

УДК 621.771

Огинский И. К.

## СМЕЩЕННЫЙ ОБЪЕМ ПРИ ПРОКАТКЕ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПОТЕЗЫ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

Гипотеза плоских сечений нашла широкое применение в теории прокатки, несмотря на то, что она выполняется с достаточной точностью лишь в ограниченных случаях. Применение гипотезы плоских сечений оправдано для установления условных (геометрических) границ очага деформации (в другой форме это было бы трудноосуществимо), полезно в качестве инструмента наглядности для качественного представления перемещения металла в границах очага деформации и за его пределами. Исследователи предпринимают попытки исключить гипотезу плоских сечений из рассмотрения задач теории прокатки [1, 2], однако эффективных альтернативных решений пока не создано. На основе гипотезы плоских сечений в теории прокатки получены сведения об объемных перемещениях металла и, в частности, о смещенном объеме. Методы выявления смещенного объема среди других объемных признаков и на их основе определение работы прокатки известны достаточно давно. Их обычно связывают с именем Финка. Предложенная им логарифмическая зависимость является простой по своей структуре и одновременно неточной. Это вызвало необходимость поиска новых решений, у Финка возникло много последователей (Киссельбах-Гульст, Прейслер, Вейс, Кирхберг, Герман, Зибель, Грасгоф, Кодрон, Пупе, Виноградов, Гавриленко, Верещагин, Лисс, Петров и другие), появились полуэмпирические зависимости, содержащие всякого рода поправочные коэффициенты, и со временем было утрачено первоначальное физическое значение смещенного объема, которое Финк придавал своей ставшей широко известной формуле. Образовалась группа методов, в основе которых лежат признаки объемного течения металла, и метод Финка стал одним из них. Созданные методы не отличались точностью, и продолжавшиеся поиски новых решений вылились в создание группы методов, в основе которых лежит контактное взаимодействие металла с валками. Методы второй группы получили большее развитие и распространение, не смотря на то, что они ставятся в зависимость от большого числа факторов. Среди названных факторов вопросы контактного взаимодействия металла с валком [3–5], в основе которых нерешенные вопросы пластического трения, являющиеся трудно определяемыми и не однозначными по своему физическому содержанию. Подтверждением сказанного является, например, дискуссия по пластическому трению, возникшая на страницах печати [6–12]. Трудности, связанные с определением названных параметров даже при простой прокатки, не позволяют рекомендовать методы второй группы для более сложных случаев – условий сортового производства. Методы на основе объемного течения металла обладают более широкими возможностями по сравнению с методами второй группы, необходимым условием для их успешного использования является физически корректное определение признаков перемещения металла в очаге деформации, к которым относится и смещенный объем. Физически корректное определение смещенного объема позволяет расширить возможности методов первой группы, применить их для более сложных случаев – прокатки фасонных профилей.

Целью настоящей работы является развитие методов определения смещенного объема при прокатке. В основе предлагаемых подходов лежит исследование объемного течения металла при прокатке, создание для этой цели модели, в которой не используется гипотеза плоских сечений, и уточнение наиболее характерных признаков смещенного объема, как составляющей энергетических параметров, в первую очередь работы прокатки.

Допущением в рассматриваемой задаче является исключение опережения металла на контакте с валком ( $S = 0$ ), принимаем, также, что отсутствует уширение ( $\Delta b = 0$ ). Два последних допущения ( $S = 0, \Delta b = 0$ ) можно считать необходимостью, поскольку включение опережения и уширения в рассматриваемую задачу сопряжено с дополнительной неопределенностью в части их взаимосвязи и характера образования. О том, что взаимосвязь между

опережением и уширением в теории прокатки с достаточной точностью не установлены, говорится, например, в работах [13–15]. Принимая допущение, что опережение отсутствует, вводим погрешность, соизмеримую с величиной опережения. Погрешность, достаточно прогнозируемая по своей величине и составляющая несколько процентов. Отсутствие уширения, вообще говоря, является не допущением, а частным, и одновременно распространенным на практике, случаем.

Для построения модели смещенного объема использованы общепринятые обозначения параметров очага деформации, часть из них показана на рис. 1, вводятся дополнительные параметры, их обозначения представлены на рис. 1–4. Исходным для рассмотрения является единичный объем  $V_e$  (рис. 1), он заключен между рабочими поверхностями валков и границами входа металла в валки и выхода из них. Геометрическими границами очага деформации являются: на входе – плоскость, соответствующая углу контакта  $\alpha$ , выходной – часть плоскости осей валков (высотой  $h_1$  и шириной  $b_1$ ). Физические границы областей, где металл претерпевает изменение размеров и формы (деформационные границы), устанавливаются на основе дополнительных условий.

