

621.771
7538

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

Аспирант В.П.Польский

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ОЧАГА
ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОМ

05.16.05

Автореферат диссертации
на соискание ученой
степени кандидата техни-
ческих наук

ЧПИ

Челябинск, 1967 г.

621.771.01

Диссертационная работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением (прокатки) Челябинского политехнического института. Экспериментальная часть работы выполнена на лабораторном стане 180 кафедры прокатки.

Научный руководитель профессор, доктор технических наук В.Н.Вылрин.

Официальные оппоненты профессор, доктор технических наук О.А.Ганаго, кандидат технических наук А.Г.Новиков.

Ведущее предприятие Челябинский металлургический завод.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1967 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1967г. на заседании Совета Челябинского политехнического института.

Адрес института: г.Челябинск, 44, проспект им.В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета, посвященного защите или прислать свои отзывы в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью.

Ученый секретарь
доцент, канд. техн. наук

/В.Н.ГОНЧАР/



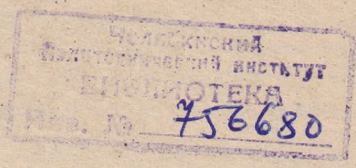
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

Аспирант В.П. Польский

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ОЧАГА
ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОМ



Автореферат диссертации
на соискание ученой
степени кандидата техни-
ческих наук

Челябинск, 1967 г.

Диссертационная работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением (прокатки) Челябинского политехнического института. Экспериментальная часть работы выполнена на лабораторном стане 180 кафедры прокатки.

Научный руководитель профессор, доктор технических наук В.Н.Вылрин.

Официальные оппоненты профессор, доктор технических наук О.А.Ганаго, кандидат технических наук А.Г.Новиков.

Ведущее предприятие Челябинский металлургический завод.
Автореферат разослан " _____ " _____ 1967 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1967г. на заседании Совета Челябинского политехнического института.

Адрес института: г.Челябинск, 44, проспект им.В.И.Ленина, 76.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета, посвященного защите или прислать свои отзывы в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью.

Ученый секретарь
доцент, канд. техн. наук

/В.Н.ГОНЧАР/

ВВЕДЕНИЕ

Согласно директивам XXIII съезда Коммунистической партии Советского Союза по пятилетнему плану развития народного хозяйства на 1966-1970 годы намечены высокие темпы развития черной металлургии, производство проката предусматривается довести до 95-99 млн. тонн. Наряду с другими вопросами особое внимание обращается на интенсификацию производственных процессов, в том числе и прокатного производства.

Успешному решению поставленных задач способствуют исследования условий захвата полосы валками, определяющих возможность процесса прокатки. В этом направлении наука о прокатке достигла определенных успехов благодаря трудам И.М.Павлова, А.И.Целикова, А.П.Чекмарева, И.Я.Тарновского, В.С.Смирнова и др.

Тем не менее известные условия захвата полосы валками, по которым угол захвата определяют только в зависимости от коэффициента трения, не учитывают ряда факторов и не всегда справедливы. Они не позволяют достаточно обоснованно решить вопрос о возможности захвата полосы валками при сочетании конкретных силовых, кинематических и геометрических параметров процесса прокатки. Этот главный недостаток объясняется тем, что известные условия захвата получены путем рассмотрения состояния полосы лишь в начальный момент встречи с валками.

Более полные данные о захвате полосы валками могут быть получены на основе анализа движения полосы с момента встречи ее с валками до момента выхода переднего конца полосы из очага деформации. При этом должны учитываться реальные условия протекания процесса заполнения очага деформации металлом: кинематика на контактной поверхности, уширение полосы, изменение силовых условий и т.д.

В данной работе исследование динамики процесса заполнения очага деформации металлом выполнено на основе энергетической теории взаимодействия полосы и валков. Исследования позволили получить принципиально новые результаты в вопросе захвата полосы валками и сформулировать понятие о захвате.

Под захватом понимается такой процесс заполнения очага дефор-

мации, который в конце концов переходит в установившийся процесс прокатки.

Показано, что известные условия захвата вытекают из полученных условий лишь в частном случае.

1. ВОПРОСЫ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОМ

В результате проведения серии экспериментов методом кино-съемки было установлено, что во всех случаях, когда начальная скорость полосы меньше скорости валков, захват осуществляется с отставанием на всей контактной поверхности (проскальзыванием) полосы относительно валков. В начальный момент величина скольжения определяется соотношением между скоростью задачи полосы и скоростью валков. В дальнейшем отставание либо убывает (разгон полосы), либо, наоборот, возрастает (торможение полосы в валках). Причем, отставание в плоскости переднего торца меньше, чем в плоскости входа полосы в очаг деформации, что объясняется вытяжкой полосы.

По мере продвижения полосы скольжение в плоскости переднего торца уменьшается, в определенный момент времени становится равным нулю, после чего в плоскости переднего торца вновь появляется скольжение, но уже противоположного знака (появляется опережение).

Явление проскальзывания хорошо наблюдается при замедленной демонстрации полученных фильмов.

Полученные выводы о характере скольжения на контактной поверхности при захвате хорошо согласуются с опытами В.С.Смирнова и В.Кирица.

Опыты также показали, что отставание происходит и в большинстве тех случаев, когда начальная скорость полосы больше скорости валков. Такое явление объясняется резким торможением полосы в начальный момент, в результате чего скорость ее падает ниже скорости валков.

В результате исследования уширения среднего по высоте слоя переднего торца установлено, что оно (в широком диапазоне обжа-

тий) подчиняется логарифмическому закону, предложенному В.Н. Выдриным. Для процесса захвата закономерность уширения выглядит так

$$b_3 = b_0 \left(\frac{h_0}{h_3} \right)^{a_3} \quad (I)$$

Здесь h_3, b_3 — высота и ширина переднего торца полосы.

Во всех случаях уширение на контактной поверхности Δb_3^k меньше, чем в среднем по высоте сечения Δb_3^c . Таким образом, боковая поверхность переднего конца образца имеет выпуклость, причем уширение по высоте распределяется по параболическому закону. Выпуклость наблюдается даже при малых обжатиях. В этих случаях она сменяется вогнутостью лишь после выхода из валков переднего конца достаточной длины. Разность $\delta_3 = \Delta b_3^c - \Delta b_3^k$ увеличивается по направлению к плоскости выхода.

