

05.16.05  
K658

(043)

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

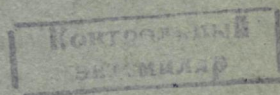
КОШЕЛЬ Иван Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЗАХВАТА ПРИ  
ПРОКАТКЕ В ВАЛКАХ С ГЛАДКОЙ БОЧКОЙ

Специальность № 05.16.05. -  
"Обработка металлов давлением"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1977



ЧПИ

Диссертационная работа выполнена на кафедре "Обработка металлов давлением" (прокатка) и проблемной лаборатории "Новые технологические процессы прокатки" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель — заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор В.Н.ВЫДРИН.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор И.Г.ПОЛЯКОВ;  
кандидат технических наук, доцент К.И.ЛИТВИНОВ.

Ведущее предприятие — Карагандинский металлургический комбинат.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1977 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1977 г.

в 15 часов, на заседании Специализированного Совета К-597/3 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, 76, Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, ученому секретарю Специализированного Совета института, тел. 39-38-23.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

кандидат технических наук, доцент

О.К.ТОКОВОЙ

Актуальность работы. В соответствии с решениями XXV съезда КПСС и планом развития народного хозяйства СССР в десятой пятилетке предусмотрено коренное улучшение качества продукции и увеличение производительности за счет повышения эффективности производства. В области прокатного производства это может быть достигнуто как за счет создания и внедрения новых прогрессивных технологических процессов, так и путем совершенствования существующих с целью интенсификации режимов прокатки.

Решение этих задач во многом зависит от условий захвата полосы валками. Из практики производства известно, что угол захвата зависит от целого ряда параметров процесса прокатки. Однако, наиболее распространенное условие захвата  $\alpha < f$ , вытекающее из теории равновесия сил, не позволяет учесть влияние этих параметров на предельный угол захвата. С целью получения более общих условий захвата в работе рассматривается процесс захвата полосы при прокатке в двух, трех и четырех валках с гладкой бочкой. Особое внимание в работе уделено прокатке в клетях с многовалковыми калибрами — одному из прогрессивных способов прокатки.

Созданию теории захвата полосы валками способствуют общие достижения науки о прокатке, разработанной советскими учеными И.М.Павловым, А.И.Целиковым, А.П.Чекмаревым, П.И.Полухиным, В.С.Смирновым, В.Н.Выдриным, В.Л.Колмогоровым, И.Я.Тарновским и др. Успешное решение вопросов захвата при прокатке в трех и четырех валках во многом зависит от общего состояния теории многовалковой прокатки, которая в последнее время успешно развивается благодаря трудам И.М.Павлова, А.П.Чекмарева, М.И.Бояршинова, М.Г.Полякова, В.Н.Выдрина, В.М.Кламенко и др.

В последние годы наблюдается стремление отыскать такие условия захвата, которые учитывали бы многообразие факторов, влияющих на захват полосы валками. Появился ряд работ, в которых процесс захвата рассматривается в динамике с учетом реальных условий протекания процесса заполнения очага деформации металлом. К ним в первую очередь следует отнести работы В.Н.Выдрина, Э.П.Польского и А.С.Федосюенко, В.С.Смирнова и В.Кириде, И.Я.Тарновского и С.Л.Коцаря, А.П.Чекмарева и В.М.Полищука и др.

Особо следует выделить работы по созданию энергетической теории захвата, основные положения которой изложены в трудах

В.Н.Видрина, В.П.Польского и А.С.Федосиенко. В этих работах на основе энергетической теории показано и объяснено влияние различных параметров прокатки на процесс захвата при прокатке в двух валках. Однако, условий захвата, удобных для практического использования, пока не было получено. Кроме того, до конца не решен вопрос в каком соотношении находятся энергетические и известное  $\alpha_0 \neq f$  условия захвата.

Ниже под захватом понимается такой процесс заполнения очага деформации металлом, который переходит в установившийся режим прокатки. Условия установившегося режима прокатки изучены в настоящее время также недостаточно полно. В связи с этим разносторонние исследования условий захвата и установившегося режима прокатки на основе энергетической теории, позволяющая решить актуальную задачу интенсификация режимов прокатки, являются актуальными.

Цель работы. Комплексное исследование взаимодействия полосы и валков с целью получения условий захвата и установившегося режима прокатки на основе энергетической теории с учетом геометрических, кинематических и силовых параметров процесса прокатки. Построены номограммы для практического определения возможных и предельных углов захвата. Исследование особенностей процесса захвата в многовалковых калибрах, связанных с наличием холостых валков и схемой калибровки. Оценка рациональности схем калибров и разработка рекомендаций по улучшению условий захвата.

Научная новизна. На основе энергетической теории получены принципиально новые, по сравнению с известными (вытекающими из условия равновесия сил), условия захвата и установившегося режима прокатки. Впервые построены номограммы для практического определения возможных углов захвата и предельных условий установившегося режима прокатки с учетом основных параметров процесса прокатки. Исследованы вопросы формоизменения, кинематики и силовых условий. Разработана методика исследования кинематики на контактной поверхности и конструкции датчика скорости, позволявшие непосредственно измерять скорость скольжения металла относительно валков при захвате. Исследованы особенности процесса захвата полосы в многовалковых калибрах, связанные с наличием холостых валков, разработаны рекомендации по улучшению условий захвата для этого случая прокатки. Построены номограммы, позволяющие оценить рациональность схем многовалковой прокатки по условиям захвата. Установлены причины и да-

ни рекомендации по устранению расслоения переднего конца полосы при захвате.

