

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І.М. ФРАНЦЕВИЧА

Гончарова Ірина Вадимівна

УДК 538.951.405:620.178.015

**ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДОМ ІНДЕНТУВАННЯ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ
З РІЗНОЮ КРИСТАЛІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ**

Спеціальність: 01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2017

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Мільман Юлій Вікторович,
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України,
завідувач відділом.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Котречко Сергій Олексійович,
Інститут металофізики
ім. Г.В. Курдюмова НАН України
завідувач відділом;

доктор технічних наук, професор
Юркова Олександра Іванівна,
Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського”,
заступник декана з наукової роботи.

Захист відбудеться « 1 » березня 2017 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.207.01 в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ-142, вул. Кржижановського, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України за адресою: 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3.

Автореферат розіслано « 30 » січня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.207.01,
кандидат технічних наук

Н.П. Коржова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. В останні десятиріччя було відкрито і впроваджено у виробництво багато принципово нових матеріалів: аморфні металічні сплави (АМС), квазікристали (КК), наноструктуровані матеріали, інтерметаліди (ІМ), високоміцна конструкційна кераміка, фулерени та ін. Більшість з цих матеріалів мають незначну пластичність або зовсім крихкі при стандартних механічних випробуваннях, тому вивчення їх механічних властивостей шляхом стандартних іспитів мало ефективно. Принципово нові можливості надає метод локальної деформації індентором, який дозволяє локально продеформувати практично всі матеріали та характеризувати пластичність малопластичних матеріалів, досліджувати механічні властивості тонких шарів, покриттів та окремих фазових складових композиційних матеріалів. Таким чином, актуальність використання індентування як метода мікромеханічних випробувань не викликає сумніву.

У теперішній час існує багато наукових робіт, присвячених теорії та методам індентування, виконаних вченими в різних країнах. Це роботи Ю.В. Мільмана, С.О. Фірстова, О.М. Григор'єва, В.Ф. Горбаня, М.В. Новікова, С.М. Дуба, О.І. Юркової, О.В. Бякової, С.В. Лубенця, Ю.І. Головіна, С.І. Буличова, В.П. Алехіна, Д. Тейбора, В. Олівера, Дж. Фара, Дж. Гілмана, В. Нікса, Х. Гао, Дж. Песіки, Л. Брауна, М. Чаудрі, Т. Сузукі, Т. Омури та ін. Кількість наукових публікацій, що присвячені проблемам індентування, збільшується з кожним роком, але існує невелика кількість робіт, в яких питання індентування розглядаються не тільки з позицій механіки, а й з урахуванням фізичних процесів. Твердість матеріалів звичайно трактується як одна з характеристик міцності матеріалів. Однак проблеми дослідження механізмів деформації та руйнування, визначення механічних характеристик малопластичних та крихких матеріалів потребують подальшого розвитку фізичної теорії індентування і методик локального навантаження матеріалів жорстким індентором, що особливо важливо для фізики пластичності матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації відповідає основним напрямкам робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України в рамках бюджетних тем: «Розвиток теорії індентування та нових методів дослідження механізмів деформації та визначення механічних властивостей матеріалів при локальному навантаженні індентором» (№0107U000031, 2007–2009 рр.); «Розвиток фізичних основ міцності, пластичності та зварюваності інтерметалідів на основі Al, Ni та Zr в різних структурних станах» (№01100U000140, 2010–2012 рр.) «Фізичні основи формування трибологічних властивостей матеріалів (сталі, алюмінієві сплави, квазікристали, інтерметаліди) та покриттів за умов динамічного навантаження» (№0114U001373, 2014–2016 рр.), та міжнародного проекту УНТЦ №1997 «Пластичність та деформаційні криві, отримані методом індентування для кераміки та покриттів» (2002–2004 рр.).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток фізичних уявлень щодо визначення характеристик міцності та пластичності матеріалів методом індентування.

Досягнення поставленої мети визначило вирішення наступних задач:

1. Розробити методику визначення характеристики пластичності при інденуванні (δ_H) для високотвердих матеріалів з великою часткою пружної деформації під інденатором; визначити δ_H кристалічних матеріалів з різним типом міжатомного зв'язку і різною кристалічною структурою, а також аморфних металевих сплавів і квазікристалічних матеріалів та класифікувати ці матеріали за величиною їх характеристики пластичності.

