

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

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В ТРЕХОЧАГОВОМ ПРОКАТНОМ МОДУЛЕ

Выполнен теоретический анализ методик для расчета силовых параметров прокатки в неприводной и приводных клетях трехочагового прокатного модуля. Получены экспериментальные данные напряжений проталкивания и среднего коэффициента напряженного состояния при горячей прокатке для различных параметров прокатки в приводной и неприводной клетях.

Анализ состояния проблемы.

Трехочаговый прокатный модуль представляет собой две приводные клетки с общим приводом и расположенную между ними неприводную клетку. Прокатка в неприводной клетке (НК) осуществляется за счет усилия подпора, создаваемого первой приводной клетью (ПК1), и усилия натяжения, создаваемого второй приводной клетью (ПК2). Общий привод приводных клеток позволяет сократить габариты модуля и устанавливать его на различных участках по длине стана и стабилизировать скоростной режим прокатки. Благодаря малым габаритам НК и общим приводом ПК1 и ПК2 уменьшается длина стана по сравнению с традиционным расположением оборудования непрерывного сортового или проволочного стана. Неприводная клетка, расположенная в межклетьевом промежутке «ПК1–ПК2», может быть выполнена с вертикальным, горизонтальным или с универсальным расположением валков. Трехочаговый прокатный модуль может быть использован также в качестве самостоятельного стана для производства малотоннажных партий проката.

Деформация металла в валках НК осуществляется за счет использования резерва сил трения в очагах деформации приводных клеток. Процесс проталкивания раската через неприводные валки, пределы осуществимости процесса по резерву сил трения в приводной клетке и устойчивости продольному изгибу полосы в комплексе ПК–НК, а также особенности энергопотребления при использовании этого комплекса подробно рассмотрены в работах [1–7]. В общем случае, когда резерв сил трения в ПК1 и ПК2, необходимый для деформации металла в НК полностью не исчерпан, в очагах деформации приводных клеток существуют зоны опережения, в которых избыточная энергия отдается от металла приводным валкам. При использовании в НК подшипников качения или ПЖТ момент сил трения в опорах валков незначителен, и его можно не учитывать, т.е. можно записать $M_{нк} = 0$. В этом случае задача расчета силовых параметров в НК сводится к определению давления металла на валки неприводной клетки, определяющего необходимую силу проталкивания или протяжки металла через вращающиеся валки неприводной клетки.

В литературе имеется достаточное количество формул для расчета давления металла на валки при непрерывной прокатке, которые могут быть использованы для расчета усилий подпора или натяжения, необходимых для деформации металла в неприводной клетке [8–14]. Подставляя параметры прокатки, в неприводной клетке, и решая уравнения давления относительно продольных усилий, получаем усилия подпора или протяжки, требуемые для преодоления сопротивления деформации металла в неприводной клетке. Имеющиеся в литературе теоретические формулы, связывающие усилия проталкивания и проволакивания с параметрами деформации в неприводной клетке, получены при различных допущениях, поэтому необходима экспериментальная оценка результатов расчетов для условий использования НК в виде трехочагового прокатного модуля в потоке сортового или проволочного стана.

Методика экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования выполнены на стане 250 ИЧМ, оборудованном неприводной клетью с валками диаметром 200 мм, закрепленной на приводной клетке. В процессе экспериментов использовалась неприводная клетка с горизонтальным и вертикальным расположением рабочих валков. В приводную клетку задавали образцы из стали 3 сечением 25 x 25 мм при температуре 1150–1200⁰С, скорость прокатки составляла 0,4 м/с. Прокатка в приводной и неприводной клетях осуществлялась в гладких валках по схемам Г–Г и Г–В. Варьировали степень деформации в ПК и НК и отношение ширины полосы, задаваемой в НК, к длине очага деформации в НК. Измеряли усилия подпора, необходимые для деформации металла в НК с различными обжатиями, силы прокатки в ПК и НК, момент и мощность на валу электродвигателя ПК. Коэффициенты обжатия в ПК и НК, степени деформации и размеры раскатов варьировали в пределах, применяемых при прокатке в клетях промежуточных групп современных проволочных и мелкосортных станов. Методика проведения экспериментальных исследований и используемая аппаратура более подробно описаны в работе [6]. Погрешности результирующих измерений силовых параметров процесса составляли 11,6...12,2 %, а энергетических параметров двигателя ПК – 1,0...2,8 %.

