

УДК 621.771.01

Максименко О. П.  
Романюк Р. Я.

### АНАЛИЗ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ ПО ОПЫТНЫМ ЭПЮРАМ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В работах [1–3] показано, что индикатором устойчивости процесса прокатки по условиям захвата является средняя результирующая горизонтальных сил в очаге деформации. В зависимости от величины и направления этой силы процесс прокатки может протекать устойчиво без частичных пробуксовок, вестись в предельных условиях или быть невозможным. На этой основе разработана методика определения предельных условий прокатки в установившемся режиме и показано, что в одних условиях процесс может прерываться при значительном опережении, в других – возможна пластическая деформация при однозонном скольжении металла в валках.

Целью данной работы является исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации по опытным эпюрам распределения контактных напряжений и её связь с кинематическими параметрами деформации.

Безразмерная средняя результирующая горизонтальных сил  $Q_{cp}^*$  тесно связана с кинематическими параметрами прокатки и, в частности, с опережением металла, что видно из графиков на рис. 1. Теоретический расчёт опережения проводился по известной формуле Головина [4]. При определении силы  $Q_{cp}^*$  исходили из методики, приведенной в [1]. Опытные значения опережения и условия прокатки взяты из работы А. П. Грудева [4]: диаметр валков  $D = 194,6$  мм, конечная толщина образцов  $h_1 = 1,1$  мм, коэффициент трения  $f_y = 0,25$ .

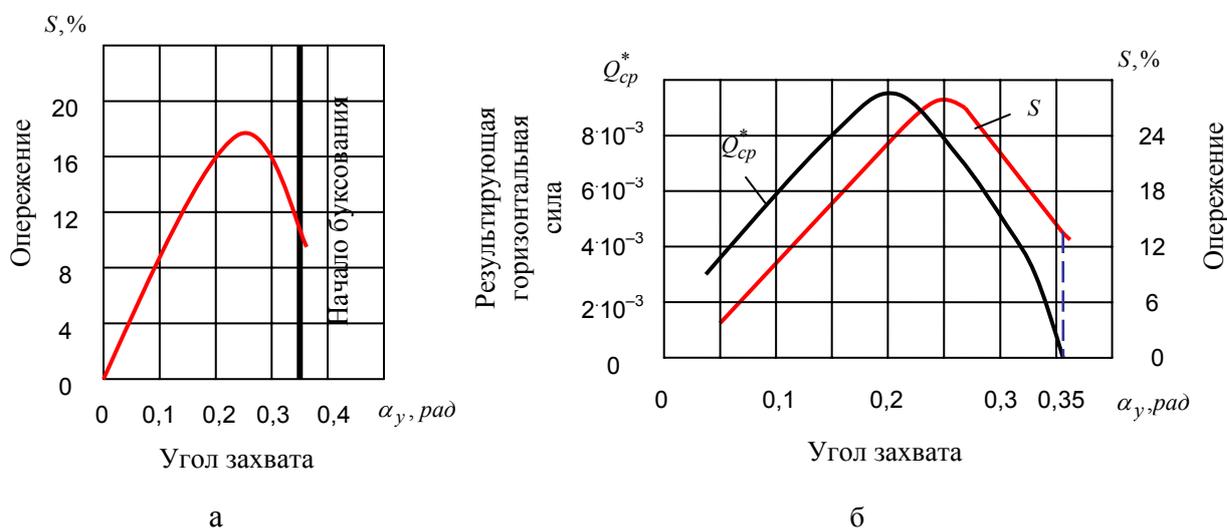


Рис. 1. Зависимость опережения и силы  $Q_{cp}^*$  от угла захвата:

а – практические данные А. П. Грудева; б – результаты теоретического исследования

Как следует из рис. 1 зависимость опережения и силы  $Q_{cp}^*$  от угла захвата  $\alpha_y$  является качественно одинаковой. Опытные и расчётные значения опережения весьма близки. Важно подчеркнуть, что при  $\alpha_y = 0,34$  рад сила  $Q_{cp}^*$  принимает нулевое значение, что свидетельствует о предельных условиях прокатки. При небольшом увеличении угла захвата начинается пробуксовка, причём она происходит при значительном опережении (около 10 %).

