

УДК 621.771.

Огинский И. К.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ

Исследованию энергосиловых параметров посвящено большое число работ, вместе с тем, существующие методы определения энергосиловых параметров не обеспечивают точность, необходимую для решения практических задач. К энергосиловым параметрам, представляющим практическую значимость, относят в первую очередь, момент и силу прокатки. Их определение представляет собой сложную задачу даже для простых случаев прокатки, для производства фасонных профилей теоретических решений не создано, недостаток теории компенсируется достижениями практики, основу которых составляет накопленный экспериментальный материал.

Существующие методы определения энергосиловых параметров при прокатке по своим физическим подходам могут быть представлены двумя группами. В основе методов первой группы лежит контактное взаимодействие металла с валками, методов второй группы – признаки объемного течения металла. Соответственно, в методах первой группы участвуют: контактные напряжения; коэффициент внешнего трения; величины, характеризующие взаимное перемещение металла и валков – опережение, скольжение и нейтральный угол. Определение каждого параметра всегда связано с погрешностями, в итоге, необходимая точность расчетов становится недостижимой. Методы первой группы получили большее развитие и распространение, не смотря на то, что они ставятся в зависимость от большого числа факторов, которые в свою очередь, являются трудно определяемыми и не всегда однозначными. В методах первой группы не всегда достаточно корректно отражена физическая сущность выше упомянутых характеристик. Коэффициент внешнего трения при прокатке не имеет однозначного физического смысла [1, 2], по причине того, что на контакте существуют два вида внешнего трения – покоя и скольжения (зоны скольжения и прилипания). Нейтральный угол, будучи одним из признаков методов первой группы, является также недостаточно однозначной величиной, поскольку его проявление ставят в зависимость от опережения при прокатке, которое, как принято считать, зависит от условий контактного взаимодействия [3, 4 и др.]. Отсутствует единство мнений о механизме образования опережения и его взаимосвязи с другими параметрами [5; 6], что ставит под сомнение полную физическую корректность методов первой группы. К методам первой группы можно отнести и энергетические методы [7], поскольку в них энергосиловые параметры также ставятся в зависимость от контактного взаимодействия, в частности, от нейтрального угла. Трение при прокатке является основным и одновременно малоизученным фактором. Существуют различные точки зрения на природу внешнего трения при прокатке, по-разному воспринимается применимость законов и моделей трения [8-14]. Единство мнений по вопросам контактного взаимодействия не достигнуто, более того, обсуждение порой носит острый дискуссионный характер [10–13]. По мнению одного из авторов дискуссии [13]: «...в понимании пластического трения все еще возможны сильные различия».

Целью настоящей работы является анализ и развитие методов определения энергосиловых параметров при прокатке. В основе предлагаемых подходов лежит исследование объемного течения металла при прокатке и выявление, в частности, смещенного объема, как составляющей энергетических параметров. На основе изучения механизма объемного течения металла становится возможным внести уточнения в недостаточно раскрытые вопросы теории прокатки и в конечном итоге достичь необходимой точности решения прикладных задач.

В теории прокатки принято говорить, в основном, о внешнем трении, вопросы внутреннего затрагиваются в меньшей степени [1, 2], вместе с тем, процесс прокатки (также как и другие виды обработки металлов давлением) наряду с внешним трением сопровождается и внутренним. Об этом прямо говорят авторы [2]: «При развитой пластической деформации контактные скольжения и объемные деформации вблизи контактной поверхности можно

считать одновременно протекающими и взаимосвязанными процессами внешнего и внутреннего трения». Основные признаки внешнего трения, в частности определения, приведены в стандарте [15], внутреннее трение, являясь областью физики твердого тела и смежных наук [16–18], не имеет столь однозначных определений как в упомянутом стандарте, в наиболее общем виде оно может быть охарактеризовано так: «Внутреннее трение» – совокупность различных процессов внутри твердого тела при его неупругом или пластическом деформировании». Пластическое состояние металла при прокатке по определению свидетельствует о внутреннем трении в объеме очага деформации. Оба вида трения взаимосвязаны, изменение параметров внешнего трения неизбежно приводит к изменениям внутреннего. Характеристики двух видов трения различны, в частности, внешнее трение характеризуется давлением, внутреннее – пределом текучести [16, 19]. По этой причине можно утверждать, что закон Зибеля, включающий напряжение текучести, является законом внутреннего трения. Другие отличительные признаки двух видов трения (характер касания, направление вектора скорости, градиент механических свойств по глубине) приводятся в материалах по трибологии [19]. Единственным сходством является то, что оба вида трения являются диссипативными процессами.