Изложение основных материалов исследования.

На рис.1 приведены экспериментальные зависимости коэффициента обжатия в неприводной клетке $\eta_{нк} = \frac{H_{нк}}{h_{нк}}$ от удельной силы подпора (на-

пряжения проталкивания, $\sigma_{пр}$). При прокатке по схемам Г–Г и Г–В при равных удельных усилиях подпора достигались примерно одинаковые коэффициенты обжатия в неприводной клетке, что объясняется близкими пределами изменения отношения длины очага деформации к средней высоте полосы и контактной площади, определяющими силу прокатки в НК

и силу проталкивания, необходимую для осуществления деформации при заданном значении $\eta_{\text{НК}}$.

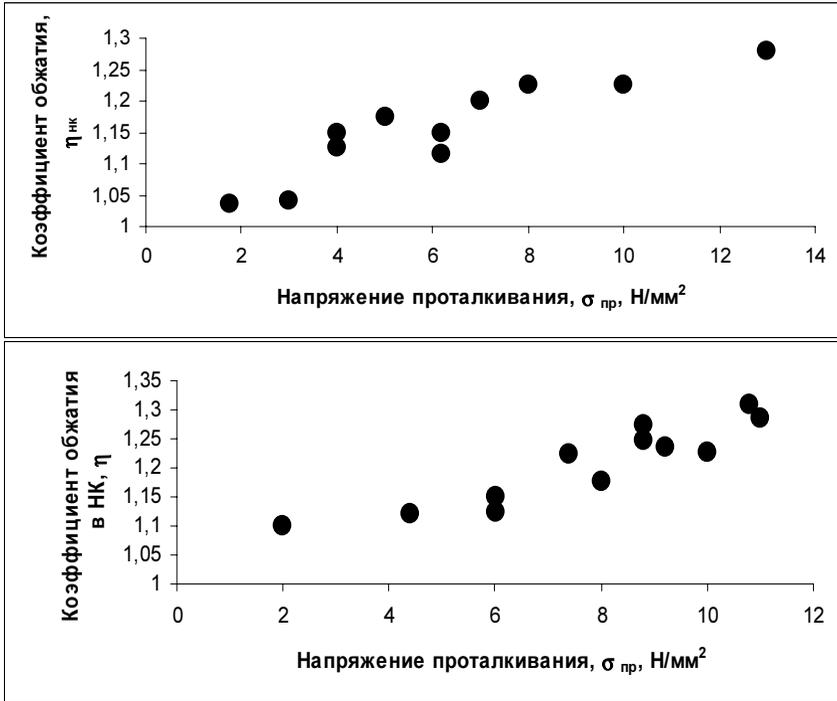


Рис.1 Экспериментальная зависимость коэффициента обжатия в НК от напряжения проталкивания – при прокатке в комплексе ПК–НК по схемам Г–Г (вверху) и Г–В (внизу).

Рис.1 соответствует заполнению металлом ПК1 и НК трехочагового модуля, когда передний конец раската находится в промежутке НК – ПК2 и не произошел его захват валками ПК2.

На рис.2–4 приведены экспериментальные зависимости коэффициента вытяжки в НК, относительного напряжения проталкивания и коэффициента напряженного состояния от коэффициента обжатия в НК. Чем больше коэффициент обжатия $\eta_{\text{НК}}$, тем больше вытяжка $\mu_{\text{НК}}$, $\frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_S}$ и $\frac{P_{\text{ср}}}{\sigma_S}$, где

$P_{\text{ср}}$ – среднее давление в НК, σ_S – сопротивление деформации металла в НК.