Исследовалось также (на недокатах) распределение деформации переднего торца по его ширине. В результате экспериментов получена функция распределения скорости металла в направлении прокатки в любой точке переднего торца. Степень неравномерности можно характеризовать величиной

$$n_3 = 1 + 0,5 \frac{\delta_3}{b_3^k}$$

Установлено, что отношение интенсивностей скоростей деформации сдвига при фактической неравномерной деформации и при равномерной деформации равно

$$\bar{\gamma}_3 = \frac{H}{H_n} = 1 + 0,66 \frac{\delta_3}{b_3^k}$$

Были исследованы графики $n_3(\alpha_3)$ и $\bar{\gamma}_3(\alpha_3)$ в широком диапазоне обжатий $\Delta h/h_1$ от II до 185%. Установлено, что неравномерность деформации при захвате возрастает с увеличением обжатия. При самых неблагоприятных условиях ($\Delta h/h_1$ около 100%) она не пре-

вышает 12%. Отмечено также снижение неравномерности деформации примерно в 2 раза при переходе к установившемуся процессу прокатки, что согласуется с теорией И.М.Павлова о выравнивающем действии жестких концов.

Неравномерность деформации учитывается при дальнейшем рассмотрении процесса захвата полосы валками.

П. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОМ

Разработанная В.И. Выдриным энергетическая теория взаимодействия полосы и валков достаточно точно описывает динамику процессов прокатки и подтверждена работами ряда его учеников.

Целесообразно применить эту теорию при рассмотрении динамики процесса заполнения очага деформации металлом. Энергетический баланс такого процесса записывается уравнением

$$N_B \pm N_o - N_T - N_f \pm N_u = 0, \quad (2)$$

где N_u - мощность сил инерции, воздействующих на полосу.

В работе приведены выражения для определения составляющих уравнения (2) с учетом двухстороннего скольжения металла на контактной поверхности. При условии полного отставания на поверхности контакта эти выражения имеют вид:

а) мощность на бочке валков

$$N_B = 2vR \int_{\alpha_3}^{\alpha_0} \tau_{\alpha} b d\alpha; \quad (3)$$

б) мощность сил трения

$$N_T = 2vR \int_{\alpha_3}^{\alpha_0} \tau_{\alpha} b d\alpha - 2v \cdot h_0 \cdot b_0 \cdot R \int_{\alpha_3}^{\alpha_0} \frac{\tau_{\alpha}}{h_1 + R\alpha^2} d\alpha; \quad (4)$$

в) мощность формоизменения (получена через интенсивность скоростей деформации сдвига)

$$N_{\phi} = 2\beta_3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} v_0 \dot{n}_0 b_0 R \int_{\alpha_0 - \alpha_3}^{\alpha_0} \frac{\sigma_s \alpha}{h_1 + R\alpha^2} d\alpha; \quad (5)$$

г) мощность внешних сил (подпор или натяжение)

$$N_0 = v_0 \dot{n}_0 b_0 \sigma_0; \quad (6)$$

д) мощность сил инерции

$$N_u = m v_0 \frac{dv_0}{dt}. \quad (7)$$

Здесь α_3 - угол, характеризующий положение переднего торца полосы в очаге деформации, изменяется от нуля (в начальный момент захвата) до α_0 ;

v_0 - скорость полосы во входном сечении очага деформации;

m - масса полосы.

Показано, что при условии $\beta_3 = 1$, $\alpha_3 = 0$ (плоская равномерная деформация) выражение (5) после интегрирования легко преобразуется в известную формулу Финка для определения мощности формоизменения применительно к захвату полосы вальцами. Таким образом, выражение (5) уточняет формулу Финка с учетом неравномерной и объемной деформации.

С использованием выражений (3) - (7) из уравнения (2) получено уравнение динамики процесса заполнения очага деформации металлом

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{b_0 \dot{n}_0}{m} \left(2R \int_{\alpha_0 - \alpha_3}^{\alpha_0} \frac{\sigma_s \alpha - \beta_3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} \sigma_s \alpha}{h_1 + R\alpha^2} d\alpha \pm \sigma_0 \right). \quad (8)$$

Это уравнение рассматривается совместно с кинематическим условием, представляющим собой условие постоянства секундных объемов, проходящих через плоскость входа и плоскость переднего торца

$$\frac{d\alpha_3}{dt} = \frac{n_3 b_0 \dot{n}_0}{2\beta_3 [h_1 + R(\alpha_0 - \alpha_3)^2] \cos(\alpha_0 - \alpha_3)} \cdot v_0. \quad (9)$$

равнение (9) учитывает неравномерность распределения скорости частиц металла в плоскости переднего торца полосы.

Система (8), (9) полностью описывает процесс заполнения очага деформации с отставанием на контакте при следующих начальных условиях

$$\alpha_3(t) \Big|_{t=0} = 0, \quad v_o(t) \Big|_{t=0} = v_{oH} \geq 0 \quad (10)$$

и справедлива до тех пор, пока скольжение в плоскости переднего торца при захвате (S_3) не станет равным нулю. В момент $S_3 = 0$ скорость полосы во входном сечении равна

$$v_o' = \frac{\beta_3 [h_1 + R(\alpha_o - \alpha_3)^2]}{n_3 \dot{n}_o \delta_o} v \cos(\alpha_o - \alpha_3),$$

где v - окружная скорость валков.

Таким образом, система (8), (9) справедлива в области D значений переменных процесса

$$\begin{aligned} 0 &\leq \alpha_3 \leq \alpha_o, \\ 0 &\leq v_o \leq v_o'. \end{aligned} \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (8), (9) приводит к выражению

$$\begin{aligned} \frac{dv_o}{dt} &= \frac{R \beta_3}{v_o n_3 m} [h_1 + R(\alpha_o - \alpha_3)^2] \cos(\alpha_o - \alpha_3) \times \\ &\times \left[2R \int_{\alpha_o - \alpha_3}^{\alpha_o} \frac{\tau_\alpha - \beta_3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} \sigma_s \alpha}{h_1 + R \alpha^2} d\alpha \pm \sigma_o \right] \end{aligned} \quad (12)$$

отсюда после интегрирования получено уравнение движения полосы при заполнении очага деформации металлом в виде

$$\begin{aligned} \frac{v_o^2}{2} &= \frac{v_{oH}^2}{2} + \frac{1}{m} \int_0^{\alpha_3} \frac{1}{n_3} R \beta_3 [h_1 + R(\alpha_o - \alpha_3)^2] \cos(\alpha_o - \alpha_3) \times \\ &\times \left[2R \int_{\alpha_o - \alpha_3}^{\alpha_o} \frac{\tau_\alpha - \beta_3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} \sigma_s \alpha}{h_1 + R \alpha^2} d\alpha \pm \sigma_o \right] d\alpha_3. \end{aligned} \quad (13)$$

Для наглядности здесь коротко излагается анализ этого уравнения при условии $G_0 = 0$ (естественный захват полосы). Физический смысл уравнения (13), а следовательно, и процесса захвата легко понять, если рассмотреть разность двух интегралов

$$I_p = 2R \int_{\alpha_0 - \alpha_3}^{\alpha_0} \frac{r_v - \beta_3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} G_s \alpha}{h_1 + R\alpha^2} d\alpha, \quad (14)$$

входящую в уравнение (13).

