

УДК 621.777

Данченко В. Н.  
Ремез О. А.  
Мроз С.  
Огинский И. К.  
Самсоненко А. А.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТАЮЩЕГО ДИАМЕТРА ВАЛКОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРАХ

Определение катающего диаметра валков при непрерывной прокатке в вытяжных калибрах является составляющей частью расчета деформационно-скоростных параметров и важным фактором, определяющим точность размеров проката. Проблема определения катающего радиуса возникла у исследователей, начиная с появления непрерывной прокатки. В настоящее время проблема не утратила своей остроты, напротив, с увеличением скорости прокатки приобрела новые формы, для которых характерным является рост динамических нагрузок в главных линиях станов при переходных процессах заполнения очага деформации металлом и его освобождения. Методы определения катающего диаметра разнообразны и сформированы достаточно давно, например, в работах Бахтинова Б. П. и Выдрина В. Н. [1]. В работах более позднего [2, 3] и настоящего периодов времени [4, 5, 6] принципиальные дополнения и изменения не приводятся. Разнообразие методов свидетельствует об отсутствии единого подхода к определению катающего радиуса. Все методы построены на геометрических соотношениях, и понятие «катающий диаметр» в устоявшемся виде в недостаточной мере отражает кинематические явления, происходящие в очаге деформации.

Целью настоящей работы является анализ существующих подходов к определению катающего диаметра, выявление кинематических особенностей непрерывной прокатки, разработка метода определения катающего диаметра, компьютерная реализация метода.

Для определения скорости металла после выхода его из валков используют зависимость [6]:

$$V_i = \frac{\pi}{60} \cdot D_{k_i} \cdot n_i \cdot (1 + S_i), \quad (1)$$

где  $V_i$  – скорость выхода металла из валков;  $D_{k_i}$  – катающий диаметр валков;  $n_i$  – частота вращения валков;  $S_i$  – опережение, отнесенное к диаметру  $D_{k_i}$ .

Катающий диаметр часто определяют по средней высоте калибра [2]:

$$D_k = D - \sqrt{\frac{F}{(B_1 \cdot H_1)}}, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения раската в калибре;  $B_1$  и  $H_1$  – ширина и высота полосы после прокатки;  $D$  – диаметр валков.

В существующих определениях катающего диаметра исключается участие опережения [1, 2, 5]; наиболее характерным для названных мнений является определение автора [5]: «Под катающим диаметром валков понимают такой воображаемый диаметр, при котором окружная скорость валков равна скорости прокатываемой полосы в плоскости выхода ее из валков при отсутствии опережения металла». Наиболее полное и близкое по физической сути определение катающего диаметра приводит Б. П. Бахтинов: «Катающим диаметром валков называют диаметр валка, по которому происходит соприкосновение калибра с металлом при прокатке. По контуру калибра катающие диаметры переменны, поэтому переменны окружная скорость валка и силы трения, действующие на полосу. Диаметр, которому

соответствует скорость выхода полосы из валков, без учета опережения, называют средним катающим диаметром». Определение автора также исключает участие опережения в формировании катающего диаметра.

В работе [7] рассмотрен аналитический метод определения катающего диаметра с учетом среднеинтегрального значения опережения по контуру калибра:

$$S_k = \sum_{1}^N \int_b^a S dl / \sum_{1}^N \int_b^a dl, \quad (3)$$

где  $N$  – общее количество участков контура калибра, контактирующего с полосой;  $S$  – величина опережения в различных точках участка  $ab$ ;  $a, b$  – точки, соответствующие концам участков контура калибра.

В работе [7] не представлено сравнение предложенного метода определения катающего диаметра с экспериментальными данными, не учтено также влияние реологических свойств металла.

