

## КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОКАТКИ В ЗАКРЫТОМ БАЛОЧНОМ КАЛИБРЕ

Тубольцев А. Г. /к. т. н./

Национальная металлургическая академия Украины

*Питання теоретичних досліджень щодо розподілу моменту прокатки у закритих балочних калібрах між валками, що обробляють відкриті і закриті фланці, у літературі практично не висвітлені. Запропоновано метод визначення моментів прокатки на валках у закритому балочному калібрі з урахуванням дотичних контактних напружень у зонах відставання та випередження на контактній поверхні металу з валками. Границі та площі зон відставання і випередження визначали за величиною випередження по стінці двотаврової балки.*

*На основі рівності лінійних швидкостей валків і металу в осередку деформації одержано вирази для визначення границь зон відставання та випередження по внутрішній та зовнішній поверхні відкритого і закритого фланців, які дозволяють визначати площі контакту зон відставання та випередження металу з валками.*

*На основі дотримання секундних об'ємів та гіпотези плоских перерізів одержано вираз для визначення величини випередження по стінці при прокатці двотаврової балки в закритому калібрі. Виходячи з умови рівноваги сил, що діють в осередку деформації на прокатувану штабу, одержано вираз для визначення нейтрального кута по стінці при прокатці двотаврової балки в закритому балочному калібрі. З урахуванням моментів, створюваних рівнодіючими дотичними контактними напруженнями у зонах відставання та випередження по стінці і фланцях на контактній поверхні металу з валками, одержано вирази для визначення моменту прокатки на валках з відкритими і закритими фланцями при прокатці двотаврової балки у закритому калібрі.*

*Використання запропонованого методу визначення моменту прокатки двотаврової балки в закритому калібрі з урахуванням дотичних контактних напружень у зонах відставання та випередження дозволяє визначити момент прокатки на валках з відкритими і закритими фланцями та характер розподілу моменту між валками.*

*Проведено порівняльний аналіз теоретичних розрахунків моменту прокатки двотаврової балки у закритому калібрі та його розподілу між валками з відкритими та закритими фланцями з експериментальними даними, який показав достатньо добру їх схожість.*

**Ключові слова:** калібр, відкритий фланець, закритий фланець, прокатка, момент, випередження, відставання, контактні напруження, стінка.

*Questions of theoretic research on distribution of the rolling torque in closed beam grooves working up open and closed flanges have been practically not dealt in the literature. A method is proposed to determine the rolling torques on the rolls in closed beam groove taking into account tangential contact stresses in zones of backward and forward slip on the surface of metal contact with rolls. The limits and areas of zones of backward and forward slip were determined by the value of forward slip along the web of H-beam.*

*On the base of equality of rolls and metal linear speeds in zone of deformation expressions have been got to determine limits of zones of backward and forward slip on the internal and external surfaces of the open and closed flanges, which allow determining contact areas of metal and rolls in zones of backward and forward slip.*

*On the base of observance of second volumes and hypothesis of flat sections the expression had been deduced for determining the value of forward slip along the web while rolling H-beam in the closed groove. Issuing from balance condition of forces acting on the strip to be rolled in zone of deformation the expression had been got for determination of neutral angle along the web while rolling the H-beam in closed beam groove. Taking into account the moments being created with resultant tangential contact stresses in zones of backward and forward slip along the web and flanges on the surfaces of metal contact with rolls expressions have been got for determination of rolling torque on the rolls with open and closed flanges while rolling H-beam in closed groove.*

*The use of the proposed method for determination of rolling torque while rolling the H-beam in the closed groove taking into account tangential contact stresses in zones of backward and forward slip allows determining the rolling torque on rolls with open and closed flanges and character of distribution of moment between rolls.*

*The comparative analysis of theoretical calculations and experimental data concerning determination of the rolling torque for H-beam rolled in the closed groove and distribution of the torque between rolls with open and closed flanges showed their fairly good compliance.*

**Key words:** groove, open flange, closed flange, rolling, rolling torque, forward slip, backward slip, contact stresses, beam web.