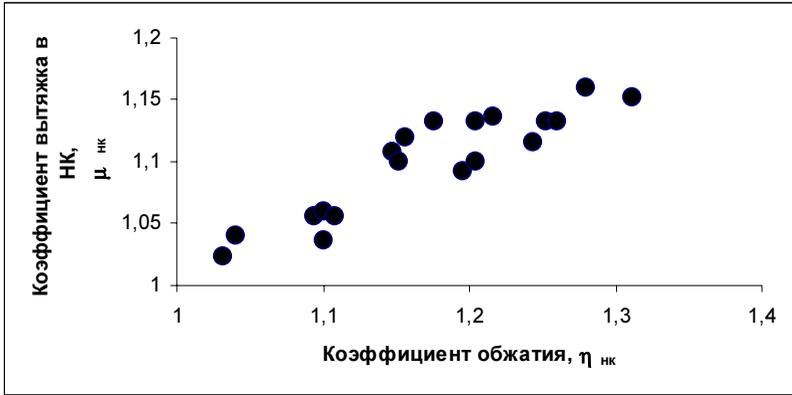


Рис. 2 Зависимость коэффициента вытяжки от коэффициента обжатия в НК

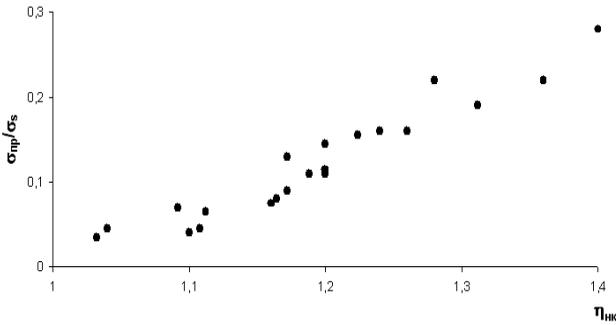


Рис. 3 Зависимость относительного напряжения проталкивания от коэффициента обжатия в НК

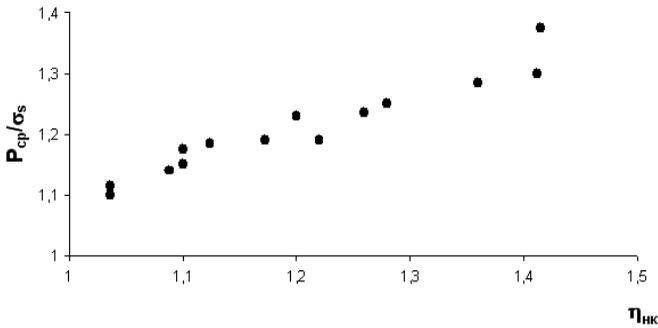


Рис. 4 Зависимость коэффициента напряженного состояния от коэффициента обжатия в НК

Выполнен анализ соответствия относительного напряжения проталкивания и коэффициента напряженного состояния, рассчитанных по раз-

личным методикам, экспериментальным данным. Рассмотрены методики М.Г.Полякова, Б.А.Никифорова и Г.С.Гуна, А.И.Целикова, Ю.С.Чернобривенко и Л.В.Кулакова и А.П.Чекмарева и М.Д.Куцыгина.

При установившемся процессе прокатки в модуле в общем случае имеется напряжение проталкивания (задний подпор) и напряжение проволакивания раската в неприводной клетке (переднее натяжение). Поэтому на входе в НК коэффициент напряженного состояния равен $\frac{P'_x}{\sigma_s} = 1 + \frac{\sigma_{пр.}}{\sigma_s}$, а на выходе из неприводной клетки $\frac{P''_x}{\sigma_s} = 1 - \frac{\sigma_{пров.}}{\sigma_s}$. При

прокатке в комплексе ПК1 – НК $\frac{P''_x}{\sigma_s} = 1$. При согласованном режиме

прокатки продольные усилия до и после модуля отсутствуют, поэтому в клетке ПК1 на входе $\frac{P'_x}{\sigma_s} = 1$, на выходе $\frac{P''_x}{\sigma_s} = 1 + \frac{\sigma_{пр.}}{\sigma_s}$, а в клетке ПК2 – со-

