

Дніпровський державний технічний університет, г. Каменське

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ПО РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ ПРОДОЛЬНЫМ СИЛАМ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА

**Введение.** В работах [1-3] проведен глубокий теоретический анализ распределения давления металла на валах и удельных сил трения. В них также исследовано изменение продольных нормальных напряжений  $\sigma_x$  пластически деформируемого металла. В зависимости от условий прокатки они могут быть либо сжимающими по всей длине очага деформации, либо на определенной части его растягивающими. Эксперименты [4] подтверждают эти положения теории. Продолжая приведенные выше исследования, определим текущие продольные силы, возникающие в полосе при пластической деформации:

$$Q_{x\text{пр.}} = \sigma_x h_x b_x = (p_x - 2k_{\text{ср}}) R b_x \left( \frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right) \quad (1)$$

или в безразмерном виде:

$$Q_{x\text{пр.}}^* = \frac{Q_{x\text{пр.}}}{2k_{\text{ср}} R b_x} \left( \frac{p_x}{2k_{\text{ср}}} - 1 \right) \left( \frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right) \quad (2)$$

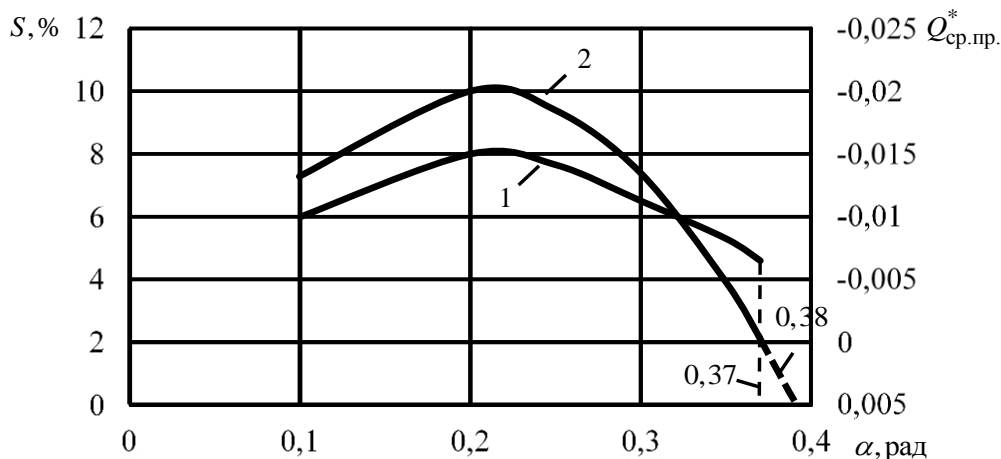
где  $p_x$  – давление металла на валики в очаге деформации;  $h_x$  и  $b_x$  – текущие толщина и ширина полосы;  $2k_{\text{ср}}$  – среднее сопротивление деформации металла;  $R$  – радиус валков;  $\varphi$  – текущий угол захвата.

Далее, рассчитаем среднее результирующее значение этих сил

$$Q_{\text{ср.пр.}} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_{x\text{пр.}} d\varphi \quad (3)$$

Заметим, что результирующая  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$  является силой сопротивления и по определению не может быть направленной по ходу прокатки. Как показано в [5] силу  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ , при прокатке средних и тонких полос, можно найти непосредственно из решения уравнения Т. Кармана. Сравним результаты опытов по определению зависимости опережения от угла захвата [6] средней результирующей  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ , полученными в тех же условиях прокатки, при которых проводился эксперимент. Исследователи проводили опыты на лабораторном стане 210 в валах диаметром 207 мм. Прокатывали свинцовые ступенчатые образцы с тремя перепадами шириной 60 мм на конечную толщину 3,75 мм. Высота последней ступени отвечала предельному обжатию при прокатке клиновидного образца. Средний коэффициент трения в опытах составлял  $f_y \approx 0,26$ . Оперережение измерял методом керновых отпечатков. Результаты опытов представлены на рис. 1 (кривая 1). Как видно, потеря равновесия образцов возникала при оперережении

