

ЛИТЕРАТУРА

1. Максименко О. П. Элементы контактной гидродинамики в исследовании толщины смазочной пленки при прокатке. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1991. № 2. С. 23–26.
2. Максименко О. П., Подберезный Н. П. Исследование контактно-гидродинамической смазки при прокатке. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1994. № 8. С. 12–14.
3. Максименко О. П., Лейко О. Е. Основы трибологии : навч. посіб. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2005. 192 с.
4. Грудев А. П., Максименко О. П., Иванов К. А. Влияние микронеровностей поверхности валков и полосы на формирование смазочного слоя в очаге деформации при прокатке. *Обработка металлов давлением : Научные труды ДМетИ*. 1976. С. 198–205.
5. Кондир Д. С. Контактная гидродинамическая смазка деталей машин. М. : Машиностроение, 1976. 304 с.
6. Дроздов Ю. Н. Арагов В. Г. Расчет коэффициента трения в тяжело нагруженном контакте при скольжении. *Машиноведение*. 1975. № 6. С. 81–83.
7. Гаркунов Д. Н. Триботехника. М. : Машиностроение, 1985. 424 с.
8. Белосевич В. К., Нетесов Н. П. Совершенствование процесса холодной прокатки. М. : Металлургия, 1971. 270 с.
9. Белосевич В. К. Трение, смазка, теплообмен при холодной прокатке листовой стали. М. : Металлургия, 1989. 256 с.
10. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке. М. : Металлургия, 1973. 288 с.
11. Грудев А. П., Тилик В. Т. Технологические смазки в прокатном производстве. М. : Металлургия, 1975. 368 с.
12. Николаев В. А. Технология прокатки листов и полос: учеб. пособие. К. : УМК ВО, 1990. 168 с.

Поступила в редколлегию 02.09.2020.

УДК.621.771.01

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.7
 МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор
 НИКУЛИН А.В., к.т.н., доцент
 ЛОБОЙКО Д.И., к.т.н., доцент
 ХАЕНКО Д.А., магистр

Днепропетровский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРИ ПРОКАТКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ

Введение. Прокатка металла на непрерывных и реверсивных станах часто совершается с натяжением полосы. Межклетевое натяжение раската уменьшает давление в очагах деформации, что снижает поперечную разнотолщинность прокатываемого листа, а также предотвращает смещение его к краю бочки валков. Регулируя межклетевые натяжения, можно также обеспечить оптимальные, с точки зрения энергосбережения, условия прокатки [1, 2].

Физическая сущность непрерывной прокатки с натяжением подробно изложена в книге В.Н. Выдрин [3].

В работе [4] приведены результаты оригинального экспериментального исследования влияния натяжения полосы на распределение контактных нормальных напряжений, усилие прокатки, кинематику процесса и другие параметры. Одним из важных выводов выполненного исследования является то, что установлено существенное влияние заднего натяжения на энергосиловые параметры и сравнительно слабую их зависимость от переднего.

Захватывающая способность валков в установившемся процессе деформации в значительной мере зависит от режима натяжения полосы, особенно в тех случаях, когда сила заднего натяжения существенно превышает силу переднего. По-видимому, и продольная устойчивость полосы в валках, обеспечивающая стабильность прокатки и поддерживающая равновесие металла в очаге деформации, также зависит от режима натяжения полосы. В работах [5–7] предложена новая методика оценки стабильности процесса, исходя из расчета средней результирующей продольных сил пластически деформируемого металла.

Результаты работы. Анализируя характер распределения давления по длине контактной зоны при прокатке полосы с натяжением, можно выделить два сечения φ_1 и φ_2 (рис. 1), в которых $p_x = 2k$ ($2k$ – сопротивление деформации металла). Из уравнения пластичности следует, что при тонколистовой прокатке в этих сечениях внутренние продольные нормальные напряжения σ_x равны нулю. Заметим, что направление действия этих напряжений в промежутке от входа в очаг деформации до сечения φ_1 совпадает с движением полосы (рис. 1), что соответствует равновесию выделенного текущего объема металла V_{0x} . На участке от выхода полосы из валков до сечения φ_2 напряжения σ_x направлены противоположно движению металла, что соответствует равновесию текущего объема V_{1x} . В сечениях, где $\frac{p_x}{2k} > 1$ продольные напряжения σ_x являются сжимающими и также направлены противоположно движению полосы.