Здесь с точностью до множителя $v_0 h_0 \beta_0$ первый интеграл представляет собой мощность активных сил трения, а второй (согласно формуле (5)) - мощность формоизменения.

Таким образом, величина I_p характеризует резерв активной мощности валков, который расходуется согласно уравнению (13) на изменение скорости полосы при захвате. Если мощность активных сил трения преобладает над мощностью формоизменения, то полоса при заполнении очага деформации разгоняется. В противном случае происходит торможение полосы по мере продвижения переднего торца в глубь очага деформации.

Очевидно, полное заполнение очага деформации будет возможным в случае, когда

$$G_0 > 0 \text{ при } 0 < \alpha_3 < \alpha_0. \quad (15)$$

Как следует из уравнения (13) (при $G_0 = 0$), это возможно при соотношении

$$-\frac{G_{0H}^2}{2} < \frac{1}{m} \int_0^{\alpha_3} \frac{1}{R_3} R \beta_3 [h_1 + R(\alpha_0 - \alpha_3)^2] \cos(\alpha_0 - \alpha_3) \times \\ \times \left[2R \int_{\alpha_0 - \alpha_3}^{\alpha_0} \frac{r_v - \beta_3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} G_s \alpha}{h_1 + R\alpha^2} d\alpha \right] d\alpha_3, \quad 0 < \alpha_3 < \alpha_0. \quad (16)$$

Последнее неравенство можно рассматривать как условие полного заполнения очага деформации металлом во всем диапазоне начальных скоростей полосы, удовлетворяющих условию (10), за исключением $G_{0H} = 0$ и начальных скоростей, удовлетворяющих равен-

$$\text{ству } \frac{(U_{on})^2}{2} = \frac{1}{m} \int_0^{\varphi_i} \frac{1}{n_3} R b_3 [h_1 + R(\alpha_0 - \alpha_3)^2] \cos(\alpha_0 - \alpha_3) \times \\ \times \left[2R \int_{\alpha_0 - \alpha_3}^{\alpha_0} \frac{r_2 - z_3 \sqrt{r_3 + a_3^2} b_3 \alpha}{h_1 + R \alpha^2} d\alpha \right] d\alpha_3, \quad 0 \leq \alpha_3 \leq \alpha_0. \quad (17)$$

При последнем условии, как следует из уравнения (13), в результате отрицательного резерва (дефицита) активной мощности валков I_p полосы затормаживается и останавливается в валках ($U_0 = 0$) в момент, когда величина I_p при значении угла $\alpha_3 = \varphi_i$ станет равной нулю (таким образом, угол φ определяется из условия $I_p|_{\alpha_3 = \varphi_i} = 0$). Дальнейшее протекание процесса заполнения очага деформации зависит от характера состояния покоя в момент остановки полосы. Если оно не устойчиво, то несмотря на невыполнение условия (15) (или, что то же (16)), процесс заполнения будет осуществим, т.е. движение полосы снова возобновится.

Таким образом, в критических случаях, отвечающих условию (17) (захват из состояния $U_{on} = 0$, $\alpha_3 = 0$, также отвечает этому условию), требуются дополнительные критерии осуществимости процесса заполнения очага деформации металлом.

В работе подробно изложена методика исследования на устойчивость системы (8), (9) в момент остановки полосы. При этом привлечены известные в математике классические методы исследования. Показано, что при условии

$$\left. \frac{d}{d\alpha_3} I_p \right|_{\alpha_3 = \varphi_i} \geq 0 \quad (18)$$

остановка полосы неустойчива, и наоборот, остановка устойчива (окончательна), если не выполняется условие (18). Физически это означает следующее. Если в момент остановки полосы в валках (или в момент начала захвата из состояния покоя полосы) имеется тенденция к положительному возрастанию резерва активной мощности валков I_p , то дальнейшее движение полосы возможно.

Таким образом, характер движения полосы при захвате, ее остановки объясняются характером изменения резерва активной мощности валков I_p . Из выражения (14) нетрудно видеть, что изменение величины I_p определяется соотношением эпюр сил трения $\tau_x(\alpha, \alpha_3)$ и сопротивления деформации $\sigma_s(\alpha, \alpha_3)$ в процессе заполнения очага деформации.

В работе рассмотрены возможные случаи изменения величины I_p . Показано, что при знакопеременном изменении величины I_p в процессе движения полоса может останавливаться несколько раз. Ниже показано, что этот теоретический вывод подтверждается экспериментально.

Состояние последней остановки (ближайшей к плоскости выхода из очага деформации) может быть либо устойчивым, либо неустойчивым. На основе анализа энергетического баланса установившегося процесса прокатки показано, что при неустойчивости ближайшей к плоскости выхода остановки полосы заведомо возможен установившийся процесс прокатки.

В результате проведенного детального анализа сформулированы следующие условия захвата.

Для осуществимости захвата должно выполняться условие (16), а ближайшее к выходному сечению возможное состояние покоя полосы должно быть неустойчивым.

В критических случаях (условие (17)) для захвата достаточно, чтобы при остановках полосы (в том числе в ближайшей к плоскости выхода) выполнялось условие (18).

В работе показано, что при $\tau_x(\alpha, \alpha_3) = \text{const}$, $\sigma_s(\alpha, \alpha_3) = \text{const}$ условие (18) имеет простой вид

$$\frac{\tau_x(\varphi_i, \varphi_i)}{\sigma_s(\varphi_i, \varphi_i)} \geq \alpha_0 - \varphi_i. \quad (19)$$

Кроме того, условие (18) для состояния покоя полосы в начальный момент захвата ($V_{он} = 0$, $\alpha_3 = 0$) имеет вид

$$\frac{\tau_x(0, 0)}{\sigma_s(0, 0)} \geq \alpha_0 \quad (20)$$

при любом законе изменения сил τ_x и σ_s . Понятно, что, если выполняется условие (20), а силы τ_x и σ_s постоянны по очагу деформации, то заведомо выполняется и условие (19), так как $\varphi_i < \alpha_0$. Оказывается, что при $\tau_x(\alpha, \alpha_0) = \text{const}$, $\sigma_s(\alpha, \alpha_0) = \text{const}$ выполнения условия (20) достаточно для осуществимости захвата при любой начальной скорости полосы, включая $v_{0н} = 0$. В самом деле, при этих условиях соотношение (16) заведомо выполняется, а состояние покоя полосы возможно лишь в начальный момент захвата (оно же ближайшее к плоскости выхода), причем состояние это неустойчиво в силу (20).