2. Експериментально і теоретично вивчити температурну залежність характеристики пластичності δ_H матеріалів з різним типом кристалічної структури. Розробити методику визначення характеристики пластичності $\delta_H(0)$ при надбар'єрному русі дислокацій в кристалах в умовах відсутності термічних коливань атомів при 0 К, тобто в умовах, при яких визначається напруження Пайєрлса-Набарро.

3. Запропонувати методику побудови кривих деформації матеріалів методом інденування пірамідальними інденаторами та проаналізувати відповідність між кривими деформації, отриманими при стандартних механічних випробуваннях, та інденуванням для металевих сплавів.

4. Вивчити методом інденування особливості механічної поведінки та механізм деформації сплавів, що сильно двійникуються і руйнуються крихко при стандартних механічних випробуваннях.

5. Дослідити вплив пористості на особливості механічної поведінки керамічних матеріалів при інденуванні в широкому температурному інтервалі.

6. Методом інденування дослідити особливості локальної пластичної деформації при прониканні в мішень кінетичного ударника.

Об'єкт дослідження: фізико-механічна поведінка та механічні властивості матеріалів при локальному навантаженні інденатором.

Предмет дослідження: металічні сплави з ОЦК, ГЦК, ГЦУ решіткою; інтерметаліди; тугоплавкі сполуки (карбіди); ковалентні кристали; аморфні металічні сплави та квазікристали; сталі 45, У8 та титановий сплав ВТ6; сплави системи Cr-Mn, що інтенсивно двійникуються при інденуванні; алюмінієвий сплав АМг5.

Методи дослідження: вимірювання твердості різними пірамідальними інденаторами в широкому температурному інтервалі (-196...900 °С), механічні випробування на розтяг та стиск, оптична, скануюча та просвічувальна електронна мікроскопія та рентгеноструктурний аналіз.

Наукова новизна отриманих результатів. Розвинення методики визначення характеристики пластичності при інденуванні δ_H вперше дозволило визначити цю характеристику для високоміцних матеріалів з високим рівнем пружної деформації та класифікувати різні нові матеріали, крихкі при стандартних випробуваннях на розтяг, за рівнем пластичності. Для широкого класу кристалічних матеріалів теоретично і експериментально вивчена температурна залежність характеристики пластичності δ_H від параметрів, що визначають механічну поведінку матеріалів: модуля Юнга E , енергії активації руху дислокацій U , активаційного об'єму V і температури плавлення T_m . Введено уявлення про характеристику пластичності при

$0\text{ K} - \delta_H(0)$ (при дислокаційному механізмі деформації без допомоги термічних коливань атомів, тобто в умовах, при яких оцінюється напруження Пайєрлса-Набарро σ_{PH}). Розроблено методику експериментального визначення $\delta_H(0)$ і встановлена теоретична залежність цієї величини від параметрів, що характеризують механічну поведінку матеріалів. Показано фундаментальне значення $\delta_H(0)$ в теорії дислокацій.

Запропонована схема температурної залежності твердості матеріалів з високим рівнем напруження Пайєрлса-Набарро з урахуванням пористості цих матеріалів, в якій на кожному температурному відрізку діє різний механізм утворення відбитку твердості (за рахунок пластичної деформації чи фазового переходу під тиском, процесами крихкого руйнування або переходом від деформації ковзанням до деформації двійникуванням).

Розроблена методика побудови методом індентування кривих деформації пірамідальними інденторами дозволяє визначати механічні характеристики матеріалів (границю плинності, деформаційне зміцнення, тощо). Коректність отриманих кривих підтверджена при порівнянні з механічними характеристиками, отриманими стандартними методами випробувань.

Вперше методом індентування вивчено механізм пластичної деформації сплавів системи Cr-Mn , які інтенсивно двійникуються в процесі деформації, і не можуть бути досліджені стандартними методами механічних випробувань у зв'язку з їх крихкістю. При цьому виявлено зворотний масштабний ефект при індентуванні пірамідами Віккерса та Берковича (зростання твердості при збільшенні навантаження на індентор).