Приведенные рассуждения позволяют построить качественную эпюру изменения продольных нормальных напряжений, которая приведена на этом же рисунке. Конкретное значение этих напряжений можно рассчитывать, используя эпюру нормальных давлений полученную, например, при численном решении уравнения Т. Кармана [8], что позволяет определить внутренние продольные силы:

$$Q_{xnp} = \sigma_x h_x b_{cp}$$

или в безразмерной форме:

$$Q_{xnp}^* = \frac{\sigma_x}{2k} \cdot \left(\frac{h_1}{R} + \phi^2 \right), \quad (1)$$

где h_x, h_1 – текущая толщина полосы и ее значение на выходе металла из валков;

b_{cp} – средняя ширина полосы;

ϕ – текущий угол захвата;

R – радиус валков.

Имея текущее значение Q_{xnp}^* , можно определить среднюю результирующую продольную силу пластически деформируемого металла при прокатке с натяжением полосы

$$Q_{срnp}^* = \frac{1}{\alpha} \left(\int_{\phi}^{\alpha} Q_{xnp}^* d\phi + \int_{\phi_2}^{\phi_1} Q_{xnp}^* d\phi + \int_0^{\phi_2} Q_{xnp}^* d\phi \right). \quad (2)$$

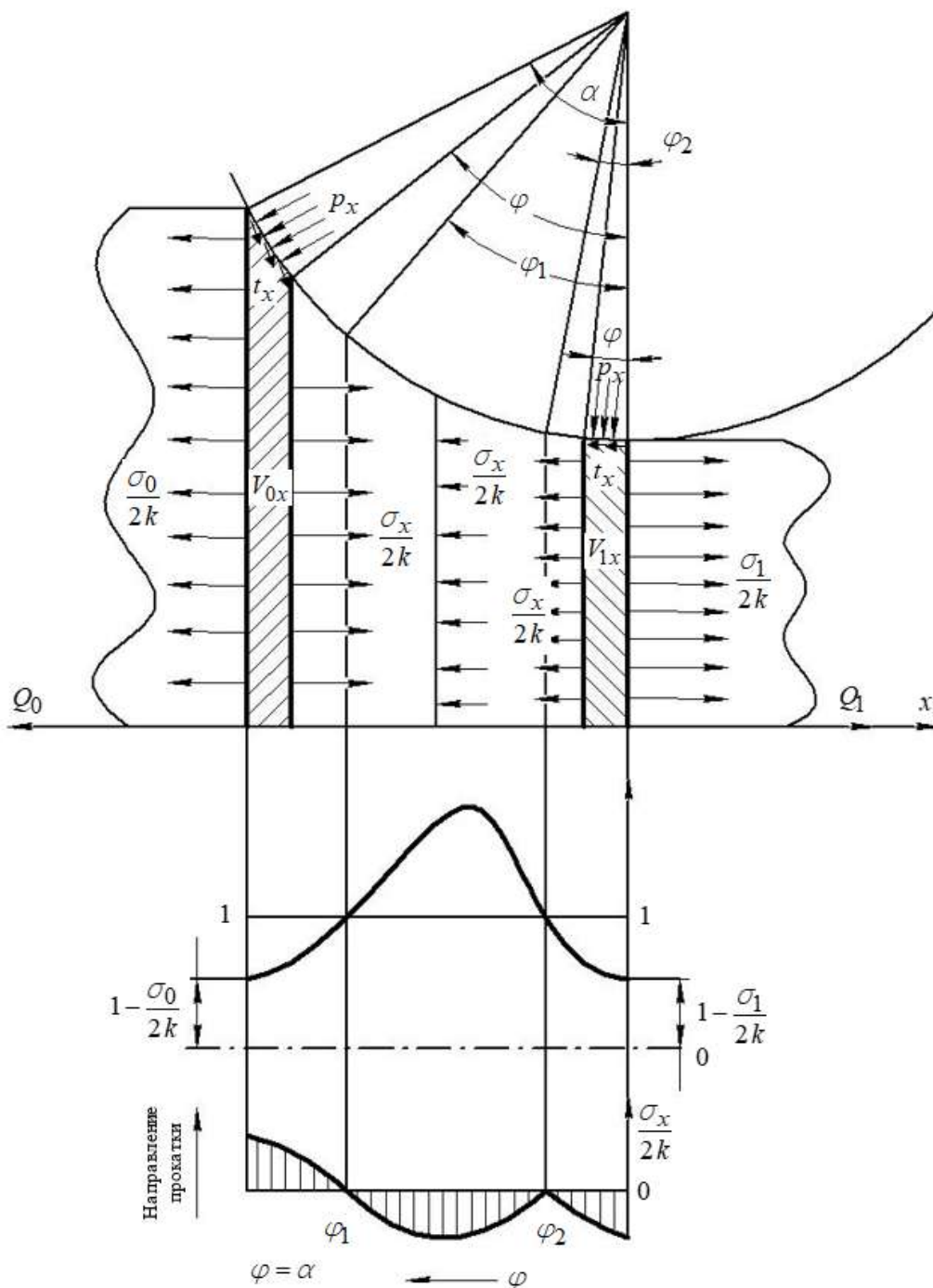


Рисунок 1 – Распределение давления и продольных напряжений

Как показано в работах [5–7] результирующая $Q_{прпр}^*$, являясь силой сопротивления при стабильном процессе деформации, направлена противоположно движению полосы, т.е. принимает значения $Q_{прпр}^* < 0$. Далее получается предельное условие прокатки в установившемся режиме

$$Q_{српр}^* = 0. \quad (3)$$

Оно является более жестким по сравнению с граничным условием $\gamma = 0$ (γ – угол нейтрального сечения) и потому при оценке стабильности процесса в случае прокатки с натяжением полосы выражение (3) играет важную роль, особенно, когда $Q_0 > Q_1$.

В результате расчета средней результирующей силы Q_{np}^* определим влияние режима натяжения полосы на предельную устойчивость металла в валках, а также оценим предельные условия прокатки, изменение момента в очаге деформации и угла нейтрального сечения. Теоретический анализ проводили, исходя из решения уравнения Т. Кармана с удельными силами трения, заданными моделью Кулона. Приняты следующие параметры прокатки:

$$h_1 = 4 \text{ мм}; \quad \frac{l_d}{h_{cp}} = 3,3; \quad \varepsilon = 0,5 \text{ (}\varepsilon \text{ – относительное обжатие);}$$

$$R = 100 \text{ мм}; \quad \alpha = 0,2 \text{ рад}; \quad f_y = 0,2.$$

Расчетные значения силы Q_{np}^* и других параметров при разных условиях натяжения полосы приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость средней результирующей силы и других параметров прокатки от величины натяжения полосы

Номер п.п.	Параметры прокатки					
	$\frac{\sigma_1}{2k}$	$\frac{\sigma_0}{2k}$	$Q_{cp\ np}^*$	$\frac{P_{cp}}{2k}$	γ	M_{np}^*
1	0	0	-0,0095	1,21	0,0488	0,05
2	0,1	- // -	-0,0084	1,18	0,0542	0,43
3	0,2	- // -	-0,0075	1,14	0,0602	0,036
4	0,3	- // -	-0,0069	1,10	0,0670	0,029
5	0,4	- // -	-0,0067	1,04	0,0748	0,021
6	0,5	- // -	-0,0070	0,98	0,0838	0,013
7	0,6	- // -	-0,0080	0,91	0,0947	0,004
8	0,7	- // -	-0,0099	0,83	0,1080	-0,005
9	0,05	0	-0,0060	1,15	0,044	0,051
10	0,07	- // -	-0,0045	1,12	0,042	0,052
11	0,08	- // -	-0,0037	1,10	0,041	0,052
12	0,1	- // -	-0,0022	1,07	0,039	0,053
13	0,11	- // -	-0,0015	1,06	0,037	0,053
14	0,12	- // -	-0,0007	1,05	0,036	0,054
15	0,13	- // -	0	1,03	0,035	0,054
16	0,14	- // -	+0,0008	1,02	0,034	0,055
17	0,05	0,05	-0,0054	1,13	0,0465	0,048
18	0,08	0,08	-0,0030	1,08	0,0450	0,048
19	0,1	0,1	-0,0014	1,05	0,0439	0,047
20	0,12	0,12	+0,0002	1,02	0,0427	0,047

Примечание: $M_{np}^* = \frac{M_{np}}{2kR^2 b_{cp}}$.

Как видно, зависимость средней результирующей силы Q_{np}^* от переднего удельного натяжения $\frac{\sigma_1}{2k}$ не является однозначной. При изменении этого натяжения в пределах от 0 до 0,5 (практическая область) с его увеличением сила Q_{np}^* по абсолютной величине уменьшается, что указывает на некоторую потерю продольной устойчивости полосы в валках. Для объяснения результатов исследования приведем эпюры контактных и внутренних продольных нормальных напряжений, а также текущей силы Q_{xnp}^* , рассчитанных при натяжениях полосы $\frac{\sigma_1}{2k}$ равных 0 и 0,2 (рис. 2 и рис. 3).

