

6 +
А-63

22/11/71

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инженер Б.С. ПОЛАТОВСКИЙ

ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ, СИЛОВЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ДВУТАВРОВЫХ
БАЛОК

Специальность 324 - Обработка металлов давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск

1971

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инженер Б.С.ПОЛАТОВСКИЙ

ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ, СИЛОВЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ДВУТАВРОВЫХ
БАЛОК

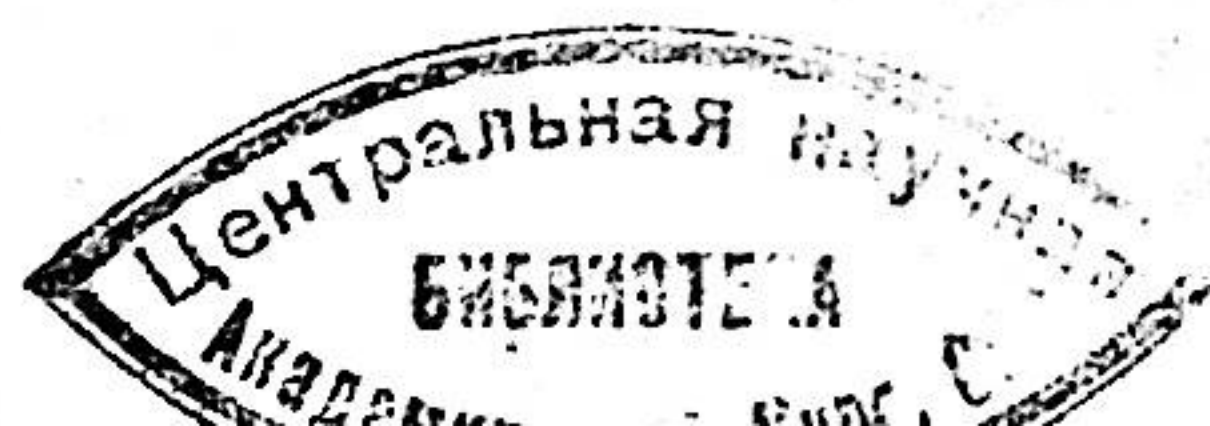
Специальность 324 - Обработка металлов давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск

1971



В задачах текущего пятилетнего плана большое значение придается развитию черной металлургии и, в частности, прокатного производства. В 1970 завершающем году пятилетки должно быть произведено 95 + 99 млн. тонн проката, или 139% от уровня производства 1965 года.

При этом предусмотрено значительное развитие сортопрокатного производства, обеспечивающего металлом такие отрасли промышленности, как все виды машиностроения и строительство.

Последние предъявляют все более высокие требования к качеству сортового проката в части повышения его точности и экономичности, а также расширения сортамента.

Удовлетворение этих требований в металлургии осуществляется путем совершенствования технологии и калибровки на имеющихся станках, разработки и освоения нового оборудования, внедрения процессов непрерывной и бесконечной прокатки.

Решение перечисленных задач обуславливает необходимость развития существующих представлений в области сортовой прокатки. В литературе не получили достаточного освещения вопросы формирования, определения кинематических и силовых параметров при прокатке в калибрах; в большинстве работ процесс рассматривается в плоском виде в выходном сечении калибра; для расчета энергосиловых параметров имеются приближенные методики (например, по соответственной полосе); имеется всего несколько работ, посвященных непрерывной прокатке фасонных профилей.

Таким образом, на современном этапе развития прокатного производства дальнейшее совершенствование процесса прокатки, по-

вышение его точности, снижение расход энергии и прокатных валков, освоение новых профилей проката требует более углубленного изучения физической сущности процесса формообразования профиля, перехода от решения плоской задачи к рассмотрению очага деформации в целом.

При этом должны быть определены геометрические параметры очага деформации, его кинематические и силовые закономерности при различных условиях деформирования, энергосиловые параметры прокатки и найдены оптимальные условия, обеспечивающие стабильность размеров полосы при непрерывной прокатке.

Реферлируемая работа посвящена решению указанных вопросов при прокатке двутавровой балки, являющейся наиболее типичным представителем фланцевых профилей, в связи с чем полученные закономерности являются в определенной степени обобщающими для профилей указанной группы.

1. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

Геометрические параметры очага деформации определяются протяженностью и площадью контактирования металла с инструментом, а также текущими его размерами в любом сечении вертикальной плоскости.

Метод вертикальных сечений позволяет судить о характере формоизменения по длине очага деформации, определять величину вытяжки на любом удалении от плоскости выхода, оценивать разновременность начала деформирования отдельных элементов профиля и условия захвата. Метод применяется в ряде случаев на практике при проектировании и анализе калибровок, а также используется многими авторами. При этом каждое заданное сечение строится графически, что

требует значительной затраты времени.

В работе получены выражения, позволяющие определять размеры вертикального сечения очага деформации на заданном удалении от плоскости выхода.

