

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МОМЕНТА ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРА В ДВУХВАЛКОВОМ КАЛИБРЕ

Тубольцев А. Г. /к. т. н/

Національна металургічна академія України

*Виходячи з умови постійності секундних об'ємів та гіпотези плоских перерізів, одержано вирази для визначення випередження по середині стінки при прокатці швелера у двохвалковому калібрі. На підставі рівноваги сил в осередку деформації одержано вирази для визначення нейтральних кутів по середині стінки при прокатці швелера у двохвалковому калібрі.*

*З урахуванням дотичних контактних напружень, які діють у зонах відставання та випередження на контактній поверхні металу з валками в осередку деформації при прокатці швелера у двохвалковому калібрі, одержано вирази для визначення моменту прокатки на верхньому та нижньому валках, що дозволяють визначити характер розподілу моменту між валками.*

**Ключові слова:** момент прокатки, випередження, швелер, стінка, фланець, дотичні напруження, осередок деформації, калібр.

*Proceeding from condition of the second volumes constancy and hypothesis of flat sections, expressions were deduced for determination of the forward slip on the middle of the channel web while rolling the channel in two-roll pass. Basing on the balance of forces in the zone of deformation expressions were deduced for determination of the angles of non-slip points on the middle of the channel web while rolling the channel in two-roll pass.*

*Taking into account tangential contact stresses acting in zones of forward and backward slip on the contact surface of metal with rolls in zone of deformation while rolling the channel in two-roll pass, expressions were deduced for determination of rolling torque on the top and lower rolls, which allow determining the character of distribution of torque between rolls.*

**Key words:** rolling torque, forward slip, web, flange, tangential stresses, zone of deformation, pass.

*Исходя из условия постоянства секундных объемов и гипотезы плоских сечений получены выражения для определения опережения по середине стенки при прокатке швеллера в двухвалковом калибре. На основании равновесия сил в очаге деформации получены выражения для определения нейтральных углов по середине стенки при прокатке швеллера в двухвалковом калибре.*

*С учетом касательных контактных напряжений, действующих в зонах отставания и опережения на контактной поверхности металла с валками в очаге деформации при прокатке швеллера в двухвалковом калибре, получены выражения для определения момента прокатки на верхнем и нижнем валках, позволяющие определить характер распределения момента между валками.*

**Ключевые слова:** момент прокатки, опережение, швеллер, стенка, фланец, касательные напряжения, очаг деформации, калибр.

Процесс прокатки швеллеров в двухвалковых калибрах относится к асимметричному процессу, одним из главных вопросов которого является равномерное распределение момента прокатки между валками для обеспечения стабильности процесса и надежной работы прокатного оборудования.

Вопросом распределения момента между валками при асимметричной прокатке посвящен ряд работ, в которых теоретически и экспериментально рассмотрены вопросы распределения момента между валками при прокатке на гладкой бочке [1-7]. В работе [7] также предложено определять распределение момента прокатки двутавровой балки в закрытом калибре как отношение площадей контакта металла с валками. В работе [8] экспериментально определено распределение момента прокатки между валками в закрытых балочных калибрах. В работах [9, 10] теоретически и экспериментально рассмотрены вопросы распределения момента прокатки между приводными горизонтальными валками универсального швеллерного калибра.

Вопросы о распределении момента между валками при прокатке швеллера в двухвалковом калибре в литературе не рассмотрены как теоретически, так и экспериментально.

Целью данной работы является разработка теоретического метода определения момента прокатки швеллера в двухвалковых 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 [11], например, по стенке. Принимая изменение скорости металла от линии входа в валки до линии выхода по параболическому закону [12], текущее значение скорости металла  $V_m$  в очаге деформации можно записать:

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

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.