*Вопросы теоретических исследований по распределению момента прокатки в закрытых балочных калибрах между валками, обрабатывающими открытые и закрытые фланцы, в литературе практически не освещены. Предложен метод определения моментов прокатки на валках в закрытом балочном калибре с учетом касательных контактных напряжений в зонах отставания и опережения на контактной поверхности металла с валками. Границы и площади зон отставания и опережения определяли по величине опережения по стенке двутавровой балки.*

*На основании равенства линейных скоростей валков и металла в очаге деформации получены выражения для определения границ зон отставания и опережения по внутренней и наружной поверхности открытого и закрытого фланцев, позволяющих определить площади контакта зон отставания и опережения металла с валками.*

*На основании соблюдения секундных объемов и гипотезы плоских сечений получено выражение для определения величины опережения по стенке при прокатке двутавровой балки в закрытом калибре. Исходя из условия равновесия угла по стенке при прокатке двутавровой балки в закрытом балочном калибре. С учетом моментов, создаваемых равнодействующими касательными контактными напряжениями в зонах отставания и опережения по стенке и фланцам на контактной поверхности металла с валками, получены выражения для определения момента прокатки на валках с открытыми и закрытыми фланцами при прокатке двутавровой балки в закрытом калибре.*

*Использование предложенного метода определения момента прокатки двутавровой балки в закрытом калибре с учетом касательных контактных напряжений в зонах отставания и опережения позволяет определить момент прокатки на валках с открытыми и закрытыми фланцами и характер распределения момента между валками.*

*Проведен сравнительный анализ теоретических расчетов момента прокатки двутавровой балки в закрытом калибре и его распределения между валками с открытыми и закрытыми фланцами с экспериментальными данными, показавший достаточно хорошую их схожесть.*

**Ключевые слова:** калибр, открытый фланец, закрытый фланец, прокатка, момент, опережение, отставание, контактные напряжения, стенка.

Процесс прокатки двутавровых балок в закрытых калибрах относится к асимметричному процессу, который характеризуется неравномерными условиями деформации и как следствие значительной неравномерностью распределения момента прокатки между валками, что значительно ухудшает условия работы деталей стана. Известны случаи, когда валок с закрытым ручьем воспринимал весь момент прокатки, а момент прокатки на валке открытым ручьем становился отрицательным.

Вместе с тем, вопрос о распределении момента прокатки между валками в закрытых балочных калибрах в технической литературе не освещен в должной мере как экспериментально, так в особенности теоретически.

Экспериментально распределение момента прокатки между валками при прокатке двутавровой балки в закрытых калибрах выполнено Теряевым В. А. в работе [1] в которой экспериментально подтверждена значительная неравномерность момента прокатки между валками.

Что касается вопроса о теоретических исследованиях по определению момента прокатки в закрытых балочных калибрах, а в особенности распределения его между валками в литературе практически не рассмотрены. В настоящее время момент прокатки двутавровой балки в закрытых калибрах определяют по методу приведенной полосы [2].

В работе [3] предложен метод определения момента прокатки на основе единичного смещенного объема. Распределение момента прокатки двутавровой балки в закрытом калибре предложено определять как отношение площадей контакта металла с валками:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{F_{k1}}{F_{k2}}, \quad (1)$$

где  $M_1$  и  $F_{k1}$  – момент прокатки и площадь контактной поверхности валка с открытым ручьем;  $M_2$  и  $F_{k2}$  – момент прокатки и площадь контактной поверхности валка с закрытым ручьем.

Хотя в некоторых случаях выражение (1) для определения распределения момента между валками дает достаточно высокую сходимость с экспериментальными данными, однако оно физически не обосновано, не учитывает кинематические параметры очага деформации (зоны отставания и опережения) и не предполагает случая прокатки с отрицательным моментом на одном из валков.

Целью данной работы является разработка теоретического метода определения момента прокатки в закрытых балочных калибрах и его распределения между валками с учетом касательных контактных

напряжений в зонах отставания и опережения на контактной поверхности металла с валками.