Для этого частного случая в предположении, что $\tau = f\sigma_s$ условие захвата представляется в виде известного соотношения $f \geq \alpha_0$, вытекающего из (20).

Таким образом, полученные выше результаты (16), (17), (18) и сформулированные условия захвата говорят о том, что в общем случае условия захвата определяются сочетанием всех кинематических и силовых параметров процесса прокатки. Известные условия захвата справедливы лишь в частном случае, когда силы трения и сопротивление деформации при заполнении очага деформации металлом остаются неизменными.

Этот вывод, имеющий принципиальный характер, подтвержден экспериментально. Установлено, что в диапазоне незначительных обжатий $\Delta h/h_0$ (в нашем случае от 0 до 40%), при которых силы τ и σ_s практически не изменяются в процессе заполнения, для осуществления захвата полосы валками достаточно выполнения условия $f \geq \alpha_0$. При обжатиях выше указанного предела силы τ и σ_s изменяются неравномерно и, несмотря на выполнение условия $f \geq \alpha_0$, захват происходит только при определенных значениях начальной скорости полосы, удовлетворяющих неравенству (16).

Подобный анализ выполнен и для случаев захвата полосы валками с подпором или натяжением. Такие усилия могут возникать в результате взаимодействия клетей непрерывного стана или в результате действия роликана, проводок и т.п. на полосу в условиях обычного стана.

Рассмотрены различные случаи захвата при различных соотноше-

ниях

скорости полосы и внешних усилий

$$\begin{array}{lll} \text{а)} \quad v_0 = \text{const} & \text{б)} \quad v_0 \neq \text{const} & \text{в)} \quad v_0 \neq \text{const} \\ \pm \sigma_0 \neq \text{const} & \pm \sigma_0 \neq \text{const} & \pm \sigma_0 = \text{const} \end{array}$$

Здесь $+\sigma_0$ - подпор, $-\sigma_0$ - натяжение.

Показано, что внешние усилия изменяют резерв активной мощности валков и тем самым влияют на характер движения полосы при захвате. Под действием внешних усилий может изменяться характер состояния покоя полосы при ее остановках. Улучшение условий захвата объясняется тем, что в результате действия подпора определенной величины крайнее к плоскости выхода состояние покоя полосы оказывается неустойчивым. Влияние натяжения противоположно.

И.М.Навлов, анализируя известные условия захвата, пришел к выводу о том, что вталкивающие усилия не улучшают захват полосы валками. В то же время в работах А.П.Чекмарева, С.Н.Филипова, А.И.Целикова, А.А.Преснякова и др. показано, что условия захвата изменяются под действием вталкивающих усилий.

Приведенный в работе анализ позволил объяснить указанные выше противоположные взгляды. Оказалось, что вталкивающие усилия улучшают захват полосы валками только в тех случаях, когда он возможен в естественных условиях ($\sigma_0 = 0$), при ограниченных значениях начальной скорости полосы. В этих случаях применение внешнего усилия расширяет диапазон начальных скоростей полосы, при которых возможен захват.

И наоборот, если естественный захват невозможен при любой начальной скорости полосы, то он невозможен и с применением вталкивающих усилий. В этом случае при определенном усилии полосу можно запрессовать в валки, но после снятия усилия полоса останется в валках.

Особое внимание уделено процессу заполнения очага деформации с постоянной скоростью полосы v_0 . Такой процесс заполнения возможен в условиях непрерывного стана, когда опережение и скорость валков в предыдущей клетке остаются неизменными или мало изменяются в период захвата полосы валками последующей клетки.

Как видно из уравнения (13), возникающие при захвате полосы с постоянной скоростью v_0 , внешние усилия изменяются по закону

$$\pm \sigma_0 = 2R \int_{\alpha_0 \alpha_3}^{\alpha_0} \frac{\tau_x - \beta_3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} \sigma_3 \alpha}{n_2 + R \alpha^2} d\alpha = I_p. \quad (21)$$

Этому уравнению можно дать следующее физическое толкование. Если заполнение очага деформации протекает с дефицитом активной мощности валков I_p , то этот недостаток энергии полностью компенсируется возникающим подпором. В результате, согласно уравнению (13), скорость U_0 поддерживается постоянной (в противном случае (при $\sigma_0 = 0$) она бы падала). И наоборот, если процесс протекает с избытком энергии валков, то этот избыток расходуется на создание натяжения полосы.

Возникающий в какой-то момент времени процесса заполнения подпор полосы может достичь величины допустимого сопротивления на продольный изгиб полосы ($[\sigma_{0,2}]$). При этом образуется петля, после чего возможность захвата полосы определяется выполнением условий естественного захвата.

Таким образом, возможность захвата полосы валками непрерывного стана определяется с одной стороны условиями протекания процесса заполнения очага деформации (изменением величины I_p), а с другой стороны - величиной $[\sigma_{0,2}]$ (сечение полосы, марка стали, температура, длина межклетевого промежутка и т.д.).

Проделанный в работе анализ выполнен для случая захвата с полным отставанием полосы относительно валков, которое имеет место в практических случаях. Представлены также исходные данные, которые могут быть использованы при необходимости для анализа условий захвата при наличии опережения и двух зон скольжения. Однако, сформулированные выше условия захвата являются достаточными для решения вопроса о возможности захвата и в тех случаях, когда первоначальная картина скольжения на контактной поверхности отличается от рассмотренной. Действительно, в случае захвата в условиях прилипания, опережения или наличия двух зон скольжения нарушение нормального процесса заполнения в конце концов приводит переменные α_3, U_0 в область D (II), в которой характер процесса определяется полученными условиями.

Предложенный метод и результаты теоретических исследований касаются принципиальной стороны вопроса о захвате полосы валками. Аналогичным образом могут быть рассмотрены вопросы захвата при прокатке полосы в калибрах, в валках неравного диаметра, с одним приводным валком, в условиях непрерывного стана с учетом взаимодействия клетей, применительно к трубным и другим станам.