Анализируя эти эпюры видно, что с увеличением переднего натяжения возрастает угол нейтрального сечения. При этом увеличивается зона опережения за счет зоны отставания, что приводит к снижению втягивающих металл в валки сил и, следовательно, отрицательно сказывается на устойчивости процесса. С другой стороны при увеличении $\frac{\sigma_1}{2k}$ в очаге деформации развивается зона продольных растягивающих нормальных напряжений $\frac{\sigma_x}{2k}$, что способствует стабильности процесса прокатки. Оба указанных фактора влияют на характер распределения внутренних продольных сил Q_{xnp}^* , а, следовательно, и на среднюю результирующую силу Q_{cpnp}^* . При изменении $\frac{\sigma_1}{2k}$ от 0 до 0,4 преобладающее действие оказывает угол нейтрального сечения. Поэтому с увеличением переднего натяжения в указанном диапазоне результирующая Q_{cpnp}^* уменьшается по абсолютному значению. При дальнейшем увеличении переднего натяжения область растягивающих напряжений $\frac{\sigma_x}{2k}$ охватывает значительную часть очага деформации, что сказывается на результирующей Q_{np}^* и увеличении продольной устойчивости. Как следует из табл. 1 во всем диапазоне изменения переднего удельного натяжения процесс совершается стабильно ($Q_{np}^* < 0$) даже при переходе прокатки в протяжку, когда деформируемый металл передает свою энергию валкам (см. табл.1, строка 8). В этих условиях угол γ превышает половину угла захвата. Среднее давление $\frac{P_{cp}}{2k}$ и момент в очаге деформации при увеличении переднего натяжения уменьшаются, что соответствует теории.

С увеличением заднего натяжения средняя результирующая Q_{np}^* резко изменяется и при $\frac{\sigma_0}{2k} = 0,13$ возникают предельные условия прокатки, т.к. эта сила принимает нулевое значение. Дальнейшее увеличение заднего натяжения приводит к смене знака средней результирующей внутренних продольных сил, она как бы изменяет свою функцию, помогая вести процесс прокатки. Но будучи силой сопротивления, активную роль играть в очаге деформации не может. Поэтому при $\frac{\sigma_0}{2k} = 0,14$ процесс невозможен, хотя при этом $\gamma = 0,034$ рад. В работах [9,10] экспериментально подтверждена

