

УДК 621.771.252::621.771.251.073.8

А.А.Горбанев, П.В.Токмаков, В.Г.Раздобреев, Д.Г.Паламарь
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ НЕПРЕРЫВНОЙ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПРОКАТКИ КАТАНКИ РАЗЛИЧНОГО
ДИАМЕТРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕДУКЦИОННО-
КАЛИБРУЮЩЕГО БЛОКА

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Целью настоящей работы является аналитическое определение максимально возможных скоростей непрерывной высокоскоростной прокатки катанки различного диаметра в редуционно-калибрующем блоке (РКБ) с учетом влияния массовых сил. Показано, что путем оптимизации деформационных режимов прокатки и передаточных коэффициентов в РКБ, возможно достижение скоростей прокатки до 200 м/с.

Ключевые слова: непрерывная прокатка, катанка, скорость, редуционно-калибрующий блок, деформационные режимы

Современное состояние вопроса. Одним из основных направлений развития производства катанки из углеродистых и высоколегированных сталей и сплавов в настоящее время является уменьшение диаметра проката с одновременным обеспечением высокого комплекса механических свойств и точности геометрических размеров. Такая продукция обеспечивает снижение затрат на переработку катанки в метизном и сталепроволочном переделах и, поэтому, будет пользоваться повышенным спросом у потребителей. Однако для обеспечения высоких технико-экономических показателей производства катанки малых диаметров необходимо повышение скоростей прокатки – вплоть до 200 м/с.

На действующих проволочных станах с традиционной компоновкой и составом оборудования при повышении скорости прокатки свыше 120 м/с резко возрастает количество аварийных ситуаций, связанных с пробуксовкой и застреванием раската в валках, возрастают простои стана и расход металла. Поэтому рабочая скорость прокатки практически не превышает 110 м/с. По этим причинам производство катанки диаметром менее 5,5 мм затруднено и становится экономически невыгодным. Такое ограничение скоростей объясняется тем, что деформационные режимы, применяемые при прокатке в чистовых блоках, и приводные линии блоков рассчитаны без учета особенностей процесса высокоскоростной прокатки, основной из которых является влияние массовых (инерционных) сил в очаге деформации. Влияние этих сил необходимо учитывать при расчетах параметров высокоскоростной прокатки катанки со скоростями более 80-100 м/с.

Целью настоящей работы является аналитическое определение максимально возможных (предельных) скоростей непрерывной высокоскоростной прокатки катанки различного диаметра в редуционно-калибрующем блоке с учетом влияния массовых сил.

Изложение основных результатов исследований. В работе [1] дана оценка влияния массовых сил и межклетьевого натяжения (подпора) на изменение положения нейтрального сечения в очагах деформации клетей проволочного блока и связанным с этим изменением соотношения зон отставания и опережения в очагах деформации клетей. Положение нейтрального сечения предлагается определять по уравнению:

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

где F_H – площадь поперечного сечения раската, соответствующая 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; $\Psi_1 = \sigma_1/\sigma_s$ и $\Psi_0 = \sigma_0/\sigma_s$ – соответственно коэффициенты переднего и заднего натяжения; σ_1 и σ_0 – соответственно удельные переднее и заднее натяжения; k – сопротивление чистому сдвигу; ρ – плотность металла; μ – вытяжка в данной клетке; α/f' – отношение угла захвата к показателю сил трения.

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

Для аналитических исследований в качестве базового нами принят стан 150 ОАО «Белорусский металлургический завод» (ОАО «БМЗ»).

На рис.1 показано влияние скорости прокатки катанки диаметром 5,0 мм в последней клетке редуционно-калибрующего блока (РКБ) на изменение положения нейтрального сечения, определенное с учетом влияния массовых сил. Коэффициенты переднего и заднего натяжения равны нулю.

