

## ЛІТЕРАТУРА

1. [www.metalfoam.net](http://www.metalfoam.net).
2. Babcsán N., Banhart J., Leitmeier D. Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming. Int. Conf. Advanced Metallic Materials, 5-7.11.2003. – Smolenice, Slovakia. – P. 5-15 (2003) 63.

### Анотация

Яблонский А. А., Могилатенко В. Г., Гурия И. М.

Влияние количества и фракционного состава порообразователя на плотность отливок из пеноалюминия

Описана технология изготовления отливок из пенометалла путем замешивания порообразователя в расплав. Определены параметры влияния количества и фракционного состава карбоната кальция на плотность пенометалла.

### Ключевые слова

пористый алюминий, пеноалюминий, алюминиевая пена, металлическая пена, пенометалл, порофор, порообразователь, карбонат кальция, фракция

### Summary

Yablonskiy A., Mogilatenko V., Guriya I.

Effect of the amount and fractional composition of calcium carbonate on the density of foamed aluminum castings

The technology of manufacturing foamed aluminum castings by mixing blowing agent into the melt is described. Parameters of the effect of the amount and fractional composition of calcium carbonate on the density of foamed aluminum.

### Keywords

porous aluminum, foamed aluminum, aluminum foam, metal foam, foamed metal, foaming agent, blowing agent, calcium carbonate, fraction

Поступила 26.05.10

УДК 621.771

**И. К. Огинский**

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## Модель течения металла без применения гипотезы плоских сечений

На основе принятого в теории обработки металлов давлением закона наименьшего сопротивления разработана модель объемного течения металла, исключающая применение гипотезы плоских сечений. Введены дополнительные параметры и характеристики очага деформации. Выполнен анализ установленных взаимосвязей между выявленными признаками объемного течения металла. Предложенные принципы построения модели адекватно отражают физическую картину течения металла во взаимосвязях характерных объемов очага деформации. Данный подход может быть использован для сложных случаев – решения задач сортовой прокатки.

**Ключевые слова:** прокатка, модель, параметр, единичный объем, остаточный объем, опережение, угол захвата

**О**бъемные перемещения при прокатке скрыты и недоступны для прямого изучения, по этой причине на первых и последующих этапах создания научных основ теории прокатки активно развивались экспериментальные методы исследований [1, 2]. Эксперименты по своей постановке не могут охватить все многообразие сочетаний технологических факторов прокатки, поэтому многие результаты носят частный характер и могут быть использованы лишь для условий, в которых они получены. В связи с этим выводы, сделанные на основе экспериментальных исследований, носят в большинстве своем качественный характер. Теоретические исследования, направленные на получение обобщающих результатов, выполнены на основе закономерностей контактного взаимодействия [3-5 и др.]. В основе теоретических результатов лежит использование гипотезы плоских сечений. Названная гипотеза нашла широкое применение в теории прокатки, несмотря на то, что она выполняется с достаточной точностью лишь в ограниченных случаях. Исследователи предпринимают попытки исключить гипотезу плоских сечений из рассмотрения задач теории прокатки [6], предлагаются новые подходы [7], однако эффективных альтернативных решений пока не создано. Сведения об объемных преобразованиях в очаге деформации при прокатке, полученные на основе контактного взаимодействия металла с валком, являются неполными. Из-за недостатка информации выводы не всегда адекватно отражают явления, происходящие в объеме очага деформации. Следствием сказанного являются спорные положения и противоречия в современной теории прокатки, о чем говорится на страницах изданий научно-технической литературы [8-10]. Исследователями предпринимаются попытки решить проблемные вопросы этой теории, но часто это происходит опять-таки на основе закономерностей контактного взаимодействия.

Целью настоящей работы является анализ деформационных особенностей очага деформации при прокатке, выявление закономерностей объемного течения металла, разработка предложений по созданию новых подходов к моделированию, создание новых объемных характеристик и параметров, установление характерных объемов и взаимосвязей между ними. В основе предлагаемых подходов лежат физические признаки объемного течения металла при прокатке. Благодаря установлению взаимосвязи деформационных и кинематических параметров прокатки становится возможным внести уточнения в недостаточно раскрытые вопросы теории прокатки и в конечном итоге достичь необходимой точности решения прикладных задач.