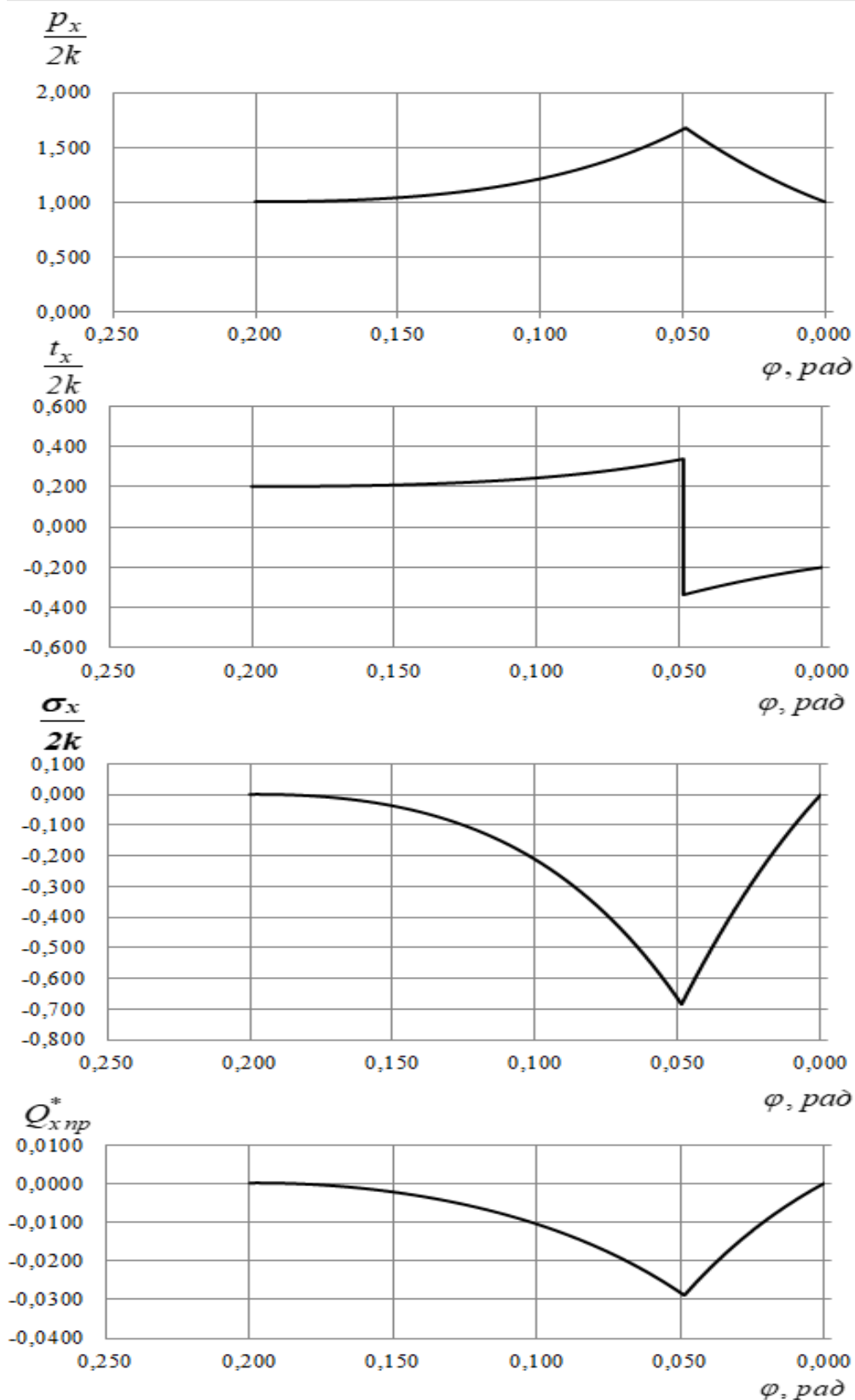


Рисунок 2 – Эпюры контактных и внутренних продольных напряжений, текущей горизонтальной силы пластически деформируемого металла при прокатке без натяжения

