

УДК 621.771.

Огинский И. К.

МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИОННО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ

Большинство решений в теории прокатки получено на основе анализа контактного взаимодействия металла с валком. По этой причине сведения об объемных преобразованиях при прокатке являются неполными и выводы не во всех случаях адекватно отражают явления, происходящее в объеме очага деформации. Следствием сказанного являются спорные положения и противоречия в современной теории прокатки, о чем говорится на страницах печати [1–3]. Исследователями предпринимаются попытки решить проблемные вопросы теории, но часто это происходит, опять-таки, на основе закономерностей контактного взаимодействия. Одним из спорных положений теории прокатки является, в частности, условие постоянства секундных объемов. Его применимость ограничена участками раската, находящимися за пределами очага деформации, в пределах зоны деформации названное условие не выполняется [4, 5].

Целью настоящей работы является анализ и выявление кинематических и деформационных особенностей очага деформации при прокатке, создание модели объемных перемещений металла, позволяющей установить количественные соотношения между скоростями металла и валков по мере их взаимного перемещения, а также определить скорости перемещения элементарных объемов в очаге деформации.

На основе установления количественных взаимосвязей деформационных и кинематических параметров прокатки становится возможным развивать методы решения прикладных задач, достигая необходимой точности, а также внести уточнения в недостаточно раскрытые вопросы теории прокатки.

Условие постоянства секундных объемов относится к числу немногочисленных объемных параметров процесса прокатки. К ним можно отнести, в какой-то мере, фактор формы и условие постоянства объема. Последнее условие, строго говоря, не является технологическим параметром, поскольку оно исходит из свойств материала. Фактор формы l_d / h_c (отношение длины очага деформации l_d к средней высоте раската h_c) является в большей степени классификационным признаком и дает представление об относительной высоте очага деформации, в технологических расчетах он не нашел прямого использования.

Условие постоянства секундных объемов записывают в виде [6]:

$$V_o F_o = V_\varphi F_\varphi = V_1 F_1 = const. \quad (1)$$

Его обычно применяют в виде равенства двух крайних членов:

$$V_o F_o = V_1 F_1, \quad (2)$$

которое позволяет использовать другое соотношение:

$$V_o = V_0 F_0 / F_1 = V_0 \lambda. \quad (3)$$

Условие постоянства секундных объемов можно назвать условным объемным параметром, поскольку оно включает площади, объем (в привычном понимании) в названное условие не входит. Более точным было бы назвать выражения (1) и (2) постоянством секундных площадей. В другом виде (равенство первого и среднего или среднего и третьего членов) условие имеет ограниченное применение, поскольку четкой взаимосвязи между скоростью и площадью поперечного сечения раската в форме постоянства внутриочаговых секундных объемов в пределах всего очага деформации не выявлено. Отмечая невыполнимость

внутриочагового условия постоянства секундных объемов, авторы работы [5] в качестве альтернативного подхода рекомендуют пользоваться условием неразрывности несжимаемого материала. Названное условие имеет вполне определенную физическую обоснованность применения и в этом его принципиальное отличие от условия постоянства секундных объемов в форме:

$$V_{\varphi} F_{\varphi} = const. \quad (4)$$

Выражение (4), являющееся составляющей частью условия (1), носит в большей степени геометрический характер.

Для построения модели воспользуемся общепринятыми обозначениями деформационных и геометрических параметров, основные из них показаны на рис. 1; вводятся также дополнительные параметры, их обозначения приведены на последующих рисунках. Исходным для рассмотрения является единичный объем V_e , он заключен между рабочими поверхностями валков и границами входа металла в валки и выхода из них. Входной границей очага деформации является плоскость, соответствующая углу контакта α , выходной – часть плоскости осей валков (высотой h_l и шириной b_l). Указанные границы обозначены в рамках гипотезы плоских сечений, в рассматриваемой задаче она играет вспомогательную роль, в качестве инструмента наглядности.