Вперше показано, що біля каналу проникання кінетичного ударника в сплав алюмінію формується зеренна та дислокаційна структура, яка відповідає структурі, що формується при пластичній деформації стиском $> 40\%$.

Практичне значення одержаних результатів. Розвинені уявлення та методики роблять доцільним дослідження мікротвердості матеріалів супроводжувати визначенням і аналізом характеристики їх пластичності δ_H , і це можливо не тільки для металів, а й для сучасних нових високоміцних матеріалів, що крихко руйнуються при стандартних механічних випробуваннях. При розробці нових високоміцних матеріалів стало можливим враховувати значення не тільки міцності, а й пластичності, що дозволяє найбільш повно характеризувати їх експлуатаційні властивості.

Підтверджено, що запропонована та відпрацьована на металічних сплавах методика побудови кривих деформації методом індентування, дозволяє також будувати деформаційні криві крихких матеріалів, тонких шарів, включень другої фази та інших структурних елементів в широкому інтервалі температур і не потребує виготовлення великої кількості зразків для механічних випробувань.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є узагальненням результатів досліджень, які були виконані автором в Інституті проблем матеріалознавства НАН України під керівництвом чл.-кор. НАН України, професора, д.ф.-м.н. Ю.В. Мільмана. Автором проаналізовано літературні джерела з означеної тематики, виконано експериментальні дослідження з вимірів твердості в широкому інтервалі

температур (-196...900 °С) різними пірамідальними інденторами, побудовано криві деформації методом індентування та визначено характеристику пластичності кристалічних матеріалів з різним типом міжатомного зв'язку і різною кристалічною структурою, а також аморфних металевих сплавів і квазікристалічних матеріалів. Виконано локальне дослідження механічних властивостей та структури поблизу каналу проникання алюмінієвої мішені. Обробка і аналіз отриманих результатів, написання ряду наукових статей, підготовка доповідей на конференціях здійснювалися дисертантом.

Визначення мети, задач та методик досліджень здійснювалось разом з науковим керівником Ю.В. Мільманом. Розвиток методики визначення характеристики пластичності δ_H з урахуванням припущення про нестискання матеріалу під індентором тільки для пластичної деформації для матеріалів з великою часткою пружної деформації при індентуванні здійснено здобувачем разом з Б.О. Галановим, Ю.В. Мільманом та С.І. Чугуновою. Рентгеноструктурні дослідження виконані сумісно з М.О. Єфімовим; просвічувальна електронна мікроскопія (ТЕМ) здійснена разом з М.І. Даниленком; фрактографічні дослідження – з А.В. Самелюком; стандартні механічні випробування на стиск та розтяг та експерименти з проникання кінетичного ударника проведені спільно з В.А. Гончаруком. Матеріали для дослідження (інтерметаліди, алюмінієві, квазікристалічні та аморфні сплави) були отримані в ІІМ НАНУ під керівництвом професора Ю.В. Мільмана. Зразки карбідокремнієвої кераміки з різною пористістю були виготовлені в Науково-дослідному центрі високих тисків Польської академії наук (Варшава, Польща).

Апробація отриманих результатів. Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях: Hypervelocity Impact Symposium HVIS 2003 (2003, Noordwijk, Netherlands); XV Петербургские чтения по проблемам прочности (2005, Санкт-Петербург, Россия); Международная конференция «Современное материаловедение, достижения и проблемы» (2005, Киев, Украина); 49 Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» АПП-2010 (2010, Киев, Украина); 51-а Міжнародна конференція „Актуальні проблеми міцності” (2011, Харків, Україна); Міжнародна конференція „Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем” (2016, Київ, Україна).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 18 друкованих праць, з них 9 статей у фахових журналах та 7 тез наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, **шести** розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 148 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 171 сторінку та містить 55 рисунків та 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета та задачі дослідження, визначені методи, об'єкт і предмет дослідження, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, позначений особистий внесок автора. Також наведено дані

щодо апробації роботи, кількості публікацій та дані про структуру та обсяг дисертації.

