

## ВІДЗИВ

офіційного опонента про дисертаційну роботу Трощенко Дар'ї Сергіївни  
«Нерівноважна еволюційна термодинаміка фрагментації  
металів з урахуванням стохастичності»,  
яку подано на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук  
зі спеціальности 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертаційна робота пані Д. С. Трощенко стосується теоретичного дослідження процесів фрагментації металевої структури, підданої інтенсивній пластичній деформації (ІПД), в рамках узагальненого феноменологічного моделю, що ґрунтується на принципах нерівноважної термодинаміки еволюції за Л. С. Метловим і положеннях теорії Ландау фазових переходів.

Питання, що стосуються фізичних процесів, які відбуваються у структурі металів під час ІПД, є *актуальними* та виникають у зв'язку з сучасним станом розвитку вискоелективних технологій, що потребує виготовлення різноманітних конструкцій чи деталей з високими та стабільними характеристиками.

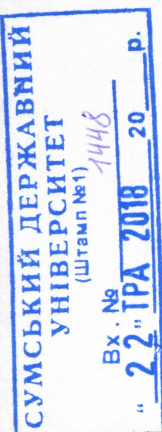
Відомі на цей час науково-дослідні роботи уможливають частково відобразити супроводжувальні процеси, що відбуваються у структурі металу під час оброблення, та узагальнити експериментальні дані; проте досі немає єдиного підходу, що здатний охопити повну картину цього процесу. Разом з тим, переважну більшість експериментальних досліджень спрямовано на вивчення граничних (залишкових) структурних станів, яких одержано в результаті оброблення ІПД, а поза увагою залишено низку процесів і закономірностей, що стаються під час утворення їх.

Таким чином, дисертаційну роботу пані Д. С. Трощенко, в першу чергу, було спрямовано на детальне відтворення та опис різного роду спостережуваних закономірностей кінетичних явищ і структурних перетворень, які відбуваються під час оброблення матеріялу, та визначення власне тих умов, які критичним чином впливають на формування стійких субмікрокристалічних чи то нанокристалічних структур, що, без сумніву, свідчить про *прикладний* аспект досліджуваної проблеми.

Структурні зміни, згідно з представленим і використаним у дисертаційній роботі підходом за Л. С. Метловим, визначаються в термінах характеристик основних дефектів — меж зерен і дислокацій, що уможлиблює більш-менш точно відобразити ієрархічну послідовність подій: формування нових меж зерен за рахунок виникнення та самоорганізації дислокаційних структур (хоча випадок дислокацій у дисертації розглядається із спрощенням взаємодії між ними).

Принциповим, на мою думку, є одержання авторкою дисертації діаграм, які зазначають умови формування стійких ультрадрібнозернистих структур різних типів та уможлиблюють відобразити вірогідні сценарії поведінки матеріялу під час оброблення (і скрізь по тексту дисертації вказано конкретні режими та значення параметрів, за яких одержуються прогнозовані структури).

Детальному дослідженню еволюції сукупності структурних дефектів при формуванні граничних (стаціонарних) структур, а також стійкості сформованих станів присвячено більшу частину дисертаційної роботи. Зокрема, показано, що одержані теоретичні результати кількісно та якісно збігаються з відомими даними експериментальних досліджень. Це свідчить про *актуальність* відповідного дослідження, виконаного пані Д. С.



Троценко.

При розгляді поставлених задач належне місце в роботі надано врахуванню шумів основних параметрів, що уможливило наблизити запропонований модель до реальних умов і процесів, які відбуваються під час експерименту. На мій погляд, це має важливе *фундаментальне* значення для даної проблематики, оскільки уможливорює охопити досі невраховані ефекти та взаємочин дефектів під час оброблення та одержати більш адекватні результати.

Маю зазначити, що частину результатів, яких представлено у дисертації пані Д. С. Троценко, одержано у співпраці з д-ром фіз.-мат. наук, професором Л. С. Метловим, який власне й запропонував використовувати нерівноважну термодинаміку для опису сильно нерівноважних еволюційних процесів, таких як фрагментація металевих зразків у ході ІПД, та розробив феноменологічний модель, на якому ґрунтується дослідження у представленій дисертаційній роботі.

Дисертацію пані Д. С. Троценко виконано разом із науковим керівником професором О. В. Хоменком за тематикою, підтриманою МОН України в рамках науково-дослідних робіт (рег. № 0115U000692, № 0117U003923, № 0116U006818) кафедри прикладної математики та моделювання складних систем, а також кафедри наноелектроніки Сумського державного університету. Маю відзначити, що представниками цієї наукової школи, яку започаткував ще професор О. І. Олемскої, було істотно розвинуто синергетичний підхід, що стосується теорфізичного дослідження просторово-часової еволюції термодинамічно нерівноважних стохастичних систем, які самоорганізуються. Таким чином, маю вагомі підстави в подальшому очікувати від пані Д. С. Троценко представлення повної феноменологічної картини процесів самоорганізації на прикладі поведінки структурних дефектів у металевому зразку, підданому обробленню інтенсивною пластичною деформацією.

