

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Голубенка Олексія Анатолійовича

“Особливості визначення фізико-механічних властивостей твердих тіл при локальному навантаженні в мікро- та нанооб’ємах”,

висунутої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 – фізика металів.

Останнім часом значна увага приділяється розробці методів визначення механічних властивостей металів і сплавів в нано- та мікроб’ємах. Це обумовлено, перш за все, інтенсивним розвитком нанофізики та нанотехнологій. Крім того, актуальним лишається проблема визначення механічних властивостей окремих фазових складових конструкційних сплавів. Зазвичай з цією метою використовується мікро- та наноіндентування. Наявність сильно неоднорідного розподілу локальних деформацій і напружень в околі вершини індентора, тривісність локального напруженого стану породжують значні труднощі для інтерпретації механічних характеристик, які визначаються за результатами індентування матеріалу. У зв’язку з чим розробка фізичних уявлень щодо механічних характеристик металів і сплавів, які визначаються за результати мікро- та наноіндентування, а також обґрунтування на цій основі відповідних методик, є актуальною фундаментальною проблемою фізики металів, яка має важливе прикладне значення.

Дослідження за темою дисертації відповідає основним напрямкам робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. Дисертаційна робота виконувалась в рамках чотирьох бюджетних тем Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України та міжнародного проекту УНТЦ №1997.

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, який містить 156 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 170 сторінок та містить 45 рисунків та 7 таблиць.

Оформлення роботи та автореферату відповідає вимогам Наказу МОН України № 40 від 12 січня 2017 р.

До основних результатів дисертаційної роботи слід віднести:

1. Розроблені уявлення щодо природи масштабного ефекту для мікро- та нанотвердості. В рамках запропонованого феноменологічного підходу показано, що наявність масштабної залежності твердості обумовлена зміною співвідношення між величиною пружних і пластичних локальних деформацій під індентором. Кількісний аналіз цього ефекту

ґрунтується на положенні про інваріантність до величини навантаження сумарної (пружної плюс пластичної) деформації.

На прикладі монокристала міді отримані залежності величини пружної і пластичної складової деформації від величини прикладеної до індентора сили. Встановлено, що при переході в область малих значень прикладеного зусилля пружна складова деформації суттєво зростає. Спираючись на ці дані в рамках запропонованого підходу, дисертанту вдалося пояснити закономірності зміни твердості при переході від мікро- до наноіндентування.

2. Дисертантом обґрунтовані доцільність проводити порівняння твердості різних матеріалів, або одного і того ж матеріалу в різних структурних станах, не при однакових значеннях величини навантаження на індентор, а при однакових розмірах відбитків. У зв'язку з цим запропоновані залежності, які дозволяють приводити до фіксованої глибини відбитка значення твердості, які отримані за стандартними методиками.

Таким чином, дисертантом були не лише розвинуті уявлення щодо масштабного ефекту, але і запропоновані залежності, які дозволяють з достатньою, для практичного використання, точністю враховувати цей ефект при визначенні твердості широкого кола матеріалів.

3. Слід відзначити результати дослідження, які стосуються зв'язку між сумарною роботою A_t , яка витрачається на втілення індентора, і роботою A_p , яка витрачається на пластичну деформацію під індентором, та співвідношенням середніх значень загальної ϵ_t і пластичної ϵ_p деформації під індентором. Встановлено, що за умови, що $\epsilon_p/\epsilon_t \geq 0,5$ співвідношення A_p/A_t практично співпадає з величиною ϵ_p/ϵ_t . Практична значимість цього результату полягає в тому, що для визначення роботи деформації необхідно використання спеціальних інструментованих твердомірів, в той час, як значення локальної деформації можуть бути розраховані за результатами випробувань на стандартних твердомірах.

4. В роботі, спираючись на результати наноіндентування, отримані деформаційні криві (залежності напруження від сумарної деформації) для таких матеріалів, як монокристалічний кремній та керамік на основі TiB_2 та SiC . Тим самим продемонстрована важливість використання методів ідентування для аналізу механічних властивостей крихких матеріалів, для яких побудувати криві деформації в широкому інтервалі значень ϵ_t іншими методами не є можливим.

5 Заслугують на увагу встановлені дисертантом закономірності деформації монокристала кремнію в умовах фазового переходу та обґрунтовану ним ефективність використання наноіндентування для отримання інформації щодо механічних властивостей наноструктурованих матеріалів.