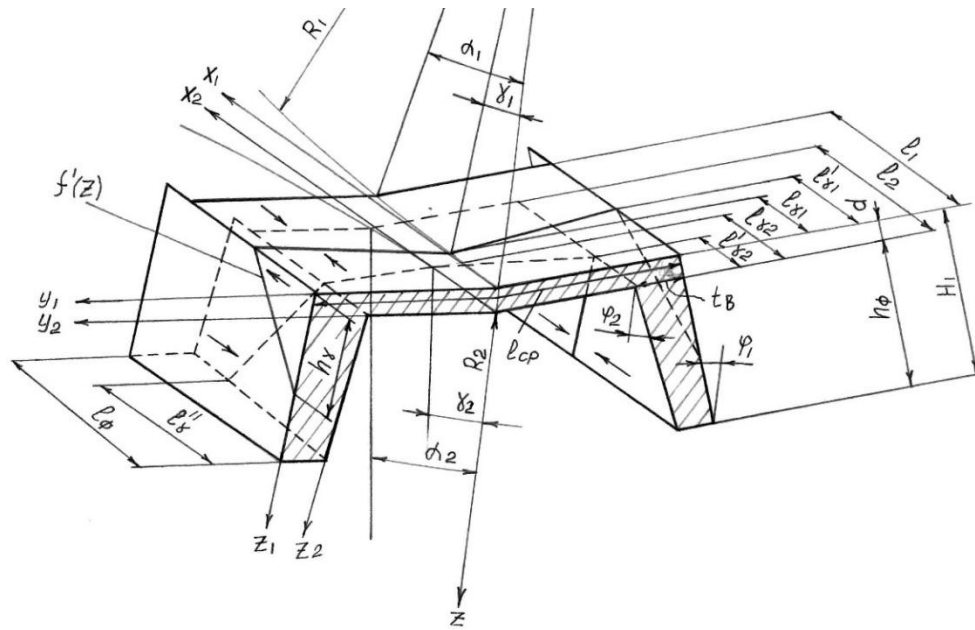


Рис. 1. Принятая система координат и обозначения к определению нейтральной линии на контактной поверхности металла с валками в двухвалковом швеллерном калибре

110

Зная величину опережения по середине стенки на верхнем валке  $S_1$  и нижнем валке  $S_2$ , можно найти уравнение нейтральных линий на контактной поверхности валков в системе координат, показанной на рис. 1

Нейтральная линия на контактной поверхности валков представляет собой геометрическое место точек, где линейные скорости валков и металла равны между собой.

$$V_M - V'_B = 0; \quad (2)$$

$$V_M - V''_B = 0. \quad (3)$$

Переменная величина скорости верхнего валка:

- по ширине стенки

$$V'_{B.C} = \frac{\pi \cdot n (R_1 - Y_1 \cdot \sin \varphi_1)}{30}; \quad (4)$$

- по высоте фланца

$$V'_{B.\Phi} = \frac{\pi \cdot n (R_1 - Y_1 \cdot \sin \varphi_1 + Z_1)}{30}, \quad (5)$$

где  $Z_1$  и  $Y_1$  – текущее значение координат по верхнему валку.

$$\begin{aligned} Z' &= Y_1 \cdot \sin \varphi_1 = \\ &= (0,5 \cdot l_{cp} - 0,5 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \varphi_1) \cdot \sin \varphi_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Решая уравнение (2) с учетом выражений (1) и (4), уравнение (2) с учетом выражений (1) и (5) находим уравнение нейтральной линии для верхнего валка:

- по стенке

$$f'_c(z) = x'_c = \sqrt{\frac{R_1 \cdot S_1 + z'}{R_1 \cdot (1 + S_1)} \cdot \frac{l^2 \cdot \mu}{\mu - 1}}; \quad (7)$$

- по фланцу

$$f'_\Phi(z) = x'_\Phi = \sqrt{\frac{R_1 \cdot S_1 + z' - Z_1}{R_1 \cdot (1 + S_1)} \cdot \frac{l^2 \cdot \mu}{\mu - 1}}. \quad (8)$$