Приведенные некоторые признаки состояния теории пластического трения [8–14], спорность положений в части природы опережения [5, 6, 14] свидетельствуют о том, что рассчитывать на точность определения энергосиловых параметров методами первой группы не приходится, в частности, возникают затруднения при определении момента прокатки через силу внешнего трения и нейтральный угол.

Во второй группе методов работа определяется на основе объемных признаков очага деформации, в частности, смещенного объема. Различие методов заключается в подходах к определению названных признаков, по мнению Финка смещенным объемом является:

$$V_{см} = V \ln \frac{h_0}{h_1}. \quad (1)$$

Табель в одной из своих работ придает формуле Финка для определения работы следующий вид:

$$A = p V \ln \lambda. \quad (2)$$

И в таком виде выражение (2) становится известным под именем формулы Киссельбаха-Гульста, считается, что оно учитывает уширение. Прейслером была предпринята попытка учесть работу сложного формоизменения, в результате получено выражение, имеющее вид:

$$A = p V \ln \frac{h_1 b_1 l_1}{V}. \quad (3)$$

Выражение (3) может быть приведено к формуле Финка. В определении объемных признаков течения металла принимали участие и другие авторы: Вейс, Кирхберг, Герман, Зибель, Грасгоф, Кодрон, Пупе, Виноградов, Гавриленко, Верещагин, Лисс, Петров и другие. Виноградов в одной из своих работ придает формулам различных авторов обобщенный вид:

$$A = p V f(\vartheta). \quad (4)$$

В современной литературе методы определения работы на основе смещенного объема обычно созывают с фамилией Финка. Все полученные выражения, включая приведенные, не характеризуют какие-либо объемные признаки, вызванные течением металла, все они включают статические параметры. В то же время, методы, на основе смещенного объема являются физически достаточно обоснованными, поскольку в них работа ставится в прямое соответствие величине смещенного объема, кроме того, методы не содержат таких трудно определяемых и неоднозначных величин как коэффициент трения и нейтральный угол.

Трудности при использовании методов второй группы заключаются в определении собственно смещенного объема, поскольку имеющиеся подходы являются упрощенными и не отражают истинную картину перемещения металла в очаге деформации. В частности, в современной теории прокатки используется условие постоянства секундных объемов, которое представляют, например, в таком виде [1]:

$$V_o F_o = V_\phi F_\phi = V_1 F_1. \quad (5)$$

При современном уровне знаний выражение (4) справедливо лишь частично, поскольку выполняются только равенство двух крайних членов  $V_o F_o = V_1 F_1$ , а произведение  $V_\phi F_\phi$ , будучи условной величиной, которая не является объемной характеристикой, не отражает картины объемного течения металла.

Задача определения смещенного объема является трехмерной, решить ее в современных условиях становится возможным с использованием методов компьютерного моделирования. С этой целью разработана математическая модель возможных кинематических состояний в очаге деформации и объемных перемещений при прокатке. В результате моделирования выявлены новые признаки очага деформации, разработаны новые подходы к определению энергосиловых параметров на основе смещенного объема. Вводится понятие единичная работа  $A_e$  – работа, совершаемая за время поворота валка на угол  $\alpha$ :

$$A_e = V_c \sigma_T, \quad (6)$$

где  $V_c$  – единичный смещенный объем – объем, смещенный при повороте валка на угол  $\alpha$ ;

$\sigma_T$  – среднее по объему напряжение текучести.

Момент прокатки определяется на основе единичной работы:

$$M = A_e / \alpha. \quad (7)$$

На основе момента прокатки определяется результирующая касательных сил на контакте металла с валком:

$$T = M / R. \quad (8)$$

Сила прокатки может быть определена по выражению:

$$P = \frac{M}{R f_3}. \quad (9)$$

Известное по своей структуре выражение (9) включает величину  $f_3$ , которая носит название «энергетический показатель пластического трения», его отличительный признак в том, что он включает энергетическую основу. Широко применяемый в теории прокатки коэффициент (показатель) трения, как отмечалось выше, является неоднозначной величиной по причине своей недостаточной физической определенности [1, 2], он не отражает особенностей пластического трения, в частности, не учитывает изменение кинематических признаков в объеме деформируемого металла и на его контакте с инструментом. По этой причине, в условиях кинематического непостоянства, необходим другой, физически более обоснованный подход и таковым является энергетический. Подобный подход освещается в работе автора [16]: «...кинетическое трение мы должны характеризовать работой, а не силой», применительно к условиям пластического трения такой подход является физически корректным. По своему физическому происхождению (связь нормальных и касательных сил) показатель внешнего пластического трения близок к коэффициенту трения твердых тел [19, 20] и потому за основу может быть взят закон трения Амонтона:

$$f = T / P. \quad (10)$$

Сила прокатки определяется по известному выражению:

$$P = p_c F_k. \quad (11)$$

И тогда с учетом выражений (8) и (9) энергетический показатель пластического трения примет вид:

$$f_э = \frac{V_c}{F_k} \frac{1}{R} \frac{\sigma_T}{p_c}. \quad (12)$$

Входящие в выражение (10) величины  $\sigma_T$  и  $p_c$  характеризуют, соответственно, условия внутреннего и внешнего трения, они могут быть определены на основе экспериментальных данных. Вообще говоря, для практических расчетов необходимым и достаточным является прямое определение (или знание) значения  $f_э$ . В поисках аналога для этих целей можно обратиться к существующим методам определения коэффициента трения при прокатке [1, 2 и др.]. Существует более двадцати методов определения коэффициентов трения при установившемся процессе прокатки [1], но лишь часть из них можно признать достаточно достоверными, это те, которые адекватно характеризуют реальные условия прокатки. Например, в условиях сплошного однозонального скольжения, образованного за счет нарастания обжатия может быть получен коэффициент трения скольжения для предельных условий прокатки при данном соотношении параметров. Он может быть применен в условиях, аналогичных тем, в которых был получен. При изменении лишь одного параметра при прочих равных условиях коэффициент будет иметь другое численное значение или даже другой физический смысл, например, если образуется зона прилипания, он перестанет быть коэффициентом трения скольжения. Соблюдение условий подобия в трибологии является признаком достоверности, создаются базы данных, одна из которых представлена авторами работы [20]. Подобная база данных для определения коэффициента  $f_э$  может быть создана на основе существующих результатов экспериментальных исследований процесса прокатки.

На основе разработанной модели выполнен анализ возможных кинематических состояний в очаге деформации, выявлены закономерности изменения отношения объемов  $V_c / V_e$  зависимости от параметров прокатки: угла захвата  $\alpha$ , и параметра  $R/h_1$ , результаты моделирования представлены на рис. 1.

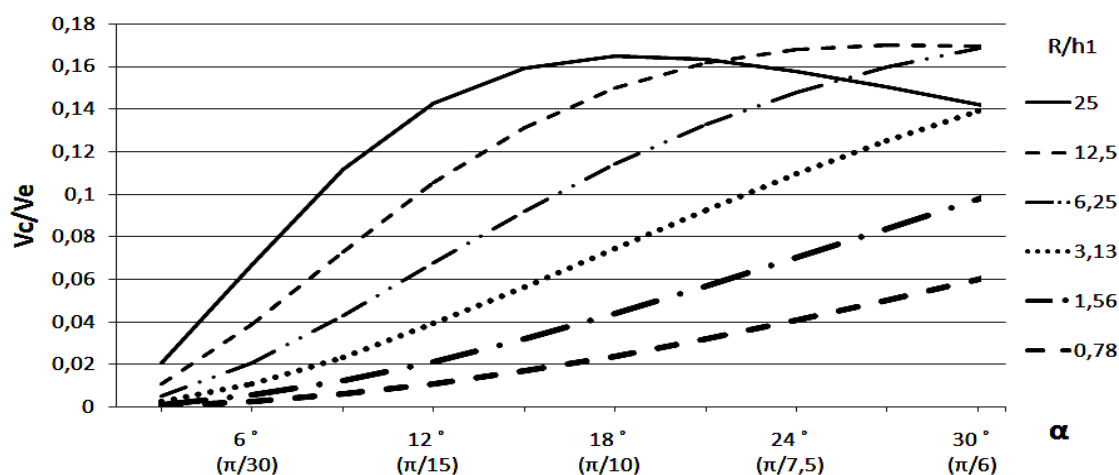


Рис. 1. Зависимость величины смещенного объема от параметров прокатки

Приведенные зависимости показаны для простого случая прокатки, на базе разработанного метода, в основе которого определение смещенного объема, стало возможным теоретически определить распределение моментов на валках при прокатке несимметричных фасонных профилей. Ранее достаточно достоверные результаты получали лишь экспериментально

[21, 22]. Сравнение расчетных данных по распределению моментов с результатами экспериментальных исследований, полученными в работе [21], показывает их удовлетворительную сходимость, погрешность не превышает 16 %.