Результаты исследований могут быть использованы в практических целях для анализа условий захвата при известных законах изменения сил T , G_s и уширения с применением вычислительно машины.

В настоящее время динамику прокатного стана в период захвата рассматривают главным образом путем исследования электромеханической системы стана. При этом недостаточно учитываются основные особенности процесса заполнения очага деформации металлом.

В работе отмечается, что более полные выводы о динамике стана в период захвата могут быть сделаны на основе совместного рассмотрения уравнений (8), (9), описывающих технологический процесс захвата, и уравнений, описывающих электромеханическую систему стана. При этом могут быть учтены также зазоры в главной линии.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

I. Методика экспериментального исследования процесса заполнения очага деформации металлом

Исследования проводились на стане дуо 180 с гладкими валками (чистота поверхности ∇_6), установленными на подшипниках качения. Для измерения скорости движения образца и исследования кинематики на контакте при захвате была использована кинокамера СКС-1М. Камера устанавливалась стационарно на уровне прокатки со свободной стороны стана. Съемку производили со скоростью 400-500 кадров в секунду. Это позволяло при расшифровке кинограмм улавливать малейшие изменения скорости образца и давало возможность проследить визуально за движением образца при замедленной демонстрации фильма. О скольжении на контакте судили по величине смещения рисок, нанесенных на торцах валков и боковой поверхности образца.

Одновременно со съемкой с помощью осциллографа Н-700 реги-

стрировали величину моментов на шпинделях, давление металла на валки, уширение переднего торца как в средней части, так и в приконтактном слое образца. При моделировании захвата в условиях непрерывного стана регистрировали также подпор (натяжение). Давление и подпор (натяжение) измеряли мессдозами мембранного типа, а крутящие моменты — с помощью динамометрических шпинделей. Для измерения уширения разработан специальный тензометр рычажного типа, который прикреплялся к плоскости переднего торца образца и перемещался при захвате вместе с ним.

Образцы задавали с помощью специального устройства, включающего тележку, привод которой осуществлялся от валков посредством троса. Устройство позволяло варьировать в широких пределах скорость задачи и массу образцов, а также давало возможность регулировать установку образца относительно линии прокатки. При задаче образца в валки в условиях естественного захвата практически исключались вталкивающие усилия.

Экспериментальная установка действовала автоматически. Для этого достаточно было выставить образец относительно валков и привести в движение задающую тележку, которая на своем пути при подходе образца к валкам включала одновременно осциллограф и кинокамеру.

Расшифровку кинограмм и осциллограмм производили совместно по показаниям отметчиков времени. Расшифровка кинограмм заключалась в измерении пути образца и валков в единицу времени. При измерениях на экране кадр увеличивали в 27-30 раз.

В работе изложен метод анализа погрешностей, возникающих при киносъемке и расшифровке кинограмм. Показано, что точность киносъемки зависит от величины уширения полосы при захвате и положения переднего торца в очаге деформации, а точность расшифровки определяется разрешающей способностью объектива камеры.

Путем теоретического анализа получен график, характеризующий степень погрешности в зависимости от положения переднего торца полосы в валках, уширения при захвате и положения кинокамеры. Показано, что погрешность может изменяться от 0 (при измерении пути образца в плоскости входа) до 100% (при измерении пути переднего торца вблизи плоскости выхода из очага деформации). Благодаря се-

ответствующей установке кинокамеры относительно очага деформации погрешность при измерении пути переднего торца полосы не превышала 5%.

По результатам обработки экспериментальных данных в зависимости от угла α_3 строились графики:

а) крутящих моментов $M(\alpha_3)$;

б) давления металла на валки $P(\alpha_3)$;

в) средних по площади контакта удельных сил трения, которые определяли через крутящий момент по выражению

$$T_c(\alpha_3) = \frac{M(\alpha_3)}{R F(\alpha_3)};$$

г) средних удельных давлений, определяющих по выражению

$$P_c(\alpha_3) = \frac{P(\alpha_3)}{F(\alpha_3)};$$

д) подпора (натяжения) $\pm T_o(\alpha_3)$;

е) удельных внешних сил $\pm \sigma_o(\alpha_3)$;

ж) уширения переднего торца в среднем горизонтальном сечении $\Delta b_3^c(\alpha_3)$ и в приконтактном слое $\Delta b_3^k(\alpha_3)$;

з) скорости образца в плоскости входа $v_o(\alpha_3)$ и в плоскости переднего торца $v_3(\alpha_3)$;

и) окружной скорости валка $v(\alpha_3)$;

л) скольжения полосы относительно валков в плоскости переднего торца $S_3(\alpha_3)$ и в плоскости входа $S_o(\alpha_3)$ и др.

Строились также эпюры $\sigma_5(\alpha_3)$. При определенном значении угла α_3 величина σ_5 в любом сечении заполнившейся части очага деформации равна

$$\sigma_5(\alpha, \alpha_3) = \sigma_{5o} + \sum_1^n \Delta \sigma_5(\alpha, \alpha_3), \quad (22)$$

где σ_{5o} - сопротивление деформации в плоскости входа в очаг деформации.

Среднее значение $\sigma_5(\alpha_3)$ определяли через площадь эпюры $\sigma_5(\alpha, \alpha_3)$. Получив таким образом для ряда значений угла α_3 промежуточные эпюры $\sigma_5(\alpha, \alpha_3)$, строили эпюру $\sigma_5(\alpha_3)$.

Для определения приращения сопротивления деформации на

участке $\Delta\alpha$ использовали известное выражение

$$\Delta G_s(\alpha) = \left(\frac{\partial G_s}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} + \frac{\partial G_s}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \right) \Delta \alpha. \quad (23)$$

Зависимости $G_s(\varepsilon, u)$ были получены экспериментальным путем на пластометре Южуралмашзавода. При расчетах $\Delta G_s(\alpha)$ использовались экспериментальные графики $U_0(\alpha_3)$ и $\beta_3(\alpha_3)$.

