

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Гончарової Ірини Вадимівни «Визначення методом індентування фізико-механічних властивостей матеріалів з різною кристалічною структурою», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Актуальність. Атестація матеріалів за сучасними методами випробувань є важливою науковою задачею, яка набуває критично важливого значення для розробки нових конструкційних та функціональних матеріалів. Можливості визначення традиційними методами механічних властивостей високоміцних, малопластичних матеріалів є вельми обмеженими в зв'язку з крихким руйнуванням при напруженнях, близьких до межі плинності та навіть нижче. Однак, при локальному навантаженні жорсткими інденторами навіть крихкі малопластичні матеріали можуть бути продеформовані до значних ступенів деформації без макроскопічного руйнування. Серед переваг методу є можливість визначення механічних характеристик у малих за розмірами зразках, зокрема в покриттях та монокристалах, проаналізувати механічні властивості окремих фазових складових, зварних з'єднань, а також дослідити зміну механічних властивостей в градієнтних покриттях та модифікованих поверхневих шарах.

Тому робота Гончарової І.В., в якій набули розвитку фізичні уявлення щодо процесів деформації та руйнування речовин в умовах індентування, та розроблені нові ефективні методики визначення механічних властивостей матеріалів жорсткими інденторами безсумнівно є важливою та актуальною. Підтвердженням актуальності роботи Гончарової І.В. є те, що дослідження за темою дисертації виконувались у рамках фундаментальних та прикладних наукових програм за відомчим замовленням НАН України, а також проектів міжнародного співробітництва, детальний перелік яких можна знайти в авторефераті дисертації, що рецензується. Дисертаційну роботу Гончарової І.В. слід визначити як таку, що за своєю науковою спрямованістю та отриманим фактичним матеріалом відповідає паспорту спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку літератури (148 найменувань). Повний обсяг дисертації налічує 55 рисунків, 7 таблиць і 171 сторінку.

Не вдаючись до викладу основного змісту дисертації, звернемо увагу лише на найбільш важливі результати роботи, а також оцінимо їх достовірність, новизну і значення для науки та інженерної практики.

Найбільшим досягненням цієї роботи, на думку опонента, є головна ідея, яка полягає в тому, що в умовах локального навантаження жорсткими інденторами навіть крихкі та малопластичні матеріали можуть бути продеформовані до значних ступенів деформації без макроскопічного руйнування. Ще однією основоположною ідеєю даної роботи є ідея щодо можливості керування ступенем загальної деформації матеріалу в умовах індентування для побудови кривих «деформація–напруження» за допомогою пірамідальних інденторів з різними кутами загострення.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, та висновків

Основні положення та висновки дисертаційної роботи є достатньо обґрунтовані даними експериментальних досліджень. Достовірність отриманих в роботі результатів не викликає сумніву, оскільки всі вони отримані шляхом строгої та коректної постановки вихідних наукових задач, вирішення яких досягається завдяки коректному використанню

класичних теоретичних положень фізики твердого тіла, комплексу взаємодоповнюючих апробованих сучасних фізичних методів дослідження, таких як оптична, скануюча та трансмісійна електронна мікроскопія, рентгенівський аналіз, а також мікромеханічними випробуваннями різними пірамідальними інденторами в широкому температурному інтервалі, проведеними на великій кількості об'єктів досліджень із застосуванням сучасного дослідницького обладнання. На додаток, надійність, достовірність та обґрунтованість одержаних наукових результатів забезпечувались ретельним та всебічним аналізом результатів експериментів та їх відповідністю результатам, які були отримані іншими науковцями та опублікованими у фаховій літературі. Про достовірність результатів роботи також свідчить апробація роботи на міжнародних наукових конференціях, та позитивна оцінка на наукових семінарах. З наведених на стор. 151-154 дисертації 6-ти основних результатів та висновків, вважаю повністю достовірними всі.

Наукова новизна отриманих в роботі результатів.