Площади и границы зон отставания и опережения на контактной поверхности валков могут быть определены по величине опережения в какой-либо точке калибра [4], например, по стенке. Принимая изменение скорости металла от линии входа в валки до линии выхода по параболическому закону [5], текущее значение скорости металла  $V_x$  в очаге деформации можно записать:

$$V_M = \frac{\pi n R}{30} (1+s) \left[ 1 - \frac{x^2 (\mu - 1)}{l \mu} \right], \quad (2)$$

где  $n$  – число оборотов валка;  $R$  – радиус валка по стенке;  $s$  – опережение по стенке;  $x$  – текущее значение координат;  $\mu$  – коэффициент вытяжки в калибре;  $l$  – длина дуги контакта металла с валками, определяемая делением площади контакта металла с валками на периметр профиля на выходе из валков.

Зная величину опережения по стенке  $s$  можно найти нейтральную линию на поверхности валков в системе координат, показанной на рис. 1.

Переменная величина скорости верхнего валка по высоте открытого фланца:

$$V' = \frac{\pi n (R - z_1)}{30}; \quad (3)$$

нижнего валка по высоте закрытого фланца:

$$V'' = \frac{\pi n (R - z_2)}{30}, \quad (4)$$

где  $z$  – текущее значение координаты.

Приравнивая линейные скорости валков и металла, получаем уравнения нейтральных линий на контактной поверхности:

- верхнего валка:

$$f' = (z) = x' = \sqrt{\frac{R s + z_1}{R(1+s)} \cdot \frac{l^2 \mu}{\mu - 1}}; \quad (5)$$

- нижнего валка:

$$f'' = (z) = x'' = \sqrt{\frac{R s + z_1}{R(1+s)} \cdot \frac{l^2 \mu}{\mu - 1}}. \quad (6)$$