около 4 % и угле захвата  $\alpha_y = 0,37—0,38$  рад. Описанный опыт наглядно показал, что и при наличии зоны опережения возможно нарушение равновесия полосы в валках, переходящее в частичную или полную пробуксовку металла. Кроме того, в этом случае отношение предельного угла захвата к коэффициенту трения  $(\alpha_y^M / f_y)$  равно не двум, а 1,46. В остальном, приведенные на рис. 1 зависимость (кривая 1) отвечает теории. При аналитическом определении средней результирующей продольных сил в качестве модели трения в очаге деформации была принята кулоновская зависимость ( $t_x = f_y p_x$ ). Результаты расчетов приведены на рис. 1 кривой 2. Как видно, максимальное по абсолютной величине значение сила  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$  принимает в сечении близком к  $\alpha_y = f_y$ . При дальнейшем увеличении угла захвата она уменьшается и при  $\alpha_y = 0,37$  рад средняя результирующая сила  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$  по абсолютной величине составляет  $-0,0003$ . Прокатка при угле захвата 0,37 рад близка к предельному случаю, т.к.  $Q_{\text{ср.пр.}}^* \approx 0$ . Следовательно это равенство характеризует опытные предельные условия прокатки.



1 – опытные данные А. П. Чекмарёва, В. И. Прокофьева и других по определению опережения;

2 – теоретическая кривая изменения результирующей  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ .

Рисунок 1 – Зависимость опережения и средней результирующей сила от угла захвата

На рис. 2 показаны эпюры распределения  $\frac{p_x}{2k_{\text{ср}}}$ ;  $\frac{t_x}{2k_{\text{ср}}}$  и  $Q_{\text{хпр}}^*$ , соответствующие этому случаю. Как следует из рисунка угол нейтрального сечения равен  $\gamma = 0,0489$  рад, а площади положительных и отрицательных значений  $Q_{\text{хпр}}^*$  почти равны между собой, т.е. действительно средняя результирующая продольных сил близка к нулю  $Q_{\text{ср.пр.}}^* = -0,0004$ . Казалось бы теоретически можно и дальше увеличивать угол захвата, например до  $\alpha_y = 0,37$  рад, так как зона опережения ещё не выклинилась из очага деформации. Этот случай представлен эпюрами на рис. 3.