Перший розділ дисертації присвячено літературному огляду з досліджуваної тематики. Наведено найбільш поширені статичні методи випробування твердості (за Брінеллем, Роквеллом та Віккерсом). Розглянуто переваги та недоліки застосування сферичних інденторів при побудові кривих деформації методом індентування. Викладено основні напрями використання методу індентування для визначення механічних властивостей матеріалів, розглянуто фізичні основи температурної залежності границі плинності та твердості. Особливу увагу приділено введеній в роботі Ю.В. Мільмана, Б.О. Галанова, С.І. Чугунової [Acta Met. and Mater. – 1993. – Vol.41, No.9] характеристиці пластичності при індентуванні δ_H , яка визначається як частка пластичної деформації в загальній пружно-пластичній деформації під індентором

$$\delta_H = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e + \varepsilon_p} = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_t}, \quad (1)$$

де ε_p , ε_e та ε_t – пластична, пружна та загальна деформація, відповідно.

На відміну від загальноприйнятих на практиці характеристик пластичності (подовження до руйнування при випробуванні на розтяг δ та поперечне звуження до руйнування ψ) характеристика пластичності δ_H відповідає фізичному визначенню пластичності, як схильності матеріалу зазнавати залишкові деформації під навантаженням, тобто необоротно деформуватися під дією навантаження. Пластичність δ_H – це безрозмірна величина, що змінюється від 0 – при абсолютно пружному вдавненні індентора до 1 – при повністю пластичній деформації, тобто $0 < \delta_H < 1$. Було встановлено наявність критичного значення пластичності $\delta_{Hcr} = 0,9$, досягнення якого є необхідною умовою для прояву пластичності при випробуваннях на розтяг та згин. Для індентора Віккерса була отримана формула для розрахунку δ_H у вигляді

$$\delta_H = 1 - 14,3 \cdot \left(1 - \nu - 2\nu^2\right) \frac{HV}{E}, \quad (2)$$

де HV – твердість за Віккерсом, E – модуль Юнга і ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу, що досліджується.

На підставі аналізу викладених літературних даних показано важливість розвитку методу індентування для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, особливо їх пластичності.

В **другому розділі** представлено обґрунтування вибору матеріалів дослідження та наведені методи дослідження. Для визначення комплексу механічних властивостей в умовах мікроіндентування були використані пірамідальні індентори Віккерса, Берковича та серія тригранних алмазних пірамідальних інденторів з різними кутами загострення при вершині (45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85°). Виміри проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 при різних навантаженнях на індентор. Вимір низькотемпературної залежності мікротвердості ($-196 \dots 20^\circ\text{C}$) здійснювали на установці ПМТН під шаром охолоджувальної рідини. Твердість вище кімнатної температури досліджували в інтервалі $20 \dots 900^\circ\text{C}$ у вакуумі не

нижче 10^{-3} Па на модернізованій установці ВІМ-1. Для структурних досліджень було задіяно оптичну мікроскопію, скануючу та просвічувальну електронну мікроскопію та рентгеноструктурний аналіз. При розробці уявлень щодо характеристики пластичності при 0 К було використано положення фізики конденсованого стану та фізики міцності і пластичності.

Третій розділ присвячений розвитку теорії визначення характеристики пластичності δ_H стосовно твердих та високотвердих матеріалів, у яких при інденуванні частка пружної деформації під індентором ε_e велика, а частка пластичної деформації ε_p мала. Для таких матеріалів нами розроблена теорія, яка враховує припущення нестискання матеріалу під індентором при визначенні тільки пластичної частини деформації ε_p , та отримана формула для розрахунку пластичної деформації

$$\varepsilon_p = -\ln \sqrt{1 + \left(\operatorname{ctg} \gamma - \frac{HM}{kE_{ef}} \right)^2}, \quad (3)$$

де $k = 0,565$ – для тригранної і чотиригранної пірамід та $k = 0,5$ – для конічного індентора з кутом при вершині 2γ , γ – кут між гранню і віссю піраміди для пірамідальних інденторів; HM – твердість за Мейєром, яка розглядається як середній контактний тиск; E_{ef} – ефективний модуль Юнга контактної пари індентор – зразок, і обчислюється як

$$\frac{1}{E_{ef}} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (4)$$

де E , E_i – модуль Юнга; ν , ν_i – коефіцієнт Пуассона матеріалу та індентора, відповідно.