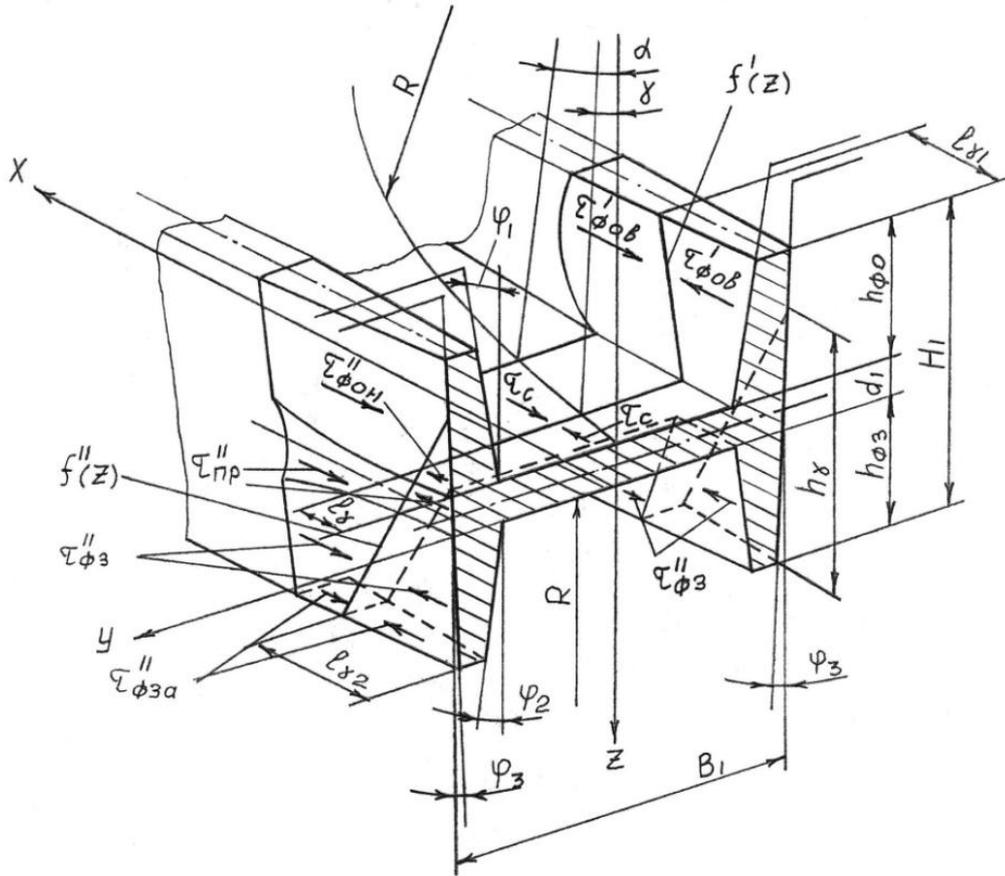


Рис. 1. Принятая система координат и обозначения к определению нейтральной линии на контактной поверхности металла с валками в закрытом балочном калибре

Из граничных условий находим границы зон отставания и опережения:

- длину зоны опережения для верхнего валка по концу фланца:

$$l_{\gamma 1} = \sqrt{\frac{Rs + h_{\phi 0}}{R(1+s)} \cdot \frac{l^2 \mu}{\mu - 1}}; \quad (7)$$

- длину зоны опережения для нижнего валка по концу фланца:

$$l_{\gamma 2} = \sqrt{\frac{Rs + h_{\phi 3}}{R(1+s)} \cdot \frac{l^2 \mu}{\mu - 1}}; \quad (8)$$

- высоту зоны опережения на выходе нижнего валка:

$$h_{\gamma} = h_{\phi 3} + Rs, \quad (9)$$

где  $h_{\phi 0}$  и  $h_{\phi 3}$  – высота открытого и закрытого фланца, соответственно.

Длину зоны опережения по основанию открытого и закрытого фланцев определяем по выражению:

$$l_{\gamma} = R\gamma, \quad (10)$$

где  $\gamma$  – нейтральный угол по стенке.

Выражение для определения опережения по стенке получили исходя из условия соблюдения секундных объемов и гипотезы плоских сечений:

$$s = \frac{B_1 R \gamma^2 + 2h_{\phi 0} \Delta t_{\gamma \phi 0} + 2h_{\phi 3} \Delta t_{\gamma \phi 3}}{F_1}, \quad (11)$$

где  $B_1$  – ширина калибра по стенке на выходе из калибра;  $\Delta t_{\gamma \phi 0}$  и  $\Delta t_{\gamma \phi 3}$  – соответственно, средняя величина обжатия открытого и закрытого фланца от нейтрального сечения по стенке до выхода металла из калибра;  $F_1$  – площадь сечения раската по выходе из калибра.

Величины  $\Delta t_{\gamma\phi_0}$  и  $\Delta t_{\gamma\phi_3}$  определяются по выражениям:

$$\Delta t_{\gamma\phi_0} = 2R_{\text{ср.}\phi_0} - 2\sqrt{R_{\text{ср.}\phi_0}^2 - R^2\gamma^2}; \quad (12)$$

$$\Delta t_{\gamma\phi_3} = 2R_{\text{ср.}\phi_3} - 2\sqrt{R_{\text{ср.}\phi_3}^2 - R^2\gamma^2}. \quad (13)$$

Здесь

$$R_{\text{ср.}\phi_0} = \frac{2R'_{\phi_0} R''_{\phi_0}}{R'_{\phi_0} + R''_{\phi_0}}; \quad (14)$$

$$R_{\text{ср.}\phi_3} = \frac{2R'_{\phi_3} R''_{\phi_3}}{R'_{\phi_3} + R''_{\phi_3}}; \quad (15)$$