Единичный объем можно представить в виде двух характерных объемов (частей), за время поворота валка на угол  $\alpha$  часть металла выходит за пределы плоскости валков, а вторая остается в очаге деформации в его выходной области. Указанный факт был выявлен на основе анализа картины объемных перемещений металла в очаге деформации и подтвержден экспериментально. Названное обстоятельство не привлекало внимание исследователей, вместе с тем, оно является весьма существенным и одним из элементов в построении картины смещенного объема.

$V_1$  – объем металла, вышедшего из очага деформации за время поворота валка радиусом  $R$  на угол  $\alpha$ ;

$\Delta V$  – объем металла, оставшегося в очаге деформации после поворота валка на угол  $\alpha$ , остаточный объем является частью единичного;

$V_0$  – объем металла, которому предстоит выйти из очага деформации за период поворота валка на угол  $\alpha$ , объем металла, находящегося в очаге деформации, и равный по величине объему  $V_1$ :

$$V_0 = V_1; \quad (1)$$

$V_c$  – единичный смещенный объем – объем, смещенный за период поворота валка на угол  $\alpha$ .

Единичный смещенный объем в свою очередь складывается из элементарных объемов  $\Delta V_c$  (рис. 4), которые создаются в период поворота валка на угол  $\alpha$  (рис. 3).

$\Delta V^*$  – объем металла, которому предстоит остаться в очаге деформации после поворота валка на угол  $\alpha$ , он равен объему  $\Delta V$ :

$$\Delta V = \Delta V^*. \quad (2)$$

$l_{1e}$  – длина раската, вышедшего из очага деформации за период поворота валка на угол  $\alpha$ , при отсутствии опережения ( $S = 0$ ) указанная длина составит:

$$l_{1e} = R \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  – центральный угол, соответствующий положению входной границы объема  $V_0$ ;

$\alpha_{\Delta V}$  – центральный угол, соответствующий положению входной границы объема  $\Delta V$ ;

$l_{\Delta V}$  – протяженность участка очага деформации, соответствующая углу  $\alpha_{\Delta V}$ ;

На рис. 1 показан очаг деформации в исходном состоянии – до прокатки (а) и после поворота валка на угол  $\alpha$  (б). В силу того, что в выходной части очага деформации отсутствует опережение, металл за время поворота валка на угол  $\alpha$  проходит путь, равный:

$$l_{1e} = R a . \quad (4)$$

Объем вышедшего из очага металла составит:

$$V_1 = R \Delta a h_1 b_1 . \quad (5)$$

Соответственно, объем  $\Delta V$  составит:

$$\Delta V = V_e - V_1 . \quad (6)$$

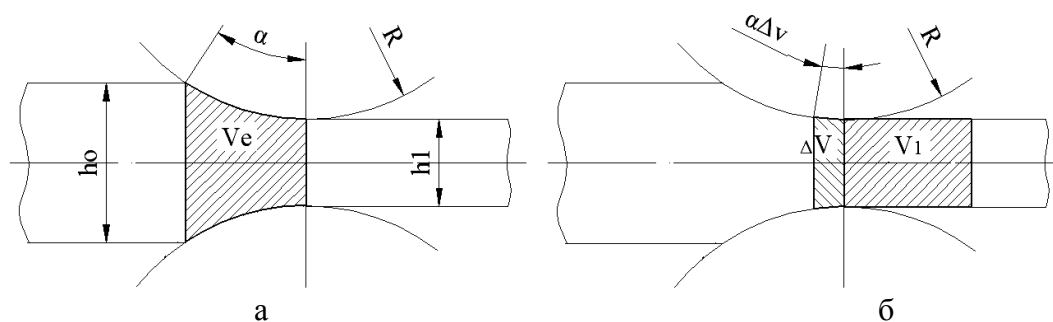


Рис. 1. Очаг деформации до прокатки (а) и после поворота валка на угол  $a$  (б)

В модели смещенных объемов использован известный в теории обработки металлов давлением закон наименьшего сопротивления, который в рассматриваемой задаче в форме принципа наименьшего периметра применен для внутриочаговых областей. Предпосылками для участия в модели принципа наименьшего периметра стали результаты известных экспериментальных исследований [16 и др.], в основе которых метод координатных сеток. Исходные поперечно-вертикальные плоскости в процессе прокатки приобретают вид пространственных поверхностей, характер их формоизменения свидетельствует о том, что проекция каждой из поверхностей, находящихся в пределах очага деформации, на продольно-вертикальную плоскость представляют собой набор кривых переменного радиуса. В абсолютном большинстве случаев с достаточной степенью точности они могут быть аппроксимированы дугой постоянного радиуса. Принцип наименьшего сопротивления, выраженный в форме минимального периметра, при рассмотрении объемного течения металла может быть представлен в форме минимальных поверхностных границ текущего объема.

