

УДК 621. 771. 01

Максименко О. П.
Лобойко Д. И.

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОКАТКИ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА

Теория простого процесса продольной прокатки разработана достаточно глубоко. Вместе с тем, как отмечено в работе [1], отдельные положения её требуют определенной корректировки и уточнения. Так, известно [2–4], что расчётная эпюра распределения нормального давления по длине очага деформации в предельном случае прокатки имеет вид вогнутой кривой. Такой характер распределения давления объясняется действием продольных нормальных растягивающих напряжений в зоне контакта полосы с валками. В этом случае среднее давление меньше $2k$ (k – сопротивление деформации чистого сдвига) прокатываемого металла, что по энергетическим условиям невозможно. Следовательно, нарушение равновесия полосы в валках должно произойти при меньшем угле захвата α_y и возможно при наличии зоны опережения.

Целью работы является анализ вопроса о равновесии в очаге деформации с учётом продольных сил пластически деформированного металла.

Для этого выделим текущий объем металла в зоне деформации (рис. 1, а) и рассмотрим его равновесие. Заменяя действие валка на металл контактными силами, а влияние отброшенной части полосы продольными нормальными напряжениями (рис. 1, б), можно получить следующее условие равновесия:

$$-2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} p_x \sin \varphi d\varphi R b + 2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} t_x \cos \varphi d\varphi R b - \sigma_x h_x b = 0$$

или в безразмерной форме:

$$-2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{p_x}{2k} \sin \varphi d\varphi + 2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{t_x}{2k} \cos \varphi d\varphi - \frac{\sigma_x}{2k} \left(\frac{h_x}{R} + \varphi^2 \right) = 0, \quad (1)$$

где p_x и t_x – нормальное давление и удельная сила трения;

σ_x – предельное нормальное напряжение;

φ – текущий угол;

b – ширина полосы;

h_1 – конечная толщина полосы;

R – радиус валков.

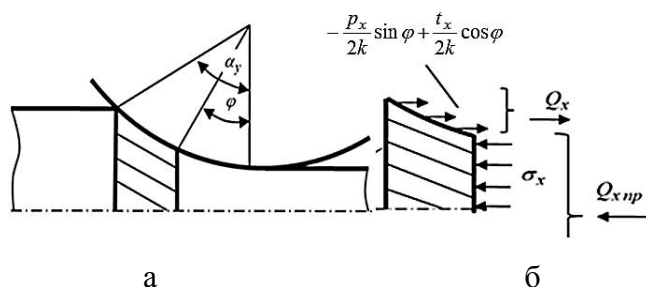


Рис. 1. К равновесию горизонтальных сил:

а – очаг деформации; б – выделенный текущий объем металла

При этом примем во внимание граничное условие, что на входе в очаг деформации при $\varphi = \alpha_y$, напряжение $\sigma_x = 0$. Как видно, первые два слагаемые выражения (1) представляют собой текущую результирующую накапливаемых горизонтальных контактных сил Q_x , а третье слагаемое, равно:

$$Q_{xnp} = \frac{\sigma_x}{2k} \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right),$$

является текущей продольной силой пластически деформируемого металла и представляет собой силу сопротивления, реакцию на действие контактных сил Q_x .

Нетрудно показать, что выражение (1) соответствует начальному уравнению равновесия выделенного в очаге деформации элемента металла, составленного Т. Карманом. С учетом упрощения, сделанного им, это уравнение имеет вид:

$$-2 p_x \sin \varphi d\varphi R b + 2 t_x \cos \varphi d\varphi R b + d \sigma_x h_x b + \sigma_x d h_x b = 0$$

или в безразмерной форме:

$$-2 \frac{p_x}{2k} \sin \varphi d\varphi + 2 \frac{t_x}{2k} \cos \varphi d\varphi + d \frac{\sigma_x}{2k} \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right) + \frac{\sigma_x}{2k} 2\varphi d\varphi = 0.$$

Проинтегрируем данное уравнение:

$$-2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{p_x}{2k} \sin \varphi d\varphi + 2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{t_x}{2k} \cos \varphi d\varphi + \int_{\varphi}^{\alpha_y} \left(\frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right) d \frac{\sigma_x}{2k} + 2 \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{\sigma_x}{2k} \varphi d\varphi = c. \quad (2)$$

Как видно, из условия $\varphi = \alpha_y$, можно определить постоянную интегрирования c , которая равна 0.