$$R'_{\phi_0} = \frac{R - h_{\phi_0} / 2}{\text{tg}\phi_1}; \quad (16)$$

$$R''_{\phi_0} = \frac{R + d_1 + h_{\phi_0} / 2}{\text{tg}\phi_3}; \quad (17)$$

$$R'_{\phi_3} = \frac{R - h_{\phi_3} / 2}{\text{tg}\phi_2}; \quad (18)$$

$$R''_{\phi_3} = \frac{R - d_1 + h_{\phi_3} / 2}{\text{tg}\phi_3}. \quad (19)$$

Для определения опережения  $s$  необходимо знать нейтральный угол  $\gamma$  по стенке. Нейтральный угол  $\gamma$  по стенке при прокатке двутавровой балки в закрытом калибре определяем из условия равновесия сил, действующих в очаге деформации на прокатываемую полосу (рис. 2).

$$\begin{aligned} \Sigma X = & T'_{\text{сх}1} - T'_{\text{сх}2} - P'_{\text{сх}} + T''_{\text{сх}1} - T''_{\text{сх}2} - P''_{\text{сх}} + \\ & + 2T''_{\text{фовх}1} - 2T'_{\text{фовх}2} - 2P'_{\text{фовх}} + \\ & + 2T''_{\text{фзвх}1} - 2T''_{\text{фзвх}2} - 2P''_{\text{фзвх}} + \\ & + 2T''_{\text{фонх}1} - 2T''_{\text{фонх}2} - 2P''_{\text{фонх}} + \\ & + 2T''_{\text{фзх}1} - 2T''_{\text{фзх}2} - 2P''_{\text{фзх}} + \\ & + 2T''_{\text{прх}1} - 2T''_{\text{прх}2} - 2P''_{\text{прх}} + \\ & + 2T''_{\text{ах}1} - 2T''_{\text{ах}2} - 2P''_{\text{ах}} = 0, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $T_x, P_x$  – горизонтальные составляющие равнодействующих касательных контактных напряжений и нормальных контактных напряжений в соответствующих зонах. Принятые обозначения: ' – верхний валок; '' – нижний валок; с – стенка;  $\phi_0$  – фланец открытый;  $\phi_3$  – фланец закрытый; в – внутренняя поверхность; н – наружная поверхность; пр – промежуточная зона; а – торец закрытого фланца; 1 – зона отставания; 2 – зона опережения.

Равнодействующая касательных контактных напряжений определяем как произведение средних касательных контактных напряжений на площадь контакта металла с валком рассматриваемой зоны. Касательные контактные напряжения определяем по закону Амонтона:

$$\tau = fP \quad (21)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $P$  – средние нормальные контактные напряжения.