Практическая ценность. Построены номограммы для практического определения возможных и предельных углов захвата как при двух- так и при многосвалковой прокатке. Рекомендации по увеличению углов захвата при прокатке в многосвалковых калибрах с холостыми и приводными валками могут быть использованы при разработке конструкций многосвалковых клетей и технологии прокатки. Рекомендации по устранению расслоения переднего конца полосы при захвате могут быть использованы на непрерывных сортовых и заготовочных станах.

Реализация работы. Рекомендации по улучшению условий захвата при наличии холостых валков, номограммы для определения возможных углов захвата и по оценке рациональности охем многосвалковой прокатки использованы при разработке конструкций клетей и отработке промышленной технологии прокатки фасонных и простых профилей, при проектировании и изготовлении непрерывного шестиклетевого многосвалкового стана для прокатки арматурной струнбетонной проволоки устанавливаемого на Орловском сталепрокатном заводе. Рекомендации по устранению расслоения переднего конца полосы внедрены на станах 240 и НЗС 900/700/500 Челябинского металлургического завода.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены:

1. На Межвузовской научно-технической конференции "Современные достижения и проблемы прокатного производства", Челябинск, 1970 г.

2. На Всесоюзной научно-технической конференции "Калибровка валков сортовых станов", Днепропетровск, 1976 г.

3. На Всесоюзной научно-технической конференции "Теоретические проблемы прокатного производства", Днепропетровск, 1972 г.

4. На У научно-технической конференции молодых специалистов ЧМЗ, Челябинск, 1970 г.

5. На XXIV-XXX научно-технических конференциях Челябинского политехнического института, Челябинск, 1971-1977 г.г.

6. На научно-технических семинарах кафедры прокатки и проблемной лаборатории "Новые технологические процессы прокатки", ЧПИ, Челябинск, 1974-1977 г.г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 статьях.

Объем работы. Диссертация изложена на 148 страницах машино-

писного текста и состоит из четырех глав с 4 таблицами, 82 рисунками и приложения. Список использованной литературы содержит 94 наименования.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЗАХВАТА

Основные положения энергетической теории захвата устанавливаются на основе анализа уравнения движения полосы в процессе захвата, которое вытекает из энергетического баланса процесса захвата очага деформации металлом и отличается от уравнения установившегося процесса прокатки наличием мощности сил инерции полосы  $N_u$ , а также переменным значением остальных составляющих.

В общем случае при наличии приводных и холостых валков уравнение энергетического баланса процесса захвата имеет вид

$$N_B - N_{BH} - N_{TII} - N_{TX} - N_X \pm N_0 - N_u = 0. \quad (1)$$

Разность между мощностью, подводимой в очаг деформации приводными валками  $N_B$ , и потерями ее на скольжения металла относительно приводных и холостых валков ( $N_{TII}$  и  $N_{TX}$ ), а также на преодоление сопротивления вращения холостых валков  $N_X$  равна

$$N_B - (N_{TII} + N_{TX} + N_X) = N_z \quad (2)$$

и представляет собой полезную мощность сил трения, которая затрачивается на деформацию и движение полосы в процессе захвата.

Мощность сил инерции при захвате определяется через скорость заднего конца  $v_0$  и массу полосы  $m$  выражением  $N_u = mv_0 \frac{dv_0}{dt}$ . С учетом этой зависимости и выражения (2) уравнение динамики процесса захвата имеет вид

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{mv_0} [(N_z - N_{BH}) - N_0]. \quad (3)$$

Уравнение динамики (3) рассматривается совместно с кинематическим уравнением, которое устанавливает связь между временем и координатой  $\alpha_3$ , определяющей согласно рис. I переменное положение переднего торца полосы в очаге деформации,

$$\frac{d\alpha_3}{dt} = v_0 \cdot \frac{S_0}{R \cdot S_3 \cdot \cos(\alpha_0 - \alpha_3)}. \quad (4)$$

Совместное решение уравнений динамики (3) и кинематического (4) приводит к уравнению движения полосы при заполнении очага деформации металлом

$$\frac{v_0^2}{2} = \frac{v_{DH}^2}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\alpha_3} \frac{R \cdot S_3 \cdot \cos(\alpha_0 - \alpha_3)}{v_0 \cdot S_0} [N_p - N_0] d\alpha_3. \quad (5)$$

Здесь  $N_p = N_T - N_{BH}$  (6)

представляет собой резерв энергии валков, который определяется разностью между полезной мощностью сил трения  $N_T$ , подводимой в очаг деформации со стороны валков, и мощностью внутренних сил затрачиваемая на деформацию полосы в процессе захвата.

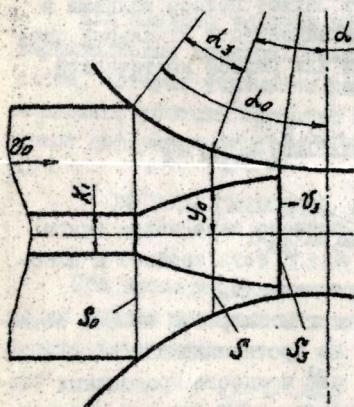


Рис.1. Схема очага деформации

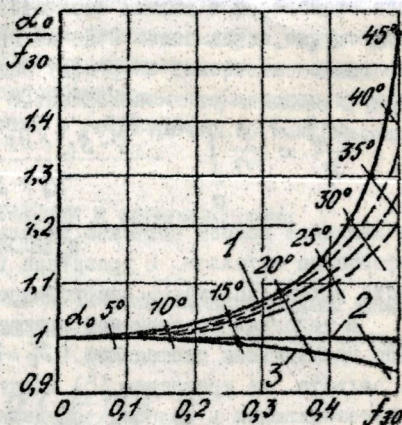


Рис.2. К анализу условий захвата

Вначале рассмотрен процесс захвата и характер движения полосы для случая, когда мощность продольных усилий  $N_0$  равна нулю. Для этого случая уравнение движения полосы (5) имеет вид

$$\frac{v_0^2}{2} = \frac{v_{DH}^2}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\alpha_3} \frac{R \cdot S_3 \cdot \cos(\alpha_0 - \alpha_3)}{v_0 \cdot S_0} [N_p] d\alpha_3 \quad (7)$$

