



On the basis of investigation results analysis it's been established that influence of mass forces on the moment arm coefficient with rolling speed of up to 150 m/s at exit from the block must be taken into account in the last two or three block stands; joint influence of interstand efforts and mass forces on the coefficient of moment arm mostly affects odd block stands, which must be considered while calculating power rolling parameters.

А. А. ГОРБАНЕВ, Институт черной металлургии НАН Украины,
В. В. ФИЛИППОВ, РУП "БМЗ",
С. М. ЖУЧКОВ, Институт черной металлургии НАН Украины,
В. А. ТИЩЕНКО, А. Б. СТЕБЛОВ, А. Д. ШЕВЧЕНКО, РУП "БМЗ"

НЕЙТРАЛЬНЫЙ УГОЛ И ОПЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПРОКАТКЕ В ЧИСТОВЫХ БЛОКАХ КЛЕТЕЙ ПРОВОЛОЧНЫХ СТАНОВ

УДК 621.771.25.04.001.5

На современных проволочных станах, оборудованных чистовыми блоками клетей и линиями двухстадийного охлаждения катанки, скорость прокатки достигла 80–100 м/с. В связи с необходимостью повышения массы мотков готовой катанки до 2,0–2,5 т наблюдается тенденция дальнейшего увеличения скорости прокатки до 150 м/с. При таких скоростях при расчете параметров прокатки в чистовых блоках следует учитывать влияние массовых сил [1].

Чистовые блоки клетей проволочных станов рассчитаны на работу с небольшим натяжением раската между клетями. Опыт эксплуатации существующих чистовых блоков, а также анализ результатов расчетно-аналитических исследований показали, что в некоторых случаях при изменении технологических параметров прокатки на входе в блок натяжения могут достигать значительной величины, кроме того, возможно появление усилий подпора в раскате между клетями блока. Поэтому влияние межклетевых усилий должно учитываться при расчетах параметров прокатки в блоках.

В работе [2] аналитически получены уравнения для расчета распределения средних по ширине давлений вдоль дуги контакта, средних по контактной площади давлений и момента прокатки с учетом массовых сил и натяжений.

Приравнивая уравнения распределения давлений в зонах отставания и опережения, получаем уравнение для определения положения нейтрального сечения в очаге деформации

$$\frac{F_n}{F_1} = \mu^{\frac{\delta-1}{2\delta}} \exp \left[\frac{\psi_1 - \psi_2}{2\delta} - \frac{0,5\rho V_1^2}{4\delta k} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) \right], \quad (1)$$

где F_n — площадь поперечного сечения раската, соответствующего нейтральному углу γ ; F_1 — площадь поперечного сечения раската на выходе из данной клетки; $\delta = 2f'/\alpha$ — коэффициент (f' —

показатель сил трения в очаге деформации; α — угол захвата); $\psi_1 = \sigma_1/2k$ и $\psi_0 = \sigma_0/2k$ — соответственно коэффициенты переднего и заднего натяжений; σ_1 и σ_0 — соответственно удельные переднее и заднее натяжение; k — сопротивление чистому сдвигу; ρ — плотность металла; μ — вытяжка в данной клетке блока.

Первое слагаемое в квадратных скобках определяет влияние на положение нейтрального сечения межклетевых усилий, второе — влияние массовых сил.

На рис. 1 показано влияние вытяжки и отношения α/f' на положение нейтрального сечения при отсутствии межклетевых усилий и без учета

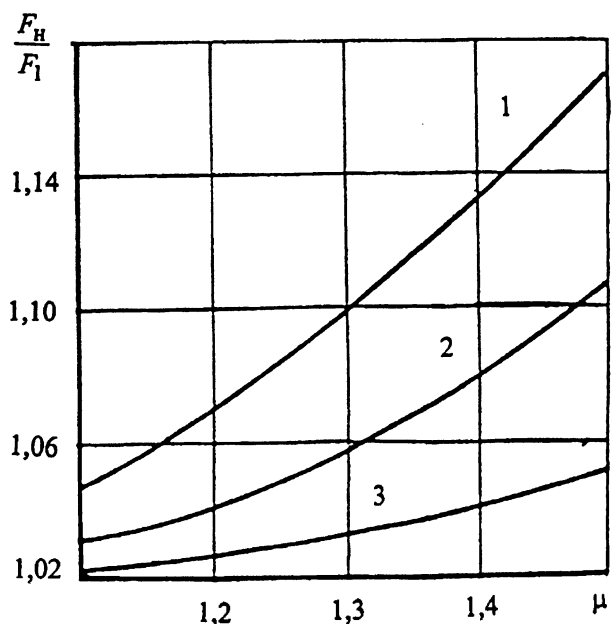


Рис. 1. Влияние коэффициента вытяжки металла μ и отношения α/f' на положение нейтрального сечения без учета натяжения и массовых сил: 1 — $\alpha/f' = 0,5$; 2 — 1,0; 3 — 1,5