В суть метода заложен принцип минимума работы, известный в теории обработки металлов давлением как закон наименьшего сопротивления или наименьшего периметра. Предпосылками для участия в модели принципа наименьшего периметра стали результаты экспериментальных исследований [2], в основе которых лежит метод координатных сеток. Исходные поперечно-вертикальные плоскости в процессе прокатки претерпевают изменения, подчи-

няясь физическим законам, в том числе и принципу минимума работы, приобретают вид пространственных поверхностей, анализ характера их формоизменения позволяет выявить некоторые закономерности. Проекция каждой из поверхностей, находящейся в пределах очага деформации, на продольно-вертикальную плоскость представляет собой набор кривых переменной радиуса. Характер изменения формы кривых свидетельствует о том, что в абсолютном большинстве случаев с достаточной степенью точности они могут быть аппроксимированы дугой постоянного радиуса. Принцип наименьшего сопротивления, выраженный минимальным периметром, при рассмотрении объемного течения металла может быть представлен в виде минимальных поверхностных границ текущего объема.

Для построения модели воспользуемся общепринятыми обозначениями деформационных и геометрических параметров, часть из них показана на рис. 1. Дополнительные параметры представлены на рис. 2-4. Исходным для рассмотрения является единичный объем  $V_e$ , который заключен между рабочими поверхностями валков и границами входа металла в валки и выхода из них. Входной границей очага деформации является плоскость, соответствующая углу контакта  $\alpha$ , выходной – часть плоскости осей валков (высотой  $h_1$  и шириной  $b_1$ ). Указанные границы условные, они обозначены в рамках гипотезы плоских сечений (в рассматриваемой задаче она играет вспомогательную роль).

