

УДК 539.2

Вплив зовнішньої періодичної дії на фазову діаграму режимів фрагментації металів при інтенсивній пластичній деформації

Д. С. Трощенко, О. В. Хоменко

Сумський державний університет, Україна

The solid fragmentation during the process of severe plastic deformation is studied using the non-equilibrium evolution thermodynamics. The grain boundaries and dislocations are considered as the main structural defects. Their interaction is of great importance for limiting structures formation. The kinetics of phase transition from the single crystal to the fragmented sample is investigated also. The case of external periodic influence on the evolution of the defects density steady-states originating¹ is considered. It is shown, that frequency and amplitude of influence change the system behavior.

Key words: grain boundary, dislocation, limiting structure, phase transition, phase diagram, fragmentation.

1. Вступ

Для досягнення високих механічних властивостей метали піддають різного роду обробленням. Методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД) є найбільш ефективними для досягнення мікродисперсної структури металів з лінійним розміром зерен близько 100 нм [1,2].

Останнім часом, для опису руйнування квазікрихких матеріалів [1], подрібнення зерен у процесі обробки металів методами ІПД [2], поведінки тонкого шару мастила [3] розробляється на основі теорії фазових переходів Ландау загальна концепція процесу ІПД [1]. Однак, вона не висвітлює багато важливих моментів, таких як формування граничної зернистої структури, не встановлює взаємодію декількох типів дефектів. Також, не розглядається випадок, коли матеріал виявляється під впливом зовнішньої періодичної дії, що є важливим для аналізу кінетики встановлення стаціонарних значень.

2. Основні співвідношення

Раніше в роботах [2,4] була представлена основна термодинамічна «тотожність» для густини внутрішньої енергії (див. (1) у роботі [4]), яка включає в себе одночасно перший і другий закони термодинаміки з урахуванням перетворення частини енергії, що надійшла до системи за рахунок роботи зовнішніх сил, в інші види енергії.

Задаючи залежність внутрішньої енергії [2] від усіх незалежних змінних задачі, можна визначити конкретну модель кінетики структурних дефектів. Розглянемо дворівневу двомодову модель з урахуванням вкладів по межах зерен до четвертої степені відносно їх щільності [4].

Внутрішня енергія в межах розглянутої моделі набуває вигляду [2]:

¹ Такой порядок слов допускает неоднозначное толкование; улучшить не могу, т. к. смысла не знаю. Предлагаю:

"... influence on the evolution of the defects density starting with steady-states ..."

$$u(h_g, h_D) = u_0 + \sum_{m=g,D} \left(\varphi_{0m} h_m - \frac{1}{2} \varphi_{1m} h_m^2 + \frac{1}{3} \varphi_{2m} h_m^3 - \frac{1}{4} \varphi_{3m} h_m^4 \right) + \varphi_{gD} h_g h_D, \quad (2.1)$$

де u_0 , φ_{km} , φ_{gD} – деякі коефіцієнти, які представляються як:

$$u_0 = \frac{1}{2} \lambda (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \mu (\varepsilon_{ij}^e)^2, \quad (2.2)$$

$$\varphi_{0m} = \varphi_{0m}^* + g_m \varepsilon_{ii}^e + \left(\frac{1}{2} \bar{\lambda}_m (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \bar{\mu}_m (\varepsilon_{ij}^e)^2 \right), \quad (2.3)$$

$$\varphi_{1m} = \varphi_{1m}^* - 2e_m \varepsilon_{ii}^e, \quad (2.4)$$

де λ , μ – пружні сталі бездефектного матеріалу; g_m – визначає активацію утворення відповідного дефекту; $\bar{\lambda}_m$, $\bar{\mu}_m$ – пружні сталі, обумовлені існуванням дефектів; e_m – характеризує анігіляцію дефектів; ε_{ii}^e , $(\varepsilon_{ij}^e)^2 = \varepsilon_{ij}^e \cdot \varepsilon_{ji}^e$ – перші два інваріанти тензора деформацій. Причому значення для ε_{ii}^e обираються у від'ємній області, так як при ПД реалізується процес стискання матеріалу.

Значення другого інваріанту $(\varepsilon_{ij}^e)^2$ є керуючими параметрами, оскільки представляють зовнішній вплив, та покладаються константами. Вище індекс D відноситься до дислокацій, а індекс g – до меж зерен. Будемо розглядати лише спрощений випадок однорідного розподілу дислокацій, тому знехтуємо старшими степенями при описі еволюції дислокацій $\varphi_{2D} = 0$ та $\varphi_{3D} = 0$ [2].