ответственно $\frac{P'_x}{\sigma_s} = 1 - \frac{\sigma_{пров.}}{\sigma_s}$ и $\frac{P''_x}{\sigma_s} = 1$. Данные положения заложены в гра-

ничные условия во всех рассматриваемых методиках для вывода распределения коэффициента напряженного состояния по длине очагов деформации в клетках модуля, среднего коэффициента напряженного состояния и напряжений проталкивания и проволакивания металла через неприводные вращающиеся валки. Расчеты выполнены для температурно-скоростных и деформационных параметров процесса ПК – НК, соответствующих условиям проведения экспериментов.

В работе М.Г.Полякова и др. [12] рассмотрена деформация металла в многовалковых калибрах с приводными и холостыми валками в условиях всестороннего сжатия. Изменение площади поперечного сечения выражено через текущий коэффициент вытяжки. При выводе формул для расчета силовых параметров учтено упрочнение металла при деформации металла в НК, дуга захвата заменена хордой, а распределение силы трения принято по закону Г.Амонтона $\tau_x = fp$, где f – коэффициент трения на дуге контакта металла с валками, а p_x – нормальные напряжения в очаге деформации. Коэффициент вытяжки в нейтральном сечении по данным работы [12] рассчитывается приближенно как $\mu_n = 0,975 \sqrt{\mu}$. Ю.И.Коковихиним

предложена следующая формула для расчета μ_n : $\mu_n = 0,975 \sqrt{\mu}$ [15].

Распределение коэффициента напряженного состояния в зависимости от текущего значения коэффициента вытяжки $\mu_x = \frac{F_o}{F_x}$ показывает, что

нейтральное сечение при проталкивании расположено ближе к плоскости входа металла в валки неприводной клетки, чем при проволакивании при

прочих равных условиях. Это означает, что при деформации металла в НК при проталкивании валки неприводной клетки будут вращаться медленнее, чем при проволакивании, а напряжение проволакивания будет меньше, чем напряжение проталкивания.

Полученные уравнения качественно правильно описывают процесс деформации металла в клетях модуля.

Известные формулы А.И.Целикова [8] для распределения нормального давления по дуге контакта, расчета среднего нормального давления в очаге деформации и положения нейтрального сечения получены для распределения сил трения по закону Г.Амонтона и при замене дуги захвата хордой.

Приняв, что затрачиваемая на прокатку мощность при применении натяжения не изменяется, момент прокатки для двух валков, необходимый для преодоления сопротивления при деформации металла без учета сопротивления в подшипниках, равен

$$\mu_{\text{пр.}} = \left(P'_{\text{ср.}} \ln \mu + \sigma_o - \sigma_1 \right) \frac{F_1 D}{2} (1 + S), \quad (1)$$

где $P'_{\text{ср.}}$ – среднее давление в очаге деформации (без учета натяжения);

F_1 – площадь поперечного сечения полосы на выходе из валков;

D – диаметр валков;

S – опережение;

σ_o и σ_1 – заднее и переднее натяжения.

При прокатке с подпором следует соответственно изменить знаки перед σ_o и σ_1 . Для НК модуля $\mu_{\text{пр.}} = 0$, тогда из уравнения (1) можно определить натяжения подпора и натяжения, необходимые для деформации металла в НК, а также рассчитать средний коэффициент напряженного состояния в очаге деформации НК.

В работе [13] момент прокатки определен решением уравнения

$$\mu_{\text{пр.}} = fR^2 \left[\int_{\gamma}^{\alpha} \rho'_{\varphi} d\varphi - \int_o^{\gamma} \rho''_{\varphi} d\varphi \right], \quad (2)$$

где α , γ – углы захвата и нейтрального сечения, соответственно.

ρ_{φ} – радиальное давление в точке с координатным углом φ .

