

Научные статьи

BULLETIN OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 1991-3494

Volume 54, Number 357 (2015), 5 – 18

CALCULATION OF POWER PARAMETERS OF COLD ROLLING STEEL STRIPS ON MULTIFUNCTIONAL LONGITUDINAL WEDGE MILL

**S. A. Mashekova, E. P. Orlova, B. N. Absadykov, M. E. Issametova,
G. A. Smailova, E. Z. Nugman, M. L. Rakhmatulin**

Kazakh National Technical University after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan,
Kazakh-British Technical University JSC, Almaty, Kazakhstan

Keywords: rolling, stripes, figure, tension, drive.

Abstract. On purpose of obtaining qualitative sheets and decrease in power parameters in work a multipurpose longitudinal wedge mill of a new design for cold and hot rolling of thin strips from steel and alloys is offered. In work the model of tension of friction taking into account features of the intense deformed state when rolling a strip on a new mill and method of calculation of contact tension are offered. Efforts of cold rolling of steel strips and tapes on a multipurpose longitudinal wedge mill with various modes of sinking are defined.

On the basis of the received results it is defined that the efforts of rolling arising in cages of a new mill considerably decrease (from 2 to 10 times) in the direction of rolling.

It is established that work and power of rolling depend only on the tangent forces caused by tangent tension.

It is shown that decrease in effort of rolling, the working moments operating on rolls, and also increase of rigidity of a camp allow to reduce the sizes of cages and power of the drive on the one hand, and will increase the accuracy of the rolled strip on the other hand.

УДК 621.771.25/.26:669.1

РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС НА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПРОДОЛЬНО-КЛИНОВОМ СТАНЕ

**С. А. Машеков, Е. П. Орлова, Б. Н. Абсадыков, М. Е. Исаметова,
Г. А. Сmailova, Е. З. Нуғман, М. Л. Рахматулин**

Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
АО «Казахстанско-Британский технический университет», Алматы, Казахстан

Ключевые слова: прокатка, полосы, стан, напряжение, привод.

Аннотация. С целью получения качественных листов и снижения энергосиловых параметров в работе предлагается многофункциональный продольно-клиновый стан новой конструкции для холодной и горячей прокатки тонких полос из сталей и сплавов. В работе предложена модель напряжений трения с учетом особенностей напряженно-деформированного состояния при прокатке полосы на новом стане и методики расчета контактных напряжений. Определены усилия холодной прокатки стальных полос и лент на многофункциональном продольно-клиновом стане с различными режимами обжатия.

На основе полученных результатов определено, что возникающие в клетях нового стана усилия прокатки значительно снижаются (от 2 до 10 раз) в направлении прокатки.

Установлено, что работа и мощность прокатки зависят исключительно от касательных сил, вызванных касательными напряжениями.

Показано, что снижение усилия прокатки, рабочих моментов, действующих на валки, а также повышение жесткости стана позволяет уменьшить размеры клетей и мощность привода с одной стороны, и повысит точность прокатываемой полосы с другой стороны.

В настоящее время для прокатки тонких полос и лент в рулонах из сталей и сплавов наиболее часто применяются реверсивные шестивалковые станы и станы с 20-валковыми клетями [1]. Многовалковые станы позволяют вести прокатку в валках малого диаметра. К числу недостатков многовалковых станов обычного типа относится сложность конструкции рабочих клетей.

На малых предприятиях, где прокатывают цветные металлы, в том числе благородные и драгоценные, в большинстве случаев используют специализированные станы листовой прокатки, ограниченного по объему производства готового металлопроката [2]. Связано это с тем, что малый объем производства не дает возможность сформировать исходную рулонную заготовку, а также то, что процесс листовой прокатки мелких партий изделий различных типоразмеров по толщине, длине и ширине имеет более высокую степень адаптивности. При этом за счет исключения из состава стана довольно сложных устройств для намотки и натяжения полос упрощаются состав и конструкция оборудования. Это преимущество, а также ряд других технологических и конструктивных достоинств, позволяют сделать вывод о целесообразности использования способа листовой прокатки на малых предприятиях.

Условия реализации листовой прокатки характеризуются наличием различных конструктивных схем исполнения рабочих клетей, обладающих максимальной конструктивной простотой и являющихся эффективными при большом сортаменте продукции. При этом наиболее часто при прокатке цветных материалов применяют клети дуо, хотя и существует перспектива использования клетей кварт [2].

Если провести анализ проблем прокатки металлов Республики Казахстан, то можно отметить, что на данный момент является востребованным производство медных полос толщиной менее 1,0 мм, алюминиевых листов толщиной 2,0–0,5 мм, прокатка драгоценных металлов для получения заготовки ювелирной и электротехнической промышленности и т.д. Значительное количество изделий, в частности, коллекционные монеты, выпускаются из серебряных полос толщиной менее 2,0 мм. Для получения вышеперечисленных тонких листов наиболее важными являются точность геометрических размеров, планшетность, продольная и поперечная разнотолщинность. Однако в Казахстане данные листы или не прокатывают, или получают с низким качеством.

На основе вышесказанного можно сделать заключение, что в настоящее время очень остро стоит вопрос разработки и внедрения многофункциональных станов холодной и горячей прокатки, позволяющих производить листовой прокат из металлов и сплавов высокого качества.

С целью получения качественных листов, а также уменьшения энергосиловых параметров нами предлагается многофункциональный продольно-клиновый стан новой конструкции для холодной и горячей прокатки тонких полос из сталей и сплавов (рисунок 1) [3].

Многофункциональный продольно-клиновый стан для прокатки листов из сталей и сплавов содержит: электродвигатели, редукторы, шестеренные клети, универсальные шпинделы, муфты, клети с рабочими и опорными валками. При этом в первых трех клетях установлены два, а в последних двух клетях – четыре опорных вала. Вращение уменьшающееся в направлении прокатки рабочих валков осуществляется через подшипниковые клети пятью мотор-редукторами с угловой скоростью $\omega = v \cdot R$ (где v – скорость прокатки в каждой клети стана; R – радиус рабочих валков в каждой клети стана). При этом расстояния между клетями увеличены на величину опережения, а регулировку расстояния между рабочими валками производят едиными червячными нажимными механизмами, расположенными сверху и снизу станин стана и подшипниковых клетей.

Усилие прокатки определяли по методике, предложенной в работе [4].

Анализ результатов, полученных в работах [4-10], и закономерностей изменения диаметров рабочих валков нового стана, позволил принять следующее: в первой, второй и третьей клетях стана имеются зоны упругого сжатия полосы длиной $x_{1\text{упр}}$, пластической деформации длиной $x_{\text{пл}}$, представляющие зону скольжения и прилипания, а также упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_2 (рисунок 2). При этом в четвертой и пятой клетях стана имеются зоны упругого сжатия полосы длиной $x_{1\text{упр}}$, пластической деформации длиной $x_{\text{пл}}$, представляющие целиком зону скольжения и упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_2 .