В соответствии с уравнением (7) характер движения полосы в процессе захвата определяется резервом энергии валков  $N_p$ .

Если параметры процесса прокатки таковы, что резерв энергии валков  $N_p$  отрицателен на начальном участке очага деформации, то движение полосы на этом участке будет замедленным. При достижении переднего торца полосы точки  $\alpha_3 = \alpha_0$ , в которой резерв энергии валков

$$N_p = 0, \quad (8)$$

полоса находится в положении динамического равновесия. Дальнейшее движение полосы будет ускоренным, если в точке  $\alpha_3 = \varphi_c$  выполняется условие неустойчивого равновесия

$$\frac{dN_p}{d\alpha_3} \Big|_{\alpha_3 = \varphi_c} > 0. \quad (9)$$

И если начальная кинетическая энергия (скорость  $V_{0n}$ ) полосы будет недостаточна для компенсации дефицита энергии валков  $N_p$ , то полоса становится в валках окончательно. Захват полосы валками в этом случае невозможен. Если же полоса задается с начальной скоростью (кинетической энергией) большей или равной критической, которая определяется зависимостью

$$\frac{V_{0n}^2}{2} = \frac{1}{m} \int_0^{\alpha_3 = \varphi^*} \frac{S_3 \cdot \cos(\alpha_0 - \alpha_3)}{V_0 \cdot S_0} [N_p] d\alpha_3, \quad (10)$$

то движение полосы возможно вплоть до полного заполнения очага деформации металлом. В уравнении (10)  $\alpha_3 = \varphi^*$  есть крайнее к плоскости выхода положение неустойчивого равновесия.

В условиях непрерывной прокатки, когда скорость полосы остается практически постоянной ( $V_0 = V_{0n}$ ) на протяжении всего процесса захвата, из уравнения (5) следует, что мощность продольных усилий, возникающих в полосе, определяется величиной резерва энергии валков ( $N_0 = N_p$ ). Усилие подпора, возникающее при этом в полосе, определяется соотношением

$$B_0 = \frac{1}{V_0 \cdot S_0} [N_p]. \quad (11)$$

Таким образом, если параметры процесса прокатки таковы, что на определенном участке очага деформации при захвате мощность внутренних сил больше полезной мощности сил трения, то для полного заполнения очага деформации металлом необходимо окиспесировать дефицит энергии валков за счет начальной кинетической энергии полосы или энергии подпора, т.е. должны выполняться условия

$$\frac{m V_{0n}^2}{2} \geq \frac{m V_{0k}^2}{2} \quad \text{или} \quad B_0 \geq B_{0 \max} \quad (12), (13)$$

Здесь  $B_{0 \max}$  наибольшее усилие подпора, соответствующее координате  $\alpha_3 = \alpha_{3m}$ , которая определяется условием

$$\frac{dN_p}{d\alpha_3} = 0. \quad (14)$$



Однако выполнение условия полного заполнения очага деформации металлом, еще недостаточно для обеспечения захвата. Показано, что для осуществления захвата полоса валками необходимо также выполнение условия перехода от захвата к установившемуся процессу прокатки, т.е. дополнительно должно выполняться условие осуществимости установившегося режима прокатки

$$N_p / \alpha_3 = \alpha_0 \geq 0. \quad (15)$$

Для анализа условий захвата при прокате в двух-, трех- и четырехвалковых калибрах получены составляющие энергетического баланса, которые учитывают реальные кинематические, силовые и деформационные условия процесса захвата и геометрические зависимости очага деформации при захвате.

#### ВОПРОСЫ ГЕОМЕТРИИ, КИНЕМАТИКИ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОСЫ ПРИ ЗАХВАТЕ

При прокатке в валках с гладкой бочкой закономерность изменения ширины контактной поверхности в наиболее общем виде описывается уравнением

$$y_0 = \frac{y_1}{2} \left[ 1 - q \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^K \right], \quad (16)$$

где  $y_1$  - ширина контакта полосы на выходе из очага деформации;

$q = 1 - \frac{K_1}{y_1}$  - величина, характеризующая форму заготовки;

$K_1$  - параметр, зависящий от схемы прокатки, определенный опытным путем.

Для схемы прокатки квадрат-квадрат, трехгранник-трехгранник  $K = 2$ ; круг-квадрат, круг-трехгранник-4; при прокатке квадрата "на ребро" в двух валках  $K = 2$ , при обычной прокатке  $K = 1$ .

Площадь произвольного поперечного сечения полосы при захвате с учетом (16)

$$S = S_1 + \pi \frac{\Delta h}{2} y_1 \left[ \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^2 - \frac{2q}{K+2} \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^{K+2} \right], \quad (17)$$

где  $\pi$  - количество валков, образующих калибр;

$\Delta h$  - абсолютное обжатие.