При прокатке труб [3] катающий диаметр (радиус) принято рассчитывать по формуле:

$$R_k = R_{\sigma} + 0,5 \cdot \Delta - \lambda' \cdot r_k, \quad (4)$$

где  $\lambda'$  – коэффициент, учитывающий форму калибра (на практике принимают  $\lambda' = 0,7 \div 0,9$ );  $R_{\sigma}$  – радиус бочки валка;  $\Delta$  – зазор между валками;  $r_k$  – радиус калибра.

Данный метод пригоден для приближенного определения катающего диаметра, так как точность расчета в формуле (4) напрямую зависит от коэффициента, учитывающего форму калибра.

Анализ методов расчета катающего радиуса, основанных на геометрических соотношениях, свидетельствует о том, что все они в недостаточной мере отражают физическую сторону взаимодействия полосы и валков, не учитывают кинематику перемещения металла и инструмента. Все методы расчета скоростных режимов прокатки на основе катающего диаметра включают необходимость определения опережения, которое является трудно определяемым фактором, с недостаточно выясненной природой образования даже при прокатке на гладкой бочке [8]; для случаев деформации в калибрах опережение приобретает еще более физически нечеткие признаки и количественную неопределенность.

В данной работе предлагается метод определения катающего диаметра с учетом опережения, в основе которого лежит кинематическая взаимосвязь валков и выходящего из них раската. Под катающим радиусом понимается условный радиус, соответствующий скорости полосы  $V_1$  после выхода ее из валков:

$$R_k = \frac{L}{\varphi}, \quad (5)$$

где  $L$  – расстояние, которое прошла полоса за период поворота валка на произвольный угол  $\varphi$ .

Условность заключается в том, что катающий радиус может находиться за пределами ручья, образующего калибр. Сущность предлагаемого метода поясняется схемой на рис. 1.

При проведении исследований выполнены теоретические исследования катающего диаметра в вытяжных системах калибров с использованием программы компьютерного моделирования процессов пластической деформации Forge-3D, разработанной CEMEF, Ecole des Mines de Paris. Forge-3D основан на вариационном принципе Лагранжа, функционал которого сформулирован следующим образом:

$$I = \int_V \left( \int_0^H T dH \right) dV - \int_V F_i U_i dV - \int_S f_i U_i dS, \quad (6)$$

где  $T$  – интенсивность касательных напряжений;  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига;  $F_i$ ,  $f_i$ ,  $U_i$  – соответственно проекции векторов объемных сил, поверхностных нагрузок и скоростей течения;  $S$  – площадь поверхности;  $V$  – объем.

Сопротивление деформации деформируемого материала задавалось на основе зависимости Хензеля-Шпиттеля [9]:

$$\sigma_T = A \cdot e^{a_1 T} \cdot T^{a_9} \cdot \varepsilon^{a_2} \cdot e^{a_4 / \varepsilon} \cdot (1 + \varepsilon)^{a_5 T} \cdot e^{a_7 \varepsilon} \cdot \dot{\varepsilon}^{a_3} \cdot \dot{\varepsilon}^{a_8 T}, \quad (7)$$

где  $\sigma_T$  – сопротивление деформации;  $\varepsilon$  – степень деформации;  $\dot{\varepsilon}$  – скорости деформации;  $T$  – температура;  $A, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$  – коэффициенты регрессии.

Для характеристики напряжений трения на контакте использовалась зависимость на основе закона Амонтона в следующей форме:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n, \quad (8)$$

$$\text{при } \mu \cdot \sigma_n < \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $\sigma_n$  – напряжение по нормали к контактной поверхности в узле сетки конечных элементов;  $\tau_n$  – напряжение внешнего трения [10].