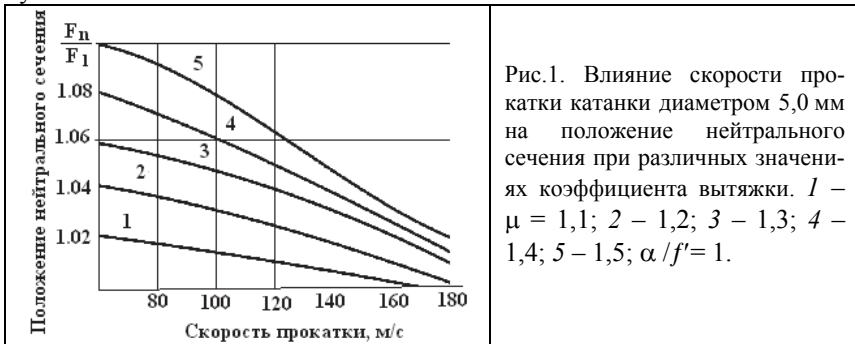
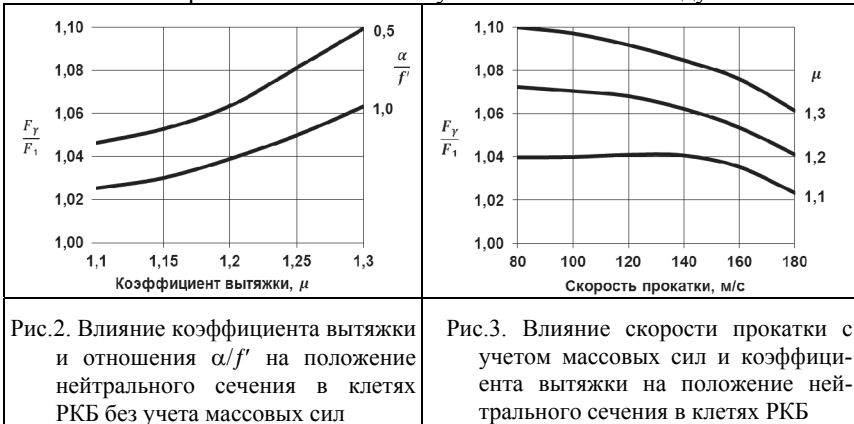


Рис.1. Влияние скорости прокатки катанки диаметром 5,0 мм на положение нейтрального сечения при различных значениях коэффициента вытяжки. 1 – $\mu = 1,1$; 2 – 1,2; 3 – 1,3; 4 – 1,4; 5 – 1,5; $\alpha/f' = 1$.

Данные, приведенные на рис.1, показывают, что увеличение скорости прокатки во всех случаях сдвигает положение нейтрального сечения в сторону выхода металла из валков, так как повышение массовых сил вследствие возрастания скорости прокатки снижает резерв втягивающих сил трения в очаге деформации. Также установлено, что с увеличением

коэффициента вытяжки в большей степени проявляется влияние массовых сил на изменение положения нейтрального сечения.

Влияние скорости прокатки на положение нейтрального сечения возрастает с увеличением отношения α/f' . Так, при отношении $\alpha/f' = 1$ и коэффициенте вытяжки $\mu = 1,1$ – резерв сил трения исчерпывается при скорости прокатки 175 м/с, а при отношении $\alpha/f' = 1,5$ и том же коэффициенте вытяжки исчерпание резерва сил трения произойдет при скорости прокатки 95 м/с. На рис.2 показано влияние отношения α/f' на положение нейтрального сечения при прокатке в клетях редуционно-калибрующего блока без учета натяжений и массовых сил, а на рис.3 приведено влияние скорости прокатки с учетом массовых сил и коэффициента вытяжки на положение нейтрального сечения без учета натяжений между клетями.



Как показали расчеты, чем больше отношение α/f' , тем меньше отношение F_n/F_1 . С увеличением скорости прокатки возрастает влияние массовых сил и отношение F_n/F_1 уменьшается, особенно при скоростях более 120 м/с (см. рис.3). Чем больше вытяжка, тем сильнее влияние массовых сил.

Приравняв $F_n/F_1 = 1$, получили уравнение для расчета предельной скорости прокатки в виде:

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

где σ_s – сопротивление деформации; $\delta = \frac{2f' \cdot l \cdot d}{\Delta h}$; Δh – обжатие в клети; $l \cdot d$ – длина очага деформации.

На рис.4 показана зависимость предельной скорости прокатки в редуционно-калибрующем блоке от коэффициента вытяжки μ и отношения угла захвата к показателю сил трения.

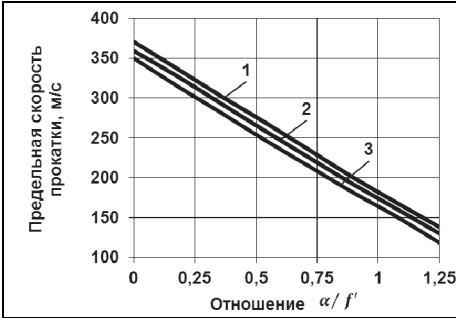


Рис.4. Влияние коэффициента вытяжки и отношения α/f' на предельную скорость прокатки в РКБ без учета влияния натяжения и массовых сил.

