

ДИСИПАТИВНІ СТРУКТУРИ У ДЕФОРМОВАНОМУ ТВЕРДОМУ ТІЛІ

Показано, що регулярні формозміни, які виникали при пластичній деформації моно- [1-5] та полікристалів [6] і не піддавалися задовільному поясненню з точки зору теорії твердого тіла, в тому числі й теорії дислокацій, є просторовими дисипативними структурами.

The space dissipation structures are good approach for the explanation of the regular form-changed during elastic deformation of the mono- [1-5] and polycrystals [6]. Early all attempts to solve the problem were incorrect.

Останнім часом особливий інтерес дослідників викликають термодинамічні системи, в яких під дією зовнішніх збуджень безладний хаотичний рух елементів системи переходить в упорядкований [7-8]. Такий перехід здійснюється внаслідок самоорганізації сильно нерівноважної системи [9-12] і може супроводжуватися формуванням так званих стаціонарних дисипативних структур: у хімії - це реакція Белоусова-Жаботинського [13,14], в гідродинаміці - утворення регулярних просторових структур (чарунок Бенара) та вихорів Тейлора [15], в астрофізиці - спіральні галактики, у фізиці магнітних явищ - формування упорядкованості доменної структур [16] і т.ін).

Що стосується фізики міцності й пластичності, то регулярний деформаційний макрорельєф було виявлено при асиметричному вигині грубозернистого кристала алюмінію [1-3] і знакозмінному (циклічному) згині пружного монокристала кременистого заліза [4,5]. А при електроімпульсному навантаженні каліброваного мідного мікродроту [6] зареєстровано регулярну його формозміну - чергування напливів і перетяжок.

Якщо пластичну деформацію тлумачити з позицій механіки суцільного середовища з урахуванням певних для конкретної моделі реологічних її властивостей або з позицій фізики пластичності й міцності на основі дислокаційних і дисклинаційних уявлень, тобто розглядати елементарні акти (етапи) процесів пластичної деформації, то пояснення регулярності формозмін стає неможливим.

Насправді, механіка суцільного середовища,

описує поведінку матеріала під навантаженням за допомогою інтегральних характеристик середовища. В цьому випадку внутрішня структура матеріала не враховується, тензори напруг і деформації симетричні, пластична деформація здійснюється тільки трансляційним рухом дефектів під дією навантажень. Такий феноменологічний підхід механіки суцільного середовища фізично і математично досить коректний, але його можна застосовувати лише для опису інтегральних властивостей макрооднорідного середовища.

Щодо теорії дислокації, то її головне завдання - розкриття механізму зародження пластичних зсувів, опис поведінки дислокаційних ансамблів і фізична інтерпретація феноменологічних закономірностей механіки деформованого твердого тіла. Однак, оскільки теорія дислокацій механічно перенесла до своєї методології схему деформації з традиційної механіки, а тверде тіло під навантаженням розглядається як замкнена система, то теорія дислокацій неспроможна описати механізм пластичної течії на мезорівні. Дійсно, всі відомі в науковій літературі схеми пластичної деформації (Закса, Кохендорфера, Бішопа-Хілла, Ешбі, Тейлора та ін.) будувалися на різниці комбінацій трансляційних мод деформації - кристалографічний характер пластичних зсувів вимагає необхідності постулювання певної схеми самоорганізації різних систем ковзання, що забезпечувало б зберігання суцільності деформованого твердого тіла. Тому вони не спроможні передбачати реальний механізм пластичної течії.

Справа в тому, що стан замкненої системи,

може суттєво відрізнятися від того стану, що описується законами нерівноважної термодинаміки. При цьому, починаючи з будь-якої критичної величини збудження, термодинамічна гілка системи, досягнувши стадії біфуркації, стає нестійкою. Тобто, згідно І.Пригожину [7,8], система за рахунок несподіваних флуктуацій обирає один із декількох варіантів майбутнього, оскільки поблизу цих точок флуктуації стають сильними, а стійкість переходить у стан, в якому поведінка системи погоджується дією частинок, які до неї входять (рис.1). Чергування стійкості та нестійкості - загальний феномен у еволюції будь-якої відкритої системи, до того ж процес є необоротним, тобто систему після проходження біфуркацій не можливо повернути до початкового стану.