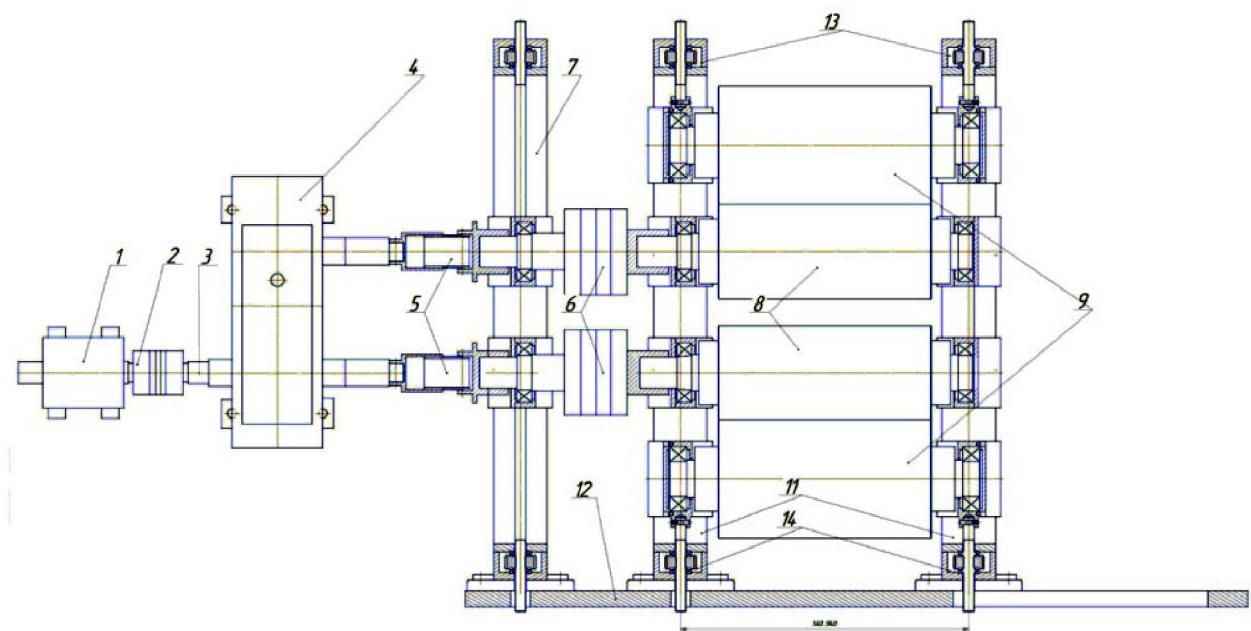


Рисунок 1 – Продольно-клиновой стан для прокатки листов:
 1 – мотор-редуктор; 2 – муфта; 3 – вал; 4 – шестеренная клеть; 5 и 6 – шпинделы; 7 – подшипниковая клеть;
 8 – рабочие валки; 9 (первых трех клетей) и 10 (последних двух клетей, не показаны) – опорные валки;
 11 – станина; 12 – опорные плиты; 13 и 14 – нажимные механизмы

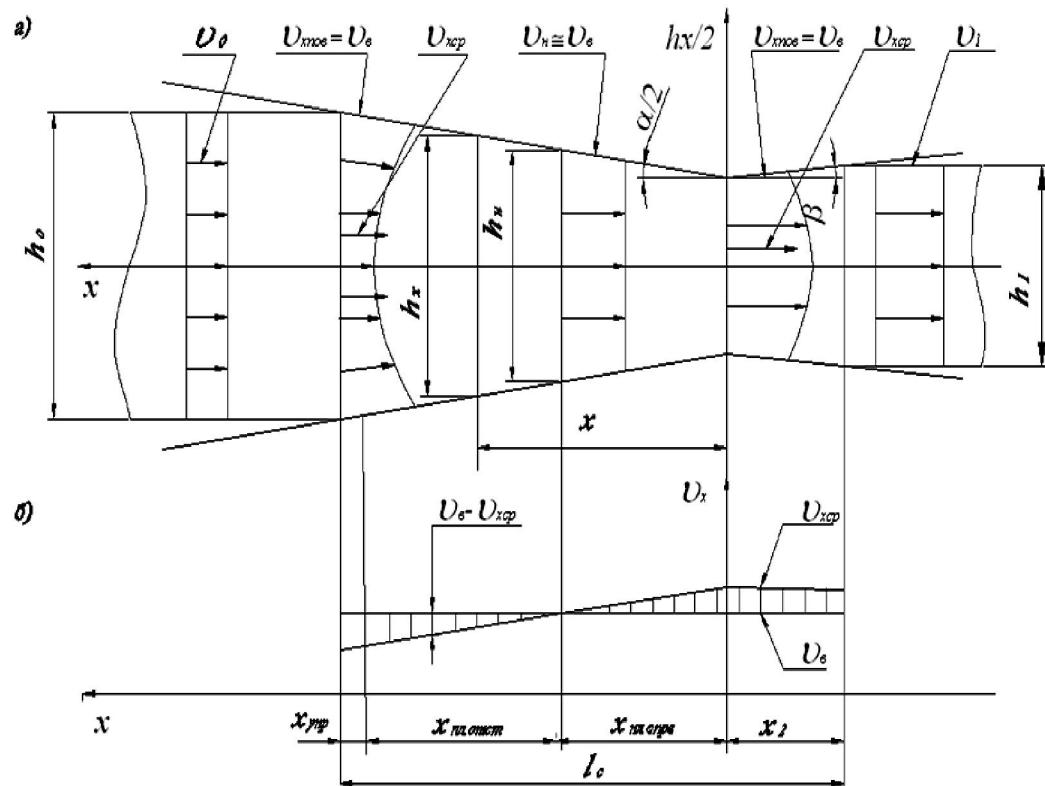


Рисунок 2 – Схема очага деформации рабочих клетей нового стана горячей прокатки
 и график изменения скоростей полосы

Несмотря на то, что при прокатке в клетях продольно-клинового стана на пластическом участке из-за явления прилипания скорость поверхностного слоя полосы постоянна относительно средней по толщине скорости полосы v_{xcp} , выполняются условия:

- при $h_x > h_h$ $v_{xcp} < v_B$;
- при $h_x < h_h$ $v_{xcp} > v_B$,

где h_h – толщина полосы в нейтральном сечении.

Поэтому по отношению к средней скорости по толщине полосы пластический участок состоит из двух зон – отставания длиной $x_{\text{пл.отст.}}$ и опережения длиной $x_{\text{пл.опер.}}$.

Протяженность первого упругого и пластических участков очага деформации определяется по формулам, приведенным в таблице 1 [4].

Протяженность второго упругого участка определяется по формуле Герца [4]:

$$x_2 = 8 p_{cp} R \left(\frac{1 - \nu_B^2}{\pi E_B} - \frac{1 - \nu_\Pi^2}{\pi E_\Pi} \right), \quad (1)$$

где p_{cp} – среднее значение нормальных контактных напряжений; R – радиус бочки рабочего валка; v_B, ν_Π – коэффициент Пуассона материала валков и полосы; E_B, E_Π – модуль упругости материала валков и полосы.