На мій погляд, кандидатська дисертація пані Д. С. Троценко є закінченим теоретичним дослідженням і містить низку оригінальних задач, поставлених перед здобувачкою, що уможливило одержати наступні *нові* і, як на мене, найбільш цікаві результати стосовно поведінки полікристалічних структур у ході оброблення методами ІПД.

1. Було удосконалено уявлення про перебіг процесу фрагментації металів через ІПД: детально відтворено еволюцію основних структурних дефектів (дислокацій і меж зерен), що супроводжується подрібненням зернистої структури полікристалічних тіл та формуванням граничної субмікрорекристалічної чи то нанокристалічної структури; із застосуванням адіябатичного наближення одержано діаграму, що зазначає умови виникнення різних режимів фрагментації; вперше вказано значення механічних напружень і зумовлених ними пружних деформацій, що визначають виникнення тієї чи іншої граничної (стаціонарної) структури.
2. Вперше з'ясовано умови, за яких відбувається формування граничних структур, залежно від початкових значень густин дефектів і значень керувальних параметрів (пружних зсувних і стискальних деформацій); визначено вплив взаємочину структурних дефектів двох типів на характер кінетики процесу фрагментації.
3. За встановленими критичними умовами для керувальних параметрів вперше побудовано діаграму, яка уможливорює зазначити області формування та стійкості стаціонарних станів (граничних структур); досліджено фазову динаміку нерівноважних змінних (густин меж зерен і

дислокацій), залежно від співвідношення значень їхніх часів релаксації.

4. Із врахуванням адитивного Гауссового шуму основних нерівноважних змінних досліджено процес фрагментації матеріялу під час ІПД і вперше передбачено можливість виникнення принципово нових (у порівнянні з детерміністичним випадком) режимів фрагментації та, відповідно, формування субмікрокристалічних чи то нанокристалічних структур із заданими властивостями; перебудовано діаграми, що враховують стохастичність процесу та демонструють умови формування граничних структур інших типів.
5. За розподілом реалізацій густини меж зерен вдалося кількісно оцінити склад зернистої структури в об'ємі металевого зразка. З аналізу часових залежностей густини меж зерен виявлено, що процес фрагментації металевої структури при ІПД залежить від передісторії нерівноважного процесу. З часової залежності кінетики випадкового процесу фрагментації оцінено час автокореляції, що уможливило спрогнозувати розмір зерен полікристалічної структури металу впродовж інтервалу автокореляції.

Матеріал у дисертації відображає логічну послідовність проведеного дослідження. Кожний розділ є продовженням попереднього, що об'єднує всю дисертацію в єдину зв'язну працю. За структурою дисертація складається із Вступу, чотирьох розділів, Основних висновків і списку використаних джерел.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та задачі дослідження, детально висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів, яких винесено на захист, представлено інформацію про зв'язок роботи з науковими тематиками університету та про апробацію роботи через участь дисертантки у наукових конференціях і семінарах, зазначено особистий внесок здобувачки в опублікованих працях і коротко охарактеризовано вміст дисертації.

У *першому* розділі дисертації здобувачка провела огляд літературних джерел за темою роботи. У ньому представлено результати експериментальних досліджень у даному напрямі, відомі теоретичні підходи щодо представлення процесу фрагментації твердих тіл і розглянуто підхід так званої «нерівноважної еволюційної термодинаміки», що покладено в основу проведеного дослідження. Вагому частину літературного огляду присвячено феноменологічному моделю, запропонованому Л. С. Метловим, в рамках якого (із всіма його припущеннями!) у подальших розділах сконструйовано вивчення процесу фрагментації твердих тіл, підданих обробленню методами ІПД.

*До першого розділу принципів зауважень не має.* Проте маю зазначити, що в літературному огляді не наведено значення параметрів теорії, за яких одержано результати іншими авторами, зокрема для моделю Л. С. Метлова, що не дає можливості збагнути принципову відмінність результатів даного дисертаційного дослідження від попередніх напрацювань. На додачу, у підрозділі 1.3 (що містить модель, розроблений за Метловим) чітко не окреслено перелік нових задач, які в подальшому мають розв'язуватися в оригінальних розділах даної дисертації (їх перелічено лише у самих висновках до розділу). Крім цього, мають місце деякі недогляди, редагувального характеру: у правій частині другої формули (1.3), певно, знак «-» є зайвим; не роз'яснено фізичний зміст величини  $\tilde{T}$  (у формулах (1.8), (1.10), (1.12)), а також «статичної температури»  $\varphi$  та