влияния массовых сил применительно к последней клетке чистового блока проволочного стана 150 БМЗ. С увеличением вытяжки при прочих равных условиях положение нейтрального сечения сдвигается в сторону входа металла в валки. При уменьшении угла захвата α или показателя сил трения f' , т. е. при уменьшении отношения α/f' отношение F_n/F_1 увеличивается в связи с ростом резерва сил трения.

На рис. 2—4 показано влияние скорости прокатки, т. е. влияние массовых сил на положение нейтрального сечения. Увеличение скорости прокатки во всех случаях сдвигает нейтральное сечение в сторону выхода металла из валков, так как повышение массовых сил вследствие возрастания скорости прокатки снижает резерв сил трения в очаге деформации. Чем больше коэффициент вытяжки металла, тем в большей степени проявляется влияние массовых сил на положение нейтрального сечения.

Влияние скорости прокатки на положение нейтрального сечения возрастает с увеличением отношения α/f' . Так, при отношении $\alpha/f' = 1$ и коэффициенте вытяжки металла $\mu = 1,1$ резерв сил трения исчерпывается при скорости прокатки 175 м/с, при отношении $\alpha/f' = 1,5$ и том же коэффициенте вытяжки металла исчерпание резерва сил трения произойдет при скорости прокатки 95 м/с.

Переднее натяжение и задний подпор смещают положение нейтрального сечения в сторону входа металла в валки. Обратное влияние оказывают передний подпор и заднее натяжение. Они уменьшают резерв сил трения в очаге деформации, поэтому нейтральное сечение смещается в сторону выхода металла из валков.

При совместном влиянии массовых сил и заднего натяжения резерв сил трения исчерпывается раньше, т. е. при меньших скоростях прокатки.

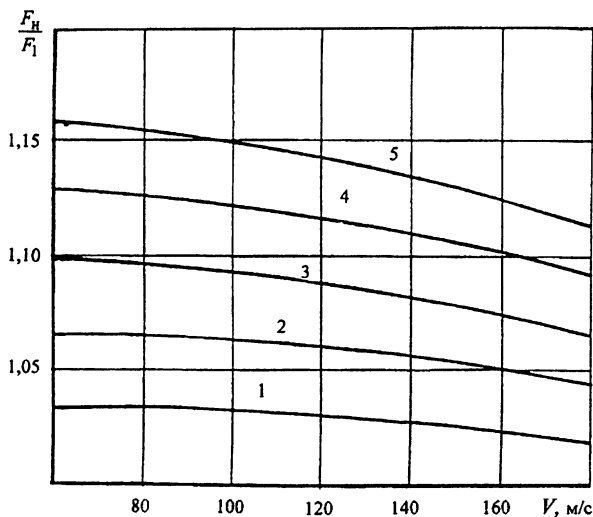


Рис. 2. Влияние массовых сил на положение нейтрального сечения: 1 — $\mu=1,1$; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4; 5 — 1,5; $\alpha/f'=0,5$; $\psi_1=\psi_0=0$

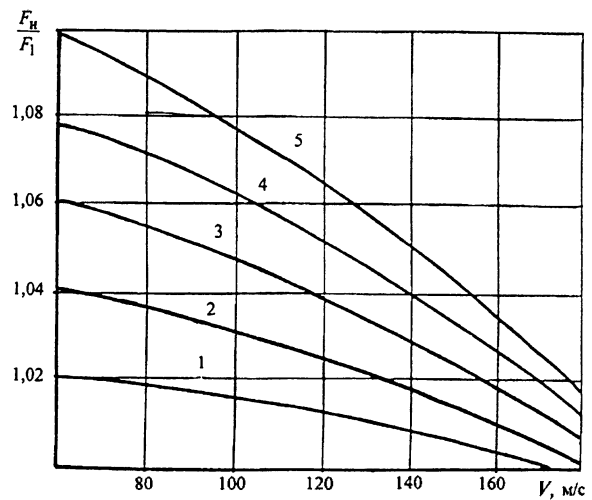


Рис. 3. Влияние массовых сил на положение нейтрального сечения: 1 — $\mu=1,1$; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4; 5 — 1,5; $\alpha/f'=1$; $\psi_1=\psi_0=0$