Таблица 1 – Структурные параметры очагов деформации [4]

Наименование	Обозначение, размерность	Формула
Сумма длин первого упругого и пластического участков	$x_{1\text{упр}} + x_{\text{пл.}}, \text{мм}$	$\sqrt{\frac{D_p}{2} \Delta h_i + x_2^2}$
Длина очага деформации	$l_{ci}, \text{мм}$	$x_{1\text{упр}} + x_{\text{пл.}} + x_2$
Длина первого упругого участка	$x_{1\text{упр}}, \text{мм}$	$\frac{\Delta h_{1\text{упр}} (x_{1\text{упр}} + x_{\text{пл.}})}{\Delta h_i + \Delta h_{2\text{упр}}}$
Длина пластического участка	$x_{\text{пл.}}, \text{мм}$	$\sqrt{\frac{D_p}{2} \Delta h_i + x_2^2 - x_{1\text{упр}}^2}$
Длина зоны опережения пластического участка	$x_{\text{пл.опер.}}, \text{мм}$	$\frac{(h_{\text{пл.}} - h_i + \Delta h_{2\text{упр}})}{2 \operatorname{tg}(\alpha/2)}$
Длина зоны отставания пластического участка	$x_{\text{пл.отст.}}, \text{мм}$	$x_{\text{пл.}} + x_{\text{пл.опер.}}$
Тангенсы углов $\alpha/2$ и β	$\operatorname{tg}(\alpha/2)$ $\operatorname{tg}\beta$	$\frac{\Delta h_i + \Delta h_{2\text{упр}}}{2(x_{1\text{упр}} + x_{\text{пл.}})}$ $\frac{\Delta h_{2\text{упр}}}{2x_2}$

Примечание: D_p – диаметр бочки рабочего валка; Δh_i – абсолютное обжатие в i -й клети; $\Delta h_{1\text{упр}}, \Delta h_{2\text{упр}}$ – максимальные величины абсолютных упругих деформаций полосы по толщине на участках с длинами $x_{1\text{упр}}$ и x_2 .

С учетом особенностей напряженно-деформированного состояния при прокатке полосы на новом стане и методики расчета контактных напряжений [4], в работе предложена следующая модель напряжений трения (см. рисунок 3):

- первая, вторая, третья клети:

а) на упругих участках и участках скольжения очага деформации действует закон трения скольжения:

$$\tau_x = \mu p_x, \quad (2)$$

μ – коэффициент трения;

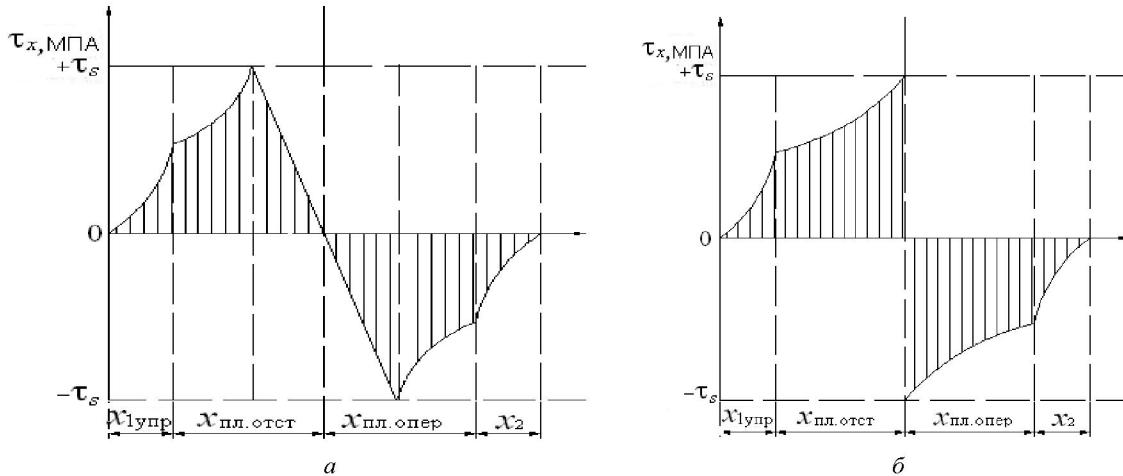


Рисунок 3 – График изменения касательных контактных напряжений в очаге деформации:
а – первая, вторая и третья клети; б – четвертая и пятая клети

б) на участке, представляющем собой зону прилипания, касательные напряжения изменяются линейно от максимального значения $\tau_{x_{\max}} = \tau_s$ до минимального значения $\tau_x \geq -\tau_s$, проходя через значение $\tau_x = 0$ в нейтральном сечении, в соответствии с выражением:

$$\tau_x = \tau_s \left(\frac{h_x - h_n}{h_{1,скол} - h_n} \right), \quad (3)$$

где $h_{1,скол}$ – толщина полосы на границе участков скольжения и прилипания;

- четвертая и пятая клети:

на упругих участках длиной $x_{1упр}$ и x_2 и участках скольжения очага деформации действует закон трения скольжения (2).

Характерная особенность условий трения в зоне прилипания состоит в том, что в ней нормальные и касательные контактные напряжения практически не зависят от коэффициента трения скольжения, а зависят от сопротивления чистому сдвигу материала полосы и разности между скоростью полосы v_{xep} (средней в каждом поперечном сечении) и окружной скоростью бочки валков v_b .

Помимо модели касательных напряжений, большое значение для расчета контактных напряжений имеет величина сопротивления деформации полосы.

Для расчета средних значений нормальных контактных напряжений, возникающих в первой, второй и третьей клетях, использовали уравнения, приведенные в таблице 2 [4].

По известным значениям нормальных контактных напряжений на каждом из трех участков вычислили среднее нормальное контактное напряжение для всего очага деформации по формуле [4]:

$$p_{cp1} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_{1,upr} + p_{2,3} x_n + p_4 x_2). \quad (4)$$

В связи с тем, что в четвертой и пятой клетях на упругих участках и участках скольжения очага деформации действует закон трения скольжения для оценки контактного (удельного) давления p_{cp} , использовали формулу А.И. Целикова [11, 12]:

$$p_{cp2} = 1,15 \{ [x_{0i} \sigma_{s0i} h_0 / (d-2)] [(h_0/h_n)^{d-2} - 1] + [x_{1i} \sigma_{s1i} h_1 / (d+2)] [(h_n/h_1)^{d+2} - 1] \} / \Delta h, \quad (5)$$

где h_0, h_1 – толщина полосы на входе и на выходе из очага деформации; $x_{0i} = 1 - q_{0i}/(1,15\sigma_{s0i})$ – коэффициент, характеризующий влияние переднего натяжения на p_{cp} ; $x_{1i} = 1 - q_{1i}/(1,15\sigma_{s1i})$ – коэффициент, характеризующий влияние заднего натяжения на p_{cp} ; $d = 2\mu l_d / \Delta h$ – параметр очага деформации (по Целикову А.И.); $h_n = [x_{0i}/x_{1i} (h_0)^{d-1} (h_1)^{d+1}]^{1/2d}$ – толщина полосы в нейтральном сечении (в сечении, котором меняется знак касательных напряжений); q_{0i}, q_{1i} – натяжение на входе и на выходе из очага деформации; $\sigma_{s0i}, \sigma_{s1i}$ – сопротивление пластической деформации на входе и на выходе из очага деформации; μ – коэффициент внешнего трения; $\Delta h = h_0 - h_1$ – абсолютное обжатие.