Сравнивая выражения (1) и (2), приходим к выводу, что они аналогичны. Тогда, продольное напряжение σ_x можно найти, непосредственно решая уравнение Т. Кармана с учетом условия пластичности:

$$\frac{\sigma_x}{2k} = \frac{p_x}{2k} - 1. \quad (3)$$

Как известно [2–4], в зависимости от условий и параметров прокатки эти напряжения по длине очага деформации существенно изменяются. Если при углах захвата меньших коэффициента трения f_y напряжения σ_x в любом сечении очага деформации являются сжимающими, то при $\alpha_y > f_y$, на определенном участке очага деформации они становятся растягивающими. Очевидно, что на этом участке и текущие силы Q_{xnp} будут растягивающими, т. е. направленными в направлении прокатки. Проанализируем характер изменения силы Q_{xnp} в различных условиях прокатки на конкретном примере. Пусть прокатка ведется в валках радиусом $R = 100$ мм, обжатие $\Delta h = 0,36$ мм, начальная толщина полосы $h_0 = 1$ мм, а коэффициент трения в установившемся режиме деформации f_y принимает значения 0,06;

0,0415; 0,03. Решение уравнения Т. Кармана осуществляли с применением ЭВМ при использовании приближенного метода Рунге-Кутты. Заметим, что в решении исходили из кулоновской модели трения в очаге деформации. Результаты расчета распределения контактных напряжений и текущей продольной силы Q_{xnp} приведены на рис. 2. Как видно характер изменения продольной силы пластически деформируемого металла существенно (количественно и качественно) зависит от отношения $\frac{\alpha_y}{f_y}$.