Середня пружна деформація на контактній площадці індентор – зразок в напрямку прикладеного навантаження розраховувалася за рівнянням

$$\varepsilon_e = -\frac{HM}{E} (1 - \nu - 2\nu^2). \quad (5)$$

Це рівняння можна розглядати як закон Гука при інденуванні.

Загальна деформація під індентором $\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_e$. (6)

Було проведено розрахунок характеристики пластичності δ_H за співвідношенням (1) (коли ε_p розраховується за формулою (3) і ε_e – за формулою (5)), а також за рівнянням (2), дані розрахунку для деяких матеріалів наведені в табл. 1. Проаналізовано широкий клас матеріалів з різною кристалічною структурою та з різним характером міжатомного зв'язку: ковалентні монокристали (Si, Ge); частково ковалентні тугоплавкі сполуки у вигляді монокристалів (Al_2O_3 , SiC, TiC, ZrC, NbC, WC); метали з ОЦК ґраткою у вигляді монокристалів або відпалені полікристали (Cr, Mo, W, Nb, Fe), з ГПУ ґраткою (Zr, Ti) та ГЦК ґраткою (Al, Cu); інтерметаліди (ІМ) на основі алюмінію; аморфні металічні сплави (АМС) на основі Fe, Co у вигляді стрічок, отриманих спінінгуванням; квазікристали (КК) на основі Al. Такий вибір матеріалів для дослідження був обумовлений необхідністю

дослідити матеріали з широким інтервалом значень твердості HV (0,16...34 ГПа), відношенням HV/E (0,002...0,074) та характеристики пластичності δ_H (0,29...0,99).

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості (HV , E , ν , E_{ef} , ε_e , ε_p , ε_t) та характеристика пластичності δ_H , розрахована за формулами (2) та ((1),(3),(5)) для деяких матеріалів

Матеріал		HV , ГПа	E , ГПа	ν	E_{ef} , ГПа	ε_e , %	ε_p , %	ε_t , %	δ_H	
									за (2)	за ((1), (3), (5))
Метали	Al	0,16	71	0,35	76	0,10	7,42	7,52	0,99	0,99
	Fe	1,40	211	0,28	192	0,40	7,08	7,48	0,95	0,95
Тугоплавкі сполуки	WC (0001)	16,7	700	0,31	472	1,28	5,36	6,64	0,83	0,81
	NbC(100)	24	550	0,21	390	3,31	3,94	7,25	0,56	0,54
	TiB ₂	33	540	0,28	394	3,72	2,89	6,61	0,51	0,44

Таблиця 2 – Характеристика пластичності δ_H різних класів матеріалів при кімнатній температурі

Матеріал		δ_H
ГЦК метали (Au, Al, Cu, Ni)		0,97...0,99
ОЦК метали (Fe, Mo, Nb, Cr та ін.)		0,92...0,97
ГЦУ метали (Co, Re, Ti та ін.)		0,95...0,97
ІМ	Al ₆₆ Mn ₁₁ Ti ₂₃	0,87
	Al ₆₁ Cr ₁₂ Ti ₂₇	0,81
	Al ₃ Ti	0,76
АМС	Co ₅ Ni ₁₀ Fe ₅ Si ₁₂ B ₁₇	0,60
	Fe ₈₃ B ₁₇	0,58
КК	Al ₇₀ Pd ₂₀ Mn ₁₀	0,71
	Al ₆₃ Cu ₂₅ Fe ₁₂	0,48
Тугоплавкі сполуки	WC (0001)	0,81
	ZrN	0,63
	NbC (100)	0,54
	TiC (100)	0,46
	ZrC (100)	0,46
	TiB ₂	0,44
	Al ₂ O ₃	0,41
α -SiC(0001)	0,29	
Ковалентні кристали	Ge (111)	0,44
	Si (111)	0,36