1 – $\mu = 1,3$; 2 – $\mu = 1,2$; 3 – $\mu = 1,1$

Чем больше вытяжка, тем больше достигаемая предельная скорость прокатки. Это связано с увеличением резерва втягивающих сил трения в очаге деформации, кривые 1 и 2 относятся к редуцирующим клетям, 3 – к калибрующим клетям РКБ. С увеличением угла захвата и снижением показателя сил трения (увеличение отношения α/f') резерв втягивающих сил трения уменьшается, что приводит к снижению предельной скорости прокатки. Так, при $\alpha/f' = 1,25$ и вытяжке, равной 1,1, которая применяется в калибрующих клетях, предельная скорость прокатки составляет 120 м/с, поэтому прокатка в калибрующих клетях ведется с малыми обжатыми и углами захвата. При $\alpha/f' = 0,5$ предельная скорость прокатки превышает 300 м/с.

Чем больше заднее натяжение ψ_0 , и передний подпор ψ_1 , тем меньше предельная скорость прокатки (см. рис.5).

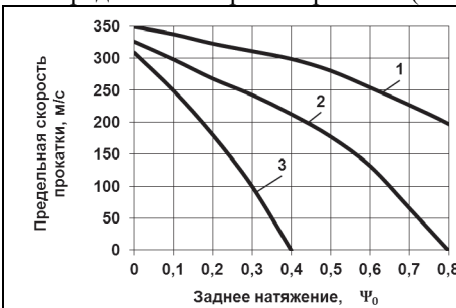


Рис.5. Влияние заднего натяжения и коэффициента вытяжки на предельную скорость прокатки в РКБ.

1 – $\mu = 1,5$; 2 – $\mu = 1,3$; 3 – $\mu = 1,1$.

Уменьшение диаметра валков увеличивает угол захвата и отношение α/f' , что снижает предельную скорость прокатки в РКБ. В существующих конструкциях РКБ калибрующие клетки имеют малый диаметр валков (140-150 мм), что повышает устойчивость раската при прокатке катанки малых диаметров (4,0-5,0 мм), в связи с уменьшением расстояния от переднего конца раската до оси, соединяющей центры валков, т.е. до сечения выхода катанки из очага деформации. Применяемые вытяжки в ка-

либрующих клетях также небольшие $\mu \leq 1,1$, что также повышает устойчивость раската и дает возможность прокатывать катанку малых диаметров со скоростями более 150 м/с. При этом конструкция общего редуктора РКБ и передаточные числа от электродвигателя к валкам должны обеспечивать прокатку с минимальными задним натяжением или передним подпором. Чем больше вытяжка, тем больше предельная скорость прокатки. Так, при $\alpha/f' = 1,0$ увеличение коэффициента вытяжки от 1,1 до 1,3 увеличивает $V_{np.}$ от 165 до 200 м/с, при этом с увеличением отношения α/f' влияние вытяжки на предельную скорость прокатки уменьшается. Во всем диапазоне изменения α/f' в РКБ зависимость $V_{np.} = \Phi(\mu)$ близка к линейной.

Увеличение диаметра прокатываемой катанки при прочих равных условиях уменьшает предельную скорость прокатки в РКБ. Чем больше сопротивление деформации прокатываемой стали σ_s , тем выше предельная скорость прокатки, при этом влияние σ_s на $V_{np.}$ практически не зависит от отношения α/f' и мало зависит от коэффициента вытяжки. Влияние сопротивления деформации на предельную скорость прокатки объясняется уменьшением отношения плотности к σ_s при прокатке более прочных материалов. Так, при прокатке коррозионностойкой стали X18H10T предельная скорость прокатки в 1,2 раза выше, а при прокатке быстрорежущей стали P18 – в 2 раза выше, чем при прокатке стали 80. Понижение температуры прокатываемой стали повышает сопротивление деформации и предельную скорость прокатки даже при тех же условиях трения в очаге деформации. Достижение предельной скорости прокатки более вероятно в случае прокатки мягких сталей при высокой температуре.