Приведённые графики убеждают в том, что сила  $Q_{cp}^*$  отражает реальную устойчивость процесса прокатки по условиям захвата и сигнализирует о возможности пробуксовки металла в очаге деформации.

Проанализируем значение средней результирующей горизонтальных сил в размерной форме  $Q_{cp}$ , используя опытные эпюры контактных напряжений. По-видимому, эта сила включает в себя составляющие, связанные непосредственно с пластической деформацией и с ускорением частиц металла в очаге деформации. Учитывая, что результирующая сила  $Q_{cp}$  не уравновешена внешними силами, оценим её величину с позиции динамики движения системы материальных точек.

В технической литературе приведено значительное количество экспериментальных эпюр контактных напряжений при прокатке, полученных разными методами. Для примера обратимся к опытным данным исследования контактных напряжений П. Л. Клименко [5] и Д. И. Пирязева [6]. Условия прокатки, при которых измерялись контактные напряжения, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры прокатки при исследовании контактных напряжений

№ п/п	Толщина образцов, мм		Ширина $b$ , мм	Диаметр валков $D$ , мм	Угол захвата $\alpha_y$ , рад	Параметр формы $\frac{l_d}{h_{cp}}$
	$h_0$	$h_1$				
1	Опыты [5], образцы стальные, температура нагрева – 1180 °С					
	6	4,2	50	210	0,131	2,7
2	Опыты [6], образцы свинцовые					
	48,5	47	50	150	0,141	0,22

На рис. 2 показаны графики распределения нормального давления  $p_x$  и удельных сил трения  $t_x$  при прокатке стальных образцов [5]. Ниже представлено распределение напряжений  $q_x$  по длине очага деформации и текущей равнодействующей горизонтальных сил  $Q_x$ , рассчитанных по формулам (1) и (2) соответственно:

$$q_x = -p_x \sin \varphi + t_x \cos \varphi; \quad (1)$$

$$Q_x = R \cdot b \int_{\varphi}^{\alpha} q_x d\varphi, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – текущий угол в очаге деформации.

Как следует из графика, равнодействующая сила  $Q_x$  во всех сечениях зоны контакта полосы с валками положительна, на границах очага деформации она обращается в нуль. Последнее показывает, что рассматривается установившийся процесс прокатки.

Среднее значение этой силы, определяемое по формуле:

$$Q_{cp} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_x d\varphi, \quad (3)$$

является также положительным и равно 10,19 кН. Из статьи [1] следует, что при таком значении  $Q_{cp}$  процесс прокатки протекает устойчиво без пробуксовок, о чём

свидетельствуют эпюры контактных напряжений и отношение  $\frac{f_y}{\alpha_y} = \frac{0,207}{0,131} = 1,58$  ( $f_y$  – коэффициент трения, рассчитанный по эпюрам контактных напряжений).