При решении уравнения (2) закон распределения ρ_{φ} в зонах отстаивания и опережения принят по известным уравнениям А.И.Целикова для закона трения по Г.Амонтону, а изменение высоты полосы представлено в виде некоторой кривой $h_{\varphi} = h_1 + R\alpha\varphi$.

После интегрирования уравнения (2) и приняв $\mu_{\text{пр.}} = 0$, для установившегося процесса прокатки получили уравнения для определения напряжений подпора и натяжения [13], которые решаются путем подбора.

В решении А.П.Чекмарева и М.Д.Куцыгина дуга захвата заменена кривой $h_\phi = h + R\alpha\phi$, распределение сил трения по дуге контакта принято по Э.Зибелю [14]. Получено следующее уравнение для расчета среднего коэффициента напряженного состояния в очаге деформации в виде:

$$\frac{P_{\text{ср.}}}{\sigma_s} = \frac{1}{\eta-1} \left[\delta \left(\eta - 2 \frac{h_{\text{н}}}{h} + 1 \right) - \psi_o \eta + \psi_1 \right] \quad (3)$$

$$\text{где } \frac{h_{\text{н}}}{h} = \eta^{0,5 + \frac{1}{\delta(\eta-1)}} \cdot e^{\frac{\psi_1 - \psi_o - 2}{2\delta}} \quad (4)$$

В расчетах по уравнениям (3) и (4) коэффициент δ подставляется в виде $\delta = \frac{2f'}{\alpha}$, где f' – показатель сил трения, равный $f' = f \frac{P_{\text{ср.}}}{\sigma_s}$;

$$\psi_o = \frac{\sigma_o}{\sigma_s}; \quad \psi_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_s}.$$

При прокатке с подпором перед и после неприводной клетки следует изменить знаки перед ψ_o и ψ_1 .

Получены также уравнения для расчета распределения коэффициента напряженного состояния в очаге деформации НК при установившемся процессе, заполнение модуля металлом и его освобождения.

В НК $M_{\text{пр}} = 0$, тогда напряжения проталкивания и проволакивания определяются следующим образом:

$$\frac{\sigma_{\text{пр.}}}{\sigma_s} = \psi_o = -2 \left[\delta \ell n \frac{2\eta^{0,5 + \frac{1}{\delta(\eta-1)}}}{\eta+1} - 1 \right] \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{\text{пров.}}}{\sigma_s} = \psi_1 = 2 \left[\delta \ell n \frac{\eta+1}{2\eta^{0,5 + \frac{1}{\delta(\eta-1)}}} + 1 \right] \quad (6)$$

В уравнении (5) ψ_o имеет знак «-», т.к. напряжение $\sigma_{\text{пр.}}$ является напряжением подпора.

При установившемся процессе прокатки в трехочаговом модуле, когда перед НК и после нее имеются продольные напряжения, величины ψ_1 и ψ_o определяется решением уравнения, задаваясь одной из величин продольного напряжения:

$$\frac{2}{\eta-1} \left[\eta^{0,95 + \frac{1}{\delta(\eta-1)}} e^{\frac{\psi_1 - \psi_o - 2}{2\delta}} - 1 \right] = 1, \quad (7)$$

Как и в методиках, изложенных в работах [8] и [13], деформация металла в НК с заданным коэффициентом обжатия $\eta_{\text{нк}}$ обеспечивается рав-

ными напряжениями проталкивания и проволакивания ($\frac{\sigma_{np.}}{\sigma_s}$ и $\frac{\sigma_{пров.}}{\sigma_s}$), од-

нако общее усилие проталкивания будет больше за счет большей площади сечения раската на входе в клеть. В приводных клетях модуля средний коэффициент напряженного состояния определяются по уравнениям (3) с учетом продольных напряжений подпора или проволакивания в ПК1 и ПК2. Количественно одинаковое влияние на момент прокатки переднего и заднего продольных напряжений теоретически и экспериментально показано в работах В.Н.Выдрина, Ю.Т.Батина, А.Хенделя и Т.Шпиттеля и др. авторов [16–18].

Результаты исследования.