Порівняння значень δ_H , розрахованих за рівнянням (2) та формулами ((1), (3), (5)) показало, що розроблену методику оцінки δ_H з розрахунком за рівняннями ((1), (3), (5)) необхідно проводити для більш точного визначення пластичної частини деформації ε_p та оцінки δ_H високотвердих матеріалів (тугоплавких сполук, ковалентних кристалів), для інших матеріалів з достатньою точністю можна використовувати розрахунок δ_H за формулою (2). Для більшості матеріалів різниця між значеннями δ_H , що отримані двома методами, не дуже велика і тому в подальшому в аналітичних розрахунках залежності пластичності від структурних параметрів і зовнішніх факторів (температура, швидкість деформації та ін.) можна користуватися більш простою формулою (2) для визначення δ_H .

Характеристика пластичності δ_H була визначена (див. табл. 2) та показано, що δ_H на відміну від

пластичності до руйнування при випробуванні на розтяг δ має значення відмінне від нуля для усіх матеріалів, включаючи крихкі при стандартних механічних

випробуваннях. На підставі розрахунків досліджені матеріали було розділено на групи за зменшенням δ_H і представлено в порядку: метали (0,99...0,92) – ІМ (0,87...0,76) – АМС (0,60...0,58) – КК (0,71...0,48) – тугоплавкі сполуки (0,81...0,29) – ковалентні кристали (0,44...0,36).

Для теоретичного аналізу впливу температури на характеристику пластичності δ_H використовувалася теорія умовної границі плинності $\sigma_S(T)$, розвинена в роботах Ю.В. Мільмана, В.І. Трефілова [Механізм разрушения металлов. – К.: Наукова Думка, 1966]. Умовна границя плинності σ_S в цій теорії визначається при деякій постійній величині деформації, що відповідає визначенню твердості пірамідальними інденторами. В інтервалі холодної деформації $T < T^*$ (де T^* – характеристична температура деформації, нижче якої опір кристалічної решітки руху дислокацій, напруження Пайерлса-Набарро, стає істотним, що приводить до різкого зростання границі плинності і твердості) з теоретичної залежності $\sigma_S(T)$ було отримано вираз

$$\delta_H(T) = \delta_H(0) + \frac{AT}{VE} \ln \frac{M}{\dot{\epsilon}}, \quad (7)$$

де $A = \frac{Ck}{\epsilon_t} \cdot (1 - \nu - 2\nu^2) \ln \frac{M}{\dot{\epsilon}}$, V – активаційний об'єм, $\dot{\epsilon}$ – швидкість деформації, k –

