УДК 621.77

Д.В. Орлов, Я.Е. Бейгельзимер

РАЗРЫХЛЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ТОНКИХ ЛИСТОВ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
340114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

Статья поступила в редакцию 25 марта 1998 года

Предлагается модель микроразрушения металла при холодной продольной прокатке тонких листов. Поврежденность металла характеризуется величиной микропористости. Последняя рассчитывается с использованием модели структурно-неоднородного пористого тела. Показано, что при различных условиях величина пористости может как монотонно расти по направлению прокатки, так и иметь максимум в районе нейтрального сечения. Это обусловлено конкуренцией процессов разрыхления металла и его залечивания.

Введение

Продольная прокатка – один из самых распространенных методов обработки металлов давлением (ОМД). Прокатку тонких листов производят в холодном состоянии, после чего они, как правило, подвергаются дальнейшей обработке. В результате прокатки происходит наклеп, связанный непосредственно с микроразрушением и образованием микропор, который впоследствии можно «залечить» термообработкой. Термообработка холоднокатаных листов связана с большими трудностями, к тому же довольно дорого стоит, возникают проблемы с размещением дополнительного оборудования и снижением производительности, что увеличивает стоимость проката. Поэтому крайне важно знать, регулировать и, по возможности, снижать количество накопленных микродефектов. Для прогнозирования развития указанного процесса целесообразно применять математические модели, одна из которых предложена в данной работе.

1. Вязкое разрушение металлов при обработке давлением

В настоящее время имеется два основных подхода к математическому моделированию вязкого разрушения. Первый, развитый в работах [1–12], опирается на постулат о существовании некоторого макрообъекта, называемого обычно поврежденностью и являющегося количественной мерой микроразрушения материала при деформации. Последнее непосредственно предшествует макроразрушению.

В соответствии с принципом макроскопической определимости Ильюшина [13] по-

лагают, что величина поврежденности однозначно определяется процессом нагружения и может быть представлена в виде функционала от этого процесса.

Критерий макроскопического разрушения записывают как условие, когда некая мера поврежденности достигает критической величины.

Работы, в которых реализован первый подход к моделированию разрушения, различаются типом объекта «поврежденность» (скаляр [1–5,11] или тензор [8,9,12]), видом функционального выражения для него и мерой поврежденности, входящей в критерий разрушения.

В настоящее время наибольшей популярностью среди специалистов по ОМД пользуются критерии [1–5], в которых поврежденность является скалярной величиной, а процесс нагружения определяется лишь показателем жесткости напряженного состояния и параметром Лоде. Данные критерии, характеризующие деформируемый материал и температурно-скоростные условия деформирования, многократно проверены в экспериментах. Имеются графики, номограммы, таблицы с конкретными численными значениями параметров, входящих в эти критерии, что делает последние удобными в работе.

Несмотря на безусловные достоинства критериев [1–5], имеются по крайней мере две причины, заставляющие исследователей искать другие подходы к прогнозированию разрушения. Первая связана с тем, что величину поврежденности нельзя непосредственно измерить. Она определяется лишь в результате макроскопического разрушения материала. Вторая причина состоит в том, что критерии [1–5] не описывают разрушение, связанное с локализацией деформации.

Решение указанных проблем возможно в рамках второго подхода к моделированию разрушения, развиваемого в работах [6,14,15–23]. Суть его заключается в том, что в качестве количественной меры микроразрушения материала принимается величина его относительной пористости, для которой записывается кинетическое уравнение, полученное из тех или иных соображений. Такой подход имеет достаточные физические основания, поскольку разрушение связано с образованием микронесплошностей, в основном и определяющих согласно [6] величину пористости. Последнюю, в отличие от поврежденности, можно непосредственно измерить, что решает первую из указанных выше проблем.

Работы, выполненные в рамках второго подхода, различаются между собой по методам получения кинетических уравнений для пористости. С нашей точки зрения, наибольший интерес представляют исследования, в которых кинетические уравнения получены из определяющих соотношений для деформируемого материала [15–21,23]. Дело в том, что в рамках этих исследований могут быть изучены вопросы локализации пластической деформации и связанного с локализацией разрушения.

Определяющие соотношения [17] базируются на модели пористого тела [15], а соотношения [16] – на модели [7]. Модели пористых тел [15] и [7] не описывают в исходном виде зарождение пор при сжимающих нагрузках и поэтому должны быть дополнены механизмами порообразования. В работе [16] в таком качестве выступают гидростатические растягивающие напряжения, которые добавляются к внешним гидростатическим напряжениям и позволяют с помощью модели [7] описать процессы порообразования. В [17] разрыхление вводится непосредственно в кинетическое уравнение для пористости, полученное на основе [15]. При этом различают порообразование, контролируемое деформацией и напряжениями.