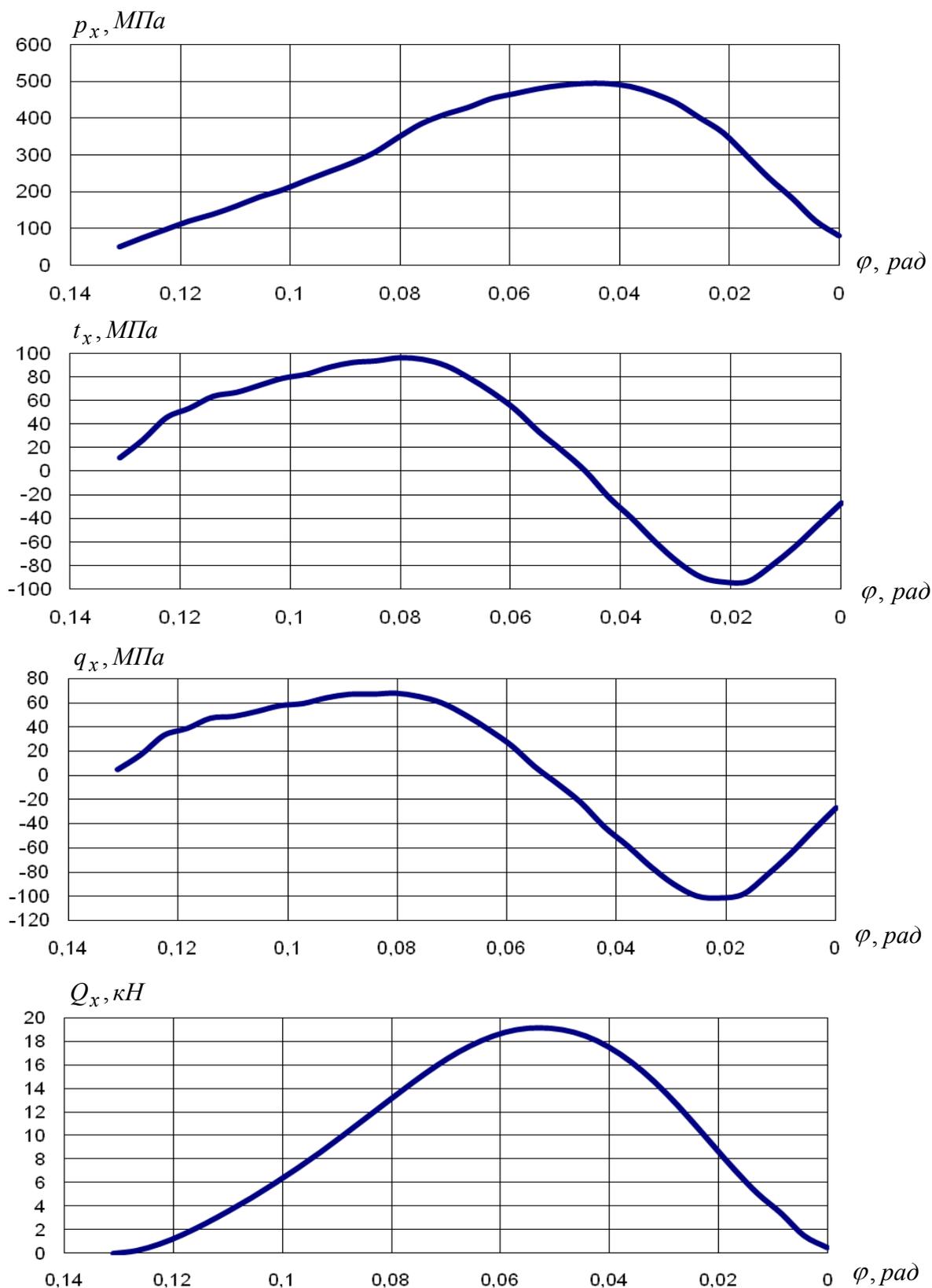


Рис. 2. Распределения контактных напряжений и результаты исследования при прокатке стальных образцов

На рис. 3 представлены эпюры контактных напряжений при прокатке свинцовых образцов [6]. Также как и в предыдущем случае, были рассчитаны значения  $q_x$ ,  $Q_x$  и  $Q_{cp}$ . Как следует из последней эпюры, текущая равнодействующая горизонтальных сил не меняет своего направления по длине очага деформации, среднее её значение также положительно и равно 1,62 кН. Следовательно, по направлению сила  $Q_{cp}$  совпадает с линией прокатки, что обеспечивает устойчивый процесс деформации. Вместе с тем, следует заметить, что текущая результирующая сила  $Q_x$  на выходе металла из валков не обращается в нуль, возможно, это связано либо с неустановившимся процессом прокатки, либо с погрешностями расчёта контактных напряжений при обработке результатов эксперимента.

Сила  $Q_{cp}$  значительна по величине и составляет примерно 5 % от усилия прокатки и 23 % от общей силы трения при горячей деформации стальных образцов. При прокатке свинцовых полос это отношение составляет 11 % и 38 % соответственно.

Таким образом, не только теоретически [1, 2], но и в результате обработки опытных эпюр контактных напряжений в очаге деформации можно выделить среднюю результирующую горизонтальных сил  $Q_{cp}$ , от величины и направления которой зависит устойчивость процесса прокатки. Как выше указывалось, одной из составляющих равнодействующей  $Q_{cp}$  является динамическая сила, связанная с ускорением частиц металла в очаге деформации.