Таблица 2 – Формулы для расчета средних значений нормальных контактных напряжений [4]

Участок	Формула
Упругий участок длиной $x_{1\text{упр}}$	$p_1 = 1,15E_{\Pi} \left\{ \frac{1}{\delta_{i-1}} + \frac{L}{\delta_{i-1}} \left[\left(\frac{\delta_{i-1}-1}{(\delta_{i-1}+1)\delta_{i-1}} - \frac{q_0}{1,15E_{\Pi}} \right) (D^{\delta_{i-1}} - 1) - 2 \ln D \right] \right\},$ <p>где $\delta_{i-1} = \frac{\mu_i}{\operatorname{tg}\alpha/2}$; $D = \frac{E_{\Pi}}{E_{\Pi} - \sigma_{\phi.m}}$; $L = \frac{E_{\Pi} - \sigma_{\phi.m}}{\sigma_{\phi.m}}$</p>
Зона прилипания длиной $x_{\text{пл}}$	$p_{2,3} = \frac{2\tau_s}{h_{2\text{упр}} - h_{1\text{упр}}} \left\{ \left[1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg}\alpha/2(h_{1\text{упр}} - h_{\text{H}})} \right] \left[h_{2\text{упр}} (\ln h_{2\text{упр}} - 1) - h_{1\text{упр}} (\ln h_{1\text{упр}} - 1) \right] - \frac{0,25(h_{2\text{упр}}^2 - h_{1\text{упр}}^2)}{\operatorname{tg}\alpha/2(h_{1\text{упр}} - h_{\text{H}})} + \frac{p_{1\text{упр}}}{2\tau_s} + \frac{0,5}{\operatorname{tg}\alpha/2(h_{1\text{упр}} - h_{\text{H}})} - \left[1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg}\alpha/2(h_{1\text{упр}} - h_{\text{H}})} \right] \ln h_{1\text{упр}} (h_{2\text{упр}} - h_{1\text{упр}}) \right\}$
Упругий участок длиной x_2	$p_4 = 1,15E_{\Pi} \left\{ \frac{1}{\delta_i} + \frac{L}{\delta_i + 1} \left[\left(\frac{\delta_i - 1}{(\delta_i + 1)\delta_i} - \frac{q_1}{1,15E_{\Pi}} \right) (D^{\delta_i} - 1) - 2 \ln D \right] \right\}$

Примечание: $h_{1\text{упр}}$ – толщина полосы на границе первого упругого и пластического участков; $h_{2\text{упр}}$ – толщина полосы на границе второго упругого и пластического участков; $p_{1\text{упр}}$ – значение нормального контактного напряжения.

Для расчета усилия прокатки использовали известную формулу [11, 12]

$$P = (p_{cp1} + p_{cp2})l_{ci} \cdot b, \quad (6)$$

где b – ширина прокатываемой полосы.

Мощность прокатки определяли следующим образом [4-10].

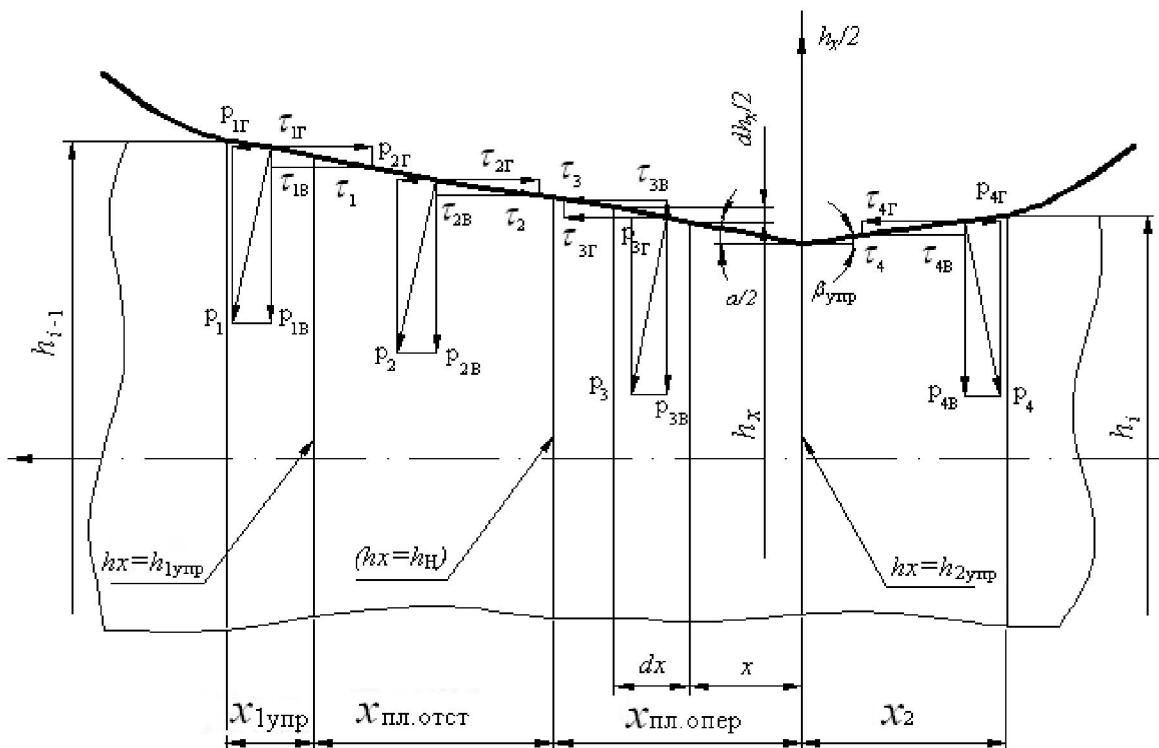


Рисунок 4 – Расчетная схема к определению мощности прокатки с учетом работы сил трения и упругопластической модели очага деформации

Для первой, второй и третьей клетей нового стана принятая нами методика расчета мощности горячей прокатки заимствована из работ [4-10] и аналогична методике, разработанной Э. А. Гарбером и И. А. Кожевниковой для станов холодной прокатки. Эта методика основана на схеме очага деформации, представленной на рисунке 4. Согласно схеме, очаг деформации состоит из двух упругих участков и одного пластического, расположенного между ними.

На упругих участках нормальные напряжения p_x и касательные напряжения τ_x связаны законом трения (2).

Пластический участок состоит из зон отставания и опережения, имеющих длины $x_{\text{пл.отст}}$ и $x_{\text{пл.опер}}$, и целиком расположен в зоне скольжения и прилипания, т.е. в контакте полосы и валков имеет место трение скольжения и покоя. Касательные напряжения на этом участке изменяются согласно зависимости (3).

Чтобы определить мощность прокатки, в работах [4-10] в соответствии с расчетной схемой рисунка 4, для каждого участка очага деформации получили выражения удельных работ прокатки, просуммировав работу нормальных и касательных сил в направлениях, параллельных оси прокатки и перпендикулярном этой оси.

Полученные таким образом выражения удельных работ приведены в таблице 3 [4].

Таблица 3 – Расчетные формулы удельных работ прокатки полосы, совершаемых валками на каждом участке очага деформации [4]

Участок	Формула
Упругий участок длиной $x_{\text{упр}}$	$a_1 = \tau_1 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha / 2} + \operatorname{tg} \alpha / 2 \right) \ln \frac{h_{i-1}}{h_{1,ynp}}, (\tau = \mu p_1)$
Зона отставания длиной $x_{\text{пл.отст}}$	$a_2 = \frac{\tau_s}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha / 2} + \operatorname{tg} \alpha / 2 \right) \ln \frac{h_{1,ynp}}{h_H}$
Зона опережения длиной $x_{\text{пл.опер}}$	$a_3 = -\frac{\tau_s}{2} \left(\frac{h_H - h_{2,ynp}}{h_{1,ynp} - h_H} \right) \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha / 2} + \operatorname{tg} \alpha / 2 \right) \ln \frac{h_H}{h_{2,ynp}}$
Упругий участок длиной x_2	$a_4 = -\tau_3 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta_{ynp}} + \operatorname{tg} \beta_{ynp} \right) \ln \frac{h_i}{h_{2,ynp}}, (\tau_3 = \mu p_4)$

Анализ выражений, приведенных в таблице 3, дает основания для следующих выводов [4-10]:

1) Работа и мощность прокатки зависят исключительно от касательных сил, вызванных касательными напряжениями; от нормальных контактных напряжений работа непосредственно не зависит;

2) Полезную работу валки совершают только на первом упругом участке и в зоне отставания, а в зоне опережения и на втором упругом участке полоса возвращает валкам часть затраченной энергии (величины a_3 и a_4 отрицательны).