С учетом перечисленных выше экспериментальных графиков проверка подвергалась уравнение движения полосы в виде

$$\begin{aligned} \frac{dU_0}{d\alpha_3} = & \frac{1}{v_0 n_3 m} R \beta_3 [h_1 + R(\alpha_0 - \alpha_3)^2] \cos(\alpha_0 - \alpha_3) \times \\ & \times \left\{ 2R \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \alpha_0 - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R}{h_1}} (\alpha_0 - \alpha_3) \right] - \right. \\ & \left. - 3 \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2} \ln \frac{h_0}{h_1 + R(\alpha_0 - \alpha_3)^2} \pm G_0 \right\}, \quad (24) \end{aligned}$$

полученное из (12) с использованием теоремы о среднем значении интеграла. Согласно этой теореме текущие значения $\tau_\alpha(\alpha)$ и $G_s(\alpha)$ замени некоторыми постоянными значениями τ_0 и G_s . Однако уравнение (24) учитывает изменение τ_0 и G_s в зависимости от положения переднего торца полосы: (α_3) .

Численное решение уравнения (24) производилось на ВМ Урал-2. Наиболее удовлетворительные результаты получены с шагом интегрирования $\Delta\alpha_3 = 0,0001$ рад.

Уравнение (24) использовалось также для получения расчетных эпюр $G_s(\alpha_3)$, которые затем сравнивались с действительными эпюрами $G_s(\alpha_3)$, полученными по изложенной выше методике.

Следует отметить, что в литературе нет сведений о перечисленных выше закономерностях применительно к захвату полосы валками.

В диссертации наряду с графиками представлены типовые киннограммы и осциллограммы.

2. Условия проведения экспериментальных исследований

Исследования проведены на свинце. В работе подробно изложено обоснование выбора этого материала для моделирования захвата при прокатке горячей стали. Сопротивление деформации свинца, как и горячей стали, сильно зависит от степени и скорости деформации. Причем, эпюры σ_s свинца аналогичны эпюрам σ_s стали. Об этом свидетельствуют эксперименты, проведенные на пластметре. Л.М.Агеевым показано, что эпюры σ_s свинца и сталист. 5, ст. 3, 20 и др., полученные при одинаковых деформационно-скоростных режимах, близки также и по абсолютным значениям σ_s .

Кроме того, наряду с известными удобствами при использовании в лабораторных условиях, свинец обладает очень хорошей фотогеничностью. Тончайшие риски, которые наносились бритвенным лезвием на боковой поверхности образцов, имеют четкие контуры, что является немаловажным фактором для получения качественных кинограмм и повышения точности результатов.

В процессе исследований изучалось влияние на движение полосы при захвате (на условия захвата) следующих основных факторов:

- а) относительного обжатия $\Delta h/h_1$ (от II до I93%, что соответствует углам захвата α_0 от 8^0 до 24^0);

- б) отношения $v/v_{0н}$ (от 0,45 до 6,2);

- в) массы полосы (от 7,6 н до 500 н).

Всего прокатано около 300 образцов сечением 20 x 20 мм.

Передний торец образцов предварительно обрабатывался строго перпендикулярно боковым граням.

3. Анализ результатов экспериментальных исследований

Анализ эпюр $\sigma_s(\alpha_2)$ показал, что сопротивление деформации в соответствии со скоростью и степенью деформации изменяется при захвате неравномерно. В большинстве случаев наблюдается явно выраженный максимум эпюры $\sigma_s(\alpha_2)$, расположенный вблизи входного сечения очага деформации, что объясняется максимальной интенсивностью изменения степени деформации на начальном участ-

ке дуги захвата. В первой половине очага деформации эпюры $\sigma_s(\alpha_3)$, $\tau_c(\alpha_3)$ и $\rho_c(\alpha_3)$ имеют аналогичный характер. Удельное давление здесь выше сопротивления деформации примерно на 15%, характер изменения его определяется изменением сопротивления деформации. После значительного снижения, сопротивление деформации снова повышается во второй половине очага деформации. Здесь наблюдается также увеличение удельного давления, причем во второй половине очага деформации силы ρ_c растут быстрее σ_s . К выходу переднего конца из очага деформации растут и силы трения, однако незначительно и не пропорционально силам σ_s и ρ_c . В связи с этим коэффициент трения по соотношениям $f = \frac{\tau_c}{\sigma_s}$ и $f = \frac{\tau_c}{\rho_c}$ падает почти в 2 раза. Причем падение его больше по второй зависимости.

В общем закономерность изменения сил трения определяется изменением сопротивления деформации; что не противоречит известным в литературе взглядам на природу трения при прокатке со скольжением металла относительно валков.

Сравнение действительных графиков $\sigma_s(\alpha_3)$ и расчетных по уравнению (24) показало хорошую их сходимость. Тем самым еще раз подтверждается справедливость уравнения движения полосы при захвате.

Установлено повышение сил $\sigma_s(\alpha_3)$, $\tau_c(\alpha_3)$, $\rho_c(\alpha_3)$ и возрастание неравномерности их изменения с увеличением относительного обжатия $\Delta h/h_1$. Характер эпюр при этом сохраняется. Однако с увеличением обжатия $\Delta h/h_1$ выше 40% на начальном участке очага деформации силы τ_c растут в меньшей степени по сравнению с σ_s , что приводит к отрицательному значению резерва активной мощности валков I_p на начальном участке. Затем величина I_p становится положительной. Именно этим объясняется провал экспериментальных графиков $\tau_c(\alpha_3)$, наблюдающийся в начале захвата. Такие экспериментальные графики хорошо согласуются с расчетными по уравнению (24).

Отмечены устойчивые (окончательные) остановки полосы в валках при начальной скорости $v_{он}$ ниже некоторой величины. Выше этой величины происходит надежный захват, несмотря на значительное падение скорости v_0 на начальном участке дуги захвата.

В связи с этим влияние начальной скорости полосы U_{OH} на условия захвата объясняется появлением дополнительной кинетической энергии полосы, частично компенсирующей дефицит активной энергии валков I_p , который имеется вначале захвата.

Аналогичным образом влияет на условия захвата масса полосы.

Показано, что в случаях, когда дефицит энергии I_p полностью компенсируется появлением кинетической энергии полосы, провал графика $\sigma_0(\alpha_0)$ исчезает.

Установлено, что максимум эпюры $\sigma_3(\alpha_3)$ с увеличением относительного обжатия несколько удаляется от плоскости входа, в связи с чем длина начального участка очага деформации, на котором величина I_p отрицательна, увеличивается. Этим объясняется необходимость увеличения начальной скорости U_{OH} и массы полосы для осуществления захвата при увеличении угла α_0 .

Так, путем постепенного повышения начальной скорости U_{OH} в нашем случае угол захвата α_0 был доведен до 20° и значительно превысил угол $\alpha_0 = 15^\circ 15'$, удовлетворяющий известным условиям захвата. Обжатие при этом возросло с 50 до 105%.