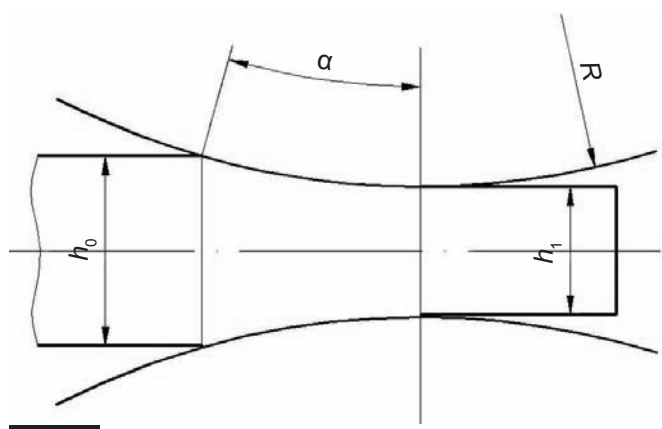


Рис. 1. Очаг деформации в исходном состоянии

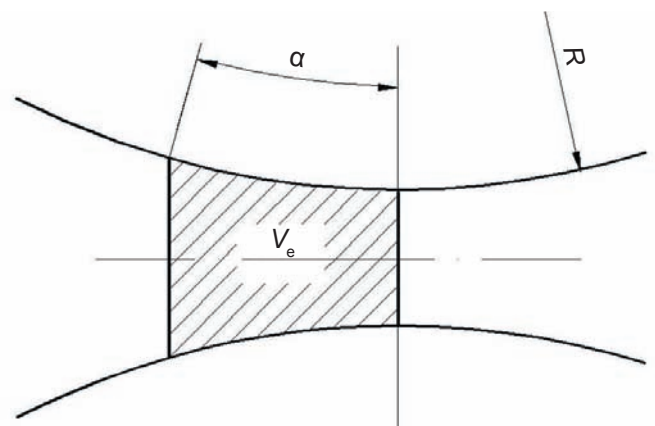


Рис. 2.  $V_e$  – единичный объем

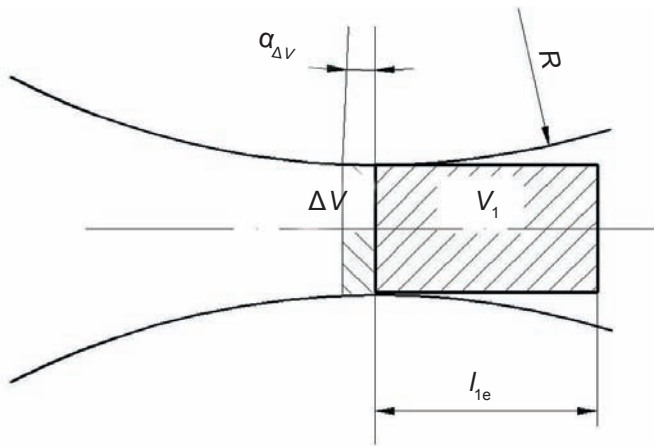


Рис. 3.  $\Delta V$  – остаточный объем;  $V_1$  – объем, вышедший из очага деформации за период поворота валка на угол  $\alpha$

Принимаем допущения, что отсутствует уширение ( $\Delta b = 0$ ) и опережение металла на контакте с валком ( $S = 0$ ). Относительно взаимосвязи названных признаков объемного течения металла и природы их образования существует много спорных положений и неопределенностей, об этом аргументированно говорится в работах [8, 10]. 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 взаимосвязи двух названных параметров. Принимая допущение, что опережение отсутствует, вводим погрешность, соизмеримую с величиной опережения; погрешность достаточно прогнозируемая по своей величине и составляет несколько процентов. Отсутствие уширения является не допущением, а частным и в то же время распространенным на практике случаем. Принятые допущения не искажают физическую основу метода и не создают препятствий для его развития.

Приведенные на рис. 2-4 обозначения отражают объемные, линейные и угловые параметры очага деформации. Каждый из них имеет свое происхождение, они возникают в ходе преобразования исходного (базового) объема  $V_e$ , который при повороте валка на угол  $\alpha$  деформируется и идет в вытяжку.