Удельная работа прокатки полосы при прохождении ее через валки i -й клети представляет собой сумму удельных работ, указанных в таблице 3 [4]:

$$a_{\text{пп}} = a_1 + a_2 + a_3 + a_4. \quad (7)$$

Мощность прокатки полосы в i -й клети вычисляют по известной формуле [4]:

$$N_{\text{пп}i} = a_{\text{пп}i} v_i h_i b. \quad (8)$$

Поскольку первая, вторая и третья клети «кварт» предлагаемого стана и существующие станы холодной прокатки идентичны по конструкции, для расчета параметров главного привода можно воспользоваться общей методикой, учитывающей потери на трение качения. Расчетная схема сил и моментов в клети «кварт» представлена на рисунке 5.

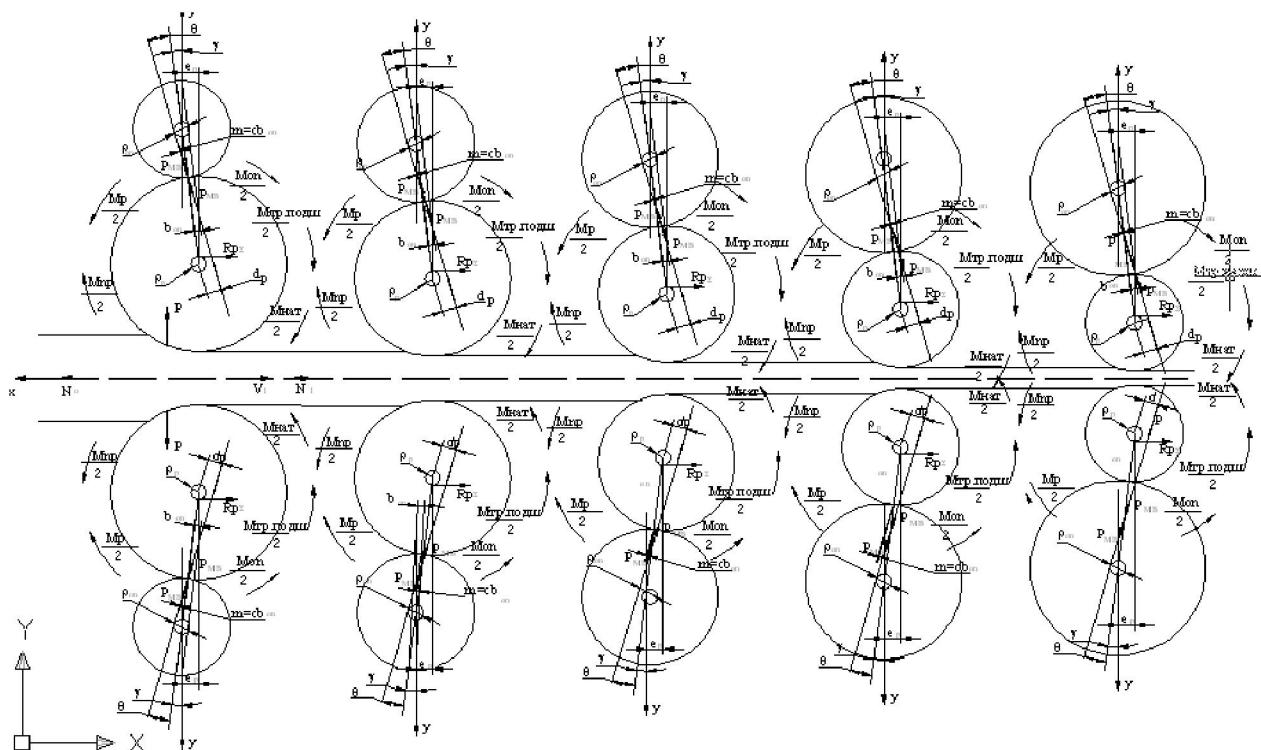


Рисунок 5 – Расчетная схема сил и моментов в клетях нового стана при постоянной скорости

Согласно этой методике, мощность двигателей главного привода рабочей клети при постоянной скорости прокатки равна [4]:

$$N_{ob,p} = N_p / \eta, \quad (9)$$

где η – КПД линии главного привода; N_p – мощность, необходимая для совершения пластической деформации и преодоления всех видов трения, в том числе трения качения между рабочими и опорными валками [4]:

$$N_p = M_p \omega_p, \quad (10)$$

где ω_p – угловая скорость вращения рабочего валка; M_p – момент, необходимый для привода рабочих валков (без учета момента инерции при разгонах и торможениях) [4]:

$$M_p = M_{np} + M_{nat} + M_{tr,p} + M_{op}, \quad (11)$$

где M_{np} – момент прокатки; M_{nat} – момент сил натяжений полосы; $M_{tr,p}$ – момент трения в подшипниках рабочих валков; M_{op} – момент, необходимый для вращения холостых опорных валков.

Момент прокатки наиболее достоверно можно вычислить через мощность прокатки [4, 12]:

$$M_{np} = \frac{N_{np}}{\omega_p}. \quad (12)$$

Момент, возникающий от разности сил заднего и переднего натяжений, равен [4, 12]:

$$M = \Delta N \frac{D_p}{2}, \quad (13)$$

где $\Delta N = N_0 - N_1$ – разность сил заднего и переднего натяжений полосы; D_p – диаметр бочки рабочего валка.

Момент трения в подшипниках рабочих валков определяют по формуле [4, 12]:

$$M_{tr,p} = \eta_{n,p} \frac{d_{n,p}}{2} [\Delta N - 2P \cdot \operatorname{tg}(\theta + \gamma)], \quad (14)$$

где $\mu_{\text{п.р}}$ – коэффициент трения в подшипниках рабочих валков; $d_{\text{п.р}}$ – рабочий диаметр этих подшипников; P – усилие прокатки; θ – угол между плоскостью действия межвалкового усилия и плоскостью, в которой лежат оси валков; γ – угол между вертикальной осевой плоскостью опорного валка и плоскостью, проходящей через оси рабочих валков.

Момент, необходимый для привода опорных валков, равен [4, 12]:

$$M_{\text{он}} = \frac{2P}{\cos(\theta + \gamma)} \cdot \left[\frac{D_p}{2} \sin \theta + cb_{\text{он}} \cdot \cos \theta \right], \quad (15)$$

где c – безразмерный коэффициент плеча трения качения; $b_{\text{он}}$ – половина ширины площадки межвалкового контакта.

В работе [10] для определения коэффициента плеча трения качения создали базу данных технологических и энергосиловых параметров режимов холодной прокатки, которая содержит следующие данные: обжатие; межклетевые напряжения; скорость прокатки; контактные напряжения; усилия и мощность прокатки; величины коэффициента плеча трения качения, при которых разность между измеренными и расчетными значениями мощности двигателей рабочей клети минимальна; максимальное нормальное напряжение в межвалковом контакте; относительные угловые скорости рабочего и опорного валков.