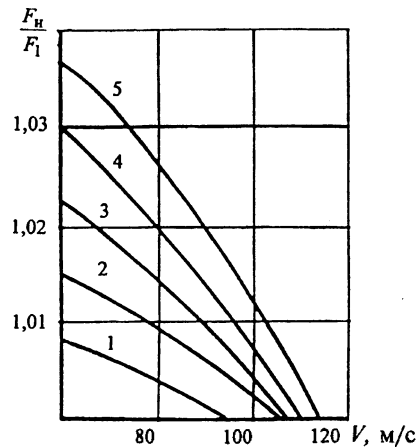


Рис. 4. Влияние массовых сил на положение нейтрального сечения: 1 — $\mu=1,1$; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4; 5 — 1,5; $\alpha/f'=1,5$; $\psi_1=\psi_0=0$

В ряде случаев отдельные клетки чистового блока работают с передним подпором и задним натяжением. Это наиболее неблагоприятный случай с точки зрения устойчивости процесса прокатки, зависящей от скорости и величины межклетевых усилий.

На рис. 5, 6 показано влияние скорости прокатки, т. е. массовых сил, и продольных усилий между клетями блока на положение нейтрального сечения.

При прокатке с отношением угла захвата к показателю сил трения, равном $\alpha/f' = 0,5$, совместное влияние массовых сил и заднего натяжения величиной до $\psi_0 = 0,1$ обеспечивает устойчивый процесс прокатки во всем диапазоне применяемых в настоящее время коэффициентов вытяжки для различных марок сталей при скоростях прокатки до 250 м/с. При увеличении заднего натяжения до 20% от сопротивления металла деформации ($\psi_0=0,2$) повышение скорости прокатки в блоках с малыми коэффициентами вытяжки металла возможно до 160 м/с. В блоках, предназна-

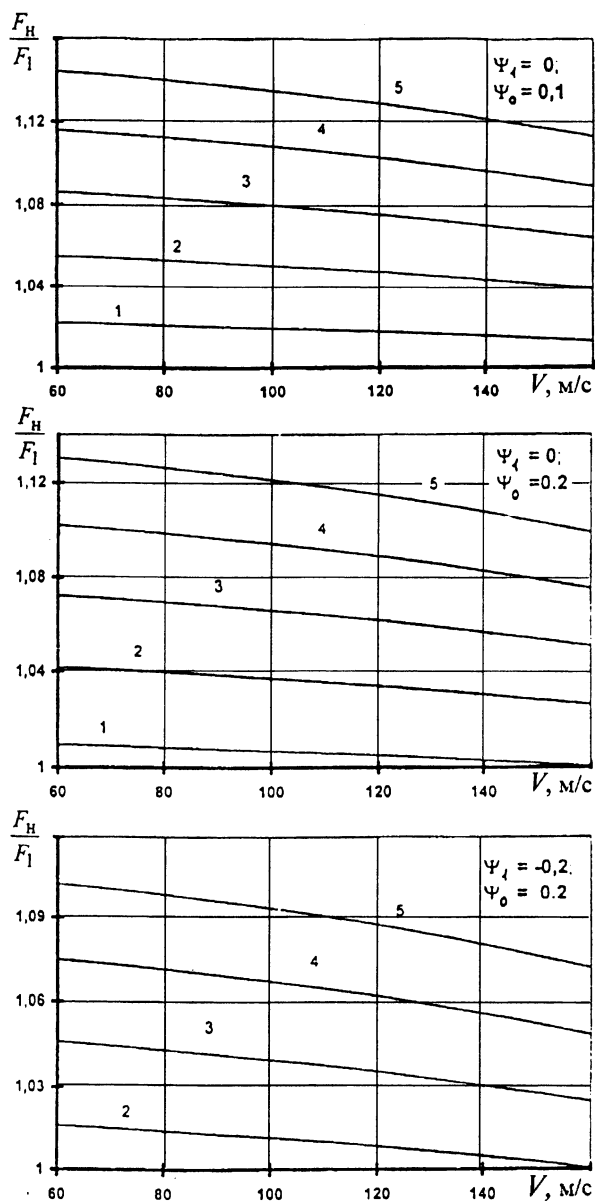


Рис. 5. Влияние массовых сил и межклетевых усилий на положение нейтрального сечения: 1 — $\mu=1,1$; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4; 5 — 1,5; $\alpha/f'=0,5$