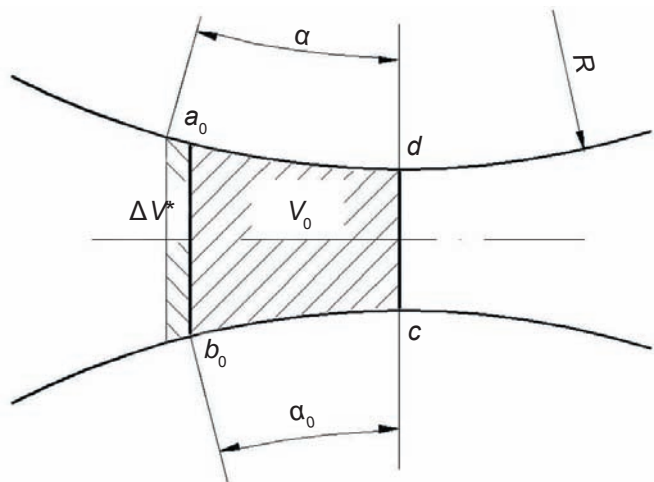


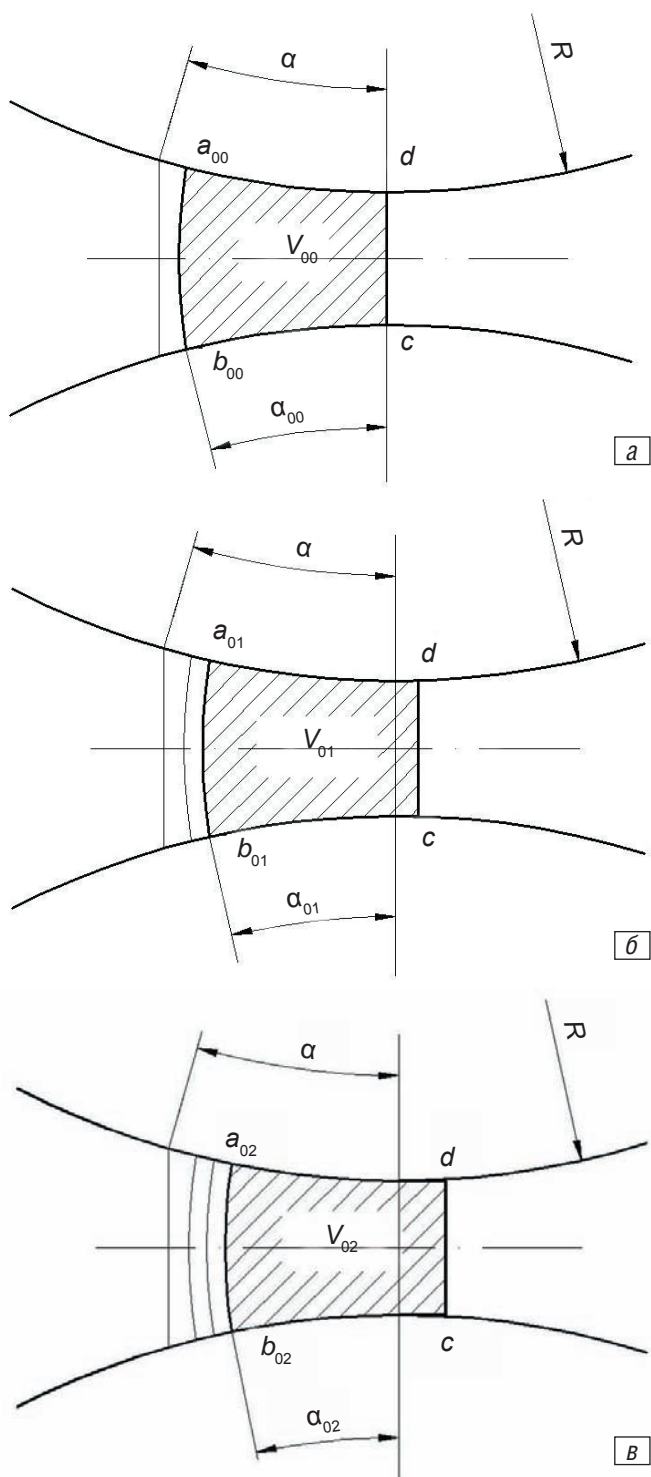
Рис. 4.  $\Delta V^*$  – объем, равный по величине остаточному объему;  $V_0$  – объем, которому предстоит выйти из очага деформации после поворота валка на угол  $\alpha$

Как было предварительно установлено в результате анализа и подтверждено экспериментально [11], часть металла при этом выходит за пределы очага деформации (за плоскость осей валков), а часть остается в границах объема  $V_e$ , его выходной части. Названный факт, не привлекая внимания исследователей, является одним из элементов модели.

На рис. 2-6 обозначены:  $V_1$  – объем металла, вышедшего из очага деформации за период поворота валка радиусом  $R$  на угол  $\alpha$ ;  $\Delta V$  – объем металла, оставшегося в очаге деформации после поворота валка на угол  $\alpha$  (остаточный объем);  $\Delta V^*$  – объем металла, которому предстоит остаться в очаге деформации после поворота валка на угол  $\alpha$  (равен объему  $\Delta V$ ).  $V_0$  – объем металла, которому предстоит выйти из очага деформации за период поворота валка на угол  $\alpha$  (объем металла, находящегося в очаге деформации, по величине равный объему  $V_1$ );  $V_{00}, V_{01}, V_{02} \dots V_{0n}$  – текущие объемы металла, равные по величине объему  $V_0$  ( $V_0 = V_{01} = V_{02} = \dots = V_{0n}$ );  $\alpha_0, \alpha_{01}, \alpha_{02} \dots \alpha_{0n}$  – центральные углы, соответствующие положению входных границ объемов  $V_0, V_{01}, V_{02} \dots V_{0n}$ ;  $\alpha_{\Delta V}$  – центральный угол, соответствующий положению входной границы объема  $\Delta V$ ;  $l_{\Delta V}$  – протяженность участка очага деформации, соответствующая углу  $\alpha_{\Delta V}$ ;  $l_{1e}$  – длина раската, вышедшего из очага деформации за период поворота валка на угол  $\alpha$ .