Переважає більшість отриманих у роботі результатів є суттєво новими: Серед основних наукових результатів, одержаних у роботі, слід зазначити наступні.

На прикладі широкого кола різних за своєю фізичною природою та структурним станом матеріалів (метали, кераміка і ковалентні кристали, аморфні, квазікристалічні сплави) розвинуті фізичні уявлення та встановлені нові теоретичні положення щодо деформації та руйнування в умовах локального навантаження жорсткими інденторами, які включають:

– теоретично та експериментально обґрунтовані процеси, які визначають характеристику пластичності в різних температурних інтервалах з урахуванням можливих фазових переходів, структурних перетворень та руйнування;

– експериментальне обґрунтування термоактиваційної природи процесу пластичної деформації при індентуванні з урахуванням рухливості дислокацій в широкому температурному інтервалі;

– введення уявлення щодо характеристики пластичності $\delta_H(0)$ при 0 K в умовах дислокаційного механізму деформації без термічних коливань атомів та встановлення теоретичної залежності $\delta_H(0)$ від параметрів, що характеризують механічну поведінку матеріалів (модуля Юнга, енергії активації руху дислокацій, активаційного об'єму і температури плавлення $T_{пл}$);

– фізичні основи побудови кривих деформації шляхом безперервного індентування жорсткими пірамідальними інденторами.

Вперше в умовах індентування досліджено та вставлено механізм пластичної деформації, а також визначена пластичність сплавів системи Cr-Mn, що інтенсивно двійникуються під час деформації, та які в наслідок високого рівня напружень Пайерлса-Набарро, руйнуються крихко не виявляючи макропластичності в умовах макромеханічних випробувань. Лише метод індентування дозволив побудувати криві деформації цих сплавів та показати, що їх крихкість в умовах стандартних механічних випробувань пов'язана з підвищеним значенням границі плинності та різким деформаційним зміцненням, яке супроводжується інтенсивним розвитком двійникування, що підтверджує істотну роль цього процесу в механізмі пластичної деформації зазначених сплавів

Практичне значення отриманих в роботі результатів полягає у тому, що розроблені методики мікромеханічних випробувань (визначення параметра δ_H та побудова кривих «деформація-напруження») дозволяють в умовах локального навантаження жорсткими

інденторами кількісно визначати комплекс характеристик міцності та пластичності матеріалів і речовин, які в стандартних умовах випробувань руйнуються крихко при напруженнях нижче ніж межа плинності. Ці методики не мають обмежень застосування з точки зору форми та розміру об'єктів випробувань, не потребують виготовлення великої кількості зразків для стандартних механічних випробувань, дозволяють атестувати покриття, тонкі та градієнтні шари, включення, ін. фазові складові та структурні елементи в широкому температурному інтервалі. В роботі переконливо показано переваги методу індентування у визначенні комплексу механічних властивостей матеріалів. Запропоновані нові методики дозволяють порівнювати між собою механічні властивості у широкому спектрі сучасних металевих та крихких і малопластичних матеріалів в однакових умовах деформації.

Результати роботи мають суттєве значення для прогнозування механічної поведінки виробів з металевих матеріалів, які працюють під навантаженням в реальних умовах експлуатації під навантаженням.

Результати дисертаційної роботи також мають цінність для підготовки фахівців у системі вищої освіти для розширення та поглиблення знань в області деформації та руйнування матеріалів при індентуванні, а також використання методик визначення механічних характеристик матеріалів методом індентування. Результати роботи використовуються в учбовому процесі при підготовці фахівців з матеріалознавства, фізики металів, порошкової металургії в лекціях та лабораторних роботах з дисциплін: «Фізичні методи дослідження», «Фізика і хімія наносистем», «Матеріалознавство покриття», при підготовці нового лекційного курсу «Фізико-механічні основи деформації і руйнування матеріалів в умовах мікро- та наноіндентування» та циклів лабораторних робіт «Визначення характеристики пластичності δ_H за результатами вимірювання твердості», «Побудова кривої «деформація–напруження» з використанням комплекту тригранних інденторів з різним кутом при вершині піраміди, «Визначення границь пропорційності та плинності за кривою «деформація – напруження» тощо, а також при виконанні магістерських, дипломних (бакалавра, спеціаліста) та курсових науково-дослідних робіт студентів інженерно-фізичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

У частині, яка стосується критичного аналізу результатів, необхідно зупинитися на таких зауваженнях.