Выполнено сравнение рассчитанных по различным методикам напряжений подпора и средних коэффициентов напряженного состояния с экспериментальными данными, показанными при прокатке в клетях комплекса ПК–НК. Сравнение расчетных по методике [12] и экспериментальных данных для параметров деформации, приведенных на рис.3, показали, что чем меньше коэффициент обжатия и вытяжка в НК, тем больше погрешность формулы для расчета $\frac{\sigma_{np.}}{\sigma_s}$, которая дает завышенные ре-

зультаты. При очень малых коэффициентах обжатия в неприводной клетки ($\eta_{нк} < 1,08$) расчетное напряжение проталкивания в несколько раз превышает фактическое.

С увеличением $\eta_{нк}$ и $\mu_{нк}$ погрешность формулы для расчета $\frac{\sigma_{np.}}{\sigma_s}$

уменьшается, а при $\eta_{нк} > 1,35$ расчетное значение напряжения проталкивания становится меньше экспериментального, что, по-видимому, объясняется увеличением погрешности, связанной с заменой дуги контакта хордой. Наибольшая сходимость расчетных и экспериментальных данных напряжения проталкивания наблюдалась в пределах $\eta_{нк} = 1,25 \dots 1,30$ (погрешность расчетных значений – до 15 %).

Для достижения заданной вытяжки в двухвалковой НК модуля вследствие наличия уширения требуется большая величина $\eta_{нк}$, чем при деформации раската квадратного сечения в четырехвалковой клетки, на выходе из НК ширина раската не равна высоте, контактная площадь в двух-

валковой клетки больше. Поэтому расчеты $\frac{P_{cp.}}{\sigma_s}$ по методике М.Г. Поляко-

ва и др. дают завышенные результаты, и использовать ее для расчета коэффициента напряженного состояния при прокатке в неприводной и приводных двухвалковых клетях трехочагового модуля не рекомендуется.

Формулы А.И.Целикова получены для случаев прокатки в двух валках. Расчеты коэффициента напряженного состояния в ПК1 с учетом пе-

реднего подпора и в НК с учетом заднего подпора показали, что погрешность определения $\frac{\sigma_o}{\sigma_s} = \frac{\sigma_{np.}}{\sigma_s}$ находится в пределах +13...60 %, при этом

чем больше коэффициент обжатия в неприводной клетки, тем больше погрешность расчетов. При расчете среднего коэффициента напряженного состояния в НК и ПК1, погрешность расчета находится в пределах –15+42%. Увеличение погрешности при увеличении коэффициента обжатия объясняется тем, что уравнения А.И.Целикова получены при малых углах захвата и α/f при прокатке относительно широких полос с $\frac{\ell}{h_{cp.}} \geq 2,0$. При больших углах захвата и коэффициентов обжатия прояв-

ляется также погрешность вследствие замены дуги захвата хордой.

Расчеты, по методике, изложенной в работе [13], показали, что чем больше коэффициент обжатия $\eta_{нк}$, тем больше требуемое для осуществления деформации напряжение подпора ψ_o , создаваемое первой приводной клетью. С увеличением $\eta_{нк}$ нейтральное сечение сдвигается в сторону входа металла в валки НК, т.е. требуемый больший подпор реализуется за счет увеличения зоны опережения в очаге деформации НК. При проволочковании раската в неприводных валках (освобождение модуля от металла) увеличение напряжения проволочкования, требуемое для больших отношений $\eta_{нк}$, достигается также за счет увеличения зоны опережения и угла $\gamma_{нк}$. При одинаковом коэффициенте ψ_l увеличение $\eta_{нк}$ приводит к возрастанию $\frac{\alpha_{нк}}{f}$. Как и по методике А.И.Целикова, для деформации металла в

НК требуются равные напряжения подпора и проволочкования.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения проталкивания показало, что данную методику можно использовать при

расчетах $\frac{\sigma_{np.}}{\sigma_s}$ для небольших обжатий в НК, когда $\eta_{нк} < 1,15$. В этом