Для розрахунків прийнято такий набір параметрів і коефіцієнтів:

$$\varphi_{0D}^* = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1}, \quad \varphi_{1D}^* = 0.6 \text{ Дж} \cdot \text{м}, \quad \varphi_{1g}^* = 3.3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1},$$

$$g_D = 3.31 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1}, \quad \bar{\mu}_D = 1.05 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1}, \quad \bar{\lambda}_D = 0.96 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1},$$

$$\bar{\mu}_g = 10.5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}, \quad \bar{\lambda}_g = 9.6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}, \quad e_g = 1.55 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1},$$

$$e_D = 0.155 \text{ Дж} \cdot \text{м}, \quad \varphi_{gD} = 0.03 \text{ Дж}, \quad \varphi_{0g}^* = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2},$$

$$\varphi_{2g} = 6.5 \text{ Дж}, \quad \varphi_{3g} = 2.88 \text{ Дж} \cdot \text{м}, \quad g_g = 9.1 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

3. Вплив зовнішньої періодичної дії

Еволюційні рівняння щільності відповідних дефектів мають вигляд:

$$\tau_{h_D} \dot{h}_D = \varphi_{0D} - \varphi_{1D} h_D + \varphi_{gD} h_g, \quad (3.1)$$

$$\tau_{h_g} \dot{h}_g = \varphi_{0g} - \varphi_{1g} h_g + \varphi_{2g} h_g^2 - \varphi_{3g} h_g^3 + \varphi_{gD} h_D, \quad (3.2)$$

де введені часи релаксації τ_{h_D} , τ_{h_g} відповідних величин, що характеризують інерційні властивості системи. Відзначимо, що обрані в якості основи формули (2.1) - (2.4), були отримані у роботі Метлова Л. С. [2].

Застосувавши адіабатичне наближення $\tau_{h_g} \gg \tau_{h_D}$, при якому еволюція щільності дислокацій слідує за змінами щільності меж зерен, приходимо до рівняння Ландау - Халатнікова:

$$\tau_{h_g} \frac{\partial h_g}{\partial t} = \varphi_{0g} + \varphi_{gD} \frac{\varphi_{0D}}{\varphi_{1D}} - \left(\varphi_{1g} - \frac{\varphi_{gD}^2}{\varphi_{1D}} \right) h_g + \varphi_{2g} h_g^2 - \varphi_{3g} h_g^3. \quad (3.3)$$

Права частина якого задає термодинамічну силу $F(h_g)$, що прагне привести параметр h_g до притягувального аттрактору, який відповідає стаціонарному значенню. При цьому система описується термодинамічним потенціалом

$$V(h_g) = \int_0^{h_g} F(h'_g) dh'_g. \quad (3.4)$$

Оскільки, існуючі методи ПД мають різну геометрію експерименту, можливий випадок, при якому деформація, що забезпечується зовнішніми силами, має періодичний характер. Розглянемо ситуацію, коли періодичною функцією часу є перший ε_{ii}^e чи другий інваріант $(\varepsilon_{ij}^e)^2$ пружної частини тензора деформації. Перший випадок, наприклад, може виникнути при впливі ультразвуку, а другий реалізується, наприклад, у методі рівноканальної багатокутової гідроекструзії [5]. Необхідність розгляду періодичного впливу пов'язана з тим, що при реальному експерименті, як правило, досягти стаціонарного режиму за один прохід неможливо. Тому, необхідно провести аналіз кінетики цього процесу.

Так, для дослідження поведінки системи покладемо

$$\varepsilon_{ii}^e = \varepsilon_{gidro} + \varepsilon_c \cos(\omega t + \phi_0), \quad (3.5)$$

$$(\varepsilon_{ij}^e)^2 = \varepsilon_c^2 \cos^2(\omega t + \phi_0), \quad (3.6)$$

де ε_c – амплітуда, та ω – кругова частота, ϕ_0 – початкова фаза. Константа ε_{gidro} введена з метою урахування постійного впливу гідростатичного стискання.

Розв'язки кінетичного рівняння (3.3) для різних значень частоти та при урахуванні відповідних інваріантів представлені на рис. 1 (рис.1а побудований при застосуванні (3.5), а рис.1б - (3.6)). Відзначимо, еволюційні залежності для обох випадків мають якісно схожий характер. Криві 1 відповідають малому значенню частоти, тут параметри h_g слідує за періодичними змінами ε_{ii}^e та $(\varepsilon_{ij}^e)^2$ відповідно. При цьому розміри зерен змінюються періодично. Якщо збільшити частоту зовнішнього впливу (криві 2 і 3), то зміни щільності меж зерен не встигають за періодичними функціями (3.5) та (3.6), і розміри зерен виходять на деякі середні рівні, довкола яких здійснюються невеликі за амплітудою коливання. У разі кривих 2, фрагментація відбувається поетапно – на залежностях на початку видно «сходінки», на яких система перебуває деякий час.