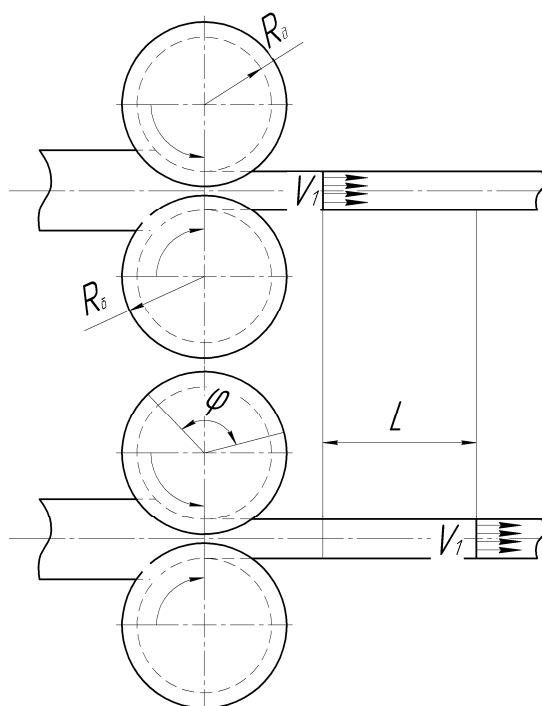


Рис. 1. К методу определения катающего радиуса:

$R_\delta$  – радиус вала по бурту;  $R_\delta$  – радиус вала по дну калибра;  $L$  – расстояние между отметками;  $\varphi$  – произвольный угол поворота вала

Моделирование выполнялось для специальных сталей ферритного класса: 08X13, 15X25T и X12. Для сравнения использовалась сталь 10. Исследования выполнялись для систем калибров: ромб – квадрат; овал – квадрат; ромб – ромб. Моделирование выполнялось для калибров, приведенных на рис. 2.

В качестве характеристики катающего диаметра  $D_k$  использовалась безразмерная величина  $D_k / D_\delta$ , где  $D_\delta$  – диаметр вала по дну калибра.

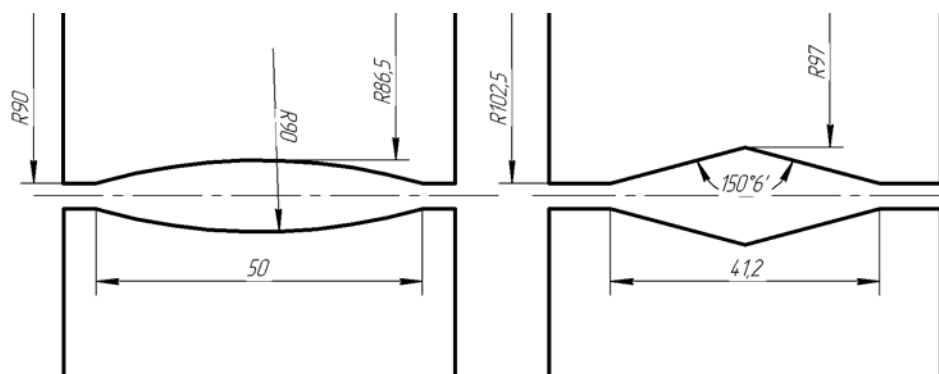


Рис. 2. Схемы исследуемых калибров

Исследование изменения катающего диаметра в вытяжных калибрах проводилось для следующих условий:

- скорость вращения валков – 32 об/мин;
- температура начала прокатки – 1100 °С;
- заготовка для систем калибров «ромб – квадрат» и «овал – квадрат» – квадрат 20; для системы «ромб – ромб» раскат, вышедший из системы калибров «ромб – квадрат»;
- коэффициент вытяжки 1,04–1,53.

Результаты исследований показаны на рис. 3.