Достовірність отриманих експериментальних даних обумовлена використанням сучасних методів нано-та мікроіндентування; отриманням одних і тих же даних різними методами та співставлення їх значень з літературними даними; використанням атомної силової мікроскопії для детального аналізу геометрії відбитків. В цілому експериментальна частина роботи проведена на високому методичному рівні.

Зауваження:

1. В дисертаційній роботі при аналізі закономірностей мікро- та наноіндентування, а також при побудові деформаційних кривих за результатами ідентування не враховується той факт, що в околі вершини індентора розподіл деформацій і напружень є суттєво неоднорідним, а напружений стан матеріалу - тривісним. Так, зокрема, зміна кута при вершині індентора повинна обумовлювати не лише зміну величини середньої деформації, але і впливати на величину її градієнта.

2. В дисертаційній роботі за результатами індентування побудовані діаграми деформації таких матеріалів, як TiB_2 і SiC . Високий рівень крихкості цих матеріалів створює значні труднощі для отримання таких діаграм прямими методами при низьких температурах. Проте, при помірних і високих температурах це цілком можливо. У зв'язку з чим, в дисертаційній роботі слід було б провести верифікацію отриманих діаграм деформації і оцінити точність діаграм, побудованих за результатами індентування.

3 В дисертаційній роботі отримані цікаві, з фізичної точки зору, і важливі, в прикладному плані, зв'язки між роботою ідентування та величиною середньої деформації під індентором (рис. 4.4), проте не дано пояснення чому $\delta_A \approx \delta_n$ спостерігається при $\delta_n > 0,5$.

4 При розрахунках значення пружної деформації при індентуванні монокристалів в дисертаційній роботі не вказується кристалографічний напрям для якого використовується значення модуля Юнга E . Так, зокрема, для нанокристала міді орієнтації $\langle 100 \rangle$ використовується значення $E = 130$ ГПа (табл. 4.1), а для орієнтації $\langle 111 \rangle$ приймається $E = 170$ ГПа (табл. 3.4). У відповідності до літературних даних $E_{\langle 100 \rangle} = 66,7$ ГПа, а $E_{\langle 111 \rangle} = 190,3$ ГПа.

Зауваження до оформлення роботи.

В цілому робота оформлена гарно, проте зустрічаються русизми та термінологічні недоречності, а саме:

«наклеп», «утруднення» пластичної деформації, тощо. Невірний підпис до рис.1.1. Зустрічаються посилання не на оригінальні статті, а їх англійські переклади, зокрема посилання [94].

Вказані зауваження не ставлять під сумнів основні результати дисертаційної роботи, їх новизну, наукову і практичну цінність. Дисертаційна робота Голубенка О. А. виконана на високому науково-методичному рівні. В ній запропонована феноменологічна модель масштабного ефекту, який спостерігається при нано-і мікроіндентування, розроблена методика врахування цього ефекту при визначенні твердості матеріалів та отримані дані щодо механічних властивостей крихких та наноструктурованих металів і сплавів.

Прикладне значення роботи полягає в тому, що отримані результати мають ключове значення для неруйнівного контролю і атестації крихких та наноструктурованих металів і сплавів.

Дисертаційна робота оформлена у відповідності до вимог до кандидатських дисертацій. Її основні результати опубліковані у 18 статтях, з них 9 статей у фахових виданнях. Результати досліджень пройшли апробацію на 9 представницьких наукових конференціях і опубліковані в працях та тезах цих конференцій. Аналіз зазначених публікацій дозволяє стверджувати, що вони досить повно відображують зміст дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційної роботи викладені в авторефераті.

Вважаю, що за актуальністю тематики досліджень, об'ємом, новизною та достовірністю отриманих результатів, науковим та практичним значенням, дисертаційна робота "Особливості визначення фізико-механічних властивостей твердих тіл при локальному навантаженні в мікро- та нанооб'ємах" відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, а їх автор Голубенко Олексій Анатолійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.13 фізика металів.

Завідувач відділу фізики міцності та руйнування матеріалів

Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,

доктор фізико-математичних наук, професор

 С.О. Котречко

Підпис С.О. Котречка засвідчую:

учений секретар Інституту металофізики

ім. Г.В. Курдюмова НАН України

кандидат фізико-математичних наук

 М.І. Савчук