Текущая площадь переднего торца согласно рис. I определяется выражением (17) при  $\alpha = \alpha_0 - \alpha_3$ . При двухвалковой прокатке высота произвольного сечения и переднего торца записывалась известным

образом

$$h = h_1 + 4R \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad h_3 = h_1 + 4R \sin^2 \left( \frac{\alpha + \alpha_3}{2} \right) \quad (18), \quad (19)$$

Условия захвата полосы валками во многом зависят от кинематики скольжения на контактной поверхности. Для исследования кинематических условий на контактной поверхности впервые был использован метод непосредственного замера скорости скольжения полосы относительно валков с помощью датчика линейной скорости высокой чувствительности. Установлено, что на начальной стадии захвата всегда наблюдается полное отставание (проскальзывание) полосы относительно валков. В тех случаях, когда захват полосы возможен, проскальзывание постепенно уменьшается и на определенной стадии скорость переднего торца полосы становится равной (появляется критическое сечение), а затем становится больше скорости валков (появляется опережение). Продолжительность скольжения увеличивается с увеличением обхвата, уменьшением трения и скорости задачи полосы. В связи с этим при дальнейшем анализе условий захвата в качестве предельных приняты наиболее неблагоприятные кинематические условия, когда проскальзывание полосы относительно приводных валков наблюдается вплоть до полного заполнения очага деформации металлом.

Формоизменение полосы исследовано на недокатах, полученных на различных стадиях процесса захвата в трех- и четырехвалковых калибрах с использованием координатной сетки. Координатная сетка наносилась на внешних и внутренних поверхностях разрезных образцов, а также на переднем торце полосы. В результате установлено, что на начальной стадии процесса захвата (до момента появления зоны опережения) вытяжка приконтактных слоев значительно больше вытяжки центральных и по разъемам калибра. По мере дальнейшего продвижения полосы и увеличения зоны опережения центральные слои получают большую вытяжку по сравнению с приконтактными слоями.

Результаты исследования формоизменения полосы легли в основу построения подходящих функций для описания поля скоростей течения металла при захвате в многовалковых калибрах.

Варируемые параметры  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , характеризующие отклонение продольной скорости от средней по сечению соответственно на контактной поверхности, по центру образца и по разьему калибра определялись (методом Ритца) из условия минимума полной энергии

деформации (с учетом условия постоянства секундного объема)

$$\frac{\partial N_E}{\partial \alpha_1} = 0; \quad \frac{\partial N_E}{\partial \alpha_2} = 0. \quad (20)$$

В результате решения системы (20) численным методом с использованием ЭВМ "Мир 2" при допущениях  $h = h_1 + \Delta h \cdot x^2/e^2$ ,  $\tau = f \cdot \sigma_s = \text{const}$  для жестко-пластической среды были построены графики зависимости параметров  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  для некоторых схем четырехвалковой прокатки при всех приводных валках.

Для упрощения дальнейшего анализа используется коэффициент  $f_3$ , учитывающий влияние неравномерности деформации при захвате на мощность внутренних сил. Коэффициент  $f_3$  определяется известным образом

$$f_3 = \frac{N_{вн}^H}{N_{вн}}. \quad (21)$$

Здесь  $N_{вн}^H$  и  $N_{вн}$  - мощности с учетом реального характера деформации с использованием параметров  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  и в условиях гипотезы плоских сечений.

#### АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЗАХВАТА И УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ПРОКАТКИ. РАЗРАБОТКА НОМОГРАММ

Теоретический анализ показал, что для количественной оценки условий захвата необходимо исследовать зависимость резерва энергии валков  $N_p$  от параметров прокатки и характер положений равновесия полосы в процессе захвата. Резерв энергии валков с учетом полученных зависимостей равен

$$N_p = 2R\sqrt{S_0} \left[ n_n \int_{\alpha_0}^{\alpha_0} \tau_n \frac{y_0 dd}{S \cdot \cos \alpha} + n_x \int_{\alpha_0}^{\alpha_0} \tau_{ox} \frac{y_0 dd}{S \cdot \cos \alpha} - \right. \\ \left. - n_x \int_{\alpha_0 - \alpha_3}^{\alpha_{3x}} \tau_{ix} \frac{y_0 dd}{S \cdot \cos \alpha} - n \int_{\alpha_0 - \alpha_3}^{\alpha_{3x}} \sigma_s f_3 \frac{y_0 \sin \alpha dd}{S} \right], \quad (22)$$

где  $\alpha_{3x}$  - критическое сечение на холостых валках;

$n_x$  - количество холостых валков;

$\tau_n$  - силы трения на поверхности приводных валков;

$\tau_{ox}, \tau_{ix}$  - силы трения в зонах отстаивания и опережения холостых валков.

Вначале рассмотрены условия захвата для частного случая, когда  $V_{вн}$  и  $\sigma_0$  равны нулю, т.е. рассмотрены условия естественного захвата полосы валками. Углы захвата  $\alpha_0$  для этого частного случая названы естественными. Показано, что для осуществления захвата по-

доси валками в этих условиях необходимо, чтобы положение равновесия полосы в момент сопряжения ее с валками было неустойчивым

$$\frac{\partial N_p}{\partial \alpha_0} \Big|_{\alpha_0} = 0 > 0, \quad (23)$$

а резерв энергии валков  $N_p$  был положительным на протяжении всего процесса захвата.