В таблице приведены расчетные параметры прокатки катанки диаметром 4,5 мм из стали 80 в редуционно-калибрующем блоке фирмы Морган, установленном на стане 150 ОАО «БМЗ».

Таблица. Предельные скорости прокатки в РКБ фирмы Морган, установленном на проволочном стане 150 ОАО «БМЗ» при прокатке катанки диаметром 4,5 мм из стали 80. Диаметр раската на входе в РКБ $d_0 = 5,6$ мм.

№ клетки РКБ	Диаметр валков, мм	Площадь сечения на выходе F_l , мм ²	Обжатие Δh , мм	Коэфф. вытяжки μ	Угол захвата α , рад	Степень деформ. ε	Длина очага деформ. l/d , мм	δ	Предел. скорость прокатки $V_{np.}$, м/с
31	205	21,1	1,72	1,161	0,13	0,137	13,3	4,6	137
32	205	18,7	2,5	1,128	0,157	0,135	16,0	3,8	195
33	142	17,3	0,64	1,081	0,096	0,108	6,7	6,3	170
34	142	16,4	0,23	1,055	0,057	0,051	4,04	9,0	216

При выводе уравнения для расчета предельной скорости прокатки в редуцирующих и калибровочных клетях РКБ нами принят закон сил тре-

ния по Э. Зибелю, аналогично принятому М. Я. Бровманом [4], В. Н. Выдриним [6] и многими другими авторами [2]. Положение нейтрального сечения при деформации металла в РКБ рассчитано с учетом влияния массовых сил и продольных усилий между клетями [5; 7].

Сопrotивление металла при высокоскоростной прокатке в редуционно-калибрующем блоке проволочного стана ОАО «БМЗ» принято по результатам экспериментальных исследований, изложенных в работе [1]. Показатель сил трения рассчитан по формуле $f' = p_{cp} / f$, где f – коэффициент трения на поверхности контакта металла с валками, рассчитан по Экелунду для установившегося процесса с учетом скорости прокатки. Расчеты показали, что показатель сил трения при прокатке в редуционно-калибрующем блоке можно принимать равным 0,3.

Предельные скорости прокатки, приведенные в табл. 1 рассчитаны исходя из резерва сил трения в очаге деформации. В редуцирующих клетях РКБ (клетки № 31 и 32) предельные скорости составляют 137...195 м/с, в калибрующих клетях (клетки № 33 и 34) составляют 170...216 м/с. Такие скорости обеспечиваются резервом втягивающих сил трения в клетях РКБ, поэтому и обеспечивается стабильность процесса прокатки в существующих конструкциях РКБ. Для обеспечения стабильности установившегося процесса при скоростях 200 м/с и более, необходимо изменение калибровки валков РКБ и системы привода клетей с целью минимизации продольных усилий натяжения и подпора между клетями, т. е. потребуются корректировка передаточных чисел общего редуктора РКБ.

В связи с высокими скоростями прокатки, достигаемыми в клетях РКБ, возрастает влияние массовых сил (влияние динамического эффекта). Так, при скорости 120 м/с в последней клетке десятиклетьевого блока стана 150 ОАО «БМЗ» работа на преодоление массовых сил составляет около 40% работы, затрачиваемой на пластическую деформацию металла. Продольное напряжение, создаваемое массовыми силами, изменяется от нуля до максимального значения на выходе металла из валков. Влияние динамического эффекта в некоторых случаях может приводить к разрыву полосы вблизи плоскости выхода металла из очага деформации, поэтому предельная скорость прокатки должна учитывать опасность разрыва полосы в очагах деформации РКБ.

Для исследования характера воздействия динамического эффекта на прокатываемую полосу в деформационной зоне и сравнения возникающего продольного напряжения от действия массовых сил с механическими свойствами металла используется коэффициент напряжения массовых сил:

$$K_{\text{нм}} = \frac{\rho}{\sigma_s} \left(\frac{\mu + 1}{2 \cdot \mu} \right) \cdot V_1^2 \cdot \ln \mu . \quad (3)$$

Отношение ρ/σ_S характеризует физико-механические свойства металла, в случае прокатки углеродистой стали при температуре 1000°C отношение $\rho/\sigma_S = 3,75 \times 10^{-5} \text{ с}^2/\text{м}^2$.

Анализ выражения (3) показывает, что опасность разрыва раската под действием массовых сил появляется, когда коэффициент $K_{\text{нм}}$ равен 1.