Переменная величина скорости нижнего валка:

- по ширине стенки

$$V''_{B.C} = \frac{\pi \cdot n (R_2 + Y_2 \cdot \sin \varphi_1)}{30}; \quad (9)$$

- по высоте фланца

$$V''_{B.\Phi} = \frac{\pi \cdot n (R_2 + Y_2 \cdot \sin \varphi_1 - Z_2)}{30}, \quad (10)$$

где  $Z_2$  и  $Y_2$  – текущее значение координат по нижнему валку.

$$\begin{aligned} Z'' &= Y_2 \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= (0,5 \cdot l_{cp} - t_B + 0,5 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \varphi_1) \cdot \sin \varphi_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Решая уравнение (3) с учетом выражений (1) и (9), уравнение (3) с учетом выражений (1) и (10) находим уравнение нейтральной линии для верхнего валка:

- по стенке

$$f_c''(z) = x_c'' = \sqrt{\frac{R_2 \cdot S_2 - z''}{R_2 \cdot (1 + S_2)} \cdot \frac{l^2 \cdot \mu}{\mu - 1}}; \quad (12)$$

- по фланцу

$$f_\phi''(z) = x_\phi'' = \sqrt{\frac{R_2 \cdot S_2 - z'' + z_2}{R_2 \cdot (1 + S_2)} \cdot \frac{l^2 \cdot \mu}{\mu - 1}}. \quad (13)$$

Используя выражения (6)-(13), из граничных условий находим границы зон отставания и опережения для случая расположения нейтральных линий, приведенных на рис. 1:

- верхний валок

$$l_{\gamma_1} = R_1 \cdot \gamma_1; \quad (14)$$

$$l'_{\gamma_1} = \sqrt{\frac{R_1 \cdot S_1 + (0,5 \cdot l_{cp} - 0,5 \cdot d \cdot tg \varphi_1) \cdot \sin \varphi_1}{R_1 \cdot (1 + S_1)} \cdot \frac{l^2 \cdot \mu}{\mu - 1}}. \quad (15)$$

$$h_{\gamma_1} = R_1 \cdot S_1 + (0,5 \cdot l_{cp} - 0,5 \cdot d \cdot tg \varphi_1) \cdot \sin \varphi_1 \quad (16)$$

- нижний валок

$$l_{\gamma_2} = R_2 \cdot \gamma_2; \quad (17)$$

$$l'_{\gamma_2} = \sqrt{\frac{R_2 \cdot S_2 - (0,5 \cdot l_{cp} - t_B + 0,5 \cdot d \cdot tg \varphi_1) \cdot \sin \varphi_1}{R_1 \cdot (1 + S_2)} \cdot \frac{l^2 \cdot \mu}{\mu - 1}}. \quad (18)$$

$$l''_{\gamma_2} = \sqrt{\frac{R_2 \cdot S_2 - (0,5 \cdot l_{cp} - t_B + 0,5 \cdot d \cdot tg \varphi_1) \cdot \sin \varphi_1 + h_\phi}{R_1 \cdot (1 + S_2)} \cdot \frac{l^2 \cdot \mu}{\mu - 1}}. \quad (19)$$

$$\sum X = T'_{x1} - T'_{x2} - P'_x + T''_{x1} - T''_{x2} - P''_x + 2 \cdot T_{x1}^{\phi'} - 2 \cdot T_{x2}^{\phi'} - 2 \cdot P_x^{\phi'} + 2 \cdot T_{x1}^{\phi''} - 2 \cdot T_{x2}^{\phi''} - 2 \cdot P_x^{\phi''} = 0 \quad (27)$$