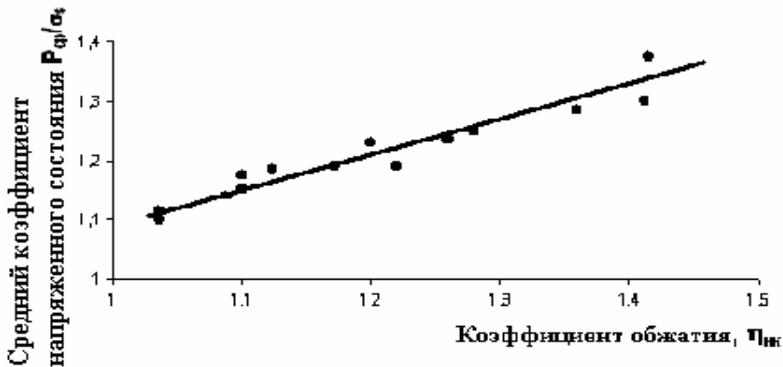
случае погрешность расчетов не превышает ± 15 %. На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости относительного напряжения протал-

кивания раската через неприводные валки $\frac{\sigma_{np.}}{\sigma_s}$ и среднего коэффициента

напряженного состояния, рассчитанные по методике А.П.Чекмарева – М.Д.Куцыгина, от коэффициента обжатия в неприводной клетки (уравнения (3) и (5)). Как и уравнение А.И.Целикова, расчетное значение ψ_o больше экспериментального, при этом максимальная погрешность была в пределах средних значений коэффициентов обжатия в неприводной клетки – $\eta_{нк} = 1,2...1,3$ – до 35 % в сторону завышения.



а)



б)

Рис.5 Зависимость напряжения подпора (а) и среднего коэффициента напряженного состояния (б) от коэффициента обжатия в неприводной клетке (точки – экспериментальные данные, прямые – результаты расчетов)

По сравнению с методикой, изложенной в работе [12], расчетные значения коэффициента заднего подпора (проталкивания), рассчитанные по уравнению (5), требуемая деформация в неприводных валках достигается существенно меньшими напряжениями подпора, что в большей степени соответствует экспериментальным данным.

Как и в уравнении А.И. Целикова, деформация металла в неприводной клетке с заданным коэффициентом обжатия обеспечивается при одинаковых напряжениях заднего подпора и переднего натяжения. Напряжения, создаваемые задним подпором и передним натяжением, смещают нейтральное сечение в сторону входа металла в НК, что позволяет осуществ-

лять деформацию металла с большими коэффициентами обжатия по сравнению с прокаткой в двух приводных валках.

Как показал анализ, при проталкивании, равно как и при проволакивании металла в НК с увеличением масштабного фактора очага деформации $(f'^2 \frac{R}{h})$ и загрузки НК различие в расчетах $\frac{P_{cp.}}{\sigma_s}$ по формулам

А.И.Целикова и А.П.Чекмарева–М.Д.Куцыгина возрастает, формула А.И.Целикова дает завышенные результаты. Это объясняется тем, что при замене дуги захвата хордой не учитывается влияние кривизны валков на наклон P_x и τ_x к оси прокатки. Некоторое влияние оказывает также принятие различных законов распределения τ_x . При подстановке в уравнение (3) расчетных значений ψ_0 методика А.П.Чекмарева – М.Д.Куцыгина определения $\frac{P_{cp.}}{\sigma_s}$ дает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных

данных при изменении $\eta_{нк}$ в пределах 1,04...1,41.

Выводы.

Анализ методик для расчета напряжения подпора, необходимого для деформации в неприводной клетке, и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показал, что при малых коэффициентах обжатия $\eta \leq 1,15$ напряжение подпора следует рассчитывать по методике А.И.Целикова, Ю.С.Чернобривенко – Л.В.Кулакова или по методике А.П.Чекмарева – М.Д.Куцыгина. При средних обжатиях ($\eta = 1,25...1,3$) хорошие результаты дает методика М.Г.Полякова и др. и при $\eta > 1,3$ – методика А.П.Чекмарева–М.Д.Куцыгина. При расчете коэффициента напряженного состояния во всем исследованном диапазоне изменения коэффициента обжатия $\eta = 1,04...1,41$ наилучшее совпадение результатов расчета с опытными данными дает формула А.П.Чекмарева–М.Д.Куцыгина.