Толщина шейки в заданном вертикальном сечении:

$$d'_{ш} = D_0 - \sqrt{R_5^2 - p^2} - \sqrt{R_2^2 - p^2}, \quad (1)$$

где: D_0 - межцентровое расстояние валков;

$R_2; R_5$ - радиусы цилиндрической части верхнего и нижнего валков, образующих шейку;

p - расстояние от заданной секущей плоскости до плоскости выхода.

Величина основания и конца закрытого фланца в любом вертикальном сечении равны их величине в плоскости выхода, а для открытого фланца определяются по выражениям:

$$b'_{фа} = A - \operatorname{tg} \alpha_1 (R_1 - \sqrt{R_5^2 - 2D_0 \sqrt{R_5^2 - p^2} + D_0^2}); \quad (2)$$

$$a'_{фа} = A - \operatorname{tg} \alpha_2 (R_5 - \sqrt{D_0^2 - 2D_0 \sqrt{R_1^2 - p^2} + R_1^2}). \quad (3)$$

Здесь: A - расстояние между основаниями конусов, образующих наружную и внутреннюю поверхности открытого фланца;

$\alpha_1; \alpha_2$ - угол наклона конусов, образующих наружную и внутреннюю поверхности открытого фланца;

R_1 - радиус основания конуса, образующего наружную поверхность открытого фланца.

Следующие выражения определяют высоту открытого, закрытого фланцев и замка калибра

$$h_{\varphi 0} = \sqrt{R_1^2 - p^2} + \sqrt{R_5^2 - p^2} - D_0 ; \quad (4)$$

$$h_{\varphi 3} = \sqrt{R_2^2 - p^2} - \sqrt{R_3^2 - p^2} ; \quad (5)$$

$$S' = D_0 - \sqrt{R_4^2 - p^2} - \sqrt{R_1^2 - p^2} . \quad (6)$$

Здесь R_3 и R_4 - радиусы цилиндрической части вала, образующие конец закрытого фланца и верхнюю часть замка калибра.

После определения размеров калибра в данном вертикальном сечении, величина снимаемой площади в нем определяется следующим образом:

$$\Delta F = F - F_i , \quad (7)$$

где: F_i - площадь калибра в данном сечении;

F - площадь задаваемого раската.

Предложен также графо-аналитический метод определения снимаемой площади, когда сечение задаваемого раската накладывается на рассчитанное. При этом соотношение обхватов на противоположащих поверхностях по шейке и на данной высоте Z по открытому и закрытому фланцам принимается обратно пропорциональным соответствующим радиусам кривизны и определяется по выражениям:

$$C_{ш.} = \frac{R_2}{R_5} ; \quad (8)$$

$$C_0 = \frac{(D_0 - Z) \operatorname{tg} \alpha_1}{Z \operatorname{tg} \alpha_2} ; \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_3} . \quad (10)$$

Здесь α_3 - угол наклона конуса, образующего внутреннюю поверхность закрытого фланца.

- 5 -

Совместным решением уравнений поверхностей валков, образующих калибр, и задаваемого раската были получены выражения, определяющие длину контакта металла с валками на любой заданной высоте Z по открытому и закрытому фланцам.

$$y_0 = \sqrt{\frac{2 \Delta t_0 (D_0 - Z)}{(1 + C_0) \operatorname{tg} \alpha_2}} ; \quad (11)$$

$$y_3 = \sqrt{\frac{2 Z \Delta t_3}{(1 + C_3) \operatorname{tg} \alpha_3}} . \quad (12)$$

Здесь Δt_0 и Δt_3 - величина обхвата открытого и закрытого фланцев на данной высоте.

Длина контакта по шейке определяется по известному выражению

$$y_{ш.} = \sqrt{R \Delta d_{ш.}} . \quad (13)$$

Приведенные выражения позволяют построить границы соприкосновения металла с инструментом по ряду заранее выбранных координат Z , количество которых выбирается в зависимости от необходимой точности. Планиметрирование полученной таким образом площади соприкосновения представляет метод ее графоаналитического определения.

Интегрирование зависимостей (11)+(12) по координате Z в пределах высоты фланцев позволило получить выражения для определения площади соприкосновения по открытому и закрытому фланцам.

$$F_0 = \frac{\sqrt{2g}}{3} \left[\sqrt{R^3} - 2\sqrt{(R - h_{\varphi 0})^3} + R\sqrt{R - 2g} \right] ; \quad (14)$$

$$F_3 = \frac{\sqrt{2g}}{3} \left[\sqrt{R^3} - 2\sqrt{(R - h_{\varphi 3})^3} + R\sqrt{R - 2g} \right] ; \quad (15)$$

$$\text{при } g = \frac{\Delta t_0}{(1 + C_0) \operatorname{tg} \alpha_2} \quad \text{и} \quad g = \frac{\Delta t_3}{(1 + C_3) \operatorname{tg} \alpha_3} .$$

Радиусы R цилиндрической части верхнего и нижнего вала, образующие шейку, приняты равными.

II. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

Величина и направление сил, действующих в очаге деформации, в значительной степени зависят от кинематических условий формоизменения - величины и направления относительного скольжения металла по валку и скорости деформации.