Принцип минимизации поверхностных границ текущих объемов, положенный в основу модели, реализуется следующим образом. Исходным является объем  $V_0$ , его проекция на плоскость чертежа представлена фигурой  $a_0 b_0 c_0 d_0$  (рис. 2, а). Первоначально объем  $V_0$  представлен в плоских границах:  $a_0 b_0$  – на входе в очаг деформации и  $c_0 d_0$  – на выходе из него. Фигура  $a_0 b_0 c_0 d_0$  преобразуется в равновеликую ей по площади  $a_{00} b_{00} c_0 d_0$  (рис. 2, б), но занимающий минимальный периметр. Линия  $a_{00} b_{00}$  является новой входной границей объема  $V_0$ , отображающей искривление исходной плоскости и, соответственно, характер перемещения металла. Формирование переднего конца объема  $V_0$  и приведение его к виду, показанному на рис. 2, в, происходит на заключительном этапе трансформации исходных поперечных сечений, названные преобразования не оказывают влияния на формирование смещенных объемов, поэтому они не освещаются в данной работе. Объем  $V_0$  в последующих преобразованиях остается в качестве исходного параметра, на смену ему приходит  $V_{01}^*$ , равный по величине первому. Угол контакта делится на  $n$ -е число элементарных углов. При повороте валка на угол  $\Delta a = a / n$  из очага деформации выходит объем металла, равный:

$$\Delta V = R \Delta a h_1 b_1 . \quad (7)$$

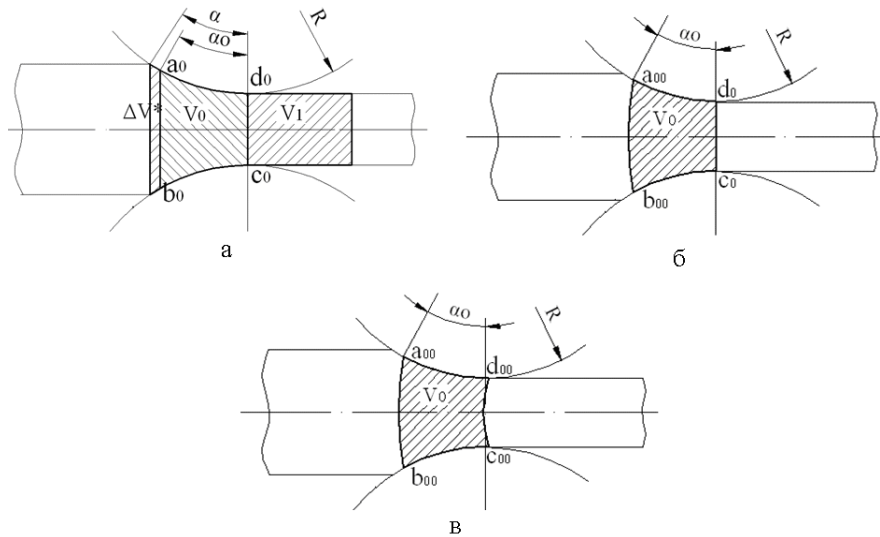


Рис. 2. Исходная (а) и преобразованная (б, в) проекция объема  $V_0$

Численно величина (7) ранее принадлежала объему  $V_0$ , при каждом повороте валка на угол  $\Delta\alpha$  пространство, занимаемое объемом  $V_0$ , сокращается на величину  $\Delta V$  (рис. 3, 1 этап). Объем  $V_0$  трансформируется в равновеликий ему  $V_0^*$  (рис. 3), который при полном повороте валка на угол  $\alpha$  преобразуется в объем  $V_1$  (рис. 1, 2). Механизм образования смещенного объема показан на рис. 4. Объем  $\Delta V$ , переходя в смежную область, обжимается по отношению к валку в радиальном направлении, осаживается по высоте и отжимается валком в сторону, противоположную направлению вращения валка, создавая зону отставания металла.

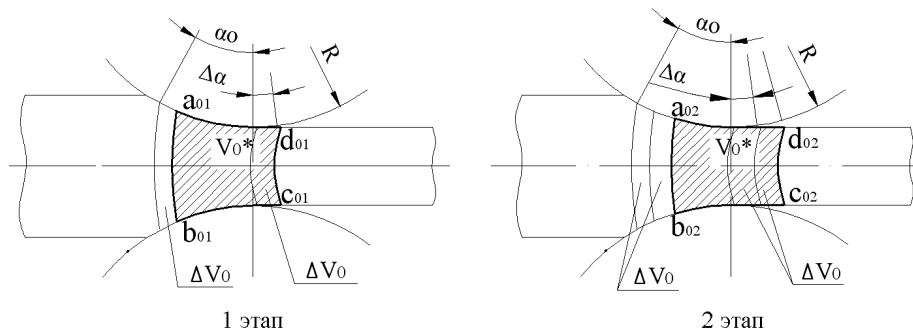


Рис. 3. Этапы формирования смещенного объема:  
1 – поворот валка на угол  $\Delta\alpha$ ; 2 – поворот валка на угол  $2\Delta\alpha$