В работах [16,17] в качестве одного из критериев разрушения приняты условие достижения пористостью некоторого критического значения и потеря устойчивости по

«материальному» типу.

Данная статья представляет собой попытку расчета технологической пластичности заготовок при холодной прокатке тонких листов и механических свойств изделий с помощью физически обоснованной модели структурно-неоднородного материала [23]. В основе этой модели лежит условие пластичности, учитывающее влияние гидростатического давления на механизмы пластической релаксации внутренних напряжений и имеющее вид

$$6a\Theta\sigma^2 + \tau^2 = \left(\tau_S - \alpha\sigma\right)^2, \tag{1}$$

где Θ – пористость материала, характеризующая поврежденность его структуры; σ – гидростатическая составляющая тензора напряжений; τ – интенсивность девиатора напряжений; τ_S – предел текучести металла на сдвиг; α – коэффициент внутреннего трения, являющийся количественной мерой эффективности действующих каналов пластической релаксации внутренних напряжений; a – параметр, характеризующий морфологию мезонесплошностей .

Из данного условия пластичности в соответствии с ассоциированным законом пластического течения в [23] получено кинетическое уравнение для пористости, которое будет использовано нами в последующих разделах этой работы.

2. Напряженно-деформированное состояние при прокатке тонких листов

В первом приближении для расчета напряженно-деформированного состояния при прокатке тонких листов воспользуемся инженерным методом, расчетная схема которого приведена на рис. 1.

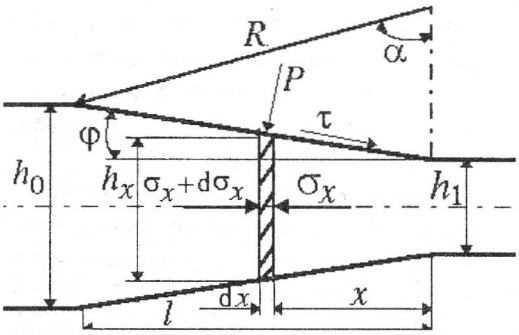

Рис. 1. Расчетная схема холодной прокатки тонкого листа

В основном будем следовать работе [24], где получены следующие соотношения для величины удельного давления p_x в точке x:

для зоны отставания

$$p_x = \frac{2\tau_S}{\delta}\left[\left(\xi_0\delta - 1\right)\left(\frac{h_0}{h_x}\right)^{\delta} + 1\right], \tag{2}$$

для зоны опережения

$$p_x = \frac{2\tau_S}{\delta}\left[\left(\xi_1\delta + 1\right)\left(\frac{h_x}{h_1}\right)^{\delta} - 1\right], \tag{3}$$

где $\delta = \dfrac{\mu}{\mathrm{tg}(\beta/2)}$; β – угол захвата; μ – коэффициент поверхностного трения; ξ_0, ξ_1 – коэффициенты, учитывающие влияние подпора (натяжения) соответственно предыдущей и последующей клетей. В случае отсутствия последних $\xi_0 = \xi_1 = 1$.

В очаге деформации в плоскости нейтрального сечения выражения (2) и (3) будут равны между собой. Отсюда найдем соотношение для определения положения нейтрального сечения

$$\bar{h}_n = \frac{1}{\eta}\left(\frac{1+\sqrt{1+\left(\xi_0{}^2\delta^2-1\right)\eta^\delta}}{\xi_1\delta+1}\right)^{\frac{1}{\delta}}, \tag{4}$$

где $\eta = h_0/h_1$ (h_0, h_1 – соответственно начальная и конечная высота листа); $\bar{h}_n = h_n/h_0$ (h_n – высота листа в нейтральном сечении).

3. Модель разрыхления металла при холодной прокатке тонких листов

С использованием условия (1) в работе [23] получено следующее кинетическое уравнение для определения пористости Θ:

$$\frac{\mathrm{d}\,\Theta}{\mathrm{d}\,\gamma} = \alpha + 6a\Theta\chi, \tag{5}$$

где $\chi = \sigma/\tau_S$ – показатель жесткости напряженного состояния; γ – интенсивность девиатора деформаций,

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{3}}e_u, \tag{6}$$

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{h_0}{h_x} = -\frac{2}{\sqrt{3}}\ln\bar{h}_x, \tag{7}$$

$$\bar{h}_x = h_x/h_0,$$

где h_x – текущая высота полосы.