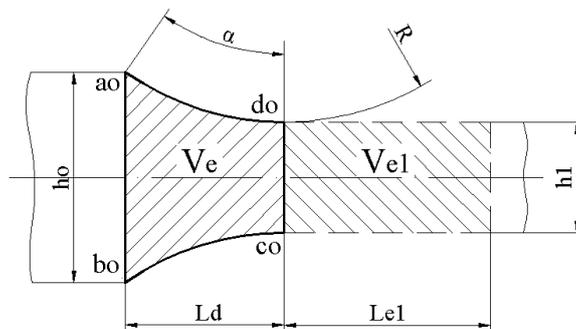


Рис. 1. Очаг деформации в исходном положении

Принимаем допущения, что отсутствует уширение ($\Delta b = 0$) и опережение металла на контакте с валком ($S = 0$). В части взаимосвязи названных признаков объемного течения металла и природы их образования существует много спорных положений и противоречивых мнений, об этом аргументировано говорится в работах [1, 3]. Участие опережения и уширения в рассматриваемой задаче было бы сопряжено с дополнительной неопределенностью, исключая их из рассмотрения, тем самым исключаем (или, по меньшей мере, минимизируем) участие спорных положений в части взаимосвязи двух названных параметров. Принимая допущение, что опережение отсутствует, вводим погрешность, достаточно прогнозируемую по своей величине, составляющую всего несколько процентов. Отсутствие уширения, вообще говоря, является не допущением, а частным, и одновременно распространенным на практике случаем. Принятые допущения не искажают физическую основу модели и не создают препятствий для ее развития.

Рассматривается промежуток времени прокатки, в течение которого объем металла, находящийся в очаге деформации V_e , полностью выйдет за его пределы и займет равновеликий объем V_{e1} (рис. 1). На рис. 1 также обозначены: V_e – единичный (базовый) объем, объем металла, которому предстоит выйти из очага деформации; V_{e1} – объем, вышедший из очага деформации, равный объему V_e :

$$V_e = V_{e1}. \quad (5)$$

На рис. 2–5 показана последовательная трансформация объема V_e в равновеликие объемы: $V_{e\varphi 1}$, $V_{e\varphi 2}$, $V_{e\varphi k}$ и V_{e1} . Объемы $V_{e\varphi 1}$ (рис. 2) и $V_{e\varphi 2}$ (рис. 3) характеризуют начальные этапы трансформации (объем $V_{e\varphi 1}$ – первый этап, $V_{e\varphi 2}$ – второй), объем $V_{e\varphi k}$ (рис. 4) – последний. В завершенном виде трансформация объема V_e в V_{e1} показана на рис. 5. Условие неразрывности выражается в виде:

$$V_e = V_{e\varphi 1} = V_{e\varphi 2} \dots V_{e\varphi k} = V_{e1} = const. \tag{6}$$