где  $T'_{x1}$ ,  $T'_{x2}$ ,  $P'_x$ ,  $T_{x1}^{\phi'}$ ,  $T_{x2}^{\phi'}$ ,  $P_x^{\phi'}$ ,  $T''_{x1}$ ,  $T''_{x2}$ ,  $P''_x$ ,  $T_{x1}^{\phi''}$ ,  $T_{x2}^{\phi''}$ ,  $P_x^{\phi''}$  – горизонтальные составляющие равнодействующих касательных контактных напряжений в зонах отставания ( $T_{x1}$ ), опережения ( $T_{x2}$ ) и

Исходя из условий соблюдения секундных объемов и гипотезы плоских сечений получены выражения для определения опережения по середине стенки на верхнем  $s_1$  и нижнем  $s_2$  валках при прокатке швеллера в двухвалковом калибре

$$S_1 = \frac{l_{cp} \cdot R_1 \cdot \gamma_1^2 + 2 \cdot h_\phi \cdot \Delta t_{\gamma_1}}{F_1}; \quad (20)$$

$$S_2 = \frac{l_{cp} \cdot R_2 \cdot \gamma_2^2 + 2 \cdot h_\phi \cdot \Delta t_{\gamma_2}}{F_1}, \quad (21)$$

где  $\Delta t_{\gamma_1}$ ,  $\Delta t_{\gamma_2}$  – средняя величина обжатия фланца от плоскостей, проходящих через нейтральные сечения по середине стенки на верхнем и нижнем валках до плоскости выхода из металла из валков;  $F_1$  – площадь сечения раската на выходе из калибра.

Величины  $\Delta t_{\gamma_1}$ ,  $\Delta t_{\gamma_2}$  определяются по выражениям:

$$\Delta t_{\gamma_1} = 2 \cdot R_{cp,\phi} - 2 \cdot \sqrt{R_{cp,\phi}^2 - R_1^2 \cdot \gamma_1^2}; \quad (22)$$

$$\Delta t_{\gamma_2} = 2 \cdot R_{cp,\phi} - 2 \cdot \sqrt{R_{cp,\phi}^2 - R_2^2 \cdot \gamma_2^2}. \quad (23)$$

Здесь

$$R_{cp,\phi} = \frac{2 \cdot R_{\Gamma,1} \cdot R_{\Gamma,2}}{R_{\Gamma,1} + R_{\Gamma,2}}; \quad (24) \quad 111$$

$$R_{\Gamma,1} = \frac{R_1 - (0,5 \cdot l_{cp} - 0,5 \cdot d \cdot tg \varphi_1) \cdot \sin \varphi_1 + \left(d + \frac{h_\phi}{2}\right)}{tg \varphi_1}; \quad (25)$$

$$R_{\Gamma,2} = \frac{R_2 + (0,5 \cdot l_{cp} - t_B + 0,5 \cdot d \cdot tg \varphi_1) \cdot \sin \varphi_2 - \frac{h_\phi}{2}}{tg \varphi_2}. \quad (26)$$

Нейтральные углы  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  по середине стенки при прокатке швеллера в двухвалковом калибре получены из условия равновесия сил, действующих в очаге деформации на прокатываемую полосу, рис 2: формула (27) – условие равновесия сил, действующих на прокатываемую полосу в двухвалковом швеллерном калибре.

нормальных контактных напряжений ( $P_x$ ) по стенке, наружной и внутренней поверхности фланца на верхнем (') и нижнем (") валках.