В работе приводится методика определения по величине и направлению векторов относительного скольжения металла по валку в любой точке контактной поверхности очага деформации, а также их среднего значения по элементам профиля. При этом принята гипотеза плоских сечений и скорость вертикального перемещения металла во фланцах не учитывается, как весьма малая по сравнению с окружной скоростью валков и скоростью перемещения полосы в направлении прокатки.

Для определения вектора относительного скольжения металла по валку в любой точке контактной поверхности, через эту точку проводится вертикальное сечение и в нем рассчитывается величина вытяжки относительно выходного. Тогда, при известной скорости выхода полосы из валков, в данном сечении оказывается определенной скорость движения металла в направлении прокатки. Окружная скорость валков $\bar{V}_\epsilon$ раскладывается на горизонтальную $\bar{V}_{\epsilon, \text{гор.}}$ и вертикальную $\bar{V}_{\epsilon, \text{верт.}}$ составляющие. Разность модулей векторов - горизонтальной составляющей скорости валков $|V_{\epsilon, \text{гор.}}|$ и скорости металла в данной точке $|V_m|$ дает модуль вектора горизонтальной составляющей относительной скорости $|V_{\text{отн. гор.}}|$. При $|V_m| < |V_{\epsilon, \text{гор.}}|$

вектор $\bar{V}_{\text{отн. гор.}}$ направлен в сторону, обратную направлению движения металла, а при $|V_m| > |V_{\epsilon, \text{гор.}}|$ - совпадает с ним. Так как скорость вертикального перемещения металла не учитывается, вектор скорости металла относительно валков ($\bar{V}_{\text{отн.}}$) определяется сложением векторов $\bar{V}_{\text{отн. гор.}}$ и $\bar{V}_{\text{отн. верт.}}$; последний по модулю равен вектору $\bar{V}_{\epsilon, \text{верт.}}$, но направлен в противоположную сторону.

По изложенной методике для любого конкретного случая может быть построена картина расположения векторов скорости относительного скольжения металла по валку на всей площади контакта; совокупность точек на этой картине, где отсутствует горизонтальная составляющая скорости скольжения металла по валку, представляет собой линию раздела областей отставания и опережения - нейтральную линию.

В работе выведены также выражения, позволяющие определять величину и направление среднего значения векторов относительного скольжения металла по валку в следующих характерных областях контакта металла с валками: на наружной и внутренней поверхностях открытого фланца отдельно (так как эти поверхности образованы различными валками), по закрытому фланцу и в промежуточной области. Последняя расположена на наружной поверхности фланцев между открытым и закрытым.

При этом средняя скорость движения металла определялась по выражению:

$$V_{\text{н. ср}} = \frac{\pi (D_0 - d_m) n}{120} (1 + S_m) \left(1 + \frac{1}{\mu_k}\right), \quad (16)$$

где: n - скорость вращения валков;
 S_m - опережение по шейке;
 μ_k - величина вытяжки в калибре,

а вертикальная и горизонтальная составляющие скорости валков усреднялись по каждой из выделенных областей контакта.

В результате были получены следующие выражения.

Наружная поверхность открытого фланца.

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{в.гор.ср}} &= \frac{\pi n}{60} (D_0 + d_{\text{ш}} + h_{\text{ф.о}}) ; \\ V_{\text{в.верт.ср}} &= \frac{\pi n}{60} y_{\text{ср.о}} ; \\ V_{\text{отн.гор.ср}} &= V_{\text{в.гор.ср}} - V_{\text{м.ср}} ; \\ V_{\text{отн.верт.ср}} &= V_{\text{в.верт.ср}} ; \\ \varphi &= \arctg \frac{y_{\text{ср.о}}}{(D_0 + d_{\text{ш}} + h_{\text{ф.о}}) - \frac{D_0 - d_{\text{ш}}}{2} (1 + S_{\text{ш}}) (1 + \frac{1}{\mu_{\text{к}}})} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Здесь φ — угол наклона вектора средней скорости относительно горизонтальной плоскости.

Внутренняя поверхность открытого фланца.

$$\left. \begin{aligned} V'_{\text{в.гор.ср}} &= \frac{\pi n}{60} (D_0 - d_{\text{ш}} - h_{\text{ф.о}}) ; \\ V'_{\text{в.верт.ср}} &= V_{\text{в.верт.ср}} ; \\ V'_{\text{отн.гор.ср}} &= V_{\text{м.ср}} - V'_{\text{в.гор.ср}} ; \\ V'_{\text{отн.ср}} &= \sqrt{(V'_{\text{отн.гор.ср}})^2 + (V'_{\text{в.верт.ср}})^2} ; \\ \varphi' &= \arctg \frac{y_{\text{ср.о}}}{\frac{D_0 - d_{\text{ш}}}{2} (1 + S_{\text{ш}}) (1 + \frac{1}{\mu_{\text{к}}}) - (D_0 - d_{\text{ш}} - h_{\text{ф.о}})} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Наружная и внутренняя поверхности закрытого фланца.