Принцип минимизации поверхностных границ текущих объемов, положенный в основу метода, реализуется следующим образом. Очаг деформации делится на конечное число объемов с помощью первоначально вертикальных сечений, которые трансформируются в криволинейные поверхности, отвечающие характеру течения металла в очаге деформации. Деление очага деформации на конечные объемы производится на основе равных угловых интервалов – угол  $\alpha$  делится на  $n$ -е число участков. Исходным является объем  $V_0$ , его проекция на плоскость чертежа представлена фигурой  $a_0b_0cd$ . Первоначально объем  $V_0$  представлен в плоских границах:  $a_0b_0$  – на входе в очаг деформации и  $cd$  – на выходе из него. Выходная граница  $cd$  претерпевает изменения на заключительном этапе моделирования, входная  $a_0b_0$  – на первом. Фигура  $a_0b_0cd$  преобразуется в равновеликую ей по площади  $a_{00}b_{00}cd$ , но занимающую минимальный периметр. Линия  $a_{00}b_{00}$  является новой входной границей объема  $V_0$ , отображающей искривление исходной плоскости и, соответственно, характер перемещения металла. В дальнейшем объем  $V_0$  остается в качестве исходного параметра, на смену ему приходит  $V_{01}$ , равный по величине первому. При повороте валка на угол  $\Delta\alpha = \alpha/n$  из очага деформации выходит объем металла, равный  $R\Delta\alpha h_1b_1$ , на такую же величину по сравнению с объемом  $V_0$  уменьшается та часть объема  $V_{01}$ , которая находится в границах очага деформации (рис. 5, б, в). Процедура повторяется вплоть до полного выхода объема  $V_{0n}$  из очага деформации.

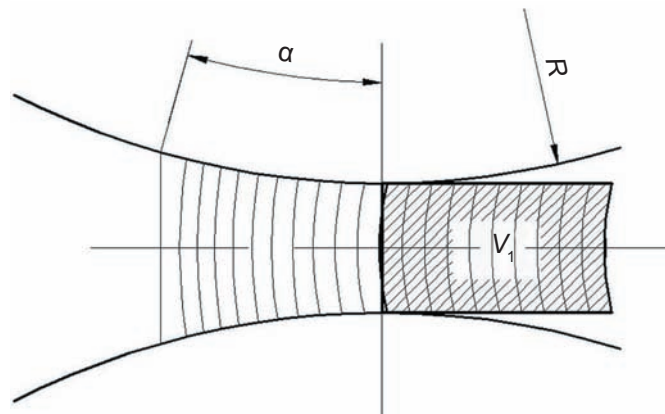
Решая поэтапно задачу минимизации площадей поверхностей, ограничивающих конечные объемы, получаем набор кривых, которые характеризуют течение металла в очаге деформации (рис. 6). На



**Рис. 5.** Объем, равный по величине объему  $V_0$ :  $V_{00}$  (а);  $V_{01}$  (б);  $V_{02}$  (в)

последнем этапе вычисления формируется выходная граница объема  $V_{0n}$ , происходит замещение временных выходных плоскостей текущих объемов криволинейной поверхностью и все кривые приобретают вид, как показано на рис. 6.

На рис. 1-6 представлены этапы моделирования, выполненного для условий, мм:  $R = 105$ ;  $h_0 = 24,81$ ;  $h_1 = 16,76$ ;  $\Delta h = 8,05$ . Сравнение результатов



**Рис. 6.** Заключительный этап трансформации исходных сечений

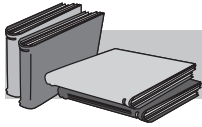
моделирования и экспериментальных исследований [2] показывает высокую качественную и достаточно хорошую количественную сходимость. Расхождение в количественных значениях лишь подтверждает сложность процесса прокатки и необходимость его дальнейшего изучения.