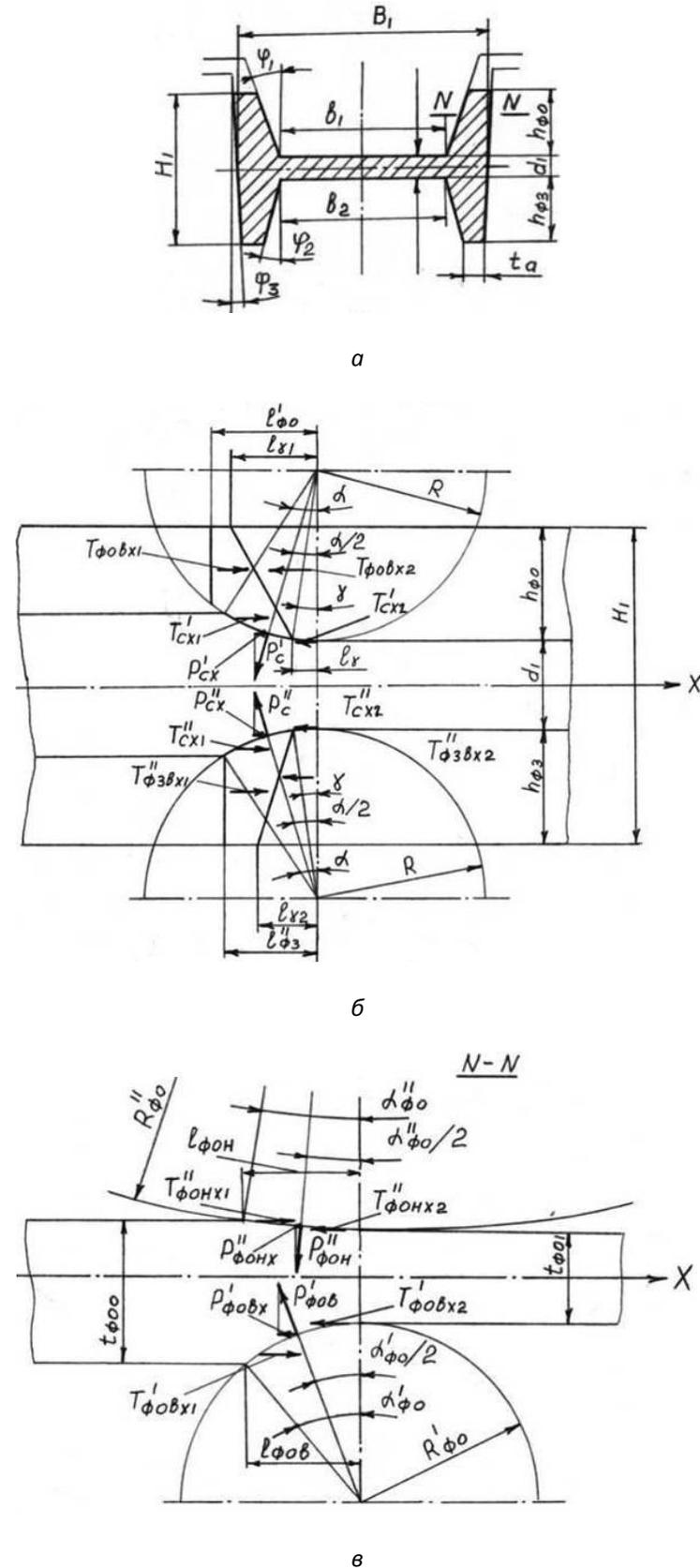


Рис. 2. Схема сил, действующих на двутавровую балку в закрытом калибре: а – закрытый балочный калибр в плоскости выхода; б – схема сил, действующих на стенку и внутреннюю поверхность фланцев в зонах отставания и опережения; в – схема сил, действующих на внутренней и наружной поверхности открытого фланца

Решая уравнение (20) получили выражение для определения нейтрального угла по стенке двутавровой балки в закрытом калибре

$$\begin{aligned} \gamma = & \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \frac{\alpha}{2f} \right) + \frac{1}{2\tau_c R (b_1 + b_2)} \left[ \tau'_{\text{фов}} \left( F'_{\text{фов1}} \cos \Psi'_{\text{в1}} - F'_{\text{фов2}} \cos \Psi'_{\text{в2}} \right) - \right. \\ & - P'_{\text{фов}} F'_{\text{фо}} \frac{\sin \alpha_{\text{фов}}}{2} + \tau''_{\text{фзв}} \left( F''_{\text{фзв1}} \cos \Psi''_{\text{в1}} - F''_{\text{фзв2}} \cos \Psi''_{\text{в2}} \right) - \\ & - P''_{\text{фзв}} F''_{\text{фзв}} \frac{\sin \alpha_{\text{фзв}}}{2} + \tau''_{\text{фон}} \left( F''_{\text{фон1}} \cos \Psi''_{\text{н1}} - F''_{\text{фон2}} \cos \Psi''_{\text{н2}} \right) - \\ & - P''_{\text{фон}} F''_{\text{фо}} \frac{\sin \alpha_{\text{фон}}}{2} + \tau''_{\text{фзн}} \left( F''_{\text{фзн1}} \cos \Psi''_{\text{н1}} - F''_{\text{фзн2}} \cos \Psi''_{\text{н2}} \right) - \\ & - P''_{\text{фзн}} F''_{\text{фзн}} \frac{\sin \alpha_{\text{фзн}}}{2} + \tau''_{\text{пр}} \left( F''_{\text{пр1}} \cos \Psi''_{\text{н1}} - F''_{\text{пр2}} \cos \Psi''_{\text{н2}} \right) - \\ & \left. - P''_{\text{пр}} F''_{\text{пр}} \frac{\sin \alpha_{\text{пр}}}{2} + \tau''_{\text{фза}} \left( F''_{\text{фза1}} \cos \Psi''_{\text{а1}} - F''_{\text{фза2}} \cos \Psi''_{\text{а2}} \right) - P''_{\text{фза}} F''_{\text{фза}} \frac{\sin \alpha_{\text{а}}}{2} \right], \quad (22) \end{aligned}$$