$$\left. \begin{aligned} V''_{\text{в.гор.ср}} &= \frac{\pi n}{60} (D_0 - d_{\text{ш}} - h_{\text{ф.з}}) ; \\ V''_{\text{в.верт.ср}} &= \frac{\pi n}{60} y_{\text{ср.з}} ; \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$V''_{\text{отн.гор.ср}} = V_{\text{м.ср}} - V''_{\text{в.гор.ср}} ;$$

$$V''_{\text{отн.ср}} = \sqrt{(V''_{\text{отн.гор.ср}})^2 + (V''_{\text{в.верт.ср}})^2} ;$$

$$\varphi'' = \arctg \frac{y_{\text{ср.з.}}}{\frac{D_0 - d_{\text{ш}}}{2} (1 + S_{\text{ш}}) (1 + \frac{1}{\mu_{\text{к}}}) - (D_0 - d_{\text{ш}} - h_{\text{ф.з.}})} \quad (19)$$

Промежуточная область.

$$V^n_{\text{в.гор.ср}} = \frac{\pi n}{60} D_0 ;$$

$$V^n_{\text{в.верт.ср}} = \frac{\pi n}{60} y_{\text{ср.пр.}} ;$$

$$V^n_{\text{отн.гор.ср}} = V^n_{\text{в.гор.ср}} - V_{\text{м.ср}} ;$$

$$V^n_{\text{отн.ср}} = \sqrt{(V^n_{\text{отн.гор.ср}})^2 + (V^n_{\text{в.верт.ср}})^2} ;$$

$$\varphi^n = \frac{y_{\text{ср.пр.}}}{D_0 - \frac{D_0 - d_{\text{ш}}}{2} (1 + S_{\text{ш}}) (1 + \frac{1}{\mu_{\text{к}}})} \quad (20)$$

В работе предложена методика определения средней по длине контакта скорости деформации в любом сечении фланцев горизонтальной плоскостью, а также ее среднего значения по фланцам и шейке в целом.

Скорость деформации может быть представлена в виде:

$$u = \frac{V_h}{h}, \quad (21)$$

где: V_h — линейная скорость обжатия в направлении деформации;
 h — мгновенная высота деформируемого тела.

В любом сечении фланцев горизонтальной плоскостью обжатие металла происходит между двумя гиперболами. При известной скорости движения металла (V_m), скорость обжатия в направлении деформации определится суммой составляющих по каждой из гипербол V_{χ_1} и V_{χ_2} .

$$V_{\chi_{1,2}} = V_m \operatorname{tg} \beta_{\varphi_{1,2}} \quad (22)$$

Здесь $\operatorname{tg} \beta_{\varphi_{1,2}}$ являются производными уравнений гипербол, ограничивающих очаг деформации в данном сечении.

Принтегрировав значение угла β для каждой из гипербол по длине очага деформации ℓ в данном сечении на высоте Z , получим среднее значение углов:

$$\beta_{\text{ср.1}} = \frac{\ell \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\ell^2 + Z^2}} - \frac{Z \sin 2\alpha}{2\ell} \left(1 - \frac{Z}{\sqrt{\ell^2 + Z^2}}\right). \quad (23)$$

Таким образом, средняя скорость обжатия в направлении деформации может быть представлена в виде:

$$V_{\text{ср.}} = V_{\text{м.ср.}} (\operatorname{tg} \beta_{\varphi_{\text{ср.1}}} + \operatorname{tg} \beta_{\varphi_{\text{ср.2}}}). \quad (24)$$

При средней толщине деформируемого фланца $t_{\text{ср.}} = \frac{1}{2}(t_0 + t_1)$ средняя скорость деформации в данном сечении будет:

$$U_{\text{ср.}} = \frac{2V_{\text{м.ср.}} (\operatorname{tg} \beta_{\varphi_{\text{ср.1}}} + \operatorname{tg} \beta_{\varphi_{\text{ср.2}}})}{t_0 + t_1}. \quad (25)$$

Значение средней скорости деформации по открытому и закрытому фланцам в целом может быть найдено по ряду сечений, количество которых определяется необходимой точностью расчета.

Для инженерных расчетов среднее значение скорости деформации для каждого фланца может быть определено с достаточной точностью в сечении, проведенном на середине высоты данного фланца.

Аналогично для шейки:

$$\beta_{\text{ш.ср.}} = \frac{\sqrt{R \Delta d_{\text{ш.}}}}{2R - \Delta d_{\text{ш.}}}; \quad (26)$$

$$U_{\text{ш.ср.}} = \frac{4V_{\text{м.ср.}} \operatorname{tg} \beta_{\text{ш.ср.}}}{d_{\text{ш.0}} + d_{\text{ш.1}}}. \quad (27)$$

III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И УСИЛИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

Исследование проводилось на лабораторном стане дуо 260. Стан оборудован пневматическим устройством, позволяющим создавать натяжение концов полосы во время прокатки. Конструкция валков обеспечила замер в 13 точках по контуру калибра удельных давлений и изменение в широких пределах толщины фланцев и ширины калибра.