Оценим динамическую составляющую силы  $Q_{cp}$ . Для этого воспользуемся теоремой об изменении количества движения динамической системы материальных точек [7]. В соответствии с этой теоремой производная по времени от вектора количества движения системы равно главному вектору внешних сил, приложенных к этой системе, т. е.:

$$\frac{dk}{dt} = \sum_{i=1}^n F_i,$$

где  $k$  – количества движения системы,  $k = \sum_{i=1}^n m_i v_i$ ;

$F_i$  – сила, действующая на точку материальной системы;

$m_i$  – масса материальной точки этой системы;

$v_i$  – скорость данной точки.

Применив данную теорему к системе материальных точек очага деформации при прокатке и предполагая, что в первом приближении  $\sum_{i=1}^n F_i = F_{cp}$ , имеем:

$$M(v_1 - v_0) = F_{cp} \cdot t, \quad (4)$$

где  $M(v_1 - v_0)$  – изменение количества движения при прохождении металла массой  $M$  через очаг деформации;  $v_0$  и  $v_1$  – скорость металла на входе металла в валки и выходе из них соответственно;  $t$  – время, в течении которого выделенная масса  $M$  образца пройдёт через зону пластической деформации;  $F_{cp}$  – среднее значение результирующей внешних динамических сил, приложенных к системе материальных точек очага деформации.

Учитывая, что ускорение материальных частиц происходит в системе, представляющей собой очаг деформации, из формулы (4) нетрудно найти значение силы  $F_{cp}$ .