Приведенный анализ относится к соотношениям U/U_{OH} в диапазоне $I + 6,2$.

Увеличение скорости U_{OH} выше скорости валков не привело к положительному эффекту. В результате резкого торможения в валках полоса останавливалась раньше, чем дефицит сменялся избытком энергии валков. Более резкое торможение при $U_{OH} > U$ объясняется тем, что энергия полосы расходуется не только на ее деформацию, но и на преодоление сил трения, направленных против движения полосы.

Опыты показали, что в случаях, когда исчерпывается возможность повышения предельного угла захвата за счет увеличения начальной скорости U_{OH} (при $U/U_{OH} = 1$), целесообразно увеличивать массу полосы.

Согласно существующим представлениям сначала происходит смятие переднего конца полосы за счет удара ее о валки, а затем осуществляется захват. Таким образом искусственно разделяются два процесса - удар и захват, которые в действительности протекают одновременно, начиная с момента соприкосновения полосы с валками.

В связи с этим были поставлены специальные опыты. Сопоставляли длину дуги захвата на недокате, полученном при остановке полосы в валках, с длиной площадки смятия, полученной в результате удара полосы о неподвижные валки при одинаковых начальных скоростях и массах. Оказалось, что длина дуги захвата была примерно в 9 раз больше длины площадки смятия. Из этого сделан вывод, что частичное внедрение полосы в валки при отсутствии захвата объясняется не смятием её при ударе о валки, а характером процесса захвата как такового. Это различие имеет принципиальный характер.

В работе отмечены случаи, когда полоса во время своего движения при захвате останавливалась в валках 3 раза, продолжительность остановок не превышала 0,15 сек. Повторение остановок объясняется знакопеременным изменением резерва мощности валков Γ_p в связи с крайне неравномерным изменением сопротивления деформации в исследованном случае. При захвате с остановками полосы графики крутящих моментов и давления металла на валки имеют волнообразный характер. Провалы графиков $M(\alpha_3)$ и $P(\alpha_3)$ строго соответствуют остановкам полосы в валках. Таким образом показано, что изменение крутящего момента и давления металла на валки объясняется характером протекания процесса захвата.

Проведены эксперименты по захвату полосы с постоянной скоростью $U_0(\alpha_3) = U_{0н}$. Установлено, что при отношениях $U/U_{0н} > 1$, имеющих место в большинстве практических случаев на непрерывном стане, в процессе захвата в большинстве случаев возникает подпор, постепенно возрастающий по мере движения переднего торца полосы к плоскости выхода.

Характер кривой подпора σ_0 и его величина хорошо согласуются с графиком изменения дефицита активной мощности валков. Тем самым подтверждается условие (21) и высказанные взгляды о захвате с постоянной скоростью полосы.

Дефицит энергии Γ_p при $U_0 = const$ объясняется соотношением эпюр $\tau_c(\alpha_3)$ и $\sigma_s(\alpha_3)$. Сопротивление деформации σ_s возрастает в течение всего периода захвата, причем наиболее резкое возрастание имеет место вблизи входного сечения. Возрастающий характер эпюр $\sigma_s(\alpha_3)$ при $U_0(\alpha_3) = U_{0н}$ объясняется снижением интен-

ности изменения скорости деформации по сравнению с естественным захватом при той же начальной скорости $v_{он}$. Вследствие этого упрочнение металла преобладает над разупрочнением.

Силы же трения при $v_0(\alpha_2) = v_{он}$ несколько снижаются за счёт увеличения скорости скольжения.

Установлено, что с увеличением относительного обжатия $\Delta h/h_1$ подпор возрастает. Увеличение подпора в этом случае объясняется увеличением в равной степени дефицита активной мощности валков (I_p).

Наблюдается снижение подпора при $v/v_{он} > 3$ и при отношении $v/v_{он}$ близком к единице. Снижение подпора в этих случаях объясняется увеличением сил трения и уменьшением в связи с этим дефицита активной мощности валков.

Отмечены случаи, когда при захвате внешние продольные усилия в полосе меняют свой знак, что объясняется сменой знака величины I_p .

В опытах отмечены случаи петлеобразования в результате возникновения подпора, превышающего $[G_{\alpha_2}]$. Несмотря на значительное заполнение очага деформации металлом (больше половины l_g), захват в этих случаях прекращается, так как углы захвата значительно превышают углы естественного захвата (в нашем случае в 1,2 раза).

Установлено, что предельные углы захвата можно повышать за счёт снижения подпора путём выбора соответствующего отношения $v/v_{он}$, в результате чего исчезает петлеобразование. На величину предельного значения возникающего подпора можно также воздействовать скоростью полосы, от которой зависит G_2 и, следовательно, резерв I_p .

В работе рассмотрен вопрос о влиянии ширины полосы на условия захвата в свете предложенной теории. Известные факты улучшения захвата с увеличением ширины полосы объясняется снижением в этих случаях уширения полосы при захвате. В результате этого увеличивается продольная составляющая сил τ и, следовательно, возрастает величина I_p .

По итогам теоретических и экспериментальных исследований предложены следующие практические рекомендации.

1. Известные условия захвата могут быть успешно использованы лишь при сравнительно незначительных обжатиях, не представляющих практический интерес с точки зрения производительности стана.

2. Применение полученных условий захвата (с практической точки зрения) может быть наиболее эффективным при значительных обжатиях.

3. В связи со значительным влиянием скорости задачи полосы на условие захвата проектировщикам и эксплуатационникам можно рекомендовать установку рольгангов с переменной скоростью вращения роликов.

4. Для улучшения условий захвата наиболее целесообразно поддерживать отношение V/v_{OH} больше единицы.

5. При отношениях $V/v_{OH} > 1$ с увеличением обжатия следует увеличивать скорость задачи полосы v_{OH} .

6. С увеличением обжатия диапазон скоростей v_{OH} , при которых возможен захват полосы, сужается.

В связи с этим в случаях, когда интенсификация обжатий ограничивается начальной скоростью полосы v_{OH} , можно рекомендовать увеличение веса заготовки или применение вталкивающих усилий.

Эти мероприятия наиболее целесообразны при отношениях V/v_{OH} близких к единице.

7. В целях улучшения захвата и интенсификации обжатий на непрерывном стане должны предусматриваться мероприятия, направленные против петлеобразования при захвате полосы.