Образцы изготавливались из недоката балки № 10 (ГОСТ 8239-56), отобранного от третьего (считая от чистового) калибра на среднесортном стане 550 завода имени Петровского. Для контроля стабильности показаний точечных месдоз и других измерителей были изготовлены также эталонные свинцовые образцы. Эти образцы, полученные прессованием на прессе 2600 т завода УТЗ, отличались чрезвычайно высокой точностью размеров и чистотой поверхности.

В процессе эксперимента измерялись следующие параметры: удельные давления и полное давление металла на валки, крутящие моменты на верхнем и нижнем валке, число оборотов валков, величина переднего и заднего натяжения.

Прокатка на стане 260 при выполнении программы исследования осуществлялась без натяжения, с передним или задним натяжением. Особое внимание обращалось на сохранение стабильных температурных условий прокатки, которая производилась при температуре $1100 \pm 15^\circ \text{C}$.

После проведения эксперимента была произведена переградуировка всех измерителей; градуировочные кривые показали удовлетворительную сходимость с первоначальными.

Влияние величины горизонтального уширения в калибре на формоизменение и силовые параметры исследовалось при свободной прокатке прокатки с передним и задним натяжениями.

Без натяжения было прокатано 4 серии по 6 образцов каждая с уширением - 1,5 (стеснение); +0,6; +3,5; +5,6 мм. Колебания величины уширения для отдельных образцов не превышали 0,9 мм в обе стороны.

В условиях эксперимента обнаружена существенная связь между величиной уширения и изменением общей высоты фланцев, когда уменьшение уширения приводит к значительному их приросту, а увеличение - снижает прирост фланцев вплоть до утяжки. Причем, для закрытого фланца такая зависимость практически отсутствует и общее изменение высоты фланцев реализуется за счет открытого. Не было обнаружено заметной связи между уширением и полным давлением металла на валки и весьма незначительным является влияние уширения на момент прокатки, когда с ростом уширения происходит некоторое увеличение момента.

Полученные зависимости влияния уширения на силовые параметры подтверждаются анализом удельных давлений. Действительно, с ростом величины уширения на шейке происходит практически взаимокompенсирующее перераспределение удельных давлений, а на фланцах некоторое увеличение удельных давлений в сравнительно небольшой области вблизи шейки при имеющихся уклонах фланцев не может оказать существенного влияния на полное давление металла на валки, способствуя в то же время некоторому увеличению момента прокатки. Кроме этого, анализ распределения удельных давлений показал, что с точки зрения прочности буртов и выработки калибров не следует опасаться уменьшения уширения вплоть до стеснения.

При исследовании влияния на основные технологические параметры переднего и заднего натяжения с изменением величины уширения было прокатано 4 серии из 5 образцов каждая для переднего и столь-

ко же - для заднего натяжения. Уширение составляло: -1,5; +0,5; +3,5; +5,5 мм при колебании его величины для отдельных образцов не более 0,75 мм в обе стороны.

Переднее натяжение практически не оказывает влияния на изменение высоты фланцев; при этом сохраняется обнаруженное ранее влияние величины уширения. В то же время под действием переднего натяжения наблюдается снижение величины полного давления металла на валки и момента прокатки; полученные здесь зависимости подтверждают отсутствие влияния уширения.

Заднее натяжение приводит к значительной общей утяжке фланцев, которая реализуется за счет открытых. Причем, степень этого влияния зависит от величины уширения, увеличиваясь с уменьшением последнего. Под действием заднего натяжения, независимо от величины уширения, происходит уменьшение полного давления металла на валки и увеличение момента прокатки.

Полученные в работе закономерности влияния натяжения на формоизменение и силовые параметры при разном уширении отражены в соответствующих графиках и описаны эмпирическими зависимостями. Данные по формоизменению и силовым параметрам хорошо согласуются с опубликованными ранее работами.

Полученные результаты позволяют выбирать оптимальный режим формоизменения при расчете калибровки. Так, при необходимости получения фланцев достаточной высоты, если ограничена, например, высота заготовки или есть необходимость в сокращении числа пропусков, прокатку следует вести с минимальным уширением.

Если же средства регулирования при непрерывной прокатке не обеспечивают стабильность величины натяжения, то для обеспечения стабильности размеров профиля уширение в калибрах, особенно близких к чистовому, следует увеличивать для уменьшения влияния натяжения.

При исследовании удельного давления с учетом того, что уширение не оказывает на него существенного влияния, экспериментальному изучению подвергалась зависимость удельного давления от различной степени неравномерности деформации.