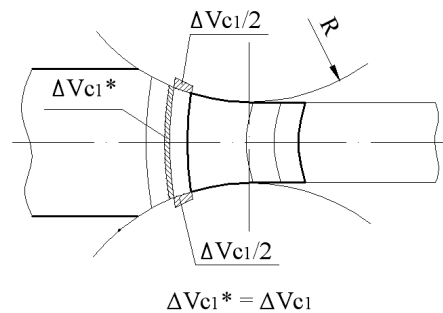


Рис. 4. Механизм образования смещенного объема

На рис. 4 показан элементарный (конечный) смещенный объем  $\Delta V_{c1}$ , сформированный при первом повороте валка на угол  $\Delta\alpha$ ; названный объем состоит из двух элементов, каждый из них численно равен  $\Delta V_{c1}/2$ . Перемещаясь, объемы  $\Delta V_{c1}/2$  занимают равновеликий объем

$\Delta V_{c1}^*$ . Процедура повторяется вплоть до полного выхода объема  $V_0^*$  из очага деформации и преобразования его в объем  $V_1$ . Единичный смещенный объем  $V_c$  определяется суммированием элементарных (конечных) смещенных объемов по всей дуге контакта.

### ВЫВОДЫ

Получило дальнейшее развитие представление об особенностях объемного течения металла при прокатке. В результате анализа объемного течения металла выявлены характерные объемы очага деформации, уточнена функциональная взаимосвязь между ними, уточнен механизм образования смещенного объема при прокатке. Выполнен анализ установленных взаимосвязей между смещенным объемом и другими характерными (смежными) объемами.

Установленные закономерности позволяют расширить представление о физической стороне процесса прокатки, взаимосвязях характерных объемов очага деформации. На основе уточнения механизма объемного течения металла и установления взаимосвязей объемов, сопряженных со смещенным, становится возможным внести уточнения в недостаточно раскрытые вопросы теории прокатки. Использование выявленных закономерностей позволяет развивать методы расчетов кинематических и энергосиловых параметров прокатки для решения прикладных задач.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зильберг Ю. В. Элементы теории прокатки без теории плоских сечений / Ю. В. Зильберг // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – 2002. – Т. 5. Пластична деформація металів. – С. 102–111.
2. Илюкович Б. М. Методика построения математических моделей напряженно-деформированного состояния при прокатке сложных профилей с исключением гипотезы плоских сечений / Б. М. Илюкович, С. В. Ершов, А. Л. Толстомят // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 11. – С. 26–29.
3. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1973. – 288 с.
4. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / [А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин и др.]. – М. : Металлургия, 1976. – 416 с.
5. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / [П. И. Полухин, В. А. Николаев, В. П. Полухин, А. В. Зиновьев, Е. Н. Косаримов]. – М. : Металлургия, 1974. – 230 с.
6. Зильберг Ю. В. Закон и модели пластического трения / Ю. В. Зильберг // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 22–24.
7. Хайкин Б. Е. Рецензия на статью Ю. В. Зильберга «Закон и модели пластического трения» / Б. Е. Хайкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 24–25.
8. Зильберг Ю. В. Ответы на замечания рецензента Б. Е. Хайкина / Ю. В. Зильберг // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 25.
9. Хайкин Б. Е. Операционалистический подход к проблеме трения в условиях обработки металлов давлением / Б. Е. Хайкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 26–27.
10. Василев Я. Д. Уточнение модели напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 5. – С. 19–23.
11. Василев Я. Д. Модель напряжений трения при тонколистовой прокатке / Я. Василев, А. Дементенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 1. – С. 29–33.
12. Зильберг Ю. В. Замечания по дискуссии о пластическом трении / Ю. В. Зильберг // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 9. – С. 26–29.
13. Долженков Ф. Е. О некоторых противоречиях современной теории прокатки / Ф. Е. Долженков // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – 2002. – Т. 5. – Пластична деформація металів. – С. 121–124.
14. 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.
15. Долженков Ф. Е. Нерешенные вопросы современной теории прокатки / Ф. Е. Долженков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 9. – С. 52–56.
16. Тарновский И. Я. Деформация металла при прокатке / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, В. Б. Ляшков. – М. : Металлургиздат, 1956. – 287 с.

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

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: oginskyu@gmail.com