Полученную базу данных обработали и получили регрессионное уравнение:

$$\begin{aligned} c = & 0,888 - 1,094 \frac{p_o}{p_\delta} + 0,029 \frac{\omega_{\text{он}}}{\omega_\delta} - 0,009 \frac{D_{\text{он}}}{D_p} + 0,061 \frac{Ra}{Ra_\delta} + \\ & + 0,49 \left(\frac{p_o}{p_\delta} \right)^2 - 0,002 \left(\frac{\omega_{\text{он}}}{\omega_\delta} \right)^2 + 0,00055 \left(\frac{D_{\text{он}}}{D_p} \right)^2 - 0,015 \left(\frac{Ra}{Ra_\delta} \right)^2, \end{aligned} \quad (16)$$

где p_δ – базисное значение максимального нормального напряжения в межвалковом контакте; ω_δ – базисное значение относительной угловой скорости рабочего и опорного валков; $D_{\text{он}}$ – диаметр бочки опорного валка; Ra_δ – базисное значение среднеарифметической высоты микронеровностей бочки рабочих валков.

Допустимую мощность для всех клетей стана рассчитывали по формуле:

$$N_{\text{доп}} = N_{\text{дв}} \eta, \quad (17)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность двигателя, кВт; η – общий коэффициент потерь мощности.

Допустимый момент прокатки рассчитывали по формуле:

$$M_{\text{доп}} = N_{\text{доп}} / \omega, \quad (18)$$

где $\omega = V_{\text{в}} / R$.

Следовательно,

$$M_{\text{доп}} = \frac{N_{\text{доп}} R}{V_{\text{в}}} \quad (19)$$

где R – радиус рабочих валков, м; $V_{\text{в}}$ – скорость рабочих валков, м/с: $V_{\text{в}} = V_{\text{пл}} / (1 + s)$; $V_{\text{пл}}$ – скорость полосы, м/с; s – опережение: $s = \frac{R}{h_1} \gamma^2$.

Для расчета энергосиловых параметров использовали техническую характеристику рабочих клетей предлагаемого многофункционального продольно-клинового стана. Для холодной прокатки полосы из стали 08 кп размером $2,03 \times 100$ мм на непрерывном многофункциональном продольно-клиновом 5-клетевом стане при комнатной температуре использовали подкат толщиной $h_0 = 20$ мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Распределение усилий и обжатий по клетям стана дано в таблицах 4-6. При этом на рисунках 6-8 и 9, 10 представлены картины распределения усилия прокатки по клетям нового продольно-клинового стана.

Таблица 4 – Распределение усилий и обжатий по клетям продольно-клинового стана

Клеть	Толщина полосы до пропуска h_i , мм	Толщина полосы после пропуска h_{i+1} , мм	Абсолютное обжатие Δh_i , мм	Относительное обжатие ε_i , %	Усилие прокатки, МН
1 проход					
1	20	14	6	30	1,77
2	14	10,5	3,5	25	1,24
3	10,5	8,4	2,1	20	0,86788
4	8,4	7,14	1,26	15	0,6245
5	7,14	6,43	0,71	10	0,4
2 проход					
1	6,43	4,5	1,93	30	1,043
2	4,5	3,37	1,13	25	0,7306
3	3,37	2,7	0,67	20	0,501
4	2,7	2,3	0,4	15	0,359
5	2,3	2,06	0,24	10	0,22977

Таблица 5 – Распределение усилий и обжатий по клетям продольно-клинового стана

Клеть	Толщина полосы до пропуска h_i , мм	Толщина полосы после пропуска h_{i+1} , мм	Абсолютное обжатие Δh_i , мм	Относительное обжатие ε_i , %	Усилие прокатки, МН
1 проход					
1	20	14	6	30	1,77
2	14	10,5	3,5	25	1,258
3	10,5	7,9	2,6	25	0,97
4	7,9	7,1	0,8	10	0,493
5	7,1	6,4	0,7	10	0,398
2 проход					
1	6,4	4,47	1,91	30	1,039
2	4,47	3,35	1,12	25	0,727
3	3,35	2,5	0,85	25	0,558
4	2,5	2,26	0,24	10	0,283
5	2,26	2,03	0,23	10	0,228

Таблица 6 – Распределение усилий и обжатий по клетям продольно-клинового стана

Клеть	Толщина полосы до пропуска h_i , мм	Толщина полосы после пропуска h_{i+1} , мм	Абсолютное обжатие Δh_i , мм	Относительное обжатие ε_i , %	Усилие прокатки, МН
1 проход					
1	20	15	5	25	1,62
2	15	11,25	3,75	25	1,3
3	11,25	8,44	2,81	25	1
4	8,44	7,17	1,27	15	0,626
5	7,17	6,45	0,72	10	0,4
2 проход					
1	6,45	4,84	1,6	25	0,954
2	4,84	3,63	1,21	25	0,757
3	3,63	2,72	0,91	25	0,581
4	2,72	2,31	0,41	15	0,361
5	2,31	2,08	0,23	10	0,231

Рисунок 6 –
Зависимость усилия
прокатки от величины
относительного
обжатия по клетям

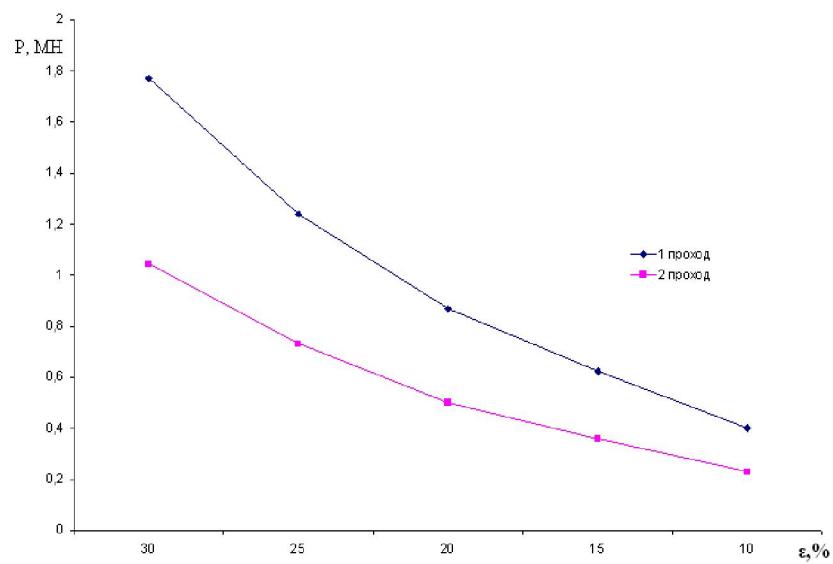


Рисунок 7 –
Зависимость усилия
прокатки от величины
относительного
обжатия по клетям