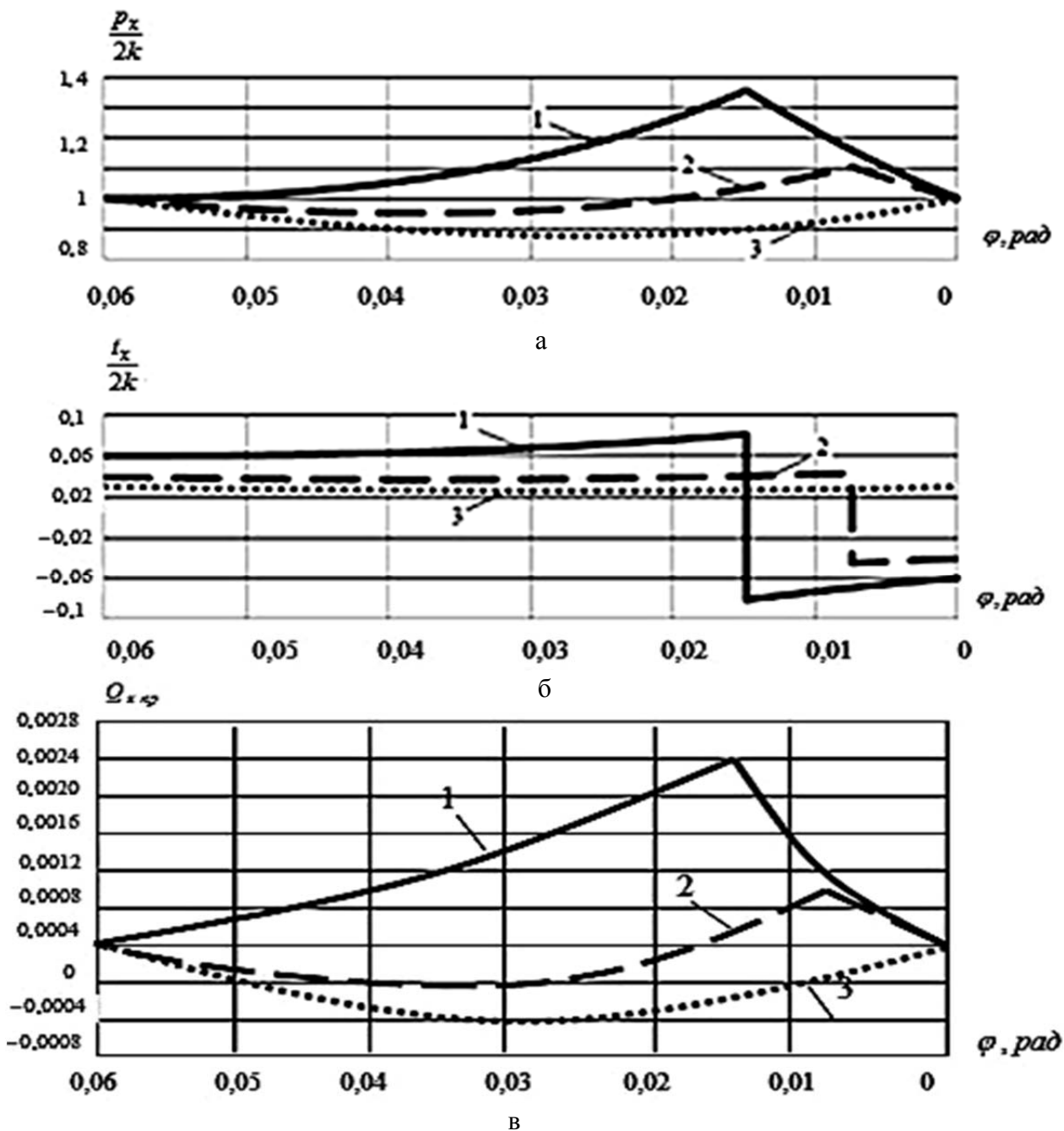


Рис. 2. Контактные напряжения (а, б), и текущая результирующая горизонтальных контактных сил (в) при $t_x = f_y p_x$:

1 – $f_y = 0,06$; 2 – $f_y = 0,0415$; 3 – $f_y = 0,03$

При $\frac{\alpha_y}{f_y} = 1$ (кривая 1) во всех сечениях очага деформации сила Q_{xnp} является сжимающей.

Противоположная картина наблюдается при прокатке в условиях, когда $\frac{\alpha_y}{f_y} = 2$.

В этом случае текущая продольная сила по всей длине очага деформации является растягивающей (кривая 3, рис. 2, в). Она направлена в соответствии с движением полосы и как бы выполняет роль активной (движущей) силы. Ранее обращалось внимание на то, что Q_{xnp} является силой сопротивления, реакцией на действие контактных сил и потому активную роль выполнять не может. Поэтому равновесие металла в валках должно нарушиться (с последующей пробуксовкой) при меньшем угле захвата ($\frac{\alpha_y}{f_y} < 2$). В подтверждение проведен-

ного анализа рассмотрим распределение силы Q_{xnp} вдоль очага деформации при $\frac{\alpha_y}{f_y} = 1,446$

(кривая 2, рис. 2, в). При прокатке в этих условиях на одной части очага деформации текущая сила Q_{xnp} является растягивающей, а на другой – сжимающей, причем площади положительных и отрицательных её значений одинаковы. Для оценки влияния этой силы на характер течения металла, стабильность процесса и предельную захватывающую способность валков удобно ввести понятие средне-интегральной результирующей силы:

$$Q_{ср.пр} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha} Q_{xnp} d\varphi. \quad (4)$$

Результаты расчетов показали, что средняя результирующая в зависимости от параметров прокатки может быть сжимающей, равной нулю и растягивающей. Следуя логике можно предположить, что предельные условия прокатки наступают при $Q_{ср.пр} = 0$.