Условие (23) в предельном случае представляет собой уравнение энергетического баланса при деформации элементарного объема металла в начальный момент захвата. В соответствии с методикой, изложенной в работах В.Н. Выдрина, можно записать

$$\partial N_p \Big|_{\alpha_0} = \pi R v_0 S_0 \left[ \tau_n \frac{2\gamma_0 d d_0}{S \cdot \cos \alpha_0} - f_{30} \epsilon_s \frac{2\gamma_0 \sin \alpha_0 d d_0}{S} \right] > 0 \quad (24)$$

После упрощения с учетом  $\tau_n = \tau = f_{30} \epsilon_s$  из (24) следует

$$f_{30} > f_{30} \cdot \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0. \quad (25)$$

Здесь  $f_{30}$  и  $f_{30}$  — коэффициент трения и коэффициент неравномерности деформации в начальный момент захвата.

На основе исследования резерва энергии валков  $N_p$  установлено, что при выполнении условия (25) имеется избыток энергии  $N_p$  на протяжении всего процесса захвата. Причем этот избыток тем больше, чем меньше параметр  $m/R$ .

Таким образом, условие (25) представляет собой условие естественного захвата полосы валками, полученного на основе энергетической теории.

В работе проведен анализ условия (25) и установлена взаимосвязь между известным и энергетическим (25) условиями захвата. Результаты анализа представлены в виде графиков на рис. 2. На этом рисунке прямая 2 изображает соотношение  $\alpha_0/f_{30}$  по условию  $f = \alpha_0$ , кривая 3 — по условию  $f = \epsilon_s \alpha_0$ , а кривая 1 построена по энергетическому условию (25). Из сравнения графиков 1, 2 и 3 видно, что углы захвата, определенные по известным и энергетическим условиям захвата, в области до  $20-25^\circ$  отличаются от коэффициента трения на 8-12%. Достоверность определения коэффициента трения при этом зависит от точности проведения опыта. При углах захвата более  $20-25^\circ$  отличие между энергетическими условиями и известными носит существенный характер, угол  $\alpha_0$  значительно превышает коэффициент трения. Из рис. 2 видно, что с увеличением коэффициента неравномерности деформации  $f_{30}$  максимальный угол захвата  $\alpha_0$  снижается (пунктирные

кривые). Однако даже при значительной неравномерности деформации угла  $\alpha_0$  по условию (25) существенно выше, чем по условию  $f = \alpha_0$ .

В работе с использованием ЭМ "Мир 2" по выражению (22) с учетом геометрических соотношений (16-19) при допущениях  $b_s(\alpha) = b_s = \text{const}$ ,  $\tau(\alpha) = \tau = \text{const}$ ,  $\tau = f_3 b_s$ ,  $f_3(\alpha) = f_3(\alpha) - f_c = \text{const}$ ,  $f_c(\alpha) = f_c = \text{const}$ , все валки приводные выполнен подробный анализ влияния различных параметров процесса прокатки на характер изменения и величину резерва энергии валков  $N_p$  в функции  $\alpha_3/\alpha_0$ . Установлено, что наибольшее влияние на резерв энергии валков оказывает соотношение  $\alpha_0/f_c$ , неравномерность деформации, параметр  $h_1/R$  и коэффициент трения. Чем больше величина  $\alpha_0/f_c$ , тем больше дефицит энергии валков  $N_p$  в начале процесса захвата. Этот дефицит возрастает с увеличением неравномерности деформации, параметра  $h_1/R$  и с уменьшением коэффициента трения.

Таким образом, если выполняется условие (25), захват полоски валками возможен при любой начальной скорости полосы и величине подпора. Если же углы захвата больше естественных, определяемых условием (25), то для осуществления захвата требуется дополнительная кинетическая энергия полосы или энергия подпора. Максимальные углы захвата при наличии кинетической энергии полосы или подпора названы возможными и обозначаются  $\alpha_{03}$ . Значение возможных углов захвата определяется с одной стороны резервом энергии валков  $N_p$ , с другой стороны величиной дополнительной энергии.

Полученные выше соотношения (8-14, 22) с учетом (16-19) позволяют рассчитать возможные углы захвата  $\alpha_{03}$ . Порядок расчета следующий. При заданных параметрах процесса прокатки (включая угол  $\alpha_{03}$ ) по выражениям (8 и 9) находится крайнее от плоскости выхода положение равновесия ( $\alpha'_3 = \varphi^*$ ). Затем по условию (10) с учетом  $\varphi^*$  определяется потребная кинетическая энергия полосы, а по условию (15) определяется возможность перехода от захвата к установившемуся режиму прокатки. Если это условие выполняется, то при данных параметрах процесса захват полосы валками будет обеспечен. В условиях непрерывной прокатки, когда дополнительная энергия создается за счет подпора, вначале находится координата  $\alpha'_{3m}$  по равенству (14). Затем с учетом  $\alpha'_{3m}$  по условию (II) определяется величина подпирательного усилия  $b_0$ , необходимого для заполнения очага деформации металлом. Если при данных параметрах выполняется условие (15), то

захват полосы валками будет обеспечен. Расчеты условий захвата по изложенной методике проведены с использованием ЭМ "Мир 2". Для практического определения углов захвата построены номограммы для семи схем прокатки. В качестве примера на рис.3 приводится номограмма для определения углов захвата применительно к двум схемам прокатки.

Построенные номограммы (рис.3) позволяют определить угол захвата, при заданных параметрах процесса прокатки (сплошные стрелки) Они позволяют решить и обратную задачу - выбрать параметры процесса при заданном угле захвата (пунктирные стрелка). Угол захвата  $\alpha_{03}$  определяется областью, которая сверху ограничена кривой естественных углов захвата  $\alpha_{0e}$  (по условию (25)), а снизу предельными углами захвата  $\alpha_{0y}$ , соответствующими предельным условиям установившегося режима прокатки. При многовалковой прокатке угол  $\alpha_{0y}$  ограничивается еще и условиями переполнения калибра металлом.