120

где  $F$  – площадь контакта металла с валками в соответствующих зонах;  $\psi$  – угол наклона вектора равнодействующих касательных контактных напряжений в соответствующих зонах;  $\alpha_{\text{фов}}$ ,  $\alpha_{\text{фон}}$ ,  $\alpha_{\text{фзв}}$ ,  $\alpha_{\text{фзн}}$ ,  $\alpha_{\text{пр}}$ ,  $\alpha_{\text{а}}$  – угол захвата (по середине высоты фланцев) по внутренней и наружной поверхности открытого и закрытого фланцев.

Площади контакта металла с валками в закрытом балочном калибре определяется по методике работы [6].

Угол наклона вектора равнодействующей касательных контактных напряжений в рассматриваемой зоне можно определить по методике работы [7] или графоаналитическим методом, как угол между радиусом до точки приложения равнодействующей касательных контактных напряжений (центр тяжести площади контакта металла с валком рассматриваемой зоны) и линией выхода металла с калибра.

Средние нормальные контактные напряжения  $p_{\text{ср}}$  определяем по выражению:

$$p_{\text{ср}} = \sigma_{\tau} n_{\sigma}. \quad (23)$$

Предел текучести  $\sigma_{\tau}$  определяем по методу термомеханических коэффициентов. Коэффициент напряженного состояния  $n_{\sigma}$  по стенке, открытому фланцу по внутренней и наружной поверхности и закрытому фланцу определяли по методике, приведенной в работе [8].

С учетом моментов, создаваемых касательными контактными напряжениями на контактной поверх-

ности валков со стенкой и фланцами в зонах отставания и опережения, получены выражения для определения момента прокатки двутавровой балки в закрытом калибре:

- на верхнем валке (открытый фланец):

$$\begin{aligned} M' = & \tau'_c b_1 R^2 (\alpha - 2\gamma) + \\ & + 2\tau'_{\text{фов}} \left( F'_{\text{фов1}} R'_{\text{фов1}} - F'_{\text{фов2}} R'_{\text{фов2}} \right); \quad (24) \end{aligned}$$

- на нижнем валке (закрытый фланец):

$$\begin{aligned} M'' = & \tau''_c b_2 R^2 (\alpha - 2\gamma) + \\ & + 2\tau''_{\text{фзв}} \left( F''_{\text{фзв1}} R''_{\text{фзв1}} - F''_{\text{фзв2}} R''_{\text{фзв2}} \right) + \\ & + 2\tau''_{\text{фон}} \left( F''_{\text{фон1}} R''_{\text{фон1}} - F''_{\text{фон2}} R''_{\text{фон2}} \right) + \\ & + 2\tau''_{\text{фзн}} \left( F''_{\text{фзн1}} R''_{\text{фзн1}} - F''_{\text{фзн2}} R''_{\text{фзн2}} \right) + \\ & + 2\tau''_{\text{пр}} \left( F''_{\text{пр1}} R''_{\text{пр1}} - F''_{\text{пр2}} R''_{\text{пр2}} \right) + \\ & + 2\tau''_{\text{фза}} \left( F''_{\text{фза1}} - F''_{\text{фза2}} \right) (R - h_{\text{фз}}), \quad (25) \end{aligned}$$

где  $R'$  и  $R''$  – радиусы до точек приложения равнодействующей касательных напряжений в соответствующих зонах.