ченных для производства катанки из углеродистых и низколегированных сталей с вытяжками более 1,2, обеспечивается устойчивый процесс при всех возможных скоростях прокатки.

В случае переднего подпора ($\psi_1 = -0,2$) и заднего натяжения ($\psi_0 = 0,2$) с коэффициентами вытяжки металла $\mu = 1,15$ прокатка невозможна даже при скоростях прокатки $V_1 = 80$ м/с.

При отношении угла захвата к показателю сил трения, равному $\alpha/f' = 1$, заднем натяжении $\psi_0 = 0,1$ и переднем натяжении $\psi_1 = 0$ при коэффициенте вытяжки металла $\mu = 1,1$ стабильность установившегося процесса обеспечивается лишь при скоростях прокатки $V_1 < 50$ м/с, при коэффициентах вытяжки металла $\mu = 1,2$ и $1,4$ — соответственно при скоростях 120 и 160 м/с. При заднем натяжении $\psi_0 = 0,2$ и $\psi_1 = 0$ максимальные

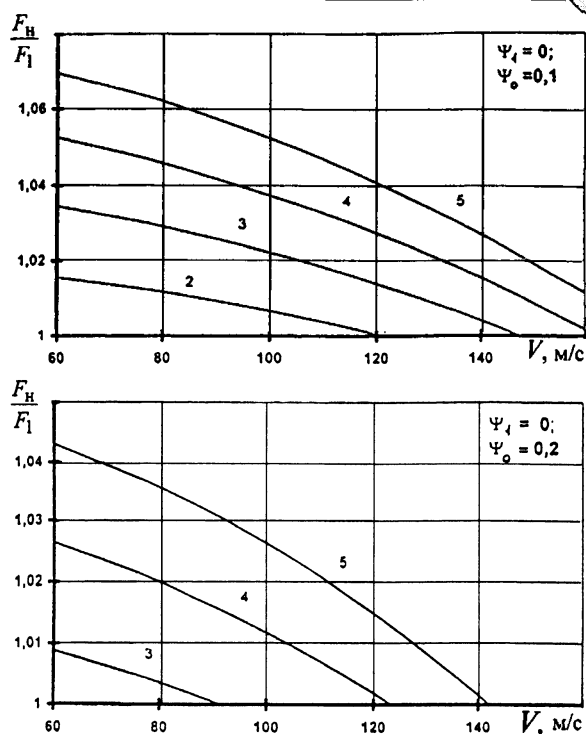


Рис. 6. Влияние массовых сил и межклетевых усилий на положение нейтрального сечения: 1 — $\mu=1,1$; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4; 5 — 1,5; $\alpha/f'=1,0$

скорости прокатки уменьшаются для $\mu = 1,3$ до 90 м/с, $\mu = 1,4$ — до 120 и $\mu = 1,5$ — до 140 м/с. Прокатка с меньшими вытяжками невозможна при скоростях $V_1 > 150-200$ м/с. При прокатке с задним натяжением $\psi_0 = 0,2$ и появлении переднего подпора возможная скорость прокатки резко снижается.

В блоках последнего поколения продольные межклетевые усилия не превышают 10 Н/мм², но в отдельных случаях, например, при неправильной настройке клетей блока, при отклонении размеров сечения подката на входе в блок, неизбежных в процессе эксплуатации стана, при высоких скоростях прокатки возможно снижение устойчивости процесса и появление пробуксовки, вызванное совместным действием массовых сил и натяжения, что необходимо учитывать при расчетах технологических параметров.