Цілком імовірно, що одержані нами експериментальні результати [1-6], задовольняють вимогам алгоритму реалізації процесів деформування твердого тіла, які призводять до виникнення регулярних дисипативних структур [17].

Дійсно, сама течія та її характер, як відомо, залежать від реології середовища (тобто від вибору матеріалу), а також від умов і режимів навантажування (початкових і крайових умов, масових сил). Зазначені параметри можна віднести до керуючих, а потім знайти такі їх сполучення, які б призвели до формування регулярних структур. При цьому самі структури будемо розглядати не як статичну, а як дещо таке, що виникає в процесі еволюції системи "деформоване тверде тіло -зовнішні умови", тобто будемо розглядати всю еволюцію течії. Регулярність структури означає деяку її інваріантність у просторі. Практично це призведе до того, що розподіл напруг, деформацій, локальної дисипації енергії та інших характеристик також набуває більш-менш періодичного характеру, тобто процес зі структурою є просторово-інваріантним процесом. Тому течія, що передуює виникненню упорядкованих структур (базова течія), повинна бути якомога однорідною в просторі: напруги, деформації, а, отже, й їх швидкості взагалі не повинні залежати від просторових координат (це в ідеалі).

В наших експериментах компоненти тензора деформацій не залежать від просторових координат. Тому в процесі еволюції вони могли змінюватися тільки як функції часу. Оскільки поворот також від координат не залежить, то розподіл швидкостей на всій межі деформованого твердого тіла опишемо так [17]:

$$v_i = \frac{dx_i}{dt} = a_{i1}(t)x_1 + a_{i2}(t)x_2 + a_{i3}(t)x_3, \quad (1)$$

де x_i - декартові координати; $a_{ij}(t)$ - задані функції; v_i - швидкості.

Якщо на всій границі деформування тіла задано розподіл (1), то базова течія буде однорідною, коли: 1) тіло стійке, 2) матеріал реологічно стійкий, 3) навантажування здійснюється таким чином, що масовими силами і силами інерції можна знехтувати - це умови єдності базової течії.

Отже, виникнення регулярних структур можна очікувати в тих випадках, коли хоч би одна з умов 1), 2) або 3) порушується [17].

Спосіб одержання дисипативних структур можна звести до такої послідовності операцій: а) обирається певна базова течія; б) задається вихідна конфігурація деформованого твердого тіла і за нею визначаються відповідні граничні умови, потім в) створюється пристрій навантажування, який реалізує граничні умови якомога більш жорстко; г) реологія деформованого тіла, параметри навантажування, а можливо, й конфігурація границі обираються таким чином, щоб у певний момент умови єдності базової течії 1)-3) порушилися [17].

Зазначу, що зразки кристалів алюмінію [1-3] і кременистого заліза [4,5] до випробування було піддано ретельній термо-хімічній обробці: відпаленню у вакуумі (з метою усунення внутрішніх напруг, які виникають під час виготовлення зразків), електролітичній поліровці, тощо. Крім того, здійснено такі оригінальні пристрої навантажування (вигин у пружній оболонці, одноосьове симетричне розтягання), які дозволили реалізувати граничні умови якомога найбільш жорстким способом. Крім того, відповідно до такої методики дослідження, зразок весь час (включаючи рентгенозйомку) знаходився в навантаженому стані, тобто релаксації напруг практично не відбувалося. Потім в процесі еволюції пластичної деформації моно- і грубозернистих кристалів алюмінію і кременистого заліза, підданих вигину або розтягання, відбувається накопичення пластичної деформації, що спричинило втрату стійкості тонкого поверхневого шару зразка (або всього його перерізу). Ін-акше, порушилась умова 2) єдності базової течії, а це призвело до виникнення дисипативної структури - спонтанних формозмін поверхні деформованого твердого тіла.