На рис.6 приведена зависимость предельной скорости прокатки углеродистой стали в клетях РКБ, исходя из условия разрыва раската в сечении выхода металла из очага деформации в результате действия массовых сил.

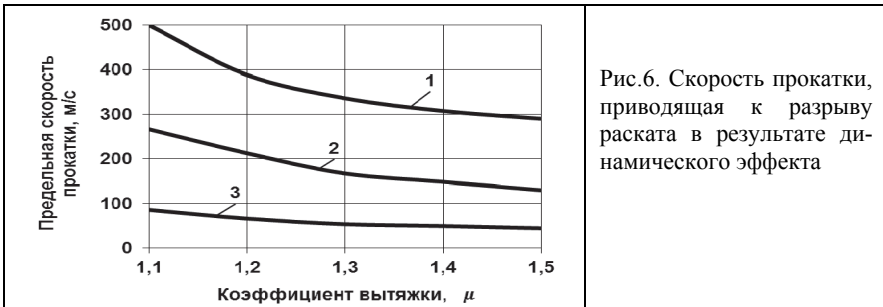


Рис.6. Скорость прокатки, приводящая к разрыву раската в результате динамического эффекта

При реальных вытяжках, применяемых в редуционно-калибрующих блоках, скорости прокатки, при которых происходит разрыв металла вблизи выхода раската из очага деформации выходят далеко за пределы возможных скоростей прокатки, т.е. реальных ограничений по механическим свойствам для различных сталей нет.

Выводы. Разработаны рекомендации по повышению скорости прокатки катанки $\text{Ø}4,5\text{-}5,0$ мм в редуционно-калибровочных блоках непрерывного проволочного стана с учетом влияния массовых сил. Показано, что путем оптимизации деформационных режимов прокатки и передаточных коэффициентов в РКБ, возможно достижение скоростей прокатки до 200 м/с.

1. *Нейтральный угол и опережение при высокоскоростной прокатке в чистовых блоках проволочных станов / А.А.Горбанев, В.В.Филиппов, С.М.Жучков и др. // Литье и металлургия. – 2001. – №4. – С. 113-118.*
2. *Грудев А.П.* Внешнее трение при прокатке. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
3. *Целиков А.И.* Теория расчета усилий в прокатных станах. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
4. *Бровман М.Я.* Применение теории пластичности в прокатке. – М.: Металлургия, 1966. – 245 с.
5. *О массовых силах в зонах деформации при прокатке на современных проволочных и мелкосортно-проволочных станах / В.В.Филиппов, А.А.Горбанев, В.А.Тищенко и др. // Литье и металлургия. – 2001. – №3. – С. 75-78.*

6. *Процесс непрерывной прокатки.* / В.Н.Выдрин, А.С.Федосиенко, В.И. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
7. *Исследования сопротивления деформации при высокоскоростной прокатке* / А.А.Горбанев, Д.А.Деркач, Б.Н.Колосов и др. //Сталь. – 1977. – №12. – С.36-37.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук И. Ю. Приходько*

А.О.Горбаньов, П.В.Токмаков, В.Г.Раздобреєв, Д.Г.Паламар

Визначення граничних швидкостей безперервної високошвидкісного прокатування катанки різного діаметру з використанням редуційно-калібрівального блоку

Метою даної роботи є аналітичне визначення максимально можливих (граничних) швидкостей безперервного високошвидкісного прокатування катанки різного діаметру у редуційно-калібрівальному блоці (РКБ) з урахуванням впливу масових сил. Показано, що шляхом оптимізації деформаційних режимів прокатування та передавальних коефіцієнтів в РКБ, є можливість досягнення швидкостей прокатування до 200 м/с.

Ключові слова: високошвидкісне безперервне прокатування, катанка, гранична швидкість, редуційно-калібрівальний блок

A.A.Gorbanev, P.V.Tokmakov, V.G.Razdobreev, D.G.Palamar

Definition of speed limits continuous high-speed rolling of wire of a various diameter at use reducing-calibration of the block

The purpose of the present job is the analytical definition of the greatest possible (limiting) speeds continuous high-speed rolling of wire of a various diameter in reducing-calibration the block (RCB) in view of influence of mass forces. Is shown, that by optimization deformation of modes rolling and transfer factors in RCB, the achievement of speeds prokattki up to 200 m/s is possible.

Keywords: high-speed continuous rolling, wire rod, limiting speed, reducing-sizing unit