Результаты данного исследования могут быть использованы при расчете конструктивных параметров трехочагового модуля, а также клетей для реализации процессов ПК–НК и ПК1–НК–ПК2, в котором приводные клетки имеют индивидуальный привод.

1. *Концепция* развития технологии и оборудования непрерывных сортовых прокатных станов при использовании неприводных рабочих клетей /А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков и др. // *Сталь*. – 1995. – № 5. – С. 51–53.
2. *Лохматов А.П., Жучков С.М., Кулаков Л.В.* Технология непрерывной прокатки сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей / *Металл и литье Украины*. – 1994. – № 9,10. – С. 16–19.
3. *Лохматов А.П., Жучков С.М., Беклемешев Ю.М.* Исследование продольной устойчивости расчета в межклетьевом промежутке непрерывного прокатного

- стана / Тез. докл. Всесоюз.конф. «Деформация металла в многовалковых калибрах» // Магнитогорск: МГМК. – 1987.
4. *Теряев В.А., Жучков С.М., Лохматов А.П.* Неприводная универсальная клетка для прокатки балочных профилей // Черная металлургия. – Бюл. Ин-та «Черметинформация». 1990. – № 4. – 53–55.
 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. 34–39.
 6. *Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей* / А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков и др. // Киев: «Наукова думка» – 1998. – С. 239.
 7. *Жучков С.М., Токмаков П.В.* Применение нетрадиционных подходов к организации производства малотоннажных партий проката / *Фундамент. и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. ИЧМ.* – 2003. – вып. 6. – С.166–173.
 8. *Теория прокатки. Справочник* / А.И.Целиков, А.Д.Толленов, В.И.Зюзин и др. // М.: Металлургия. – 1982. – С. 333.
 9. *Расчет усилий при непрерывной горячей прокатке* / В.Н.Жучин, Г.С.Никитин, Я.С.Шварцбарт и др. // М.: – Металлургия. – 1986. – С. 198.
 10. *Анализ характеристик прокатки в непрерывном заготовочном стане с неприводными вертикальными вальками* / Shicano H. Tetst to hagane // *Iron and Stell Inst. Jap.* – 1993. – 78, № 12. – р. 1802–1809.
 11. *Бровман М.Я.* Применение теории пластичности в прокате /М.: Металлургия. – 1991. – С. 254.
 12. *Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С.* Деформация металла в многовалковых калибрах / М.: Металлургия. – 1979. – С. 240.
 13. *Чернобривенко Ю.С., Кулаков Л.В.* Предельные величины натяжения при непрерывной прокатке / «Непрерывная прокатка». Сб.научн.тр. ИЧМ, т.23 //М.: Металлургия. – 1966. – С. 105–115.
 14. *Чекмарев А.П., Куцыгин М.Д.* Определение средних удельных давлений при прокатке с натяжением / «Непрерывная прокатка». Научн.тр. ИЧМ, т. 23 //М.: Металлургия. – 1966. – С. 7–15.
 15. *Коковихин Ю.М.* Технология сталепроволочного производства / Учебник. Киев.: 1995. – с. 608.
 16. *Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И.* Процесс непрерывной прокатки / М.: Металлургия. – 1970. – С. 456.
 17. *Батин Ю.Т.* Исследование процесса прокатки с натяжением и подпором на гладкой бочке / «Непрерывная прокатка». Сб. научн.тр. ИЧМ, т. 23 // М.: Металлургия. – 1966. – С. 54.57.
 18. *Хензель А., Шпаттель Т.* Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. / Справочник. Под ред. В.П.Полухина // М.: Металлургия. – 1982. – С. 360.

Статья рекомендована к печати д.т.н. В.В.Парусовым