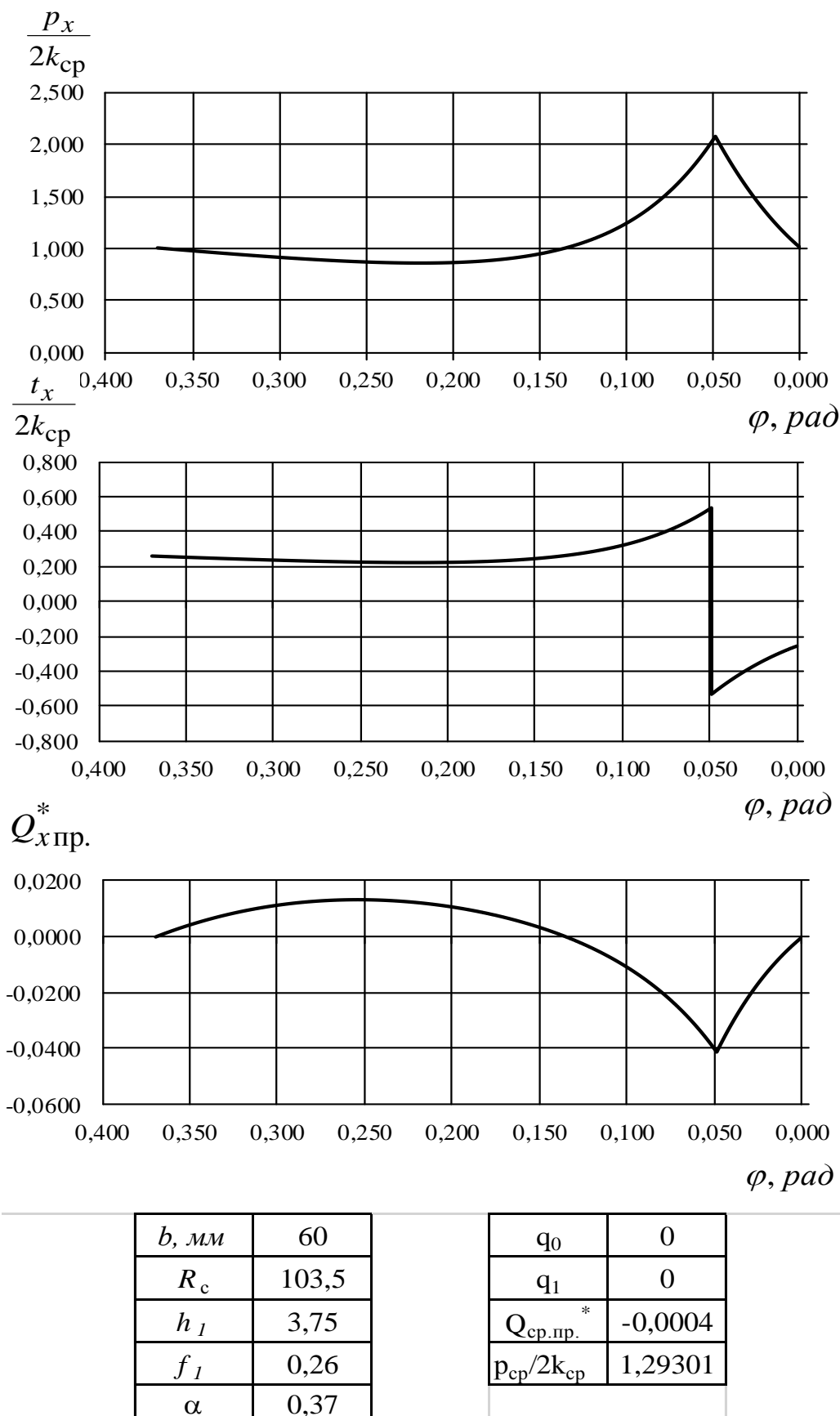


Рисунок 2 – Распределение контактных напряжений и внутренних продольных сил в предельном случае прокатки  $\alpha_y = 0,37$  рад;  $f_y = 0,26$