1. Дана робота безумовно нова та цікава, але розмір літературного огляду є завищеним – 53 сторінки (сс. 18-70), що становить 31 % від загального об'єму.

2. Не встановлена масштабна залежність величини параметра пластичності δ_H від навантаження на індентор, наслідком чого може бути не виконання закону подібності. Формульні вирази (1.17), (3.6) та (1.36), (1.37), для визначення пружної ϵ_e , пластичної ϵ_p деформації, а також характеристики пластичності δ_H , містять в собі значення мікротвердості за Мейером HM . Остання внаслідок порушення закону подібності має масштабну залежність – збільшується зі зменшенням розміру відбитку під навантаженням на індентор меншим за критичне. З оглядом на це усі зазначені характеристики (ϵ_e , ϵ_p , δ_H) зазнають впливу масштабного фактору. Тому, так само, як і у разі випробувань на мікротвердість, порівняння матеріалів за характеристикою пластичності δ_H необхідно проводити, використовуючи її значення, що отримані під навантаженнями вище за критичне, які надають сталості значенням мікротвердості.

3. Будь-які вимірювання завжди пов'язані з похибками, але в роботі (як в дисертації, так і авторефераті), в якій методом індентування визначено характеристики міцності та

пластичності, автор не вказує довірчі інтервали (похибки вимірювання твердості та ін. характеристик) на жодному з рисунків, крім рис. 5.2 на стор. 127 (рис. 7 на стор.15 автореферату).

4. На стор. 5 (у переліку умовних скорочень) зазначається: h – глибина переміщення індентора, а на стор. 32 в формулі (1.18) h – глибина відбитка. Насправді прилад безперервного вдавлення вимірює переміщення індентора h , яке є сумою декількох доданків: глибини контакту h_c , пружного прогину поверхні зразка на краю контакту h_s , пружного прогину силової рами h_f , теплового розширення стрижня, в якому закріплений індентор, h_{td} . Але на стор. 53 в підпису до рис. 1.13 вказано «...переміщення індентора h ».

5. На стор. 5 (у переліку умовних скорочень) та стор. 29 у формулі (1.10) наведене старе позначення твердості за Берковичем $НБ$, За діючим натепер міжнародним стандартом твердість за Берковичем позначають $Нв$. Важко погодитись з визначенням мікротвердості за Берковичем за формулою (1.10), що наведена в тексті дисертаційної роботи на стор. 29. Мікротвердість за Берковичем $Нв$ розраховують як частку від ділення сили (навантаження), на площу проєкції відбитку індентора. Тому мікротвердість за Берковичем є тотожною мікротвердості за Мейером (середній контактний тиск) $НМ$. Тобто $Нв = НМ$, а ні $НБ = НМ \cdot \sin\gamma$, як вказано на стор. 29 дисертації.

6. В тексті дисертації дублюється інформація щодо переліку матеріалів для дослідження та обґрунтування їх вибору (зокрема на стор. 71-72 розділу 2 та стор. 83-84 розділ 3).

7. Недостатньо наочне (табл. 3.1 та 3.2 на стор. 84 та 87) представлення значної кількості результатів визначення характеристики пластичності δ_H за двома методиками для широкого класу досліджених матеріалів різної з різною структурою та характером міжатомного зв'язку. Для відображення розбіжності у значеннях параметра пластичності δ_H (для наочності, спрощення аналізу та сприйняття результату бажано було б навести графічне зображення залежності характеристики пластичності від пружної деформації ϵ_e , отриманої відповідно до спрощеної моделі і розвиненої в роботі методики.