«статичної ентропії»  $h$  (у формулах (1.9), (1.10), (1.12) на відміну від роз'яснення їх у п. 1.3.3); у п. 1.3.3.1 не зазначено межі застосовності виразів (1.15) та (1.16)–(1.18), а саме, наближення пружньо-ізотропного континууму тощо; також тут не вказано припущення, які покладено в основу співвідношення (1.20) (певно, в дусі співвідношення Голла–Петча, про що можна здогадатися лише із виносок 5 та 28 аж на стор. 68 і 140 у п. 2.2 та п. 4.2 відповідно); рисунок 1.1в (на стор. 33) у друкованій версії дисертації має низьку якість; деінде невдало розставлено переноси слів. У деяких місцях цього розділу (а також у Вступі і наступних розділах) застосовано ненайкращу термінологію та жаргонові словосполучення, наприклад, «сплав» (замість україномовного терміну «стоп»). Також, на жаль, часто трапляються по тексту зайві коми, а іноді, навпаки, їх упущено там, де вони стилістично потрібні.

У *другому* оригінальному розділі проведено дослідження особливостей процесу подрібнення металів при ІПД на основі феноменологічного моделю Л. С. Метлова. Виявлено різні режими фрагментації металевих зразків у ході ІПД, що відповідають формуванню двох та однієї стаціонарних структур. Досліджено кінетику процесу фрагментації та встановлено залежність формування відповідного типу граничної структури від початкових значень густин дефектів (меж зерен і дислокацій) та значень керувальних параметрів. Проведено якісне і кількісне порівняння одержаних залежностей з експериментальними даними.

*До другого розділу є наступні чотири зауваження-побажання. По-перше*, маю зазначити, що в розділі (та й у дисертації в цілому) відсутнє чітке визначення поняття «межа зерна». Також не наведено обґрунтування, чому саме вважається, що межа зерна може забезпечувати внесок у пластичність матеріалу. *По-друге*, залишилося не прокоментованим, які саме методики ІПД мають на увазі в даному дослідженні та власне яким чином враховується відмінність між ними, оскільки геометрія реалізації кожного метода приводить до відповідного визначеного впливу на фрагментацію зразка. *По-третє*, у виконаному дослідженні не враховано теплові аспекти процесу фрагментації. В загалі-то в процесі оброблення температура на контактних поверхнях зразка може підвищитися до точки топлення, але, на жаль, в моделю така можливість не враховується. *По-четверте*, у п. 2.1 не зазначено межі застосовності виразів (2.1) та (2.2)–(2.4), а саме, наближення пружньо-ізотропного континууму (хоча обговорення результатів дослідження фрагментації часто-густо здійснюється в термінах зсувних і стискальних деформацій «(полі)кристалу» або навіть «монокристалу»). Також у тексті розділу не наведено пояснення, чому як параметри порядку розглядаються величини, що описують ступінь дефектності матеріалу, але не відображають зміну його симетрії. (Адже ж, згідно з феноменологічною теорією Ландау, вважається, що параметер порядку має відображати симетрію матеріалу, оскільки в термінах саме таких параметрів вдається якісно та кількісно описати термодинаміку супроводжувальних фазових перетворень.)

У *третьому* розділі дисертаційної роботи авторка вивчила кінетику процесу утворення граничних структур дводефектної системи у металі, проаналізувала умови формування та стійкість її стаціонарних станів. Тут досліджено швидкість досягнення стаціонарних станів відповідного моделю, залежно від пружньої деформації, зумовленої механічним напруженням; побудовано фазові портрети; проведено аналізу стійкості стаціонарних станів та одержано діаграму, що зазначає умови формування стійких

і нестійких особливих точок (станів) типу «вузол» або «сідло». Крім того, з'ясовано залежність від часів релаксації густин дефектів перебігу процесу фрагментації через ІПД.

*До третього розділу є традиційне для подібних досліджень два побажання:* наводити аргументи щодо застосовності адіабатичного наближення до реального процесу еволюції дефектних підсистем при обробленні; при аналізі стійкості слід будувати функцію Ляпунова, а не обмежуватися лише відповідними показниками, оскільки саме ця функція уможливорює повніше оцінити стійкість моделі. Також зауважу, що у п. 3.2.3 на стор. 105 зазначається можливість обтиснення з відносною деформацією понад 100%, але фізичний зміст цього не роз'яснено.