К этим мероприятиям следует отнести:

а) снижение дефицита активной мощности валков путем подбора соответствующего отношения V/v_{OH} (при увеличении отношения V/v_{OH} выше 2 дефицит снижается);

б) ужесточение полосы в период захвата, например, путем сокращения межклетьевого расстояния, создания специальной арматуры, соблюдения соответствующего температурного режима и т.п.

Предлагаемая теория захвата полосы валками открывает возможность научно обоснованного использования описанных выше мероприятий по улучшению захвата и интенсификации обжатий с учетом конкретных условий.

В диссертации изложена методика и приведены примеры расчета условий захвата.

Изложены также перспективы использования предложенных методов исследований и полученных условий захвата. В частности отмечено, что для успешного использования полученных результатов необходимо накопление и обобщение данных по эграмм сил T и σ_s , характеру деформации полосы при захвате и др. вопросам.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана теория процесса заполнения очага деформации металлом. Показано, что заполнение очага деформации является сложным с кинематической, геометрической и силовой точек зрения процессом.

2. Получено уравнение движения полосы при заполнении очага деформации металлом, которое в достаточной степени подтверждается экспериментально.

3. Получено условие осуществимости полного заполнения очага деформации металлом.

Исследованы критические случаи, когда в процессе заполнения возможны остановки полосы. Такие случаи полностью подтверждаются экспериментально и подчиняются полученным зависимостям.

4. Сформулировано понятие о захвате полосы валками.

Под захватом понимается такой процесс заполнения очага деформации, который в конце концов переходит в установившийся процесс прокатки.

5. Сформулированы условия захвата полосы валками. В частности показано, что заполнение очага деформации переходит в установившийся процесс прокатки в случаях, когда выполняются условия полного заполнения очага деформации металлом, а ближайшая к плоскости выхода возможная остановка полосы неустойчива.

6. Исследовано влияние внешних сил на условия захвата полосы валками.

7. Показано, что захват полосы валками зависит, главным образом, от соотношения эграмм сил $T(\alpha, \alpha_2)$ и $\sigma_s(\alpha, \alpha_2)$.

8. Известное соотношение $f \geq \alpha_0$ является частным случаем полученных условий захвата и справедливо лишь при $\tau(\alpha_1, \alpha_2) = const$ и $\sigma_s(\alpha_1, \alpha_2) = const$, что также подтверждается экспериментально.

9. Предложенный метод исследований касается принципиальной стороны вопроса о захвате полосы валками. Аналогичным образом могут быть рассмотрены вопросы захвата полосы при прокатке в калибрах, в валках неравного диаметра, с одним приводным валком, в условиях непрерывного стана, применительно к трубным и другим станам.

10. Результаты исследований могут быть использованы в практических целях для анализа условий захвата с применением вычислительной техники.

Полученные зависимости могут быть также использованы при анализе динамики прокатного стана и его привода в период захвата полосы валками.

11. Разработана методика и создана экспериментальная установка для комплексного исследования процесса заполнения очага деформации металлом.

12. Предложен и использован метод исследования кинематики скольжения на контактной поверхности с помощью скоростной киносъемки.

13. Разработана методика совместной расшифровки кинограмм и осциллограмм.

14. Проведен анализ погрешностей, сопутствующих киносъемке и расшифровке кинограмм.

Установлены зависимости, определяющие величину погрешности метода киносъемки.

15. Исследованы кинематические условия на контактной поверхности при захвате полосы валками.

Захват практически осуществляется с закономерным проскальзыванием (полным отставанием) полосы относительно валков.

16. Создан надежный датчик уширения (широномер). Исследована закономерность уширения полосы при захвате и распределение уширения по высоте полосы.

17. Исследована неравномерность деформации полосы при захвате.

Повышенная по сравнению с установившейся прокаткой неравномерность объясняется отсутствием переднего жесткого конца полосы.

18. Экспериментально показано, что силы трения и сопротивление деформации в общем случае при захватераспределяются неравномерно и могут значительно изменяться по величине.

19. Частично исследованы эпюры $p_c(\alpha_3)$. Выявлен характер изменения сил p_c и их взаимосвязь с силами Q .

20. Показано, что неравномерность эпюр $\sigma_2(\alpha_2)$ объясняется деформационно-скоростными условиями процесса заполнения очага деформации.

Наряду с другими факторами, изменение сил трения объясняется закономерностью изменения сил σ_2 .

21. Экспериментально исследовано влияние относительного обжатия, массы и начальной скорости полосы на условия захвата.

22. Экспериментально исследован захват полосы применительно к условиям непрерывного стана (при $U_c(\alpha_3) = U_{0н}$). Опытные данные подтверждают основные теоретические закономерности такого процесса.

Диссертация состоит из шести глав, содержит 165 страниц машинописного текста, сопровождаемого 83 иллюстрациями, 14 таблицами. Список использованной литературы включает 67 наименований.

Материалы диссертации докладывались автором:

1. На научно-технической конференции по вопросам прочности металлургических машин. Ленинград-Колпино, ВНИИМЕТМАШ, апрель, 1966.
2. На Ученом Совете физико-технического института АН БССР, Минск, декабрь, 1966.
3. На объединенном семинаре кафедр "ОМД" и "Автоматизация металлургических процессов" Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина, Ленинград, декабрь, 1966.
4. На третьей научно-технической конференции молодых специалистов, Челябинск, Металлургический завод, май, 1967.
5. На пятом совещании по основным проблемам теории машин и механизмов, Сухуми, АН СССР, АН ГССР, Грузинский политехнический институт, май, 1967.
6. На научном семинаре ЦНИИЧЕРМЕТА, г. Москва, октябрь, 1967.
7. На Челябинской областной научно-технической конференции работников ВУЗов, НИИ и предприятий, Челябинск, октябрь, 1967.
8. На ХУШ, XIX, XX научно-технических конференциях Челябинского политехнического института, 1965-1967 гг.
9. На научных семинарах кафедры прокатки Челябинского политехнического института.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Явление проскальзывания полосы относительно валков при захвате. Известия высших учебных заведений, Черная металлургия, 1967, № 5.
2. Динамика процесса заполнения очага деформации металлом. Известия высших учебных заведений, Черная металлургия, 1967, № 9.
3. Сопротивление деформации свинца в зависимости от деформационно-скоростного фактора. Известия высших учебных заведений, Цветная металлургия, 1966, № 3.
4. Условия захвата полосы валками при прокатке с подпером или натяжением. Теория и технология прокатки, сб. трудов кафедр ОМД·УПИ, ЧПИ и МГМИ, в.1, Металлургия, 1967.