнению.

Используя метод, приведенный в работе [10], выполнена оценка изменения сопротивления деформации в комплексе ПК–НК и анализ влияния на сопротивление деформации температурно–скоростных и деформационных условий прокатки. Рассмотрены процессы упрочнения и динамического разупрочнения при прокатке, а также статического разупрочнения металла во время пауз. Показано, что при паузах между проходами в ПК и НК, равными 0,6...1,2с полного разупрочнения не происходит, при этом величина упрочнения металла на входе в НК зависит от суммарной вытяжки в комплексе и распределения вытяжек по клетям и может достигать (1,3...1,5) σ_T , где σ_T – предел текучести при растяжении горячих образцов.

Учитывая изложенное, предел текучести металла в межклетьевом промежутке НК–ПК2 был пересчитан для принятых значений расстояний между клетями трехочагового модуля, скорости прокатки и параметров деформации в ПК1 и НК. Сравнение полученных значений предела текучести и удельных натяжений в промежутке НК–ПК2, необходимых для осуществления деформации в НК, показало, что с учетом неполного динамического и статического разупрочнения удельные натяжения не превышают σ_T в промежутке НК–ПК2, поэтому при расчетных значениях коэффициентов обжатия в клетях модуля ($\eta_{ПК1} = \eta_{НК} = 1,1...1,6$) разрыва раската не произойдет, т.е. стабильность процесса прокатки в модуле по критерию разрыва обеспечивается [9].

На основании результатов расчетов разработаны параметры трехочагового модуля, предназначенного для установки в линиях современных непрерывных сортовых станов.

Расстояние между осями ПК1 и НК – 300...500мм, между НК и ПК2 – 1000мм. В первую приводную клеть задается раскат квадратного или круглого сечения площадью ~625мм². Прокатываются образцы из углеродистой стали с содержанием углерода 0,1...0,8%, температура прокатки – 900...1100⁰С. 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...10м/с и регулируются изменением частоты вращения якоря электропривода. Клетки модуля с консольным расположением валков (по типу клеток вторых промежуточных групп станов 150 Макеевского и Криворожского меткомбинатов). Валки дисковые, с максимальным диаметром валков в ПК1 и ПК2 – 250мм, в НК – 200мм, ширина дисковых валков – 100мм. Необходимо предусмотреть радиальную регулировку межвалковых зазоров в пределах: в ПК1 – 10...20мм, в НК – 10...25мм, в ПК2 – 5...20мм.

Соотношение частот вращения валков при максимальном их диаметре

$$\frac{n_{внк\ 2}}{n_{внк\ 1}} \leq 2,2 ,$$

где $n_{в\ пк2}$ – частота вращения валков в ПК2, c^{-1} ;
 $n_{в\ пк1}$ – частота вращения валков в ПК1, c^{-1} .

Максимальные усилия и моменты прокатки в модуле:

	ПК1	НК	ПК2
Р, кН	200	100	120
М, 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.

Во всех клетях модуля предусмотреть установку подшипников качения.

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

Выводы. Приведены особенности взаимодействия клетей трехчагового модуля, представляющего собой 2 горизонтальные клетки с общим приводом (ПК1 и ПК2) и установленную между ними неприводную клеть, которая, в зависимости от прокатываемого профиля может быть вертикального или горизонтального исполнения. Показаны преимущества установки трехчагового модуля в линии сортового стана. Рассчитаны границы осуществимости процесса с точки зрения потери раскатом продольной устойчивости в промежутке ПК1 – НК, исчерпания резерва сил трения в ПК1 и ПК2 и разрыва раската в промежутке НК – ПК1. Определены возможные интенсивность деформации и вытяжка в неприводной клетке, обеспечивающие устойчивость процесса прокатки. Определены рациональные параметры модуля, предназначенного для установки в чистовой группе мелкосортного и второй промежуточной группе проволочного стана.

1. *Применение нетрадиционных подходов к организации производства малотоннажных партий проката / С.М. Жучков, П.В. Токмаков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии, научн. тр. ИЧМ, № 6, 2003, с. 166–173.*

2. *Непрерывная* прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей. / А.П. Лохматов, С.М. Жучков, Л.В. Кулаков и др. // Киев.: Наукова думка. – 1998. – 239с.
3. *Экспериментальные* исследования технологий прокатки балочных профилей с использованием неприводных универсальных клетей / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Ю.М. Беклемешев // Черная металлургия. – Бюл. Ин-та «Черметинформация». – 1992. – № 5. – с. 27–30.
4. *Продольная* устойчивость раската при прокатке балочных профилей с использованием неприводных универсальных клетей. / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Л.В. Кулаков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 2 – с. 31–33.
5. *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. – с.17. (Деп. в ВИНТИ. 1989. – № 4916).
6. *Выбор* методики оценки сопротивления раската продольному изгибу перед неприводной клетью при непрерывной прокатке сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей. / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Л.В. Кулаков // Металл и литье Украины. – 1995. № 7,8. – с. 45–49.
7. *Теория* прокатки. Справочник. / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. // М.: Металлургия. – 1982. – с. 333.
8. *Бровман М.Я.* Применение теории пластичности в прокатке. / М.: Металлургия. – 1991. – с. 254.
9. *Определение* средних удельных давлений при прокатке с натяжением / А.П. Чекмарев, М.Д. Куцыгин / Непрерывная прокатка, научн.тр. ИЧМ. // М.: Металлургия. – 1969. – с. 7–15.
10. *Расчет* усилий при непрерывной горячей прокатке. / В.Н. Жучин, Г.С. Никитин, Я.С. Шварцбарт и др. // М.: Металлургия. – 1986. – с. 198.
11. *Анализ* изменения сопротивления деформации металла в комплексе «приводная – неприводная клеть» при непрерывной сортовой прокатке./ Л.В. Кулаков, А.П. Лохматов, С.М. Жучков / Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – №1. – с. 26–30.

Статья рекомендована к печати д.т.н. Г.В.Левченко.