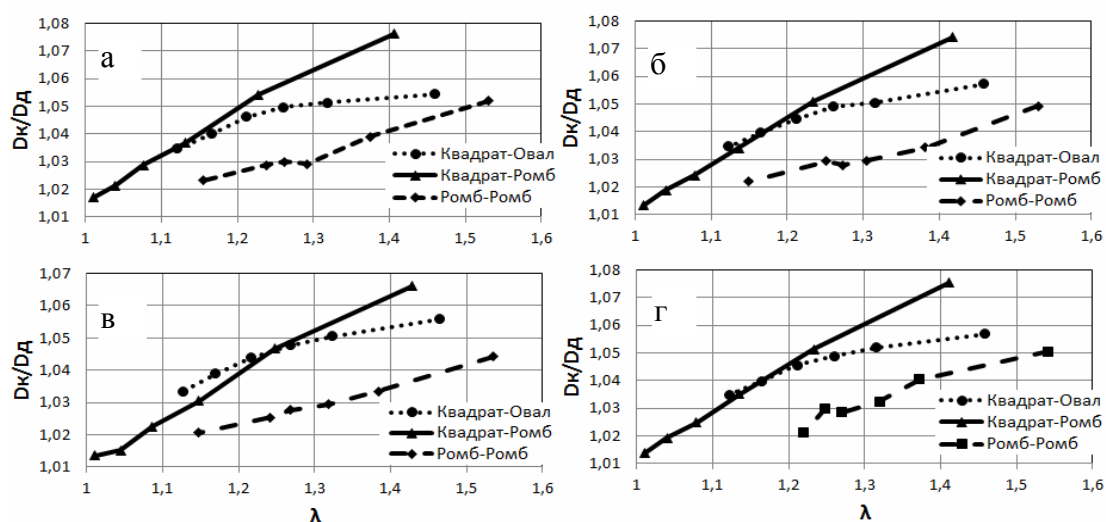


Рис. 3. Результаты определения катающего диаметра на основе компьютерного моделирования при прокатке сталей:

а – 08X13; б – 15X25Т; в – X12; г – сталь 10

В системах калибров «квадрат – ромб» и «ромб – ромб» наблюдается возрастание катающего диаметра по кривой близкой к линейной зависимости: с увеличением коэффициента вытяжки увеличивается катающий диаметр (точка приложения  $D_k$  сдвигается в сторону выпуска калибра). В системе калибров «квадрат – овал» изменение катающего диаметра происходит по логарифмической зависимости. Максимальное значение катающего диаметра, при одинаковых вытяжках, в системе калибров «квадрат – ромб»; минимальное – «ромб – ромб».

Получены зависимости изменения катающего диаметра в вытяжных системах калибров для сталей различного химического состава (рис. 4). Наиболее заметно влияние химического состава на величину катающего диаметра проявляется в системе калибров «квадрат – ромб». Однако даже в этом случае максимальное отличие составляет 1 %.

Выполнена экспериментальная проверка предложенного метода определения катающего радиуса. Исследования выполнялись на лабораторном стане 200 кафедры ОМД НМетАУ. Прокатка проходила в следующих условиях: материал заготовки свинец С1, поперечное

сечение заготовки  $20 \times 20$  мм, материал валков – сталь 40Х, поверхности ручьев для обеспечения условий, идентичных заданным при моделировании, были загружены наждачной бумагой. Экспериментальное определение катающего диаметра выполнялось на основе схемы на рис. 1, для калибров, представленных на рис. 2. Наносились последовательно две отметки на передний конец раската после выхода его из очага деформации; первую отметку наносили в произвольном месте полосы, вторую – после поворота валка на произвольный угол  $\varphi$ , после чего замеренное расстояние между отметками  $L$  делили на угол поворота  $\varphi$ .