Принцип минимизации периметра, будучи формой выражения закона минимума энергии, является обобщенным подходом; он может быть применен и к решению задач, где участвует уширение. В этом случае решение сводится к минимизации площади поверхности, ограничивающей конечный объем. Принципы, положенные в основу модели, в совокупности представляют собой новое решение вариационных задач пластического формоизменения. Метод может совершенствоваться введением дополнительных признаков, учитывающих, в частности, фактор формы очага деформации и условия на контакте.

### Выводы

Методы исследований объемного течения металла при прокатке получили дальнейшее развитие. На основе принятого в теории обработки металлов давлением закона наименьшего сопротивления предложен подход к моделированию. Разработана модель объемного течения металла, исключающая применение гипотезы плоских сечений. Введены дополнительные параметры и характеристики очага деформации. Выполнен анализ установленных взаимосвязей между выявленными признаками объемного течения металла.

Предложенные принципы построения модели адекватно отражают физическую картину течения металла во взаимосвязях характерных объемов очага деформации. На основе разработанных взаимосвязей характерных объемов становится возможным вносить уточнения в недостаточно раскрытые вопросы теории прокатки. Использование предложенных принципов моделирования позволит создать более точные методы решения прикладных задач. Данный подход может быть использован для сложных случаев – решения задач сортовой прокатки.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарновский И. Я. Формоизменение при пластической обработке металлов. – М.: Металлургия, 1954. – 534 с.
2. Тарновский И. Я., Поздеев А. А., Ляшков В. Б. Деформация металла при прокатке. – М.: Металлургия, 1956. – 287 с.
3. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
4. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
5. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П. И. Полухин, В. А. Николаев, В. П. Полухин и др. – М.: Металлургия, 1974. – 199 с.
6. Зильберг Ю. В. Элементы теории прокатки без теории плоских сечений // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів. – 2002. – Т. 5. – С. 102-111.
7. Илюкович Б. М., Ершов С. В., Толстопят А. Л. Методика построения математических моделей напряженно-деформированного состояния при прокатке сложных профилей с исключением гипотезы плоских сечений // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2004. – № 11. – С. 26-29.
8. Долженков Ф. Е. О некоторых противоречиях современной теории прокатки // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів. – 2002. – Т. 5. – С. 121-124.
9. Зильберг Ю. В. О некоторых противоречиях и допущениях теории прокатки // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2004. – № 11. – С. 24-26.
10. Долженков Ф. Е. Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) // Там же. – 2003. – № 5. – С. 41-44.
11. Огинский И. К. Экспериментальные исследования объемного течения металла при прокатке // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Новые решения в современных технологиях. – 2010. – № 42. – С. 9-13.

### Анотація

Огинський Й. К.

### Модель течії металу без використання гіпотези плоских перерізів

На основі прийнятого в теорії обробки металів тиском закону найменшого опору розроблено модель об'ємної течії металу, що виключає використання гіпотези плоских перерізів. Введено додаткові параметри і характеристики зони деформації. Виконано аналіз встановлених взаємозв'язків між виявленими ознаками об'ємної течії металу. Запропоновані принципи побудови моделі адекватно відображають фізичну картину течії металу із взаємозв'язками об'ємів зони деформації. Даний підхід може бути використаний для складних випадків – рішення задач сортової прокатки.

### Ключові слова

прокатка, модель, параметр, одиничний об'єм, остаточний об'єм, випередження, кут захоплення

### Summary

Oginsky Y.

### The model of metal flow without the use of the plane sections hypothesis

On the basis of the law of least resistance adopted in the theory of metal forming, an approach to modeling is developed the model of bulk metal flow, excluding the application of the hypothesis of plane flows. Additional parameters and characteristics of a deformation were used. The analysis of the linkages between the detected features the metal flow was introduced. The proposed principles of the model reflect adequately the physical pattern of the flow metal in the related characteristic of the deformation zone. The given approach can be used for complicated cases – to solve problems of sectional rolling.

### Keywords

rolling, model, parameter, unit volume, residual volume, forward slip, angle of nip

Поступила 02.12.10