8. В розділі 5 не наведено розмір пор у досліджених зразках карбідокремнієвої кераміки.

Має сенс зупинитися на необхідності більш чіткого розмежування результатів за ознаками, які становлять їх наукову новизну та практичне значення. На думку опонента розвиток та розробка методик, а також класифікація матеріалів (крихких в умовах стандартних випробувань на розтяг) за рівнем їх пластичності, відносяться до практичного значення отриманих результатів.

Зауваження до оформлення дисертації

1. Завелика кількість умовних позначень, не всі з яких наведено в Списку умовних скорочень (наприклад, позначення нанотвердості символом H можливо зрозуміти тільки із тексту дисертації).

2. На с. 5 дисертації наведено «Перечень условных сокращений» насправді це «Перечень условных обозначений».

3. В тексті дисертації зустрічаються орфографічні помилки (зокрема на стор. 24, 35, 54, 59, 61, 85), а також стилістичні огріхи: стор. 19 «широко расширилась инструментальная база исследований твердости...», стор. 60 «...по мировому стандарту ISO...», та ін., на стор. 34, 5 рядок знизу, посилання на формулу (1.21), а в тексті помилково позначено (1.22).

4. Стор. 53, на рис. 1.13 підписи координатних осей виконано англійською мовою.

5. У тексті на стор. 20 одночасно використовується системна та несистемна запис чисел твердості за Бринеллем; на стор. 53, (2 рядок зверху) «...резкое увеличение размера материала под индентором...» – замість «...объема материала...»; на стор. 71 міститься вислів «квасикристалл исследовался в монокристаллическом состоянии».

Все ж, в цілому, слід відмітити, що оформлення дисертації виконано цілком задовільно, текст викладено грамотно, чітко, ясно і акуратно.

Зроблені зауваження в цілому не знижують наукову та практичну цінність роботи та не впливають на її позитивну оцінку. В цілому робота є закінченим науковим дослідженням, яке містить низку наукових та прикладних рішень і дозволяє розв'язати зазначені в роботі завдання.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях. Основні положення та результати дисертації роботи достатньо повно висвітлені у 18 наукових публікаціях, в тому числі у достатньому числі фахових журналів (9 статей), серед яких статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних. Результати роботи обговорені на авторитетних вітчизняних і міжнародних конференціях. Автореферат адекватно відбиває зміст, основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Загальний висновок. Основний зміст дисертаційної роботи Гончарової І.В. «Визначення методом індентування фізико-механічних властивостей матеріалів з різною кристалічною структурою» є завершеною науковою працею, містить раніше незахищені наукові положення і отримані автором нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати в галузі фізики твердого тіла, які у сукупності вносять значний вклад у розвиток фізичних уявлень і теоретичних положень щодо закономірностей деформації та руйнування кристалічних, аморфних та квазікристалічних матеріалів, в т.ч. матеріалів, крихких при стандартних випробуваннях, в умовах локального навантаження жорсткими інденторами для створення нових методик визначення комплексу їх механічних властивостей. Нові теоретичні положення та методики, розвинуті та розроблені у роботі, мають важливе значення для розробки новітніх технологій отримання матеріалів, оптимізації складу та структури і прогнозування їх поведінки в умовах експлуатації під навантаженням.

На підставі вищенаведеного вважаю, що представлена дисертаційна робота повністю відповідає вимогам щодо кандидатських дисертацій згідно з п.п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, її зміст відповідає паспорту спеціальності 01.04.07 – Фізика твердого тіла, а її автор Гончарова Ірина Вадимівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Д. т. н., професор,
професор кафедри високотемпературних
матеріалів та порошкової металургії
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



[Signature]
О. І. Юркова

[Signature]
А.А. Мельниченко