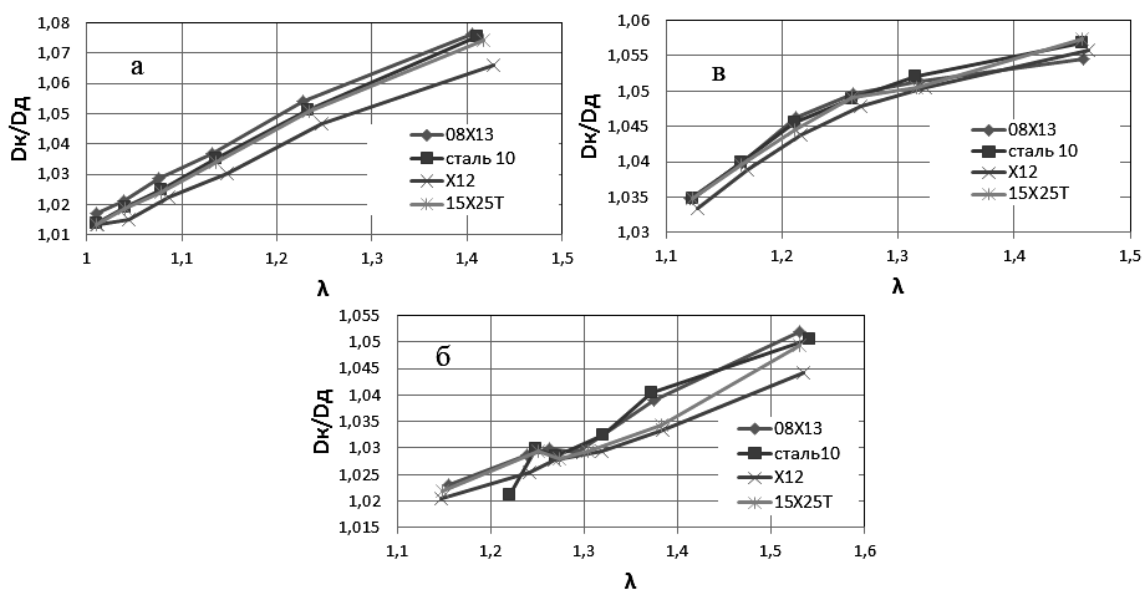


Рис. 4. Влияние химического состава сталей на изменение катающего диаметра в вытяжных калибрах:

а – система калибров «квадрат – ромб»; б – «ромб – ромб»; в – «квадрат – овал»

Сравнение данных, полученных путем математического моделирования, с экспериментальными показало различие в пределах 6%. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных приведены в графическом виде на рис. 5.

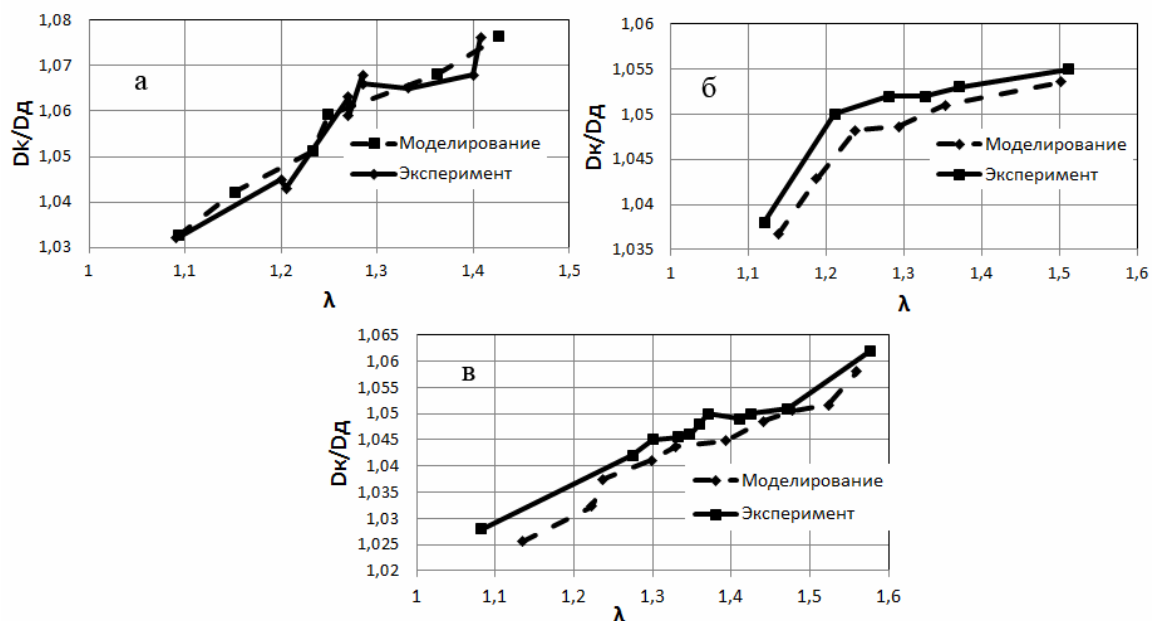


Рис. 5. Графики сравнения результатов моделирования и экспериментальных данных при прокатке свинцовых образцов на стане 200:

а – система калибров «квадрат – ромб»; б – «ромб – ромб»; в – «квадрат – овал»

## ВЫВОДЫ

Выполнен анализ методов расчета катающего диаметра валков, основанных на геометрических соотношениях. Результаты анализа свидетельствуют о том, что все методы в недостаточной степени отражают физическую сторону взаимодействия полосы и валков, не учитывают кинематику перемещения металла и инструмента. Известные методы расчета скоростных режимов прокатки на основе катающего диаметра включают необходимость определения опережения, которое является трудно определяемым фактором, с недостаточно выясненной природой образования даже при прокатке на гладкой бочке.

Предложен метод определения катающего диаметра, в основе которого использована кинематическая взаимосвязь валков и выходящего из них раската. Метод исключает необходимость определения опережения при прокатке в вытяжных калибрах при расчете скоростных параметров.

Показано влияние химического состава сталей на величину катающего диаметра. Более заметно названное влияние проявляется в системе калибров «квадрат – ромб».

Исследование влияния формы калибров на изменение катающего радиуса показало, что с увеличением коэффициента вытяжки увеличивается и величина  $D_K / D_D$ . Наибольшее значение наблюдается в системе калибров «квадрат – ромб», а наименьшее в системе «ромб – ромб».

Сравнение экспериментальных данных и результатов математического моделирования подтвердило возможность дальнейших исследований катающего диаметра по предлагаемой методике с использованием программы Forge-3D.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М. : Металлургия, 1970. – 456 с.
2. Чекмарев А. П. Калибровка прокатных валков: учебное пособие для вузов / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – М. : Металлургия, 1971. – 512 с.
3. Данилов Ф. А. Горячая прокатка и прессование труб / А. Ф. Данилов, А. З. Глейберг, В. Г. Балакин. – Изд. 3-е. – М. : Металлургия, 1972. – 576 с.
4. Онищенко И. И. Теория непрерывной прокатки / И. И. Онищенко, П. И. Куценко, А. И. Куценко. – Запорожье : Изд-во ЗГИА, 1998. – 470 с.
5. Прокатка и калибровка : справочник в 6 т. / [Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев; ред. Б. М. Илюкович]. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – Т. 1. – 506 с. – (Серия «Основы теории калибровки. Калибровка блюмов и заготовки, кругов и шестигранников, квадратной стали, проволоки и арматуры»).
6. Непрерывная прокатка / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Н. Данченко. – Днепропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 588 с.
7. Машкин Л. Ф. Определение катающего диаметра при прокатке в калибрах / Л. Ф. Машкин // Теория и практика металлургии. – 1997. – № 3. – С. 7–8.
8. 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.
9. Thilo Spittel Ferrous Alloys. V. 2 / Thilo Spittel, Marlene Spittel. – New York : Springer, 2009. – 800 p.
10. Users Guide, How to run Forge-3d / S. A. Transvalor. – Sophi Antipolis, 2003.

Данченко В. Н. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой НМетАУ;

Ремез О. А. – аспирант НМетАУ;

Мроз С. – д-р техн. наук, проф. Политехника Ченстохово;

Огинский И. К. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НМетАУ;

Самсоненко А. А. – канд. техн. наук, ассистент НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

Политехника Ченстохово – институт моделирования и автоматизации процессов пластической обработки, г. Ченстохово, Польша.

E-mail: remez@fregat.com