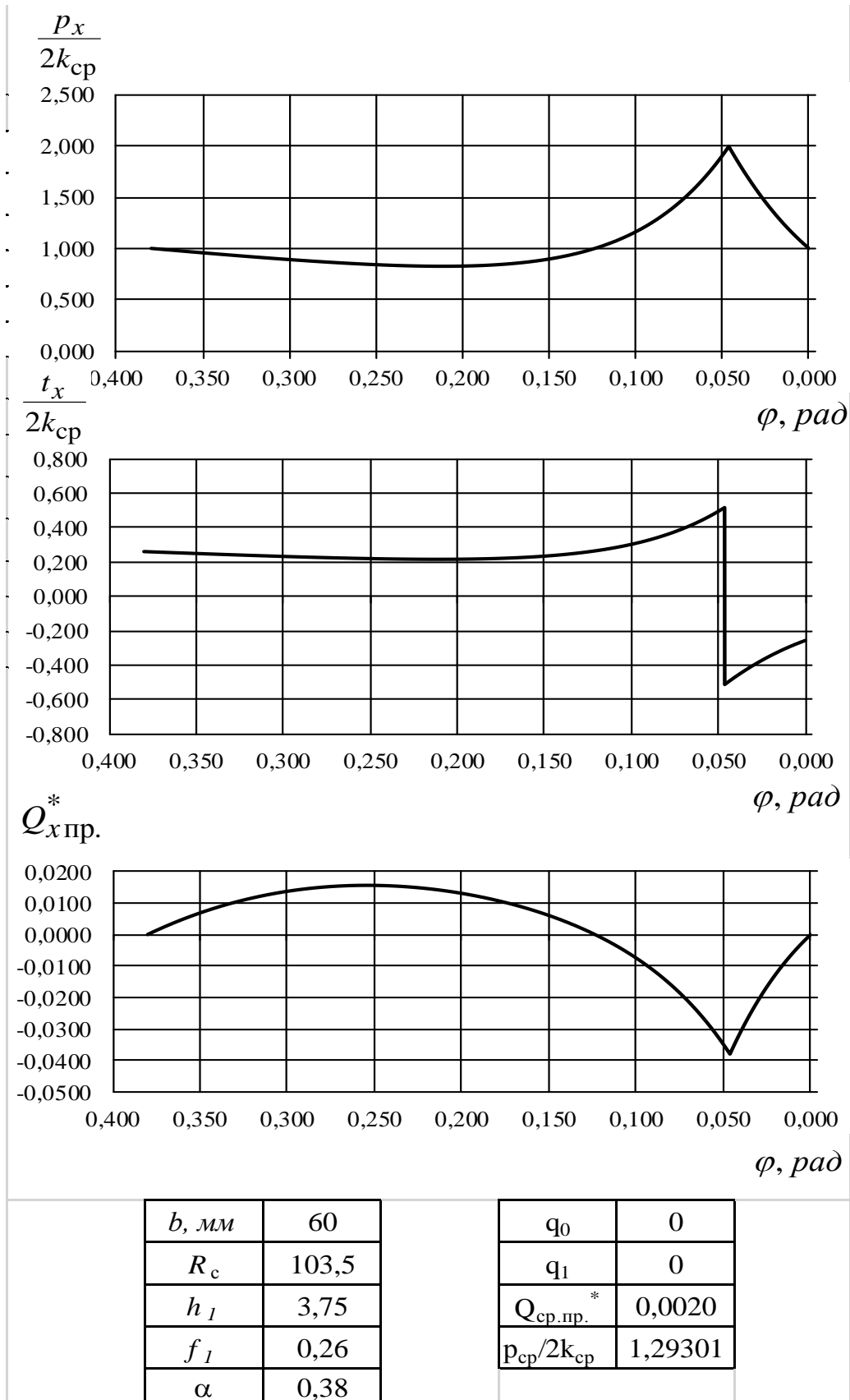


Рисунок 3 – Распределение контактных напряжений и внутренних продольных сил при теоретически невозможном случае прокатки при наличии зоны опережения  $\alpha_y = 0,38$  рад  $\alpha_y$ ;  $f_y = 0,26$

Как видно результирующая сила становится положительной ( $Q_{\text{ср.пр.}}^* = 0,0028$ ), вектор которой совпадает с направлением движения полосы и она вынужденно помогает процессу прокатки. Но ведь выше упоминалось, что  $Q_{\text{ср.пр.}}^*$ , являясь силой сопротивления, активную роль в очаге деформации выполнять не может.

Аналитически изменение знака средней результирующей продольных сил означает то, что в очаге деформации недостаточно контактных втягивающих металл в валки сил для устойчивого ведения процесса даже при наличии зоны опережения (рис. 3,  $\gamma = 0,048$ ). Закljučая эту часть исследования отметим, что процесс прокатки будет совершаться устойчиво, без частичных или полных пробуксовок, если средняя результирующая продольных сил принимает отрицательные значения, т.е. вектор действия её должен быть направлен противоположно движению полосы. При  $Q_{\text{ср.пр.}}^* = 0$  возникают предельные условия прокатки, если эта сила положительна – процесс невозможен. Таким образом, результаты опытов [6] и проведенный анализ показывают, что условия  $\alpha_y = 2f_y$  и  $\gamma = 0$  не всегда определяют предельный случай прокатки.

Одним из противоречивых положений теории является вопрос о возможности осуществления устойчивого процесса прокатки при однозонном скольжении металла в очаге деформации или при полном отставании полосы от валков («отрицательном» опережении). В опытах [7-9] и других зафиксирован устойчивый процесс холодной прокатки с эффективными (вязкими) технологическими смазками при однозонном скольжении полосы в валках. Такие результаты получены при значительной толщине смазочной плёнки в контактной зоне. На основе предложенной методики, оценим продольную устойчивость полосы в валках при однозонном скольжении. В исследовании будет исходить из того, что в очаге деформации выполняется закон трения И. Ньютона.

$$\frac{t_x}{2k_{\text{ср}}} = \eta \frac{dv}{dy} \approx \frac{\eta_{\text{ср}} v_{\text{в}}}{2k_{\text{ср}} \xi_{\text{ср}}} \left[ 1 + (S + 1) \frac{h_1}{h_x} \right], \quad (4)$$

где  $A = \frac{\eta_{\text{ср}} v_{\text{в}}}{2k_{\text{ср}} \xi_{\text{ср}}}$  – усредненный гидродинамический параметр;  $\eta_{\text{ср}}$  и  $\xi_{\text{ср}}$  – средние динамическая вязкость смазки и толщина масляной плёнки в очаге деформации.

Значение гидродинамического параметра можно определить по известным в теории прокатки формулам, например [10, 11].