Из условия постоянства секундных объемов запишем уравнение для расчета опережения с учетом массовых сил и натяжения

$$S = \left(1 - \frac{\gamma^2}{2}\right) \mu^{\frac{\delta-1}{2\delta}} e^{\frac{\psi_1 - \psi_0}{2\delta} - \frac{0,5\rho V_1^2}{48k} \left(1 - \frac{1}{\mu^2}\right)} - 1. \quad (2)$$

Уравнение (2) является видоизмененной формулой Дрездена, полученной при переменных по длине дуги контакта ширине и площади поперечного сечения раската с учетом массовых сил и натяжений.

Как показали исследования многих авторов, формула Дрездена дает результаты, близкие к

опытным данным, для широких полос. При сортовой горячей прокатке, в том числе в овальных и круглых калибрах, применяемых в чистовых блоках с сильно развитым уширением, в формулу Дрездена необходимо вводить коэффициент, учитывающий ширину раската. Известно, что чем меньше ширина раската, тем меньше опережение при прочих равных условиях. Ряд авторов, учитывая результаты исследований, определяют коэффициент C_s , учитывающий ширину раската, экспериментально. В этом случае формула опережения дает хорошее совпадение при прокатке в условиях, близких к условиям проведения экспериментальных исследований.

В работе [3] влияние ширины полосы на опережение определяется теоретически на основании линий равных напряжений ($\sigma_x = \sigma_y$), определяющих области преимущественного течения металла в продольном и поперечном направлениях. Используя указанный подход, коэффициент C_s можно определить по уравнению:

$$C_s = 1 - \frac{(\delta + 1) \left(1 + 2 \frac{F_H}{F_1} \ln \frac{F_H}{F_1} - \frac{F_H}{F_1} \right)}{\delta(\mu - 1) \frac{B}{l} + 2 \left[(\delta - 1)\mu + \delta + 1 - 2\delta \frac{F_H}{F_1} \right]}, \quad (3)$$

где B — начальная ширина раската; l — длина очага деформации.

Установлено, что в случае смыкания условных зон уширения в нейтральном сечении коэффициент $C_s \approx 0,5$. Анализ показывает, что это происходит при $B/l < 1$ и зависит от соотношения параметров δ и F_0/F_1 . При дальнейшем уменьшении начальной ширины раската (узкий очаг деформации) при прочих равных условиях опережение может снижаться до нуля. В калибрах чистовых блоков клетей проволочных станов параметры очага деформации таковы, что при прокатке в овальных калибрах значение коэффициента C_s находится в пределах 0,35—0,4, а в круглых — в пределах 0,2—0,28.

Окончательно с погрешностью до 1% можно записать, что опережение с учетом особенностей процесса прокатки в высокоскоростных блоках будет равно:

$$S = C_s \left\{ \mu^{\frac{\delta-1}{2\delta}} \exp \left[\frac{\psi_1 - \psi_0}{2\delta} - \frac{0,5\rho V_1^2}{4\delta k} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) \right] - 1 \right\}. \quad (4)$$

Так как в клетях блока прокатка происходит с отношением длины очага деформации к средней толщине раската, большем 1, то предельную скорость прокатки можно определить для условия, когда резерв сил трения в очаге деформации будет исчерпан, т. е. при F_H/F_1 .

В этом случае уравнение для расчета продольной скорости прокатки будет иметь вид

$$V_{np} = \mu \sqrt{\frac{4k[(\delta-1)\ln\mu + \psi_1 - \psi_0]}{\rho(\mu^2 - 1)}}. \quad (5)$$

На рис. 7 приведена зависимость предельной скорости прокатки от коэффициента вытяжки и отношения α/f' . Расчеты выполнены для случая прокатки в последней клетке блока катанки диаметром 5,5 мм без натяжения.

Установлено, что предельная скорость прокатки, обусловленная резервом сил трения в очаге деформации, может изменяться в широких пределах от 65 до 350 м/с в зависимости от параметров прокатки.

Чем больше коэффициент вытяжки металла, тем больше предельная скорость прокатки. Так, при $\alpha/f' = 1,0$ увеличение вытяжки от 1,1 до 1,5 повышает V_{np} от 175 до 200 м/с. Во всем диапазоне изменения α/f' зависимость $V_{np} = \Phi(\mu)$ близка к линейной. С ростом отношения α/f' влияние вытяжки на предельную скорость прокатки уменьшается. Так, при $\alpha/f' = 0,5$ увеличение коэффициентов вытяжки металла μ от 1,1 до 1,5 повышает скорость прокатки на 46 м/с, а при $\alpha/f' = 1,7$ — на 10 м/с.