Сравнение результатов теоретических расчетов с разработанным методом с экспериментальными данными работы [1] приведены в таблице 1, показывает достаточно хорошую их сходимость.

Таблица 1. Сравнения результатов расчета момента прокатки  $M_{пр}$  и его распределения между валками  $M''_{пр} / M_{пр}$  ( $M''_{пр}$  – момент прокатки на валке с закрытым ручьем)

№ калибра	Тип калибра	$M_{пр}$		Относит. погрешность, %	$M''_{пр}/M_{пр}$		Относит. погрешность, %	$\frac{F_{к2}}{F_{к1}}$	Относит. погрешн., %
		эксперим., т·м	расчетн., т·м		эксперим.	расчетн.			
2	Закр.	1,66	1,54	-7,2	0,842	0,801	-4,9	0,774	-8,1
3	Закр.	1,97	1,91	-3,2	0,878	0,907	+3,3	0,736	-16,2
4	Закр.	2,01	2,13	+6,0	0,872	0,885	+1,5	0,723	-17,1
5	Закр.	2,11	2,01	-4,7	0,933	0,826	-11,5	0,784	-16,0

### ВЫВОДЫ

Исходя из условия постоянства секундных объемов получено выражение для определения опережения по стенке при прокатке двутавровой балки в закрытом калибре.

На основании равновесия сил в очаге деформации получено выражение для определения нейтрального угла по стенке при прокатке двутавровой балки в закрытом калибре.

С учетом касательных контактных напряжений, действующих в зонах отставания и опережения на контактной поверхности металла с валками в очаге деформации при прокатке двутавровой балки в закрытом калибре, получены выражения для определения момента прокатки на валках с открытым и закрытым ручьями.

Разработанный метод определения момента прокатки двутавровой балки в закрытом калибре позволяет определить характер распределения момента между валками.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Теряев В. А. Распределение крутящих моментов между валками при прокатке балочных профилей / В. А. Теряев // Прокатное производство: Сб. научн. тр. Института черной металлургии. – М. : Металлургия, 1969. – Вып. 17. – С. 125-129.
2. Смирнов В. К. Калибровка прокатных валков / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Игнатович. – М. : Металлургия, 1987. – 368 с.
3. Огинский И. К. Работа и моменты при прокатке в несимметричных калибрах / И. К. Огинский // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2010. – № 32. – С. 188-199. – ISSN 2077/ 1738/
4. Силовые параметры прокатки в угловом прямополюсном калибре / А. А. Динник, Л. Н. Левченко, В. С. Лиханский [и др.] // В кн.: Теория прокатки: Материалы Всесоюз. научн.-техн. конф. "Теоретические проблемы прокатного производства". – М. : Металлургия, 1975. – С. 193-195.
5. Чекмарев А. П. Аналитические исследования течения металла в калибре швеллерного типа / А. П. Чекмарев, В. Н. Гаращенко, Л. Н. Левченко // Обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. Днепропетровский металлургический ин-т. – М. : Металлургия, 1970. – Вып. 55. – С. 33-48.
6. Теряев В. А. О площадях контакта металла с валками и усилиях при прокатке балок в обычных и универсальных калибрах / В. А. Теряев, Ю. В. Павлович // Прокатное производство: Сб. научн. тр. Института черной металлургии. – М. : Металлургия, 1969. – Вып. 29. – С. 146-154.
7. Полатовский Б. С. Вертикальное равновесие в балочном калибре / Б. С. Полатовский, Ю. В. Павлович // Прокатное производство: Сб. научн. тр. Института черной металлургии. – М. : Металлургия, 1969. – Вып. 29. – С. 170-180.
8. Удельные давления при прокатке в балочном калибре / А. П. Чекмарев, Б. С. Полатовский, В. В. Остапенко [и др.] // Прокатное производство: Сб. научн. тр. Института черной металлургии. – М. : Металлургия, 1969. – Вып. 29. – С. 155-169.