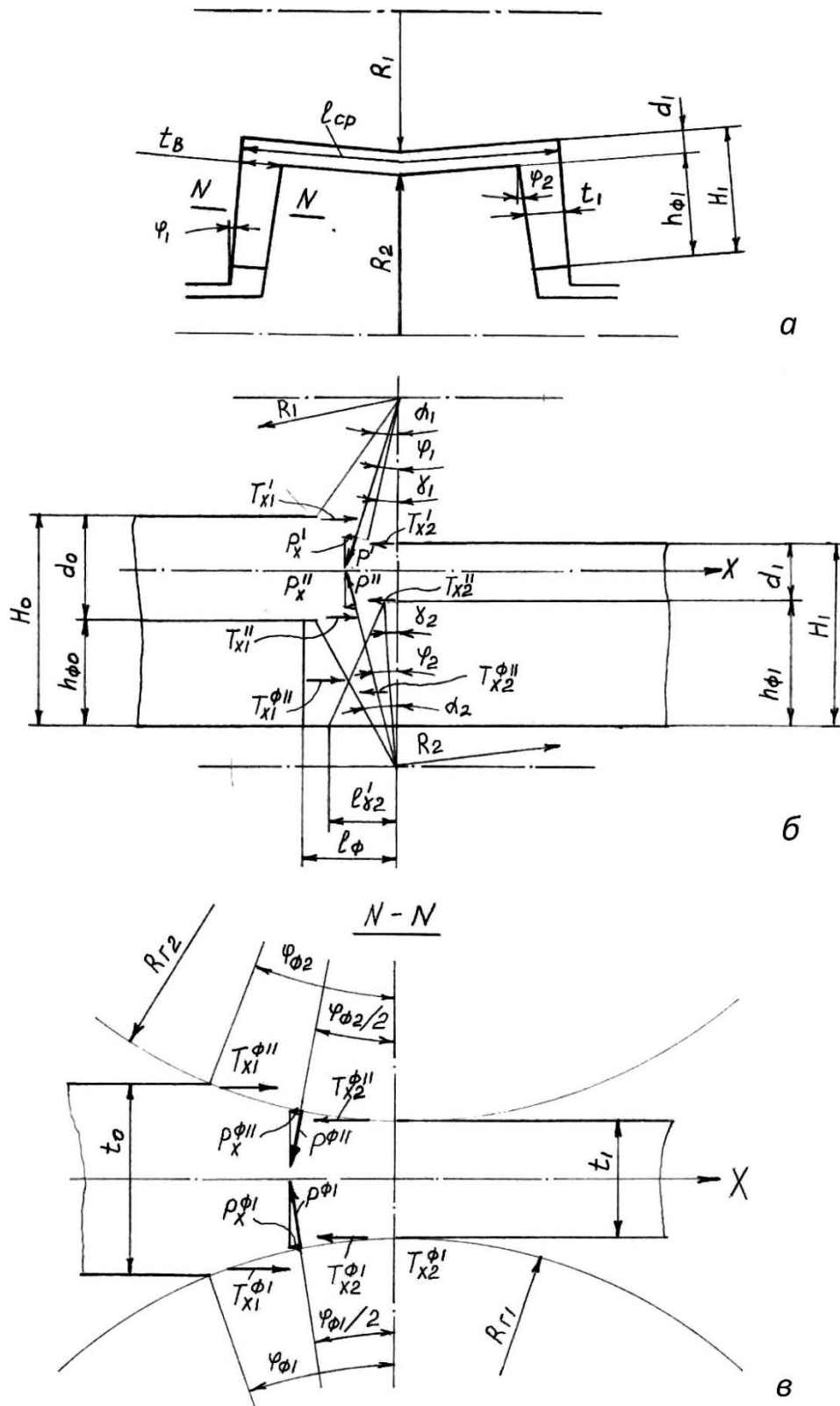


Рис. 2. Схема сил, действующих на швеллер в двухвалковом калибре: а – двухвалковый швеллерный калибр в плоскости выхода металла из валков; б – схема сил, действующих на стенку и внутреннюю поверхность фланцев в зонах отставания и опережения; в – схема сил, действующая на внутреннюю и наружную поверхности фланца