В связи с этим исследовались удельные давления по контуру калибра при изменении величины и соотношения обжатий по элементам профиля - открытым фланцам, закрытым фланцам и шейке. Было выполнено 3 серии опытов: с изменением обжатия открытых фланцев, когда $\epsilon_{и.о.ф.} = 0,108; 0,159; 0,219; 0,279; 0,366; 0,436$ при постоянном обжатии закрытых фланцев и шейки ($\epsilon_{и.з.ф.} = 0,085$ и $\epsilon_{и.ш.} = 0,170$); с изменением обжатия закрытых фланцев, когда $\epsilon_{и.з.ф.} = 0,005; 0,049; 0,102; 0,148; 0,201; 0,264; 0,315$ при постоянном обжатии открытых фланцев и шейки ($\epsilon_{и.о.ф.} = 0,255$ и $\epsilon_{и.ш.} = 0,175$) и с изменением обжатия шейки, когда $\epsilon_{и.ш.} = 0,013; 0,100; 0,191; 0,324; 0,452$ при постоянном обжатии открытых и закрытых фланцев ($\epsilon_{и.о.ф.} = 0,255$ и $\epsilon_{и.з.ф.} = 0,086$).

При этом

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{и.о.ф., з.ф.} &= \ln \frac{t'}{t} ; \\ \epsilon_{и.ш.} &= \ln \frac{d'}{d} . \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Здесь $\epsilon_{и.о.ф., з.ф.}; \epsilon_{и.ш.}$ - истинная относительная деформация открытого, закрытого фланцев и шейки;
 $t', d' \text{ и } t, d$ - задаваемая и выходящая толщина фланцев (средняя) и шейки.

По каждому из значений варьируемых параметров прокатывалось по 5 + 7 образцов. Эпюры удельных давлений, приведенные в работе, показали, что изменение обжатия в любом элементе профиля изменяет величину удельных давлений как в нем самом, так и в других элемен-

тах. В работе эта зависимость была выражена коэффициентом напряженного состояния

$$n_{\sigma} = \frac{p_{ср.}}{\sigma_{и.}} \quad (29)$$

где: $p_{ср.}$ - средняя величина удельного давления по данному элементу профиля;

$\sigma_{и.}$ - истинный предел текучести при деформации данного элемента.

Значения коэффициентов представлены в соответствующих графиках, изображающих их изменение при различной величине деформации открытых, закрытых фланцев и шейки по следующим областям контакта металла с валками: на наружной поверхности открытого фланца ($n_{\sigma.о.ф.н.}$), на внутренней поверхности открытого фланца ($n_{\sigma.о.ф.в.}$), по закрытому фланцу ($n_{\sigma.з.ф.}$) и по шейке ($n_{\sigma.ш.}$).

Используя графики коэффициентов напряженного состояния, можно определить удельные давления в выделенных областях контакта при прокатке балок с величинами истинной относительной деформации по элементам профиля, лежащими в пределах экспериментальных значений.

При этом по элементам профиля определяются скорость, степень деформации и истинный предел текучести; затем по графикам - коэффициенты напряженного состояния. Тогда искомые удельные давления:

по наружной поверхности открытого фланца

$$p_{о.ф.н.} = n_{\sigma.о.ф.н.} \sigma_{и.о.ф.} \quad (30)$$

по внутренней поверхности открытого фланца

$$p_{о.ф.в.} = n_{\sigma.о.ф.в.} \sigma_{и.о.ф.} \quad (31)$$

по наружной и внутренней поверхности закрытого фланца

$$p_{з.ф.} = n_{\sigma.з.ф.} \sigma_{и.з.ф.} \quad (32)$$

по шейке

$$p_{ш.} = n_{\sigma.ш.} \sigma_{и.ш.} \quad (33)$$

Удельное давление в промежуточной области определяется на основании опытных данных следующим образом:

$$p_n = 1,41 \frac{P_{0.ф.н.} + P_{2.ф.}}{2} \quad (34)$$

IV. СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

Определение в настоящей работе геометрических и кинематических параметров очага деформации балочного калибра, методики расчета удельных давлений позволило прийти к решению вопроса силового взаимодействия металла с инструментом на всей протяженности контакта. При этом были решены вопросы вертикального равновесия в калибре в определении энергосиловых параметров - полного давления металла на валки и момента прокатки.

Правильно выполненная калибровка двутавровой балки должна отвечать условию равновесия действующих в калибре вертикальных сил. Если это условие не обеспечивается расчетными размерами калибров, то достижение равновесного положения раската сопровождается смещением шейки относительно фланцев, что приводит к искажению профиля, непроизводительному расходу энергии, увеличению выработки валков.

Равновесие раската заданных размеров будет иметь место, когда сумма вертикальных проекций средних значений удельных сил трения и нормального давления по всей площади контакта металла с валками будет равна нулю.

Определение вертикальных проекций среднего значения удельных сил трения и нормального давления производится в ряде выделенных ранее областей контакта металла с валками - на наружной и внутренней поверхностях открытого и закрытого фланцев и в промежуточной области.

Значение удельной силы трения в любой из рассматриваемых областей определяется в соответствии с законом трения Амантона-Кулона.

$$\tau_{ср} = p_{ср} f. \quad (35)$$

Здесь $p_{ср}$ - среднее удельное давление в рассматриваемой области, определяемое по вышеизложенной методике;

f - коэффициент трения, выбираемый в зависимости от величины вектора средней скорости относительного скольжения металла по валку в рассматриваемой области.