Електроімпульсне навантаження (осьове стис-

нення) каліброваного однорідного дроту [6] також відповідало усім умовам базової течії 1), 2) і 3). Тому порушення умови 3) (зміна параметрів навантажування в синусоїдному імпульсі струму), сприяло отриманню дисипативних структур - періодичних змін потовщень і перетяжок полікристалічного довгого об'єкту дослідження [6].

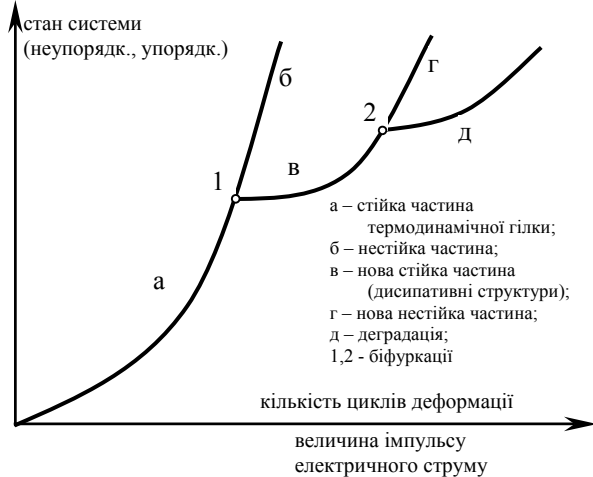


Рис.1. Схематичне зображення термодинамічних гілок експериментальних результатів [1-6] по мірі збільшення механічної дії на кристалічний зразок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Л.М. Моїсєєв, И.Б. Старый, А.А. Ханонкин. Микрорентгено-графическое исследование рельефа поверхности монокристалла алюминия подвергнутого циклической деформации // ФФМ. - 1969. - 27, вып. 4. - С. 760-762;
2. Моїсєєв Л.М., Старый И.Б., Ханонкин А.А. К методике исследования складчатого макрорельефа, возникающего на поверхности монокристалла при его циклической деформации // Металлофизика, вып. 29. - Киев: Наукова думка, 1970. - С. 177.

3. Моїсєєв Л.М. Дослідження процесу втрати стійкості кристалом алюмінію при несиметричному циклічному вигині // Актуальні питання фізики твердого тіла. - Київ: Вища школа, 1970. - С. 110-112.
4. Моїсєєв Л.М., Ханонкін О.А. Вивчення втомленості кремнистого заліза в зв'язку з втратою стійкості поверхневого шару досліджуваного зразка // Доповіді АН УРСР. - 1971. - № 12. - С. 99-102
5. Моїсєєв Л.М., Ханонкин А.А. Рентгенографическое исследование топографии поверхности циклически деформированных монокристаллов кремнистого железа // ФММ. - 1972. - 34, вып.3. - С. 658-660.
6. Моїсєєв Л.М., Ханонкин А.А. Формоизменение медного микропровода, подвергнутого экстремальным электрическим нагрузкам // Изв. АН СССР. Металлы. - 1990, № 5. - С.159-166.
7. Пригожин И.Р. Введение в неравновесную термодинамику. - М.: Мир, 1960.
8. Пригожин И.Р. Неравновесная статическая механика. - М.: Мир, 1964.
9. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: Мир, 1979.
10. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. - М.: Мир, 1980.
11. Хакен Г. Синергетика. - М.: Мир, 1985.
12. Хакен Г. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. - М.: Мир, 1985.
13. Белоусов Б.П. Периодически действующая реакция и ее механизм // Рефераты по радиационной медицине за 1958. - М.: Медтехника, 1959.
14. Жаботинский А.М. Концентрационные автоколебания. - М.: Наука, 1974.
15. Ермолаев Ю.Л., Санин А.Л. Электронная синергетика. - Ленинград.: Изд-во Ленинградского уни-верситета, 1989.
16. Кондаурова Г.С. Хаос и порядок в динамической системе магнитных доменов // ДАН СССР. - 1989. - 300. - №6. - С.1364-1366.
17. Ревуженко А.Ф. Диссипативные структуры в сплошной среде // Изв. Вузов. Физика. - 1992. - № 4. - С.94-104.