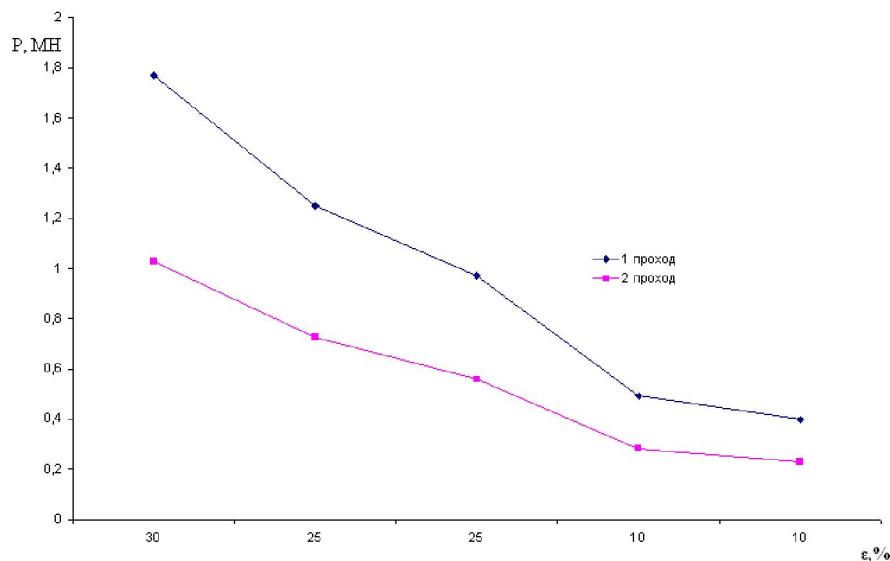
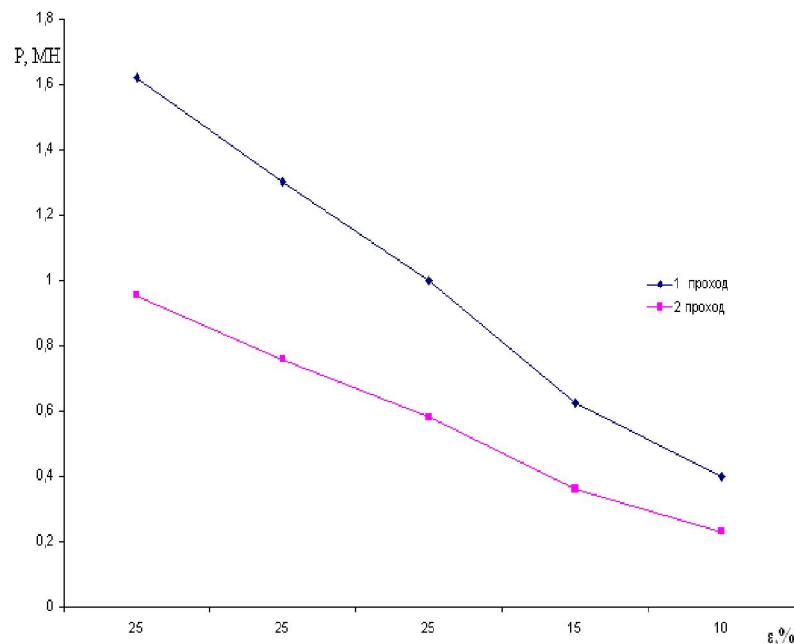


Рисунок 8 –
Зависимость усилия
прокатки от величины
относительного
обжатия по клетям



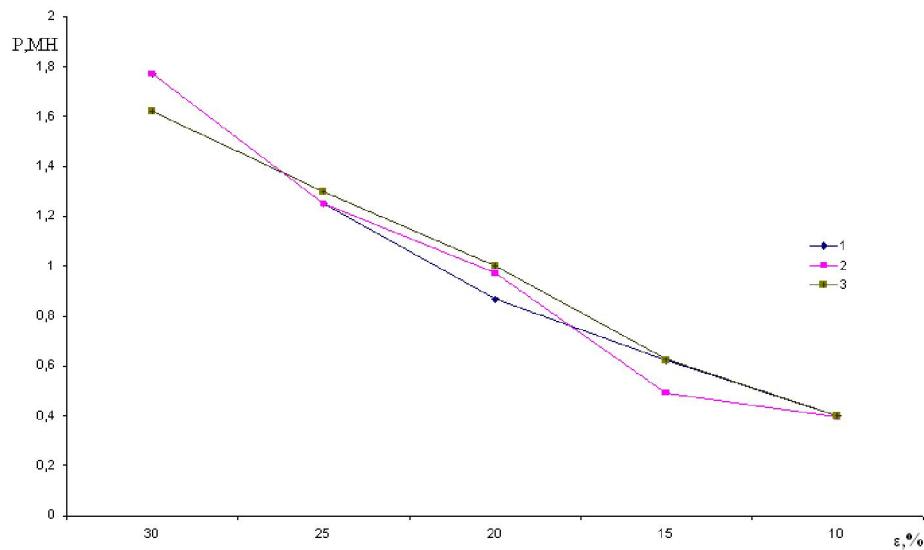


Рисунок 9 – Распределение усилий прокатки по клетям при различных степенях обжатия при первом проходе:
1 – значение обжатий из таблицы 4; 2 – значение обжатий из таблицы 5; 3 – значение обжатий из таблицы 6

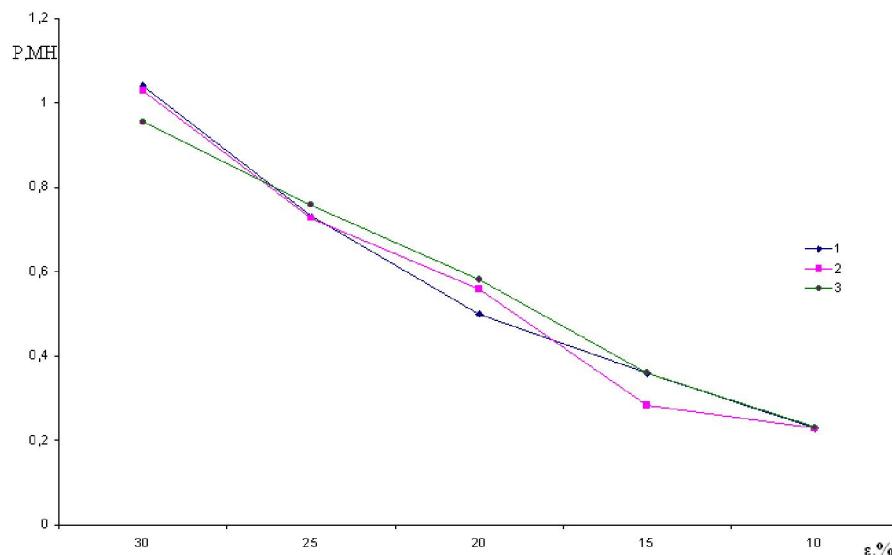


Рисунок 10 – Распределение усилий прокатки по клетям при различных степенях обжатия при втором проходе:
1 – значение обжатий из таблицы 4; 2 – значение обжатий из таблицы 5; 3 – значение обжатий из таблицы 6

На основе полученных результатов расчета усилия холодной прокатки установлено, что:

1. Возникающие в клетях нового стана усилия прокатки значительно снижаются (от 2 до 10 раз) в направлении прокатки;
2. Прокатка по второму и третьему вариантам приводит к уменьшению усилия прокатки по сравнению с прокаткой по первому варианту (таблицы 4-6);
3. Наиболее рациональным для прокатки стальных полос шириной 100 мм, будет следующее распределение обжатий по клетям: $\varepsilon_1 = 30\%$, $\varepsilon_2 = 25\%$, $\varepsilon_3 = 25\%$, $\varepsilon_4 = 10\%$, $\varepsilon_5 = 10\%$.
4. Работа и мощность прокатки зависят исключительно от касательных сил, вызванных касательными напряжениями;
5. Полезную работу валки совершают только на первом упругом участке и в зоне отставания, а в зоне опережения и на втором упругом участке полоса возвращает валкам часть затраченной энергии (величины a_3 и a_4 отрицательны).

6. При прокатке в стане новой конструкции рабочие моменты и мощности прокатки уменьшаются от одной клети к другой в направлении прокатки;

7. Снижение усилия, рабочих моментов, действующих на валки, а также повышение жесткости стана позволяют уменьшить размеры клетей и мощность привода с одной стороны, и повысить точность прокатываемой полосы с другой стороны.