Направление вектора средней удельной силы трения принимается обратным направлению вектора относительного скольжения металла по валку (определяемому углом φ), а ее вертикальная проекция находится в зависимости от угла наклона фланцев в рассматриваемой области (α_1 - наружная поверхность открытого, закрытого фланца и промежуточная область; α_2 - внутренняя поверхность открытого фланца; α_3 - внутренняя поверхность закрытого фланца). Сумма вертикальных проекций сил трения, действующих в рассматриваемых областях, определяется по всей площади контакта (F_0 и F_3 - на наружной и внутренней поверхностях открытого и закрытого фланцев и $F_{пр}$ - в промежуточной области).

Тогда для выделенных областей контакта:

наружная поверхность открытого фланца

$$\tau_{ср.з} = p_{ср} f \sin \varphi \cos \alpha_1 F_0; \quad (36)$$

внутренняя поверхность открытого фланца

$$\tau'_{ср.з} = p'_{ср} f' \sin \varphi' \cos \alpha_2 F_0; \quad (37)$$

наружная поверхность закрытого фланца

$$\tau''_{ср.з} = p''_{ср} f'' \sin \varphi'' \cos \alpha_3 F_3; \quad (38)$$

внутренняя поверхность закрытого фланца

$$\tau_{срз}'' = p_{ср.г}'' \sin \psi'' \cos \alpha_3 F_3 ; \quad (39)$$

промежуточная область

$$\tau_{срз}'' = p_{ср.г}'' \sin \psi'' \cos \alpha_4 F_{пр}. \quad (40)$$

Сумма вертикальных проекций нормальных сил, действующих в рассматриваемых областях контакта металла с вальками, определяется по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} p_{ср.г} &= p_{ср} \sin \alpha_1 F_0 ; \\ p_{ср.г}' &= p_{ср}' \sin \alpha_2 F_0 ; \\ p_{ср.г}'' &= p_{ср}'' \sin \alpha_1 F_3 ; \\ p_{ср.г}''' &= p_{ср}''' \sin \alpha_3 F_3 ; \\ p_{ср.г}'''' &= p_{ср}'''' \sin \alpha_4 F_{пр}. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

В результате получено выражение, определяющее условие вертикального равновесия раската в балочном калибре в процессе прокатки.

$$\tau_{срз} + p_{ср.г} + \tau_{срз}'' + p_{ср.г}' + \tau_{срз}''' + p_{ср.г}'' + \tau_{срз}'''' + p_{ср.г}'''' = \tau_{ср.г}' \quad (42)$$

По изложенной методике была произведена проверка вертикального равновесия 3-8 калибров балки № 27, прокатываемой на стане 925 и на основании этого расчета осуществлена перекалибровка валков. Внедрение новой калибровки, расчетные размеры которой обеспечили значительно большее приближение к равновесному положению раската по калибрам по сравнению со старой, позволило избежать целый ряд трудностей, имевших ранее место при прокатке этого профиля. Прекратились поломки бурта у 8-го калибра, стойкость валков II клетки повысилась с 6 до 10-12 тыс.т; снизился съем металла при переточке и др. Экономический эффект от внедрения новой калибровки составил 12 тыс.рублей в год при объе-

ме производства балки № 27 в 25 тыс.т.

Полное давление металла на вальки определено как сумма составляющих по фланцам ($P_{ф.}$) и шейке ($P_{ш.}$):

$$P = 2 P_{ф.} + P_{ш.} \quad (43)$$

Учитывая предшествующие выводы, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} P_{ф.} &= \tau_{ср.г} + p_{ср.г}' ; \\ P_{ш.} &= p_{ш.} F_{ш.} \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Тогда выражение (43) приобретает вид:

$$P = 2 (\tau_{ср.г} + p_{ср.г}') + p_{ш.} F_{ш.} \quad (45)$$

Момент прокатки определен как сумма составляющих в характерных областях контакта металла с вальками на наружной и внутренней поверхностях открытого фланца ($M_{ан.}$; $M_{ав.}$), по закрытому фланцу ($M_з.$), в промежуточной области ($M_{пром.}$) и по шейке ($M_{ш.}$):

$$M_{пр} = 2 (M_{ан.} + 2 M_з. + M_{пром.} + M_{ав.} + M_{ш.}). \quad (46)$$

Величина каждой составляющей определяется как произведение суммарной силы трения на радиус валька, среднее значение которого принято на середине высоты данной области в плоскости выхода.