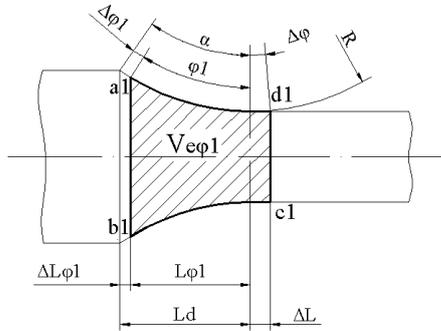


Рис. 2. Первый этап трансформации единичного объема V_e

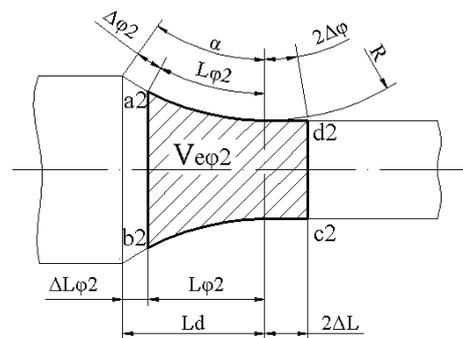


Рис. 3. Второй этап трансформации единичного объема V_e

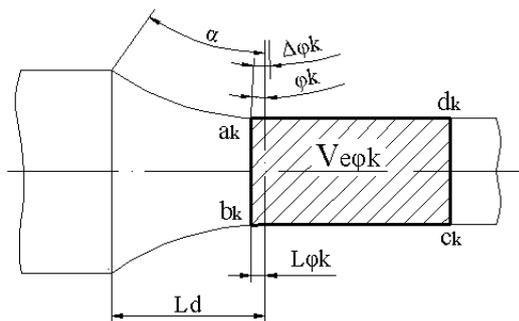


Рис. 4. Заключительный этап трансформации единичного объема V_e

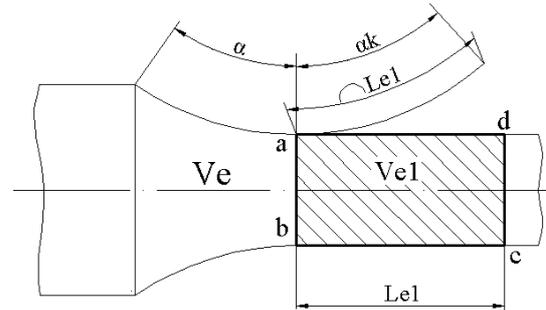


Рис. 5. Трансформация единичного объема V_e в завершенном виде

В период трансформации объема V_e в V_{e1} из очага деформации выходит раскат длиной l_{1e} , в этот же период времени валок совершает поворот на угол α_k (рис. 5). На основе вышеуказанного допущения об отсутствии опережения ($S = 0$) указанная длина раската составляет:

$$l_{1e} = R \alpha_k. \tag{7}$$

Объем металла, вышедшего из очага деформации за период поворота валка на угол α_k , составит:

$$V_{e1} = R \alpha_k h_1 b. \tag{8}$$

Модель включает определение и сравнительную оценку перемещений элементарных объемов металла и валка в равные промежутки времени. Последовательность действий выполняется следующим образом. После задания исходных параметров прокатки (радиус валков R , исходная высота раската h_0 и конечная h_1 , ширина раската b , угол захвата α) определяется объем V_e , после чего угол α делится на произвольное число « n » сколь угодно малых элементарных углов $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \frac{\alpha}{n}. \quad (9)$$

При повороте валка на угол $\Delta\varphi$, передний конец металла, обжимаясь и уходя в вытяжку, проходит элементарный путь, равный:

$$\Delta l = R \Delta\varphi. \quad (10)$$

Скорость переднего конца раската постоянна:

$$\bar{V}_1 = \frac{\Delta l}{\Delta t} = const, \quad (11)$$

где Δt – время поворота валка на угол $\Delta\varphi$.

Скорость металла на входе в очаг деформации \bar{V}_0 при коэффициенте вытяжки λ составит:

$$V_0 = \frac{V_1}{\lambda}. \quad (12)$$

Объем V_e при первом повороте валка на угол $\Delta\varphi$ преобразуется в равновеликий V_{e1} , который при последующем повороте на угол $\Delta\varphi$ преобразуется в $V_{e\varphi 2}$. На рис. 2 положение объема $V_{e\varphi 1}$ и состояние его формы соответствует повороту валка на угол $\Delta\varphi$ (первому повороту валка); на рис. 3 показано положение объема $V_{e\varphi 2}$ при повороте валка на угол $2\Delta\varphi$. При первом повороте валка граница $ao bo$ преобразуется в границу $a1 b1$ объема V_{e1} (рис. 2), соответственно, при втором повороте – $a1 b1$ в $a2 b2$ объема $V_{e\varphi 2}$ (рис. 3). Расстояние $\Delta l_{\varphi 1}$, на которое перемещается граница $ao bo$, преобразуясь в $a1 b1$, определяется из условия равенства названных объемов в соответствии с выражением (6), а скорость ее перемещения составит:

$$\bar{V}_{\varphi 1} = \frac{\Delta l_{\varphi 1}}{\Delta t}. \quad (13)$$

Соответственно, передняя граница $co do$ объема V_e преобразуется в границу $c1 d1$ объема V_{e1} . Площадь раската в сечении, соответствующем углу $\varphi 1$ составит:

$$F_{\varphi 1} = 2 R b (1 - \cos \varphi_1) + F_1. \quad (14)$$

При повороте валка на очередной угол $\Delta\varphi$ процедура повторяется, картина нового положения раската показана на рис. 3. В последующих действиях качественная картина сохраняется вплоть до заключительных этапов, представленных на рис. 4 и 5. На этапе рис. 4 последний элементарный угол поворота $\Delta\varphi$ переходит в отрицательную зону – за плоскость осей валков. Для этого случая рассматривается реальный угол φ_k , который к этому периоду времени определен из предыдущих вычислений. Необходимым становится определение угла $\Delta\varphi_k$, на который следует повернуть валок, чтобы объем $V_{e\varphi k}$ полностью трансформировался в равновеликий ему объем V_{e1} . Названный угол определяется из равенства:

$$\Delta V_{e\varphi k} = V_e - R \Delta\varphi k F_1 = R \Delta\varphi_k F_1, \quad (15)$$

где множитель k численно означает количество элементарных углов $\Delta\varphi$, на которые был повернут валок, до его вхождения в заключительную стадию.

$$\Delta\varphi_k = \frac{\Delta V_{e\varphi k}}{R F_1}. \quad (16)$$

Соответственно, угол α_k на рис. 5 составит:

$$\alpha_k = \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_k. \quad (17)$$

С использованием модели выполнен анализ возможных деформационно-кинематических состояний в очаге деформации для случаев прокатки с фактором формы в диапазоне $l_0 / h_c = 0,16 \dots 16,6$. Установлено, что внутриочаговое условие постоянства секундных объемов выполняется с достаточной точностью (погрешность составляет около 3 %) для случаев прокатки толстых и особо толстых полос, для остальных случаев исследованного диапазона фактора формы погрешность достигала 14 %.

ВЫВОДЫ

Разработана модель объемных перемещений металла, позволяющая установить количественные соотношения между скоростями металла и валков по мере их взаимного перемещения, а также определить скорости перемещения элементарных объемов в очаге деформации. Предложено условие неразрывности, выражающееся в постоянстве базового объема металла при его перемещении в очаге деформации. Введены дополнительные объемные параметры и характеристики очага деформации. Выполнен анализ возможных деформационно-кинематических состояний в очаге деформации для случаев прокатки с фактором формы l_0 / h_c в диапазоне $0,16 \dots 16,6$. Выполнен анализ выполнимости внутриочагового условия постоянства секундных объемов. Установлено, что указанное условие выполняется с достаточной точностью в случаях прокатки толстых и особо толстых полос (погрешность составляет около 3 %), для остальных случаев исследованного диапазона фактора формы погрешность достигает 14 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долженков Ф. Е. О некоторых противоречиях современной теории прокатки / Ф. Е. Долженков // *Сучасні проблеми металургії*. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – Т. 5. – С. С. 121–124.
2. Зильберг Ю. В. О некоторых противоречиях и допущениях теории прокатки / Ю. В. Зильберг // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2004. – № 11. – С. 24–26.
3. Долженков Ф. Е. Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) / Ф. Е. Долженков // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2003. – № 5. – С. 41–44.
4. Тимофеева М. А. Исследование и моделирование энергосиловых параметров процесса дрессировки для совершенствования технологии и оборудования дрессировочных станов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы металлургического производства» / М. А. Тимофеева. – Череповец, 2006. – 24 с.
5. Вольфович Г. В. Закон равенства секундных объемов при продольной периодической прокатке / Г. В. Вольфович, В. В. Вольфович // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов*. – Днепропетровский металлургический институт : Металлургия, 1976. – № 59. – С. 33–37.
6. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – М. : Интернет Инжиниринг, 2001. – 280 с.

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

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: oginsky@gmail.com