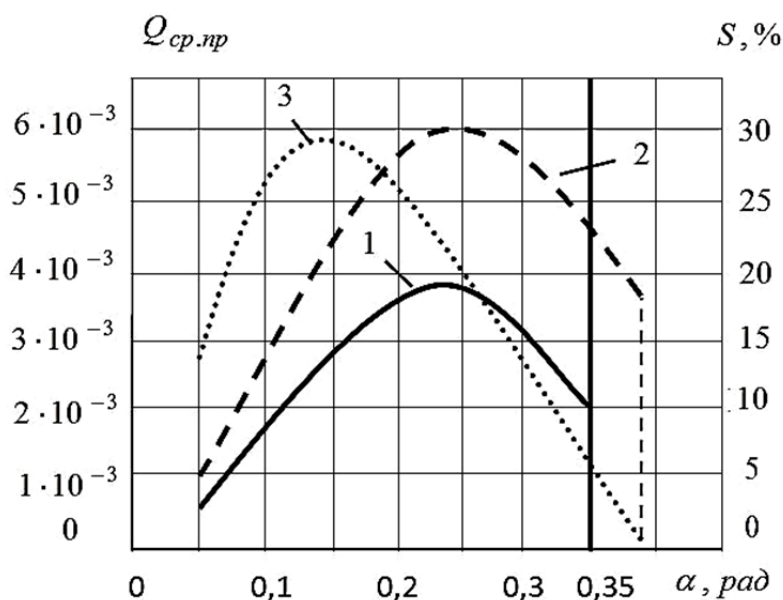


Рис. 3. Теоретическая и экспериментальная зависимость опережения и средней результирующей силы от угла захвата:

1 – опытная зависимость опережения от угла захвата, согласно [5]; 2 – теоретическая зависимость опережения от угла захвата; 3 – изменение средней продольной результирующей сил в очаге деформации

Оценим насколько точно характеризует предельные условия прокатки в установившемся режиме выше сформулированное предположение. Для этого сравним опытные данные А. П. Грудева зависимости опережения от угла захвата [6] с расчетом средней результирующей продольных сил $Q_{ср.пр}$ по предложенной методике. Результаты опытов и расчета $Q_{ср.пр}$ приведены на рис. 3. В этой работе А. П. Грудев обращает внимание на то, что при угле захвата равном 0,34 рад прокатка проводилась со значительным опережением, равным 10 %. Казалось бы в очаге деформации имеется достаточный запас сил трения для того, чтобы дополнительно увеличить угол захвата. Однако при увеличении угла захвата до 0,35 равновесие сил в очаге деформации нарушилось, следствием чего происходила пробуксовка полосы.

Как видно из графиков рис. 3 в момент пробуксовки средняя результирующая $Q_{ср.пр}$ действительно принимает примерно нулевое значение. Аналогичные результаты были получены и при сравнении опытных данных [7] с расчетами по предложенной методике. Следует подчеркнуть, что потеря равновесия полосы в валках происходит при наличии зоны опережения (кривые 2, рис. 3). Это соответствует результатам опытов [6, 7]. Кроме того, предельное отношение $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y}$ меньше двух и равно 1,446, что ближе к производственным данным прокатки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно констатировать, что процесс прокатки устойчиво протекает, пока $Q_{ср.пр}$ является сжимающей силой; если она равна нулю, возникают предельные условия прокатки. В случае если средняя результирующая $Q_{ср.пр}$ становится растягивающей силой, устойчивый процесс прокатки невозможен.

На основе анализа средней результирующей продольных сил пластически деформируемого металла разработана методика оценки предельной захватывающей способности валков в установившемся режиме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долженков Ф. Е. Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) / Ф. Е. Долженков // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 5. – С. 41–44.
2. Хейн А. Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки / А. Я. Хейн. – М.: Металлургиздат, 1941. – 247 с.
3. Целиков А. И. Теория расчета в прокатных станах / А. И. Целиков. – М.: Металлургиздат, 1962. – 494 с.
4. Чекмарев А. П. Анализ формул для определения удельного давления металла на валки. / А. П. Чекмарев, В. А. Токорев // Прокатное производство. Труды НЧМ. – Вып. 3, изд. А. Н. Украинская ССР, 1961. – С. 16–43.
5. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1988. – 283 с.
6. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М.: Металлургиздат, 1973. – 288 с.
7. Чекмарев А. П. Экспериментальное исследование максимальных углов захвата в установившемся процессе прокатки / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев // Обработка металлов давлением: науч. труды ДМетИ. – М.: Металлургия, 1967. – Вып. ЛП. – С. 79–88.

Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;

Лобойко Д. И. – магистр ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск.

E-mail: maximenko_o_p@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.10.2012 г.