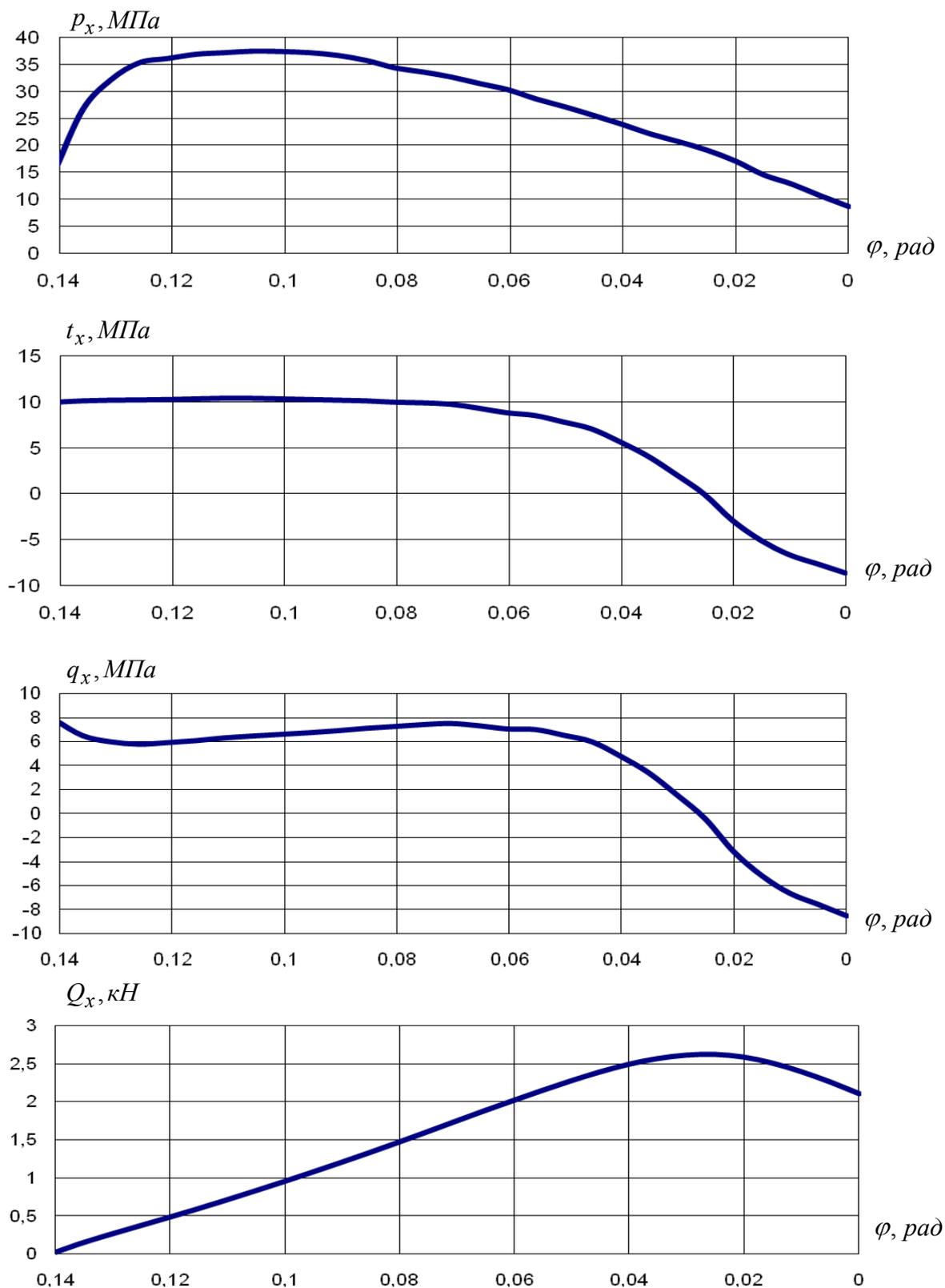


Рис. 3. Распределения контактных напряжений и результаты исследования при прокатке свинцовых образцов

В табл. 2 представлены результаты расчёта средних значений результирующих горизонтальных сил  $Q_{cp}$  и  $F_{cp}$ .

Таблица 2

Результаты расчёта сил  $Q_{cp}$  и  $F_{cp}$ 

Опытные данные работы	Плотность материала образцов $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Масса металла в очаге деформации $M$ , кг	Длина образца после прокатки массой $M$ , $l_1$ , мм	Скорость прокатки $v_v$ , м/с	Результирующие силы, кН	
					$Q_{cp}$	$F_{cp}$
[5]	7,85	0,0274	16,6	0,5	10,19	0,125
[6]	11,3	0,2841	10,7	0,1	1,62	0,008

Из табл. 2 следует, что динамическая составляющая  $F_{cp}$  по величине существенно меньше средней результирующей  $Q_{cp}$ .

### ВЫВОДЫ

Средняя результирующая горизонтальных сил в очаге деформации тесно связана с кинематическими параметрами и, в частности, с опережением. Зависимость этой силы и опережения от угла захвата является аналогичной. Максимумы этих функций несколько смещены. При нулевом значении силы  $Q_{cp}$  наступают предельные условия прокатки.

В результате анализа опытных эпюр контактных напряжений можно выделить среднюю результирующую горизонтальных сил в очаге деформации. Она включает в себя составляющую, связанную с деформацией металла, и динамическую составляющую, возникающую при ускорении системы материальных частиц в очаге деформации. Динамическая составляющая при этом существенно меньше результирующей силы  $Q_{cp}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Максименко О. П. Теоретический анализ захватывающей способности валков в установившемся режиме прокатки / О. П. Максименко, А. А. Никулин, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. – 2008. – № 10. – С. 32–34.
2. Максименко О. П. Влияние режима трения на устойчивость прокатки при однозонном скольжении металла в валках / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк, А. А. Никулин // Изв. вуз. Чёрная металлургия. – 2008. – № 6. – С. 26–29.
3. Максименко О. П. Исследование процесса прокатки в режиме гидродинамического трения / О. П. Максименко, В. М. Самохвал // Изв. вуз. Чёрная металлургия. – 2007. – № 2. – С. 40–43.
4. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М. : СП Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.
5. Чекмарёв А. П. Анализ процесса прокатки по данным о распределении контактных напряжений / А. П. Чекмарёв, П. Л. Клименко; под ред. А. П. Чекмарёва // Теория прокатки. Мат. Всесоюз. научно-техн. конф. «Теоретические проблемы прокатного производства». – М. : Металлургия, 1975. – С. 33–37.
6. Пирязев Д. И. Исследование влияния структуры параметра  $l_d/h_{cp}$  на удельное давление / Д. И. Пирязев, Г. А. Сагитов // Украинский науч.-исслед. институт металлов. Обработка металлов давлением. – 1960. – Вып. XIV. – С. 57–60.
7. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической механики : в 2-х томах. Т. 2. Динамика. – [6-е изд., перераб. и доп.] / Д. И. Пирязев, Г. А. Сагитов. – М. : Наука, 1983. – 640 с.

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

Романюк Р. Я. – аспирант ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск.

E-mail: omd@dstu.dp.ua  
r22roma@mail.ru