Таким образом, в соответствии с энергетическими условиями возможный угол захвата может значительно превышать естественный в зависимости от параметров процесса прокатки и величины внешней дополняющей энергии.

Известным условием установившегося режима прокатки является соотношение

$$\alpha_{0y} \approx 2f, \quad (26)$$

полученное из условия равновесия сил в очаге деформации при прокатке. Однако опытные данные свидетельствуют о том, что условие (26) зачастую не выполняется и что угол  $\alpha_{0y}$  зависит от толщины полосы, радиуса валков, схемы прокатки и т.д. В связи с этим предельное условие прокатки в установившемся режиме записывается в виде

$$\alpha_{0y} = \psi f, \quad (27)$$

в котором коэффициент  $\psi$  определяется опытным путем. В работах В.П.Выдриля показано, что предельное условие осуществления установившегося режима прокатки определяется из уравнения энергетического баланса при условии, когда критический угол равен нулю. Для наиболее простого случая - двухвалковой прокатки прямоугольной полосы - предельное условие прокатки без пробуксовки имеет вид

$$N_p|_{\alpha_3=\alpha_0} = v_0 S_0 \left[ 2R \int_0^{\alpha_0} \frac{\tau \cdot d\alpha}{(h_1 + 4R \cdot \sin^2 \alpha/2) \cos \alpha} - \xi b_s \ln \frac{h_0}{h_1} \right] = 0. \quad (28)$$

В работе дан подробный анализ предельных условий установившегося режима прокатки с использованием ЭМ "Мир 2". Результаты расчета

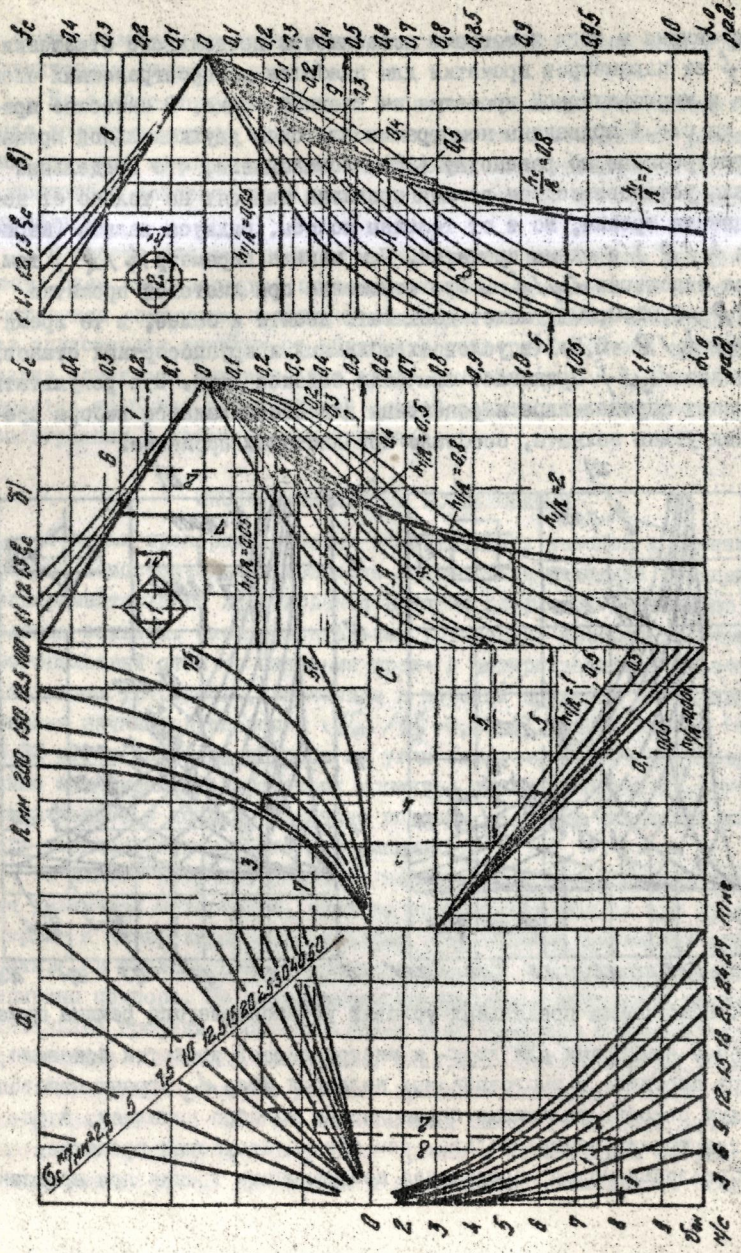


Рис. 3. Номограммы для определения углов закрутки.

032 P958

представлены в виде номограмм зависимости предельного отношения  $\alpha_{ог}/f$  от параметров прокатки для наиболее распространенных схем двух- и многовалковой прокатки на гладкой бочке. В качестве примера на рис. 4 приведены номограммы для схем двухканальной прокатки, построенные по равенству (28). Установлено, что предельные условия установившегося режима прокатки зависят не только от коэффициента трения, но и от толщины полосы, радиуса валков (параметра  $h_1/R$ ) в схемы прокатки. Чем меньше параметр  $h_1/R$ , тем больше отношение  $\alpha_{ог}/f$ . Это отношение при листовой прокатке ( $h_1/R = 0,02+0,001$ ) может достигать десяти и более, в то время как при  $h_1/R = 0,5+1$  (в условиях обжимных и крупносортовых станов) отношение  $\alpha_{ог}/f$  принимает значение близкое двум. Эти результаты открывают определенные перспективы для обоснованного выбора предельных углов захвата, особенно при листовой прокатке.