Увеличение диаметра катанки при прочих равных условиях уменьшает предельную скорость прокатки. Чем больше отношение α/f' , тем меньше предельная скорость прокатки. Чем больше сопротивление деформации прокатываемого металла ($2k$), тем больше предельная скорость прокатки, при этом влияние сопротивления деформации металла на скорость прокатки практически не зависит от отношения α/f' и незначительно зависит от коэффициента вытяжки металла (рис. 8). Влияние сопротивления деформации на предельную скорость объясняется изменением отношения $\rho/2k$ при прокатке материалов различной прочности. Понижение температуры прокатки увеличивает сопротивление металла деформации, поэтому предельная скорость прокатки повышается даже при постоянных условиях трения в очаге деформации.

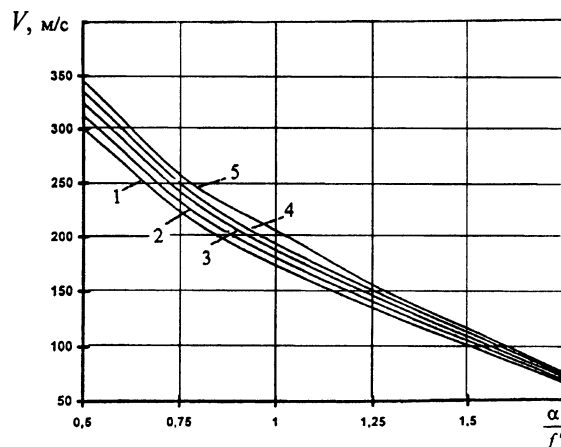


Рис. 7. Предельная скорость прокатки катанки диаметром 5,5 мм из углеродистой стали в последней клетке блока без натяжения: 1 — $\mu=1,1$; 2 — 1,2; 3 — 1,3; 4 — 1,4; 5 — 1,5

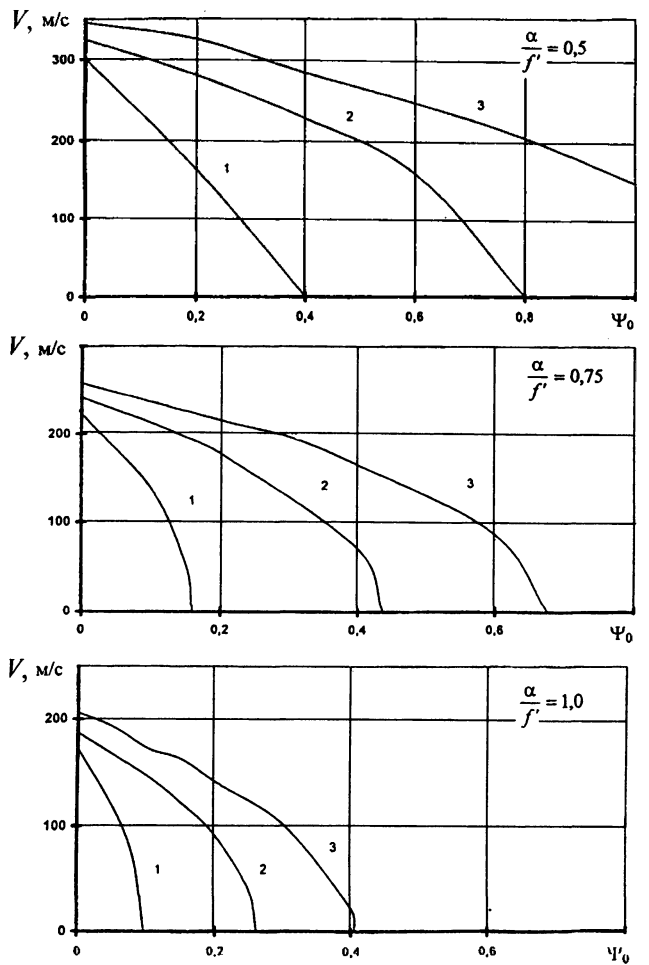
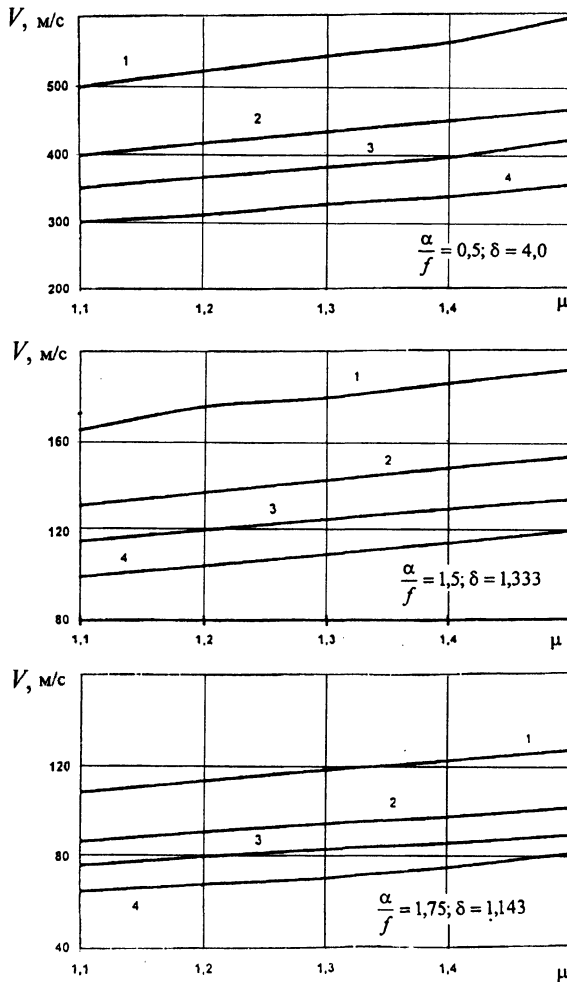