*Четвертий розділ дисертаційної роботи є самим великим та, за інформаційним наповненням, — головною частиною роботи, де, перш за все, розглянуто стохастичність реального процесу фрагментації твердого тіла у ході ІПД. У цьому розділі дисертантка враховує вплив флюктуацій основних нерівноважних змінних моделю при оброблянні матеріялу, що уможливило більш адекватно описати процес самоузгодженого формування граничних структур з дефектами двох типів. Крім того, проведено дослідження умов формування стаціонарних станів з урахуванням стохастичності процесу й одержано діаграму можливих режимів фрагментації. Відповідно до виявлених областей на цій діаграмі побудовано розподіли структурних дефектів і часові залежності еволюції густини меж зерен, що уможливило кількісно оцінити склад (за розмірами) зернистої структури в об'ємі зразка. Аналізом часових залежностей густин меж зерен з'ясовано вид кореляційної функції густин і визначено частотні характеристики випадкового процесу фрагментації. Показано, що одержані результати можуть бути прогнозованими лише протягом визначеного часу автокореляції.*

*Стосовно четвертого розділу маю декілька непринципових зауважень. По-перше, в описі реалістичнішої поведінки твердих тіл під час оброблення не роз'яснено, який фізичний зміст тут має час автокореляції і яким чином він пов'язаний із часом деформації та чи пов'язаний взагалі. По-друге, маю зазначити таке ж саме побажання, що й стосовно третього розділу, а саме, щодо застосовності адіабатичного наближення до реального процесу еволюції дефектних підсистем у процесі оброблення. По-третьє, в дисертації не наведено обґрунтування обраного для дослідження діяпазону інтенсивностей шумів нерівноважних змінних — густин дефектів.*

На завершення зазначу, що практично всі зауваження, яких було наведено вище, мають характер побажань стосовно подальшого розвитку представленого напряму досліджень і не знижують загальної схвальної оцінки дисертації пані Д. С. Троценко. Здобувачка виконала велику та цікаву роботу, що уможливило одержати *оригінальні* наукові результати.

*Вірогідність одержаних основних результатів і висновків підтверджується застосуванням відомих теоретичних положень і забезпечується використанням вже розробленого математичного апарату, а також якісним (та й кількісним) узгодженням одержаних результатів з наявними експериментальними даними та теоретичними підходами інших авторів. Важливим є те, що застосований підхід спрямовано саме на пояснення експериментальних даних і закономірностей, а результати даної дисертаційної роботи мають експериментальне підтвердження. Вважаю, що роботу в цілому виконано на високому науковому рівні, а її результати стано-*

влять не лише академічний інтерес, а й можуть бути використаними при дослідженні процесів фрагментації твердих тіл, підданих обробленню методами ІПД.

Дослідження, виконані в дисертаційній роботі пані Д. С. Троценко, розширюють уявлення про механізми оброблення твердого тіла за різних випадків його вихідного стану та способів ІПД. Вони можуть стати корисними для подальшого розвитку як теоретичних, так і експериментальних досліджень процесу фрагментації металевих структур через ІПД у провідних наукових установах України, наприклад ІФ, ІМФ ім. Г. В. Курдюмова (Київ), ІФКС (Львів), ННЦ «ХФТІ», ІПФ (Суми) НАН України, НТУ «ХПІ», КНУ імені Тараса Шевченка, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» та СумДУ МОН України, а також для передбачення механосинтезу металевих тіл, які застосовуються при конструюванні різних приладів і деталей. Крім того, результати дослідження дають гарну основу для викладання спецкурсів у навчальному процесі при підготовці магістрів з прикладної математики та моделювання складних систем, в тому числі наноматеріалів.

Дисертацію побудовано логічно, написано науковою українською мовою і оформлено відповідно до вимог МОН України стосовно кандидатських дисертацій.

Результати дисертаційної роботи пані Д. С. Троценко викладено в 6 статтях, опублікованих у пристойних вітчизняних і міжнародних наукових журналах, що входять до переліку періодичних фахових видань та індексуються наукометричною базою Scopus або Web of Science, і 4 статтях у матеріалах міжнародних наукових конференцій, 2 з яких проіндексовано наукометричною базою Scopus, а також апробовано на 10 міжнародних конференціях.

В цілому опубліковані праці, зміст та основні положення дисертаційної роботи цілком і вірно відображено в авторефераті дисертації.

### ВИСНОВОК

Отже, дисертація пані Д. С. Троценко являє собою самостійну, завершену в цілому (в рамках поставлених завдань) працю, що містить вагомий внесок у розвиток досліджень процесів фрагментації та встановлення фізичних явищ, що виникають у твердих тілах під час ІПД.

За актуальністю обраної теми, науковим рівнем, новизною та значимістю одержаних результатів дисертація «Нерівноважна еволюційна термодинаміка фрагментації металів з урахуванням стохастичності» задовольняє критеріям МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук (а саме, пп. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 із змінами (окрім п. 3), що внесені до постанов Кабміну України, затвердженими постановою Кабміну України від 12.09.2011 р. № 955). З огляду на це, я вважаю, що авторка дисертації пані Дар'я Сергіївна Троценко є сформованою кваліфікованою дослідницею і заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Заступник директора з наукової роботи  
Інституту металофізики  
ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
чл. кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф.



В. А. Татаренко