Тогда, на основании предшествующих выводов, значение составляющих определено выражениями:

$$\left. \begin{aligned} M_{ан.} &= p_{ср.г} \cos \psi (R_{ш.} + d_{ш.} + \frac{h_{ф.з.}}{2}) F_0 ; \\ M_{ав.} &= p_{ср.г}' \cos \psi' (R_{ш.} - \frac{h_{ф.з.}}{2}) F_0 ; \\ M_з. &= p_{ср.г}'' \cos \psi'' (R_{ш.} - \frac{h_{ф.з.}}{2}) F_3 ; \\ M_{пром.} &= p_{ср.г}''' \cos \psi''' (R_{ш.} + \frac{d_{ш.}}{2}) F_{пр}. \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Расчет полного давления металла на валки и момента прокатки по приведенной методике показал удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, так как отличие рассчитанных их значений от замеренных при прокатке на промышленном стане двутавровой балки № 20 не превысило, соответственно, 12 и 15 %.

Основные выводы по работе.

I. Определены геометрические параметры очага деформации.

Предложены выражения для расчета протяженности и площади контакта металла с валками, аналитического определения вертикальных сечений очага деформации.

2. Произведен анализ кинематических условий в очаге деформации и получены выражения для определения скорости относительного скольжения металла по валку и скорости деформации.

3. Исследовано влияние горизонтального уширения в калибре на основные технологические параметры. Определено, что при свободной прокатке уменьшение величины уширения приводит к значительному увеличению приращения открытых фланцев, не оказывая существенного влияния на энергосиловые параметры.

4. Влияние заднего натяжения на формоизменение наиболее сильно проявляется при малых значениях уширения и значительно падает с ростом последнего. Таким образом, если средства регулирования в непрерывной прокатке не обеспечивают стабильного натяжения полосы, уширение следует увеличивать (особенно в чистовых и близких к ним калибрах) с целью максимального уменьшения влияния натяжения на профиль.

5. При наличии переднего натяжения влияние уширения на формоизменение аналогично процессу свободной прокатки, так как переднее натяжение само по себе не оказывает существенного влияния на формоизменение.

6. Определены закономерности изменения энергосиловых параметров прокатки при воздействии переднего и заднего натяжения.

7. Исследовано удельное давление в 13 точках по контуру калибра. Определено, что изменение величины уширения не оказывает существенного влияния на величину удельных давлений, а изменение обкатки по каждому элементу профиля заметно изменяет их величину по всем элементам. Степень этого влияния отражена в соответствующих графиках коэффициентов напряженного состояния.

8. Разработана методика расчета среднего удельного давления по элементам профиля при различных условиях формоизменения с использованием коэффициентов напряженного состояния, учитывающая степень и скорость деформации.

9. Разработана методика расчета равновесного положения раската в калибре. Ее применение при расчете калибровки позволяет обеспечить заданные размеры профиля, снизить расход энергии при прокатке, повысить стойкость валков и привалковой арматуры.

10. Предложена методика расчета полного давления металла на валки и момента прокатки, обеспечивающая удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

II. Результаты работы могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров, калибровки и разработке оптимального технологического режима свободной и непрерывной прокатки двутавровой балки.

Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 4 таблицы, 45 рисунков и список использованной литературы из 52 наименований.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.А. Теряев, Б.С. Полатовский, Ю.В. Павлович. Геометрические параметры очага деформации балочного калибра. В сб. "Прокатное производство" (ИЧМ), т. XXI. Изд-во "Металлургия", 1965, с. 318-331.

2. В.А. Теряев, Б.С. Полатовский, Ю.В. Павлович. Некоторые вопросы кинематики очага деформации балочного калибра. В сб. "Прокатное производство" (ИЧМ), т. XXII. Изд-во "Металлургия", 1967, с. 261-266.

3. А.П. Чекмарев, В.А. Теряев, П.Л. Клименко, Б.С. Полатовский. Исследование деформации и усилий в балочном калибре при свободной прокатке и прокатке с натяжением. В сб. "Прокатное производство" (ИЧМ), т. XXIII. Изд-во "Металлургия", 1967, с. 160-172.

4. Б.С. Полатовский, Ю.В. Павлович. Скорость деформации в балочном калибре. В сб. "Прокатное производство" (ИЧМ), т. XXIII. Изд-во "Металлургия", 1967, с. 197-201.

5. А.П. Чекмарев, Б.С. Полатовский, В.В. Остапенко, В.А. Теряев, Ю.В. Павлович, В.А. Станкевич. Удельные давления при прокатке в балочном калибре. В сб. "Прокатное производство" (ИЧМ), т. XXIII. Изд-во "Металлургия", 1969, с. 155-169.

6. Б.С. Полатовский, Ю.В. Павлович. Вертикальное равновесие в балочном калибре. В сб. "Прокатное производство" (ИЧМ), т. XXIX. Изд-во "Металлургия", 1969, с. 170-180.

Материалы диссертационной работы обсуждены на:

1. Объединенных научных семинарах кафедры обработки металлов давлением Днепропетровского металлургического института и прокатного отдела Института черной металлургии ИЧМ СССР.

2. Республиканской научно-технической конференции по вопросам теории и практики производства простых и фасонных экономичных профилей проката. Днепропетровск, 1970.

Подп. к печ. 21. I. 1971 г. БТ 21217

Зак. № 59. Тираж 220. Объем 1,5 п.л.

Днепропетровск, 1971 г. Ротапринт ОБ ДМет И