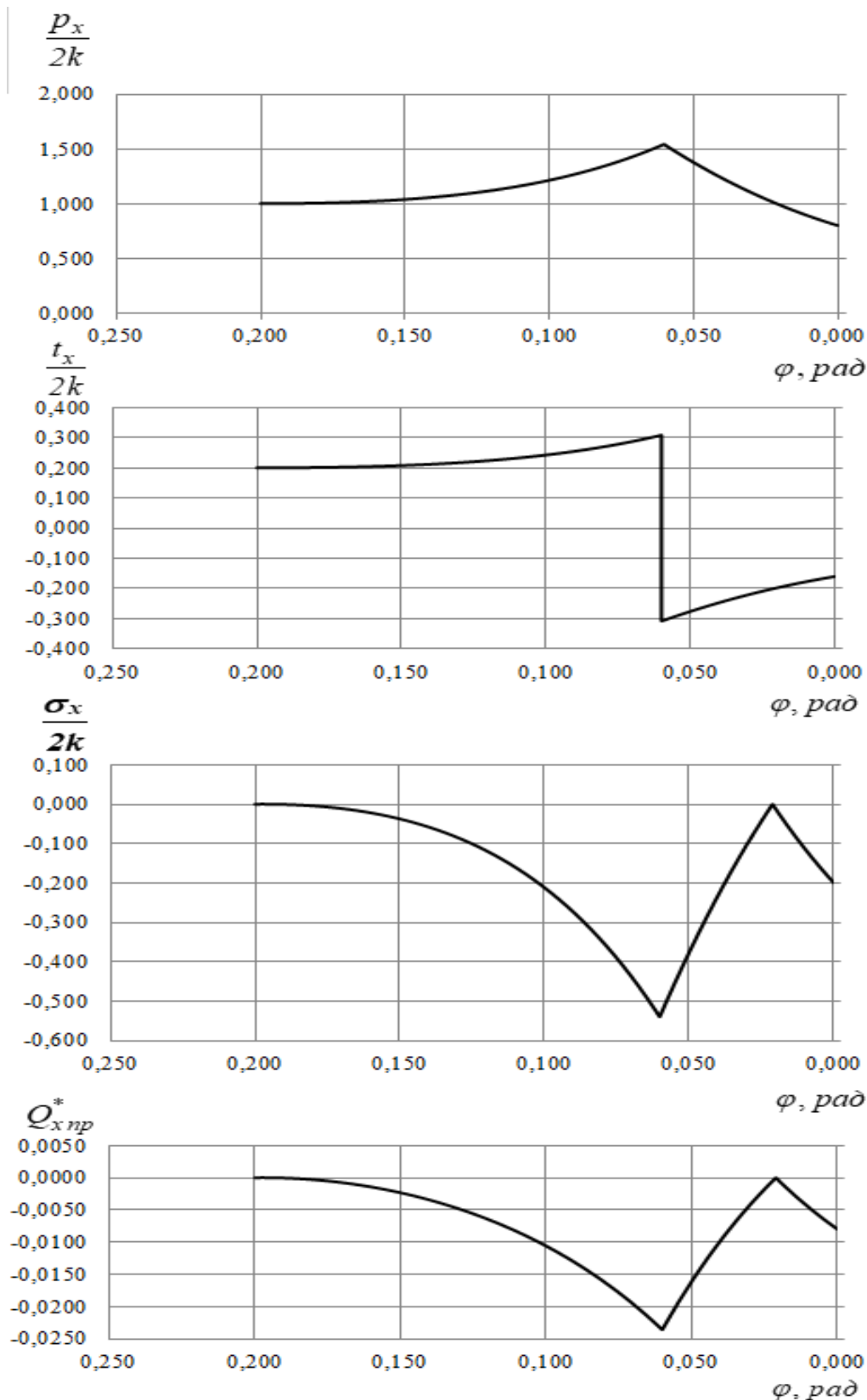


Рисунок 3 – Эпюры нормального давления, удельных сил трения и продольных напряжений, а также текущей продольной внутренней силы при прокатке с передним натяжением

возможность потери равновесия полосы в валках при наличии опережения. Так, А.П. Грудев [10] утверждает, что при прокатке образца с обжатием $\Delta h = 11,2$ мм ($\alpha_y = 0,34$ рад) опережение составляло $S = 10,1$ %, но при незначительном увеличении обжатия до 11,6 мм металл начинал буксовать в валках. С увеличением переднего и заднего натяжения продольная устойчивость полосы существенно снижается и уже при $\frac{\sigma_0}{2k} = \frac{\sigma_1}{2k} = 0,12$ стабильный процесс прокатки становится невозможным (см. строку 20

табл. 1). Обратим внимание на то, что параметры прокатки были подобраны специально таким, чтобы наиболее ярко проявилось различие в граничных условиях натяжения. Если принять $f_y = 0,26$ при остальных неизменных параметрах, то предельное условие

$$(3) \text{ наступает при } \frac{\sigma_0}{2k} = \frac{\sigma_1}{2k} = 0,22.$$

Выводы. С помощью методики, предложенной в работе [6], изучено влияние режима натяжения полосы на продольную устойчивость и стабильность процесса. Установлено, что заднее натяжение существенно влияет на среднюю результирующую продольных сил пластически деформируемого металла, тем самым предопределяет границы устойчивого процесса. Предельные условия в установившемся процессе, изложенные в настоящей работе и принятые теорией существенно отличаются, что следует учитывать при непрерывной прокатке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василев Я. Д., Самокиш Д. Н. Разработка энергосберегающих режимов натяжения на непрерывных станах холодной прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 2. С. 34 – 38.
2. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. М. : Металлургия, 1995. 368 с.
3. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов. Свердловск : Металлургиздат, 1960. 255 с.
4. Королев А. А. Новые исследования деформации металла при прокатке. М. : Металлургиздат, 1953. 268 с.
5. Максименко О. П., Лобойко Д. И. Методика оценки устойчивости процесса прокатки по результирующей продольных сил пластически деформируемого металла. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське : ДДТУ. 2018. Тематичний випуск. «Механіка і пластична деформація металу». С. 52–58.
6. Максименко О. П., Лобойко Д. И., Измайлова М. К. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий : монография. Днепропетровск : ДГТУ, 2016. 213 с.
7. Максименко О. П., Измайлова М. К., Лобойко Д. И. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 1. С. 59–62.
8. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки. М. : Металлургия, 1983. 168 с.
9. Экспериментальное исследование максимальных углов захвата при установившемся процессе прокатки / А. П. Чекмарев и др. *Обработка металлов давлением : Научные труды ДМетИ*. М. : Металлургия, 1967. Вып. 52. С. 79–88.
10. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков. М. : СП Интермет Инжиниринг, 1998. 283 с.

Поступила в редколлегию 04.09.2020.