Решение уравнения Т. Кармана с учётом модели трения (4) приведено в [2, 5]. С помощью граничного условия на выходе полосы из валков ( $p_x = 2k_{\text{ср}}$ ) получена связь между параметром  $A$  и опережением. Расчеты выполнены при следующих условиях прокатки:  $R = 100$  мм;  $h_0 = 1,0$  мм;  $\Delta h = 0,36$  мм ( $\Delta h$  – абсолютное обжатие). Пусть гидродинамический параметр принимает значения: 0,25; 0,22 и 0,17, тогда опережение, соответственно, равно: 0,02; 0 и  $-0,043$ . Результаты вычислений приведены в виде эпюр на рис. 4. При  $S = 2\%$  (кривые 3) распределение давления имеет куполообразный вид, максимум которого достаточно удален от нейтрального сечения. Удельные силы трения развиты, имеется значительная зона опережения. Текущие продольные силы  $Q_{\text{х.пр.}}^*$  по всей длине очага деформации являются сжимающими,  $Q_{\text{ср.пр.}}^* = -0,00038$ , что характеризует процесс как устойчивый. При прокатке с нулевым опережением (рис. 4, кривые 2) продольные силы  $Q_{\text{х.пр.}}^*$  несколько уменьшаются по абсолютной ве-

личине, хотя продолжают оставаться сжимающими, результирующая  $Q_{\text{ср.пр.}}^* = -0,00023$ , т.е. и в этом случае процесс остается теоретически устойчивым. При прокатке с «отрицательным» опережением (кривые 1, рис. 4) давление вблизи выхода металла из валков

$\frac{P_x}{2k_{\text{ср}}} < 1$ . В этой части очага деформации появляются продольные нормальные растя-

гивающие напряжения  $\frac{\sigma_x}{2k_{\text{ср}}}$ . Текущие силы  $Q_{\text{хпр.}}^*$  по длине очага деформации разно-

направлены, что вызывает ещё большее уменьшение по абсолютному значению результирующей силы  $Q_{\text{ср.пр.}}^* = -0,000051$ , но процесс прокатки продолжает оставаться устойчивым хотя опережение  $S = -4,3\%$ .