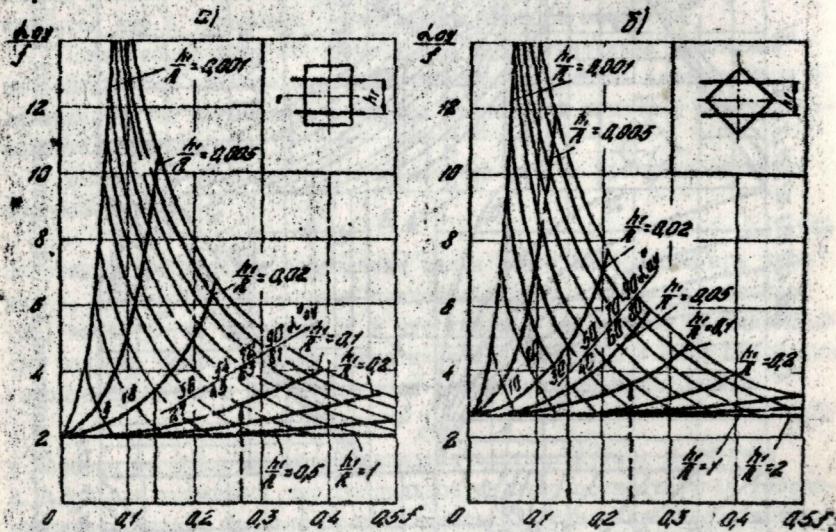


Рис. 4. Номограммы предельных условий установившегося режима прокатки

Сравнение номограмм для двух- и многовалковой прокатки показало, что при прокатке в многовалковых калибрах угол  $\alpha_{ог}$  ограничивается в первую очередь условиями переполнения калибра металлом, а резев сил трения всегда больше, чем при двухвалковой прокатке.

Предложен метод определения коэффициента трения при прокатке



с использованием номограмм и экспериментального значения угла  $\alpha_{03}$  (пунктирная линия на рис.4).

На основе теоретических и экспериментальных исследований влияния холостых валков на условия захвата даны конкретные рекомендации, за счет которых угол захвата может быть увеличен в 1,7+2 раза и достигать значения угла захвата при прокатке со всеми приводными валками.

В работе впервые построены номограммы для оценки рациональности схем многовалковой прокатки по условиям захвата. В основу построения номограмм положены найденные для каждой системы калибров зависимости вытяжки от обжатия и размеров исходной заготовки. Анализ номограмм показал, что среди схем четырех- и трехвалковой прокатки наиболее рациональной схемой является схема трехгранник-шестигранник и квадрат-восьмигранник.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью проверки основных теоретических выводов и решения некоторых самостоятельных вопросов разработана методика комплексного экспериментального исследования влияния различных параметров на условия захвата. Экспериментальная установка, которая включает многовалковый стан со сменными трех- и четырехвалковой каскадами и задающее устройство, позволяло в широких пределах исследовать влияние начальной скорости ( $V_{0n} / V_k = 0,25+4$ ), массы полосы (от 7 до 32 кг) и величины подпора на углы захвата. В опытах одновременно записывались параметры: момент и давление прокатки, скорость валков и полосы, величина подпора, а также положение переднего торца полосы в очаге деформации.

В работе получены значения максимальных естественных углов для различных материалов, чистоты поверхности валков при прокатке в трех- и четырехвалковых калибрах. Исследованы возможные углы захвата  $\alpha_{03}$  в зависимости от уровня начальной кинетической энергии и величины подпора. По результатам исследования построены экспериментальные графики. Сопоставлением этих графиков с теоретическими, полученными с помощью номограмм, показана достаточная их сходимость.

Исследованы силовые условия процесса захвата. С этой целью был разработан тензодатчик, позволявший измерить интегральные и рассчитать средние удельные силы трения в зависимости от угла  $\alpha_0$ . Одновременный замер сил трения и нормального давления (с помощью

месдоз давления) позволил исследовать среднее значение коэффициента трения  $f_3$  в процессе захвата. Анализ графиков  $f_3$  для различных материалов показал, что коэффициент трения возрастает от захвата к установившемуся процессу прокатки, а естественный угол захвата во всех случаях превышал значение  $f_3$  и в достаточной степени удовлетворял условию (25).

На двухвалковом стане дуо I30 было исследовано влияние толщины полосы  $h_1$  на углы захвата и условия установившегося режима прокатки. В опытах при различных значениях  $h_1$  максимальный естественный угол захвата устанавливался гарьированием исходной толщины полосы. Предельный угол захвата в установившемся режиме  $\alpha_{ог}$  определялся прокаткой клиновидных образцов при различных  $h_1$ . Установлено, что как при захвате, так и в установившемся режиме прокатки толщина полосы  $h_1$  оказывает решающее значение. Так при  $h_1 = 0,1$  мм абсолютное обжатие  $\Delta h$  свинцовой полосы при захвате превышало в 1,5-2 раза  $\Delta h$  при  $h_1 = 50$  мм. В установившемся режиме угол  $\alpha_{ог}$  возрастает с уменьшением  $h_1/R$ . Так при прокатке на шлифованных валках ( $\nabla 5-\nabla 6$ ) и  $h_1/R = 0,001-0,012$  угол захвата в момент пробуксовки составил  $48-56^\circ$ . Вытяжка при этом была  $\lambda = 48-52$ , ушрение отсутствовало, а давление прокатки к моменту пробуксовки снижалось. При прокатке с  $h_1/R = 0,1-0,15$  угол  $\alpha_{ог} = 32-38^\circ$ , вытяжка составила  $\lambda = 5-7$ . Результаты этих опытов полностью подтверждают основные выводы, полученные на основе энергетической теории взаимодействия полосы валков.