Рис. 8. Влияние сопротивления деформации металла на предельную скорость прокатки: 1 – X20H80; 2 – P18; 3 – X18H10T; 4 – У8

ции. Достижение предельной скорости более вероятно при прокатке мягких сталей с высокой температурой.

Заднее натяжение и передний подпор уменьшают предельную скорость прокатки (рис. 9). В клетях чистового блока проволочного стана 150 БМЗ, где применены коэффициенты вытяжки 1,23–1,28, отношение α/f' составляет 0,8–1,33. При этом показатель сил трения f' рассчитан из условия $P_{cp}/2k \approx 1,15$, а коэффициент трения при установившемся процессе определен в соответствии с рекомендациями работы [4].

Как показал анализ результатов расчетно-аналитических исследований, при данной конструкции чистового блока и используемой калибровке валков теоретически возможно достижение устойчивого установившегося процесса прокатки со скоростями 140–150 м/с. Однако в реальных производственных условиях использование такой конструкции блока при скоростях более 100 м/с проблематично.

Экспериментальные и расчетно-аналитические исследования процесса прокатки катанки в аналогичных блоках чистовых клетей показали, что при

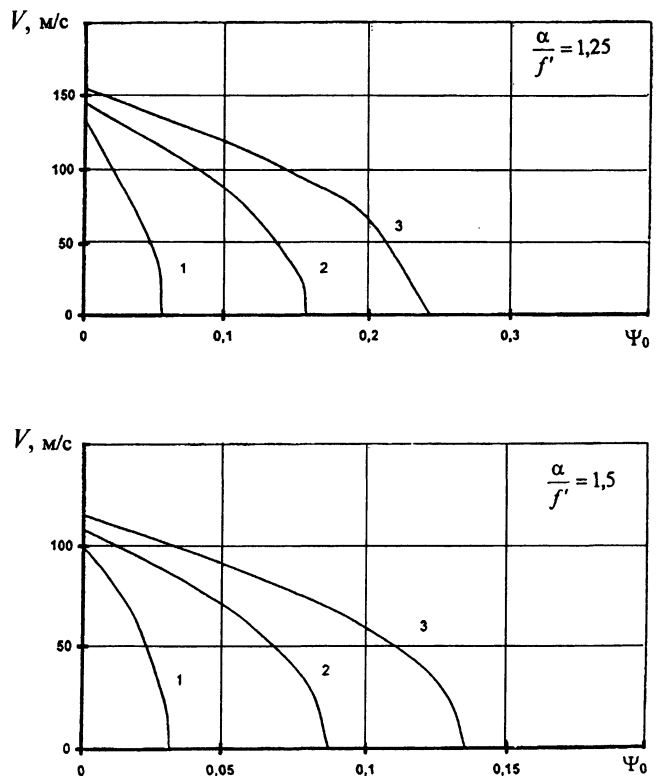


Рис. 9. Предельная скорость прокатки катанки диаметром 5,5 мм с задним натяжением: 1 – $\mu=1,1$; 2 – 1,3; 3 – 1,5