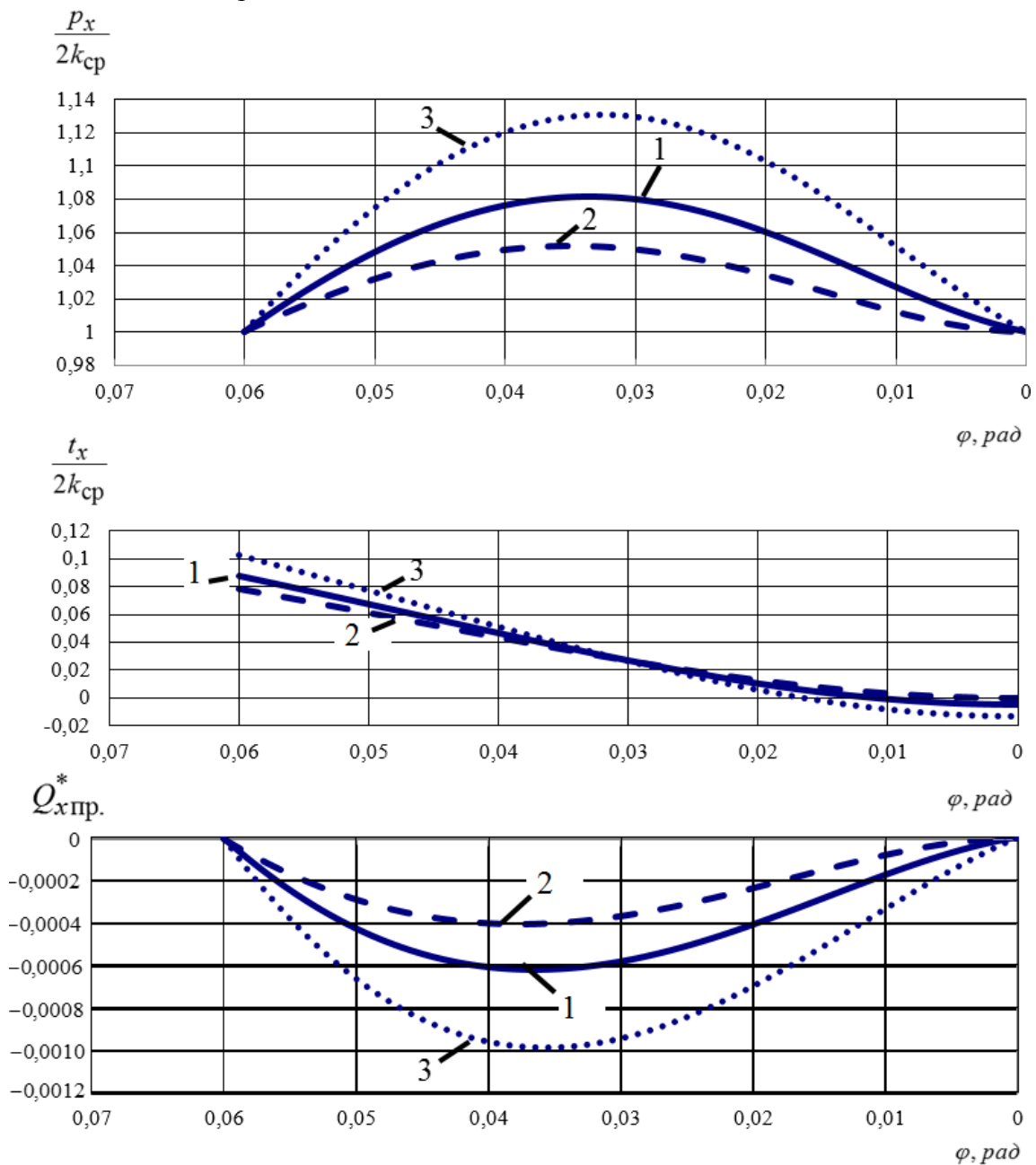


Рисунок 4 – Контактные напряжения и текущие продольные силы при прокатке с «отрицательным» опережением в условиях гидродинамического трения

Дальнейший анализ показывает, что только при  $S = -5\%$  средняя результирующая сила изменяет свой знак (направление), что теоретически предопределяет невозможность процесса прокатки.

Таким образом, результаты теоретического исследования показали, что в определенных условиях процесс прокатки может протекать устойчиво без пробуксовок при однозонном скольжении полосы в очаге деформации, что находит экспериментальное подтверждение.

**Выводы.** Разработана методика оценки продольной устойчивости полосы в валках, которая позволила теоретически обосновать результаты экспериментальных исследований, связанных с особыми предельными условиями процесса прокатки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хейн А. Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки / А. Я. Хейн. – М. : Metallurgizdat, 1941. – 247 с.
2. Целиков А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А. И. Целиков. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
3. Чекмарёв А. П. О некоторых вопросах теории прокатки / А. П. Чекмарёв // Теория прокатки : Матер. науч.-техн. конф. «Теоретические проблемы прокатного производства». – М. : Metallurgizdat. – 1962. – С. 31–56.
4. Чекмарёв А. П. Анализ процесса прокатки по данным о распределении контактных напряжений / А. П. Чекмарёв, П. Л. Клименко // Теория прокатки: материалы Всесоюз. научно-техн. конф. «Теоретические проблемы прокатного производства». Под ред. А. П. Чекмарева. – М. : Metallurgiya. – 1975. – С. 33–37.
5. Максименко О. П. Продольная устойчивость в валках с анализом контактных условий: монография / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, М. К. Измайлова. – Днепро-дзержинск : ДДТУ, 2016. – 212 с.
6. Экспериментальное исследование максимальных углов захвата при установившемся процессе прокатки / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев, В. П. Галицкий [и др.] // Обработка металлов давлением : Научные труды, ДМетИ. – М. : Metallurgiya. – 1967. – Вып. LI. – С. 79–88.
7. Павлов И. М. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке / И. М. Павлов, В. К. Белосевич // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 10. – С. 46–49.
8. Mizuno T. An experimental research on cold rolling. 1. Re-port: Estimating the mechanism of the lubrication / T. Mizuno // Japan Society of Technology of Plasticity. – 1966. – № 7. – P. 383–389.
9. Николаев В. А. Технологические параметры прокатки с вязкими смазками / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 4. – С. 29–32.
10. Максименко О. П. Основы трибологии / О. П. Максименко, О. Є. Лейко – Дніпро-дзержинськ : ДДТУ, 2005. – 192 с.
11. Мазур В. Л. Теория и технология прокатки (Гидродинамические эффекты смазки и микрорельеф поверхности) / В. Л. Мазур, В. И. Тихомиров. – Киев : «АДЕФ Украина», 2018. – 560 с.