В работе в тесной связи с основными теоретическими положениями рассмотрены также вопросы выхода годного, связанные с условиями захвата. Установлено, что с появлением и увеличением по мере захвата зоны опережения центральные слои металла получают большую вытяжку (скорость) чем приконтактные. Это приводит к появлению растягивающих напряжений и расслоения переднего конца полосы. Показано, что, чем больше дефицит энергии валков, тем позже появляется зона опережения, тем меньше вероятность расслоения. В целях устранения расслоения переднего конца полосы в условиях непрерывного стана рекомендуется увеличивать дефицит энергии  $N_p$  (проскальзывание) повышением оборотов валков на период захвата. Эта рекомендация успешно внедрена на НЭС 900/700/500 ЧМЗ при прокатке свинецсодержащих марок стали АС11 и АС14. В условиях линейного

стана № можно увеличить перераспределением обжатия и уменьшением коэффициента трения. Экспериментально определен диапазон параметров ( $h_1/R = 0,2+0,4$ ;  $\Delta h/h_1 = 0,25+0,45$ ;  $d_0/f = 0,6+0,8$ ), при которых наиболее вероятно расслоение при захвате. Эти результаты легли в основу калибровки, позволившей устранить расслоение переднего конца полосы в условиях литейного стана 240 ЧМЗ. Экономический эффект от внедрения указанных рекомендаций составляет 105,6 тыс.руб. в год.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе энергетической теории получены принципиально новые (по сравнению с известными, вытекающими из условия равновесия сил) условия захвата и установившегося режима прокатки. Максимальные естественные углы захвата не ограничиваются соотношением  $d_0 = f$ , а определяются условием  $f_{30} = f_{30} \cos \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0$

2. По энергетическим условиям построены номограммы для практического определения максимально возможных углов захвата, которые могут быть значительно больше коэффициента трения и ограничиваются предельными углами захвата в установившемся режиме прокатки.

3. Теоретически установлено, что предельные углы захвата в установившемся режиме не ограничиваются условием  $d_0 = 2f$  и зависят не только от коэффициента трения, но и от толщины полосы  $h_1$ , радиуса валков и схемы прокатки. С уменьшением  $h_1/R$  угол  $\alpha_{0y}$  значительно возрастает по отношению к коэффициенту трения.

4. Установлено, что естественный угол захвата при всех приводных валках не зависит от числа валков, образующих калибр.

5. При наличии холостых валков за счет уменьшения диаметра их по отношению к диаметру приводных в 1,25+1,4 раза или смещения их в направлении прокатки на величину 0,2+0,3 длины очага деформации угол захвата может быть увеличен в 1,7+2 раза.

6. Впервые на основе построенных номограмм установлено, что наиболее рациональными схемами прокатки по условиям захвата являются схемы шестиугольник-треугольник и восьмиугольник-квадрат. За счет рационально выбранной схемы калибровки и использования рекомендаций по увеличению углов захвата при наличии холостых валков число проходов может быть уменьшено в 3-4 раза, что дает основание рекомендовать к внедрению многовалковые станы с приводными и хо-

лостыми валками, отличающиеся простотой конструкции.

7. Экспериментально установлено, что коэффициент трения возрастает от захвата к установившемуся процессу прокатки.

8. С уменьшением  $\mu/R$  от 0,8 до 0,001 обжатие при захвате увеличивается более чем в 1,5 раза. Предельные углы захвата в установившемся режиме прокатки при уменьшении параметра  $\mu/R$  от 0,006 до 0,15 уменьшаются от  $\alpha_{огр} = 48-52^\circ$  до  $\alpha_{огр} = 32-38^\circ$ .

9. Одной из основных причин расслоения переднего конца полосы при захвате является появление зоны опережения. Для устранения расслоения процесс захвата рекомендовано осуществлять в условиях полного проскальзывания полосы относительно валков вплоть до выхода переднего конца из счига деформации.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Формоизменение при захвате круглой полосы в квадратном четырехвалковом калибре. В сб. Теория и технология прокатки, № 102, Челябинск, 1972 г.

2. К вопросу о захвате полосы в многовалковых калибрах, образованных гладкой бочкой. В сб. Теория и технология прокатки. № 102, Челябинск, 1972 г.

3. К вопросу динамики захвата гильзы на пальгерстане. Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научно-технической конференции "Теоретические проблемы прокатного производства", Днепропетровск, 1972 г.

4. Формоизменение при захвате круглой полосы в квадратном четырехвалковом калибре. Тезисы докладов Межвузовской научно-технической конференции "Современные достижения и проблемы прокатного производства". Часть I, Челябинск, 1970 г.

5. Прокатка в многовалковых калибрах. Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции "Теоретические проблемы прокатного производства", Москва, Металлургия, 1975 г.

6. Рациональность калибровок по условиям захвата при прокатке в многовалковых калибрах. Тезисы Всесоюзной научно-технической конференции "Калибровка валков сортовых станков", Днепропетровск, 1976 г.