### ВЫВОДЫ

В результате углубленного анализа объемных преобразований в очаге деформации выявлены новые признаки, характеризующие процесс прокатки, введены объемные параметры. Разработаны новые подходы к определению энергосиловых параметров на основе смещенного объема.

Разработана математическая модель, позволяющая реализовать предложенные подходы. В результате становится возможным повысить точность расчетов энергосиловых параметров, в частности, определить распределение моментов на валках при прокатке несимметричных фасонных профилей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1973. – 288 с.
2. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / [Леванов А. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П. и др]. – М. : Металлургия, 1976. – 416 с.
3. Павлов И. М. Теория прокатки / И. М. Павлов. – М. : Металлургиздат, 1950. – 610 с.
4. Целиков А. И. Основы теории прокатки / А. И. Целиков. – М.: Металлургия, 1965. – 247 с.
5. Долженков Ф. Е. О некоторых противоречиях современной теории прокатки / Ф. Е. Долженков // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : «Системні технології», 2002. – Т. 5. – С. 353–355.
6. Долженков Ф. Е. Уширение, опережения и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) / Ф. Е. Долженков // Известия вузов. ЧМ. – 2003. – № 6. – С. 41–44.
7. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов / В. Н. Выдрин. – М. : Металлургиздат, Свердловское отделение, 1960. – 255 с.
8. Василев Я. Д. Модель напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев // Производство проката. – 1998. – № 6. – С. 2–8.
9. Василев Я. Д. Уточнение модели напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев // Известия вузов. ЧМ. – 2000. – № 11. – С. 22–24.
10. Зильберг Ю. В. Закон и модели пластического трения / Ю. В. Зильберг // Известия вузов. ЧМ. – 2000. – № 11. – С. 22–24.
11. Хайкин Б. Е. Рецензия на статью Ю. В. Зильберга «Закон и модели пластического трения» / Б. Е. Хайкин // Известия вузов. ЧМ. – 2000. – № 11. – С. 24–25.
12. Зильберг Ю. В. Ответы на замечания рецензента Б. Е. Хайкина / Ю. В. Зильберг // Известия вузов. ЧМ. – 2000. – № 11. – С. 25.
13. Хайкин Б. Е. Операционно-аналитический подход к проблеме трения в условиях обработки металлов давлением / Б.Е. Хайкин // Известия вузов, ЧМ. – 2000. – № 11. – С. 26–27.
14. Зильберг Ю. В. О некоторых противоречиях и допущениях теории прокатки / Ю. В. Зильберг // Известия вузов. ЧМ. – 2004. – № 11. – С. 24–26.
15. Трение, изнашивание и смазка. ГОСТ 27674-88. – М. : Издательство стандартов. – 1988. – С. 20.
16. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела (Материалы по физике внешнего трения, износа и внутреннего трения твердых тел) / В. Д. Кузнецов. – Томск : Красное знамя, 1947. – Т. 4. – 542 с.
17. Кристалл М. А. Внутреннее трение и структура металлов / М. А. Кристалл. – М. : Металлургия, 1976. – 375 с.
18. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов / Я. И. Френкель. – Л. : Наука, 1972. – 424 с.
19. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
20. Крагельский И. В. Коэффициенты трения / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. – М. : Машигиз. – 1962. – 220 с.
21. Теряев В. А. Распределение крутящих моментов между валками при прокатке балочных профилей / В. А. Теряев // Прокатное производство : сб. научн. трудов, ин-т черной металлургии. – 1962. – Т. 17. – С. 125–129.
22. Чекмарев А. П. Исследование силовых факторов при прокатке в разрезных калибрах / А. П. Чекмарев, В. М. Клименко, М. П. Топоровский // Прокатное производство : сб. научн. трудов, ин-т черной металлургии. – 1961. – Т. 15. – С. 109–124.

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

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: oginskyu@gmail.com