Из (6) и (7) получаем

$$\gamma = -\frac{1}{\sqrt{2}}\ln\bar{h}_x. \tag{8}$$

Продифференцировав (8), имеем

$$d\gamma = -\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{d\bar{h}_x}{\bar{h}_x}. \tag{9}$$

Из определения χ и условия пластичности [24] следует

$$\chi\sqrt{2} = -\frac{p_x}{\tau_S} + 1. \tag{10}$$

Подставив (2) и (3) в (10), получим

$$\chi\sqrt{2} = \begin{cases} -\frac{2}{\delta}\left[\left(\xi_0\delta - 1\right)\left(\frac{1}{\bar{h}_x}\right)^{\delta} + 1\right] + \frac{1}{\sqrt{2}}, & \bar{h}_n \le \bar{h}_x \le 1, \\ -\frac{2}{\delta}\left[\left(\xi_1\delta + 1\right)\left(\bar{h}_x\chi\right)^{\delta} - 1\right] + \frac{1}{\sqrt{2}}, & \frac{1}{\eta} \le \bar{h}_x < \bar{h}_n. \end{cases} \tag{11}$$

Подставив (9) и (11) в (5), после всех алгебраических преобразований получим дифференциальные уравнения первого порядка для определения пористости материала

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}\bar{h}_x} = \frac{6a\left(\xi_0\delta - 1\right)}{\delta}\frac{\Theta}{\bar{h}_x^{1+\delta}} + 3a\left(\frac{2}{\delta} - 1\right)\frac{\Theta}{\bar{h}_x} - \frac{\alpha}{\sqrt{2}}\frac{1}{\bar{h}_x}, & \bar{h}_n \le \bar{h}_x \le 1, \\ \frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}\bar{h}_x} = \frac{6a\eta^{\delta}\left(\xi_1\delta + 1\right)}{\delta}\frac{\Theta}{\bar{h}_x^{1-\delta}} - 3a\left(\frac{2}{\delta} + 1\right)\frac{\Theta}{\bar{h}_x} - \frac{\alpha}{\sqrt{2}}\frac{1}{\bar{h}_x}, & \frac{1}{\eta} \le \bar{h}_x < \bar{h}_n. \end{cases} \tag{12}$$

4. Расчет по соотношениям модели. Анализ результатов

Дифференциальные уравнения (12) с начальным условием $\Theta = \Theta_0$ при $\bar{h}_x = 1$ численно исследовались с помощью пакета Mathcad 7.0 Pro. В частности, на рис. 2 приведены результаты расчета, которые отображены в виде графиков в координатных осях относительная высота полосы – пористость. Из рисунка видно, что в направлении прокатки пористость может как монотонно возрастать, так и иметь максимум и минимум при определенных условиях.

Графики показывают, что увеличение коэффициента трения приводит к снижению пористости после прокатки, что объясняется ростом гидростатического давления. Увеличение обжатия приводит к качественному изменению характера разрыхления материала: появляется немонотонность в зависимости Θ от h_x. Это объясняется конкуренцией процессов разрыхления и залечивания несплошностей: максимум величины контактных

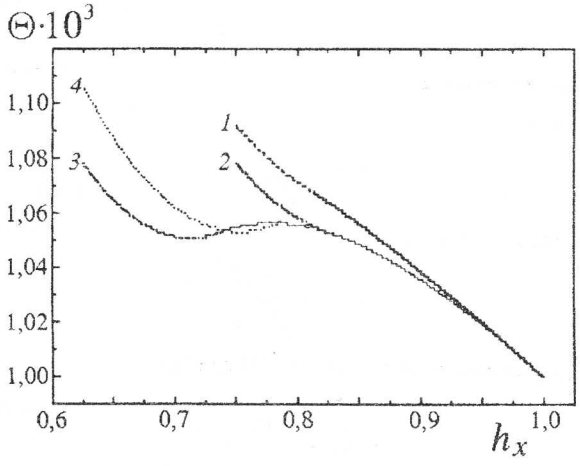

Рис. 2. Зависимость пористости от текущего значения относительной высоты полосы. Расчет выполнен при следующих условиях: $\alpha = 10^{-3}$; $a = 10^{-1}$; $\Theta_0 = 10^{-3}$; $\xi_1 = 1$; $\varepsilon = 0{,}25$ (*1*, *2*), $\varepsilon = 0{,}375$ (*3*, *4*); $\mu = 0{,}11$ (*1*), $\mu = 0{,}15$ (*2–4*); $\xi_0 = 1$ (*1–3*), $\xi_0 = 0{,}8$ (*4*). Изменение пористости до нейтрального сечения – сплошные линии, после – прерывистые

напряжений вблизи нейтрального сечения приводит к преобладанию в данной области процессов залечивания над процессами порообразования. При наличии переднего натяжения величина пористости сильно возрастает, что происходит вследствие снижения гидростатического давления.