Равнодействующие 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 [1, 7]:

$$\tau = f \cdot P \quad (28)$$

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

Решая уравнение (27) получили выражение для определения нейтральных углов по середине стенки швеллера в двухвалковом калибре:

$$\gamma_1 = \frac{B - \sqrt{B^2 - \left(1 - \frac{A^2}{K^2}\right) \cdot \left\{B^2 + \left[1 - \frac{1}{K} - \frac{2 \cdot h_{\phi} \cdot (\Delta t_{\gamma 1} - K \cdot \Delta t_{\gamma 2})}{K \cdot F_1}\right] \cdot \frac{F_1 \cdot A^2}{l_{cp} \cdot R_2}\right\}}}{1 - \frac{A^2}{K^2}}; \quad (29)$$

$$\gamma_2 = \frac{-\frac{B \cdot A^2}{K^2} + \sqrt{B^2 - \left(1 - \frac{A^2}{K^2}\right) \cdot \left\{B^2 + \left[1 - \frac{1}{K} - \frac{2 \cdot h_{\phi} \cdot (\Delta t_{\gamma 1} - K \cdot \Delta t_{\gamma 2})}{K \cdot F_1}\right] \cdot \frac{F_1 \cdot A^2}{l_{cp} \cdot R_2}\right\}}}{A - \frac{A^2}{K^2}} \quad (30)$$

Значения величин  $A$ ,  $B$  и  $K$  определяются по зависимостям

$$A = \frac{\tau_2 \cdot (l_{cp} - 2 \cdot \tau_B)}{\tau_1 \cdot l_{cp}}; \quad (31)$$

$$B = \frac{\alpha_1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_1}{2 \cdot f_1}\right) + \frac{\alpha_2}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_2}{2 \cdot f_2}\right) \cdot \frac{\tau_2 \cdot (l_{cp} - 2 \cdot t_B)}{\tau_1 \cdot l_{cp}} \cdot K + \frac{1}{\tau_1 \cdot l_{cp} \cdot R_1} \times$$

$$\times \left[ \tau_1^{\phi} \cdot \left(F_1^{\phi'} \cdot \cos \varphi_1^{\phi'} - F_2^{\phi'} \cdot \cos \varphi_2^{\phi'}\right) - P_1^{\phi} \cdot F^{\phi'} \cdot \sin \frac{\varphi_{\phi 1}}{2} + \right.$$

$$\left. + \tau_2^{\phi} \cdot \left(F_1^{\phi''} \cdot \cos \varphi_1^{\phi''} - F_2^{\phi''} \cdot \cos \varphi_2^{\phi''}\right) - P_2^{\phi} \cdot F^{\phi''} \cdot \sin \frac{\varphi_{\phi 2}}{2} \right]; \quad (32)$$

$$K = R_2 / R_1, \quad (33)$$

где  $\tau_1, \tau_2, \tau_1^{\phi}, \tau_2^{\phi}$  – средние касательные контактные напряжения по стенке на верхнем и нижнем валке, по наружной и внутренней поверхности фланца;  $f_1, f_2$  – коэффициент трения по стенке на верхнем и нижнем валке;  $F_1^{\phi'}, F_2^{\phi'}, F^{\phi'}, F_1^{\phi''}, F_2^{\phi''}, F^{\phi''}$  – площади зон отставания (1), опережения (2) и площадь контакта по наружной и внутренней поверхности фланца;  $\varphi_1^{\phi'}, \varphi_2^{\phi'}, \varphi_1^{\phi''}, \varphi_2^{\phi''}$  – угол наклона вектора равнодействующих касательных контактных напряжений в зонах отставания и опережения на верхнем

и нижнем валках (угол между линией выхода металла из очага деформации и радиусом до точек приложения равнодействующих касательных контактных напряжений соответствующих зон).