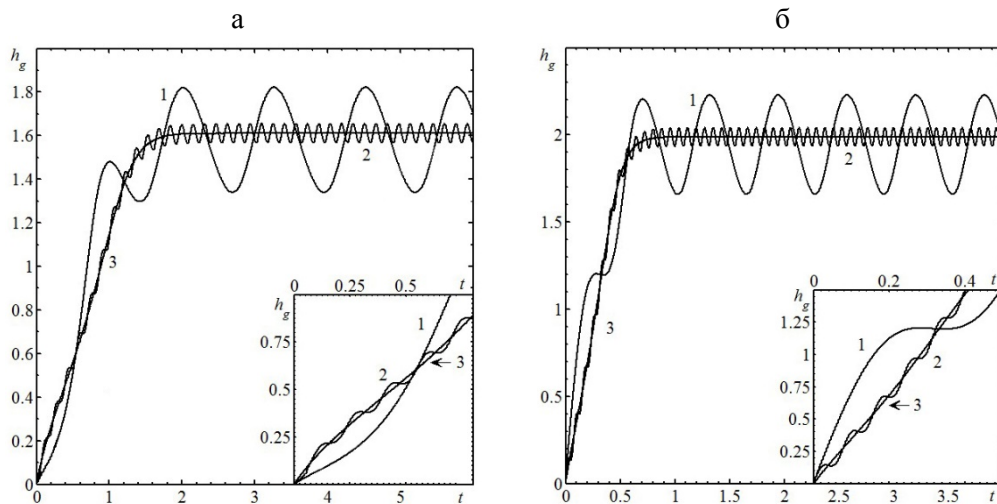


Рис.1. Розв'язок кінетичного рівняння (3.3) у випадку періодичного впливу. (а) - враховуючи (3.5) і $\varepsilon_{gidro} = -0.25$, $\varepsilon_c = -0.15$, $\phi_0 = 0$, $(\varepsilon_{ij}^e)^2 = 0.35$. (б) - враховуючи (3.6) та $\varepsilon_c^2 = 0.81$, $\phi_0 = 0$, $\varepsilon_{ii}^e = -0.05$. Криві 1 - 3 відповідають частотам $\omega = 5, 40, 1000$.

Очевидно, що наявність періодичного сигналу вплине на характер фазової діаграми, отриманої раніше в роботі [4]. В обох випадках періодичного впливу рівняння (3.3) і потенціал $V(h_g, t)$ (3.4) будуть залежати від часу, що може вплинути на зміщення екстремумів. Однак, протягом еволюції системи, як показано на рис. 1, реалізується стаціонарне значення щільності меж зерен, поблизу якого відбуваються гармонічні коливання з постійною амплітудою. Відповідні моменти мають вигляд:

$$\langle \varepsilon_{ii}^e \rangle = \varepsilon_{gidro}, \langle \varepsilon_{ii}^e \varepsilon_{ii}^e \rangle = \varepsilon_{gidro}^2 + \frac{\varepsilon_c^2}{2}, \langle \varepsilon_{ij}^e \varepsilon_{ij}^e \rangle = \frac{\varepsilon_c^2}{2}. \quad (3.7)$$

Відповідно до (3.7) вагомий внесок у поведінку системи має параметр ε_c^2 . Таким чином, можна припустити, що зростання амплітуди періодичного сигналу призводить до зниження порогу фазового переходу. Можливо, при цьому для досягнення дрібнозернистої структури при ПД потрібно меншу кількість проходів в експериментальній установці [6].

4. Висновки

Запропонований підхід дозволив описати режими фрагментації матеріалу при ПД, зокрема, існування граничної (стаціонарної) зернистої структури матеріалу. Було встановлено, що взаємодія таких структурних дефектів як межі зерен та дислокації відіграє важливу роль у зміцненні матеріалу, оскільки вони виявляють один на одного підсилювальний вплив. Дослідження кінетики встановлення стаціонарних значень щільності дефектів показало, що тип граничної структури, що формується, залежить від початкових значень щільності меж зерен. У випадку періодичного зовнішнього впливу, залежно від його частоти і амплітуди можливе встановлення різних режимів фрагментації, що може вплинути на формування стаціонарних областей фазової діаграми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Segal V. Structure Formation // Severe Plastic Deformation: Towards Bulk Production of Nanostructured Materials. – New York: Nova Science Publishers, 2006. – 601 p.
2. Метлов Л.С. Неравновесная эволюционная термодинамика и ее приложения. – Донецк: Ноулидж, 2014. – 176 с.
3. Khomenko A.V., Lyashenko I.A. Statistical theory of the boundary friction of atomically flat solid surfaces in the presence of a lubricant layer // Physics Uspekhi. – 2012. – v. 55, № 10. – P. 1008-1034.
4. Khomenko A.V., Troshchenko D.S., Boyko D.V., Zaharov M.V. Thermodynamics of fragmentation of solids at severe plastic deformation // Proceedings of the international conference Nanomaterials: Applications and Properties. – 2014. – v. 3, № 1. – P. 01psi16 (4).
5. Варюхин В.Н., Спусканюк В.З., Матросов Н.И., Дугадко А.Б., Шевченко Б.А., Медведская Э.А., Сенникова Л.Ф., Спусканюк А.В., Павловская Е.А. Равноканальная многоугольная гидроэкструзия // Физика и техника высоких давлений. – 2002. - т. 12, № 4,- С. 31-39.
6. Погребняк А.Д., Каверин М.В., Береснев В.М. Влияние фазового, элементного состава и дефектной структуры на физико-механические и триботехнические свойства наноструктурных Ti–Hf–Si–N - покрытий // Журнал технической физики. – 2014. – т. 84, № 1, - С. 86-93.