1. *Г.Д. Дель*, Технологическая механика, Машиностроение, Москва (1978).
2. *В.Л. Колмогоров*, Напряжения, деформации, разрушения, Металлургия, Москва (1970).
3. *В.А. Огородников*, Оценка деформируемости металлов при обработке давлением, Вища школа, Киев (1983).
4. *А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов*, Ресурс пластичности при обработке металлов давлением, Металлургия, Москва (1984).
5. *С.М. Красновский, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин*, Разрушение металлов при пластическом деформировании, Наука и техника, Минск (1983).
6. *В.А. Скуднов*, Предельные пластические деформации металлов, Металлургия, Москва (1984).
7. *Р.Дж. Грин*, Механика № 4, 109 (1973).
8. *А.А. Ильюшин*, Механика твердого тела № 3, 21 (1967).
9. *Г.Д. Дель*, Рукопись деп. в ВИНИТИ 13.04.82, № 1813-82, Воронеж (1982).
10. *Г.Д. Дель*, Физика и техника высоких давлений вып.11, 28 (1983).
11. *В.А. Огородников, И.О. Спивак*, там же, 33.
12. *В.М. Михалевич*, Изв. АН СССР. Металлы № 5, 89 (1991).
13. *А.А. Ильюшин*, Пластичность. Основы общей математической теории, Изд-во АН СССР, Москва (1963).
14. *В.И. Владимиров*, Физическая природа разрушения металлов, Металлургия, Москва (1984).
15. *А.П. Герсон*, Теоретические основы инженерных расчетов **99,** сер. Д, № 1, 1 (1977).
16. *В.М. Сегал*, Журнал прикладной механики и технической физики № 1, 164 (1981).
17. *A. Needleman, V. Tvergaard*, Engineering Fracture Mechanics **38,** 157 (1991).
18. *M. Zheng, Z.J. Luo, X. Zheng*, Engineering Fracture Mechanics **41,** 103 (1992).
19. *Y. Casey, T.D. Sullivan*, International Journal of Plasticity **1**, 39 (1985).
20. *М.Б. Штерн*, Порошковая металлургия № 5, 28 (1989).
21. *М.Б. Штерн*, Порошковая металлургия № 6, 34 (1989).
22. *О.Б. Наймарк*, Механика композитных материалов № 1, 16 (1981).
23. *Ya.E. Beygelzimer, B.M. Efros, V.N. Varyukhin and A.V. Khohlov*, Engineering Fracture Mechanics **48**, 629 (1994).
24. *А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян*, Теория продольной прокатки, Металлургия, Москва (1980).

D.V. Orlov, Ya.E. Beygelzimer

LOOSENING OF METAL AT COLD ROLLING OF THIN METAL SHEETS

A model of microdestruction of metal sheets at cold longitudinal rolling of thin metal sheets is proposed. Domage of the sheets is characterized by the value of microporosity, to calculate which a model of the structurally-ununiform porous body is applied. It is shown that at different conditions the porosity value might monotonously increase in the direction of the rolling as well as to manifest the maximum in the region of the neutral cross-section. This is due to competing of the processes of loosening and cure of metal.

Fig. 1. Calculated shedule of sheet cold rolling

Fig. 2. Dependence of the porosity value on the current value of the relative height of a metal sheet. The calculation is based on the following parameters: $\alpha = 10^{-3}$; $a = 10^{-1}$; $\Theta_0 = 10^{-3}$; $\xi_1 = 1$; $\varepsilon = 0{,}25$ (*1*, *2*), $\varepsilon = 0{,}375$ (*3*, *4*); $\mu = 0{,}11$ (*1*), $\mu = 0{,}15$ (*2–4*); $\xi_0 = 1$ (*1–3*), $\xi_0 = 0{,}8$ (*4*). Porosity variations up to the neutral cross-section – solid lines, after it – discontinuous lines