прокатке катанки некоторых диаметров имеется неравномерность в распределении межклетевых усилий. В четных промежутках прокатка происходит преимущественно с натяжением, в нечетных промежутках — с подпором. В наиболее неблагоприятных условиях работают нечетные клетки — с передним подпором и задним натяжением. Эта неравномерность может оказать существенное влияние на устойчивость процесса и привести к неравномерному износу деталей привода различных клеток при нестандартных ситуациях на стане, имеющих место в изменяющихся условиях производства, например, при попадании смазки на поверхность валков в результате неудовлетворительной работы уплотнений и др. Уменьшить неравномерность распределения межклетевых усилий изменением настройки блока, сечения подката на входе и диаметров валковых шайб можно лишь в ограниченных пределах. Поэтому при разработке конструкций новых блоков, рассчитанных на рабочую скорость прокатки до 150 м/с, необходима корректировка передаточных чисел от электропривода к валкам различных клеток с учетом размерного и марочного сортамента стана, а также повышение надежности работы подшипниковых опор и уплотнений. Для исключения возможных резонансных явлений в линии привода новых блоков, по-видимому, потребуются корректировка масс вращающихся деталей привода, при этом применение систем диагностики состояния линии привода и ужесточение требований к допустимому износу при эксплуатации новых блоков являются обязательными.

Выводы

1. При расчетах параметров прокатки в блоках чистовых клеток современных проволочных станов следует учитывать влияние массовых сил и межклетевых усилий.

2. Получены уравнения для определения положения нейтрального сечения в очаге деформации и опережения с учетом массовых сил и натяжения.

3. С использованием полученных выражений выполнены исследования влияния различных технологических факторов на положение нейтрального сечения и величину опережения с учетом массовых сил и натяжения. Показано, что:

- увеличение скорости прокатки во всех случаях сдвигает нейтральное сечение в сторону выхода

металла из валков, так как повышение массовых сил вследствие возрастания скорости прокатки снижает резерв сил трения в очаге деформации;

- с увеличением коэффициента вытяжки металла влияние массовых сил на положение нейтрального сечения проявляется в большей степени;

- влияние скорости прокатки на положение нейтрального сечения возрастает с увеличением отношения угла захвата к показателю сил трения;

- переднее натяжение и задний подпор смещают положение нейтрального сечения в сторону входа металла в валки; обратное влияние оказывают передний подпор и заднее натяжение;

- совместное влияние массовых сил и заднего натяжения приводит к исчерпанию резерв сил трения при меньших скоростях прокатки.

4. Выполнены исследования влияния массовых сил и натяжения на предельную скорость прокатки в блоке. Показано, что:

- увеличение коэффициента вытяжки металла и сопротивления металла деформации повышает предельную скорость прокатки;

- с увеличением отношения угла захвата к показателю сил трения влияние коэффициента вытяжки металла на предельную скорость прокатки уменьшается;

- увеличение диаметра катанки, заднее натяжение и передний подпор при прочих равных условиях уменьшают предельную скорость прокатки.

Показано, что достижение предельной скорости более вероятно при прокатке мягких сталей с высокой температурой.

Сформулированы требования к разработке конструкций новых блоков, рассчитанных на рабочую скорость прокатки до 150 м/с.

Литература

1. Филиппов В. В., Горбанев А. А., Тищенко В. А. и др. О массовых силах в зонах деформации при прокатке на современных проволочных и мелкосортно-проволочных станах // *Литье и металлургия*. 2001. № 3.

2. Горбанев А. А., Филиппов В. В., Жучков С. М. и др. Давление и момент прокатки в высокоскоростных чистовых блоках с учетом массовых сил в зонах деформации // *Литье и металлургия*. 2001. № 3.

3. Спиридонов Н. П., Куцыгин М. Д. Влияние исходной ширины полосы на опережение при прокатке в гладких валках // *Прокатное производство* М.: Металлургия. 1969. Т. XXIX. С. 83–89.

4. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков // *СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ*. М., 1998.