Выводы:

1. Многофункциональный продольно-клиновой стан с уменьшающим диаметром рабочих валков в направлении прокатки позволяет уменьшить усилия, рабочие моменты, требуемые мощности, удельный расход энергии на деформацию;

2. При прокатке в стане новой конструкции, по сравнению с прокаткой тонких листов в существующих станах, средние давления уменьшаются от первой до последней клети;

3. Снижение усилия, рабочих моментов, действующих на валки, а также повышение жесткости стана позволяют уменьшить размеры клетей и мощность привода с одной стороны, и повысить точность прокатываемой полосы с другой стороны.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Черная металлургия: Бюл. НТИЭ - М.: Черметинформация, - Вып. 3-4. 2000. - С. 23-25. Тонкослябовые литеинно-прокатные агрегаты: развитие технологий, компоновок и оборудования / И.Г. Гун, В.М. Салганик, Ф.В. Пивоваров и др.
- [2] Перспективные конструкции прецизионных станов /А.Н. Кулик, К.Ю. Юрков, А.А. Файчак, В.В. Шевченко // http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/Zmmvp/2008_10/3.pdf.
- [3] Патент 20969. Непрерывный стан для прокатки полос из сталей и сплавов/ С.А. Машеков, Е.З. Нугман, А.С. Машекова, и др. //Опубл. 16.03.2009, Бюл. №3.
- [4] Грудев А.П. Теория прокатки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Интермет инжиниринг, 2001. - 280 с.
- [5] Новые методы моделирования процессов холодной прокатки, обеспечивающие улучшение качества холоднокатанных листов, экономию энергии и увеличение скорости непрерывных станов / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, А.З. Трайно, В.Н. Кузнецова, С.А. Павлов //Вестник ЧГУ. № 6. 2009. – С. 108-111.
- [6] Моделирование процесса горячей прокатки широких полос с учетом зоны прилипания в очаге деформации /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Труды седьмого Конгресса прокатчиков. М. - 2007. – С. 484-492.
- [7] Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. № 4. - 2007. – С. 7-15.
- [8] Повышение эффективности листопрокатного производства на основе новых методов моделирования процессов прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования». – Вологда: ВоГТУ, - 2008. - С. 13-15.
- [9] К вопросу о влиянии трения первого и второго рода на энергосиловые параметры горячей прокатки в клетях квартета /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Металлы. № 6. - 2007. – С. 47-56.
- [10] Эффективные режимы горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. № 1. - 2009. – С. 10-16.
- [11] Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
- [12] Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах, т.3 Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Учебник для ВУЗов /А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребенник и др. - М: Металлургия, 1988, 487 с.

REFERENCES

- [1] Gum I.G., Salganik V.M., Pivovarov F.V., et al. Thin slab foundry-rolling machines: the development of technologies, hardware and configurations / Iron and steel industry: Bull. NTiIE - M.: Chermetinformatsiya - Vol. 3-4. 2000. - p. 23-25. (in Russ.).
- [2] Kulik A.N., Yurkov K.Yu., Faychak A.A., Shevchenko V.V. Advanced design precision mills // http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/Zmmvp/2008_10/3.pdf. (in Russ.).
- [3] Patent No. 20969. Continuous mill for rolling strips of steels and alloys / S.A. Mashekova, E.Z. Nugman, A.S. Mashekova, et al. // Publ. 16.03.2009, Bull. №3. (in Russ.).
- [4] Grudev A.P. Theory rolling. Ed. 2nd, Revised. and add. Internet M.: Engineering, 2001. - 280 p. (in Russ.).
- [5] Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Traino A.Z., Kuznetsov V.N., Pavlov S.A. New methods of modeling the processes of cold rolling that improve the quality of cold-rolled sheet, saving energy and increasing the speed of continuous mills // Herald CSU. № 6. 2009. - p. 108-111. (in Russ.).
- [6] Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Modeling of hot rolling wide bands considering sticking zone in the deformation // Proceedings of the Seventh Congress of distributors. M. - 2007. - p. 484-492. (in Russ.).

- [7] Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Calculation of the efforts of hot rolling thin strips based on the stress-strain state in the deformation zone sticking // Production of steel. № 4. - 2007. - p. 7-15. (in Russ.).
- [8] Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Increase the efficiency of rolling production, based on new methods of modeling the processes of rolling // Proceedings of IV International scientific-technical conference "Automation and energy efficiency engineering and metallurgical industries, technology and reliability of machines, devices and equipment." - Vologda: Vogt - 2008. - P. 13-15. (in Russ.).
- [9] Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. On the effect of the friction of the first and second order in the energy-power parameters of hot rolling four-high stands // Metals. № 6. - 2007. - p. 47-56. (in Russ.).
- [10] Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Effective modes of hot rolling thin strips on broadband camps // Production of steel. № 1. - 2009. - p. 10-16. (in Russ.).
- [11] Konovalov Yu.V., Ostapenko A.L., Ponomarev V.I. Dimensioning sheet rolling. - M : Metallurgy, 1986. - 430 p. (in Russ.).
- [12] Machines and equipment of metallurgical plants. The 3 volumes, v.3 Machines and equipment for the production and finishing of steel. Textbook for High Schools /A.I. Pillars, PI Poluhin, VM Grebennik Mr. al. - M: Metallurgy, 1988, 487 p. (in Russ.).

КӨПФУНКЦИЯНАЛДЫ БОЙЛЫҚ-СЫНА ТҮРАҒЫНДА БОЛАТ ЖОЛАҚТАРЫН СУЫҚ ТЕГІСТЕУДІҢ ЭНЕРГИЯ КУШТІ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУ

С. А. Машеков, Е. П. Орлова, Б. Н. Әбсадықов, М. Е. Исаметова,
Г. А. Смаилова, Е. З. Нугман, М. Л. Рахматулин

К. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан,
«Казақстан-Британ техникалық университеті» АҚ, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: тегістеу, жолактар, тұрақ, қысым, өткізгіш.

Аннотация. Сапалы қаңылтыр алу және энергиякүштік шамаларды азайту мақсатында болаттар мен қорытпалардан жұқа жолакты ыстықтай және сұықтай илемдеуге арналған жаңа конструкциялы көпфункциялы бойлық-ұшкіл орнақ ұсынылады. Бұл жұмыста үйкеліс көрнеуін есептеу әдістемесі мен жаңа орнакта жолакты илемдеу кезінде көрнеулі-деформациялық қүйдің ерекшелігін ескере отырып үйкеліс көрнеуінің үлгісі ұсынылады. Көпфункциялы бойлық-ұшкіл орнақта әртүрлі жаншу режимде болат жолактар мен таспаларды сұықтай илемдеу күші анықталды.

Алынған нәтижелер негізінде орнак капасында туындастырылған илемдеу күші илемдеу бағытында айтартылған азаятыны (2 ден 10 дейін) анықталды.

Илемдеу күші мен жұмысы тек қана жанама көрнеулерге байланысты пайда болатын жанама қүштерге тәуелді.

Илемдеу күшінің және біліктеге әсер ететін жұмысшы моменттердің азаоюы, сондай-ақ орнақтың қатаңдығының артуы бір жағынан жетектің қуаты мен қапас өлшемдерін азайтуға және де екінші жағынан илемделетін жолактың дәлдігін артыруға мүмкіндік береді.

Поступила 02.10.2015 г.