С учетом моментов, создаваемых касательными контактными напряжениями на поверхности контакта металла с валками со стенкой и фланцем в зонах отставания и опережения, получены выражения для определения момента прокатки швеллера в двухвалковом калибре:

- на верхнем валке

$$M_1 = \tau_1 \cdot F_1^{c'} \cdot R_1^{c'} - \tau_1 \cdot F_2^{c'} \cdot R_2^{c'} + 2 \cdot \tau_1^{\phi} \cdot F_1^{\phi'} \cdot R_1^{\phi'} - 2 \cdot \tau_1^{\phi} \cdot F_2^{\phi'} \cdot R_2^{\phi'}; \quad (34)$$

- на нижнем валке

$$M_2 = \tau_2 \cdot F_1^{c''} \cdot R_1^{c''} - \tau_2 \cdot F_2^{c''} \cdot R_2^{c''} + 2 \cdot \tau_2^{\phi} \cdot F_1^{\phi''} \cdot R_1^{\phi''} - 2 \cdot \tau_2^{\phi} \cdot F_2^{\phi''} \cdot R_2^{\phi''}, \quad (35)$$

где  $R_1^{c'}$ ,  $R_2^{c'}$ ,  $R_1^{\phi'}$ ,  $R_2^{\phi'}$ ,  $R_1^{c''}$ ,  $R_2^{c''}$ ,  $R_1^{\phi''}$ ,  $R_2^{\phi''}$  – радиусы до точек приложения равнодействующих касательных контактных напряжений в зонах отставания и опережения по стенке и фланцу на верхнем и нижнем валках.

Радиусы до точек приложения равнодействующих касательных контактных напряжений (центр тяжести площади контакта металла с валком рассматриваемой зоны) могут быть определены графоаналитическим методом или по методике работы [13].

## ВЫВОДЫ

Исходя из условия постоянства секундных объемов и гипотезы плоских сечений получены выражения для определения опережения по середине

стенки при прокатке швеллера в двухвалковом калибре.

На основании равновесия сил в очаге деформации получены выражения для определения нейтральных углов по середине стенки при прокатке швеллера в двухвалковом калибре.

С учетом касательных контактных напряжений, действующих в зонах отставания и опережения на контактной поверхности металла с валками в очаге деформации при прокатке швеллера в двухвалковом калибре, получены выражения для определения момента прокатки на верхнем и нижнем валках.

Разработанный метод определения момента прокатки швеллера в двухвалковом калибре позволяет определить характер распределения момента между валками.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Чекмарев А.П. Теория продольной прокатки / А.П. Чекмарев, А.А. Нефедов, В.А. Николаев. – Харьков: Изд. Харьк. Ун-та, 1965. – 212 с.
2. Гришков А.И. К теории асимметричного процесса продольной прокатки / А.И. Гришков. / Металлы. – 1976. – № 5. – С. 117-123.
3. Николаев В.А. Распределение давлений и обжатий между валками при несимметричной прокатке / В.А. Николаев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 9. – С. 28-30.
4. Николаев В.А. Углы критического сечения при несимметричной прокатке / В.А. Николаев // Металлургия и коксохимия. – 1982. – № 78. – С. 47-52.
5. Николаев В.А. Опережение при несимметричной прокатке / В.А. Николаев, В.И. Емченко // Металлургия и коксохимия. – 1980. – № 64. – С. 49-53.
6. Николаев В.А. Влияние несимметрии деформации на распределение крутящих моментов прокатки полос / В.А. Николаев, И.А. Волков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1993. – № 3. – С. 56-57.
7. Огинский И.К. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров / И.К. Огинский, В.Н. Данченко, А.А. Самсоненко, В.В. Бояркин. – Днепропетровск: Пороги, 2011. – 355 с.
8. 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.
9. Тубольцев А.Г. Кинематические и энергосиловые параметры процесса прокатки швеллера в универсальном калибре / А.Г. Тубольцев // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. – № 7. – С.183-187.
10. Тубольцев А.Г. Экспериментальное исследование момента прокатки швеллера в универсальном калибре / А.Г. Тубольцев // Обработка металлов давлением. – Краматорск, 2011. – № 3. – С.164-167.
11. Силовые параметры прокатки в угловом прямополочном 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.
12. 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.
13. 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.