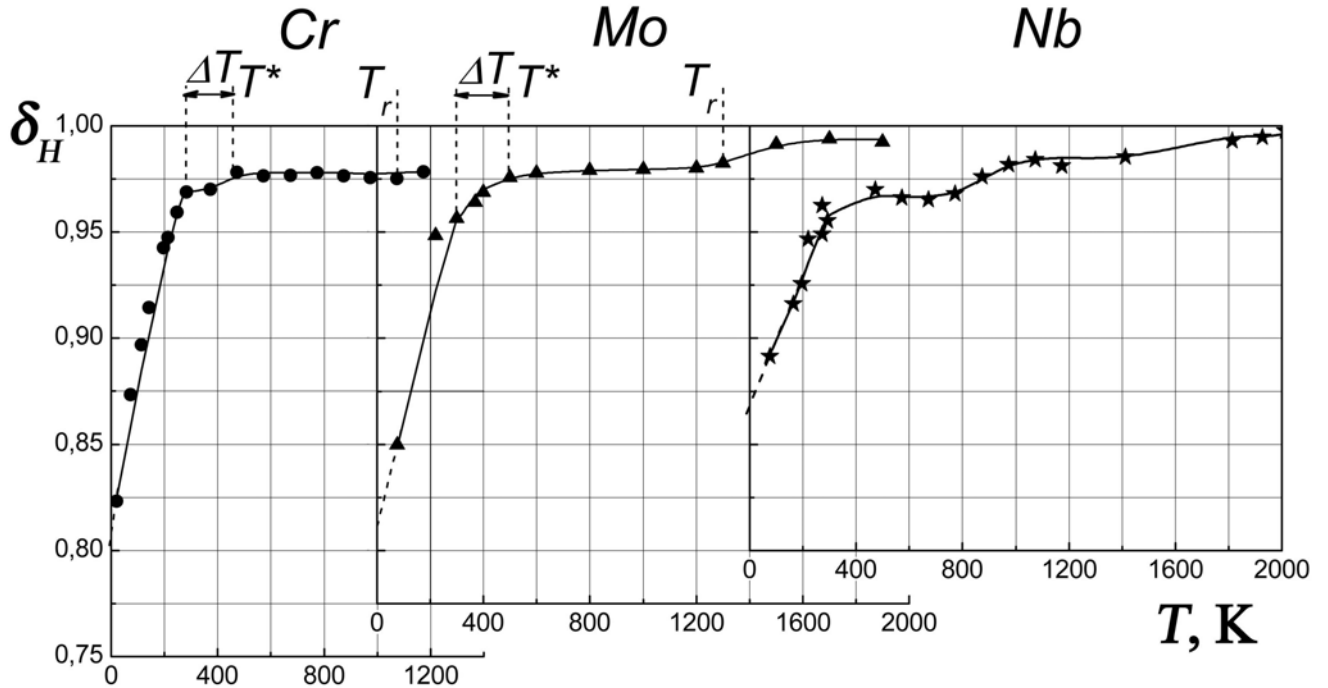
константа Больцмана, M – константа матеріалу та $\delta_H(0)$ – пластичність при 0 К, $C = HM/\sigma_S$ – параметр Тейбора.

Як видно, δ_H лінійно збільшується з ростом температури і зменшується за логарифмічним законом при збільшенні швидкості деформації. При цьому ряд експериментальних даних показує, що при наближенні до 0 К всі залежності границі плинності від температури $\sigma_S(T)$, отримані при різних швидкостях навантаження, збігаються в одну точку при 0 К, оскільки при 0 К термоактиваційні процеси відсутні. Отже, $\delta_H(0)$ не залежить або слабо залежить від швидкості навантаження. Для великої кількості різних матеріалів були експериментально вивчені залежності $HV(T)$ і побудовано залежності характеристики пластичності від температури $\delta_H(T)$ (рис. 1).

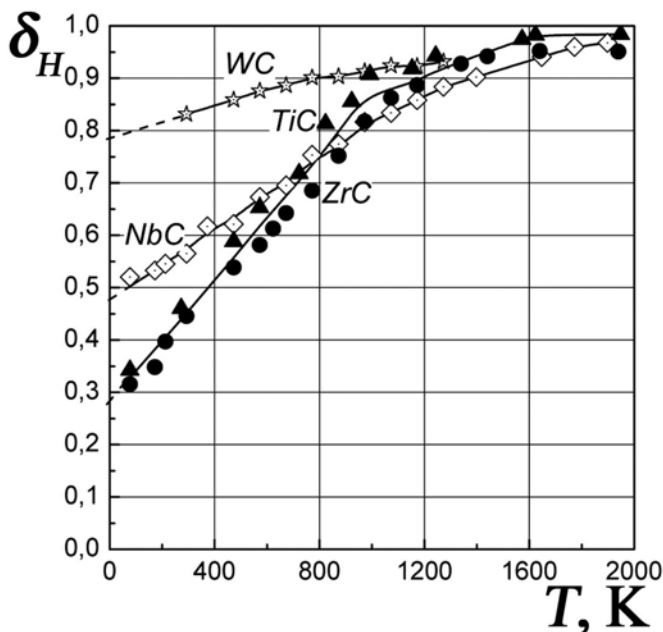
Відомо, що в роботах В.Д. Нацика, В.В. Пустовалова, В.С. Фоменко з ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України при дослідженнях сплавів на основі Pb та сплаву Ti-O була виявлена низько-температурна аномалія пластичності – немонотонна температурна залежність границі плинності з максимумом при температурах 10...20 К. В дослідженнях, виконаних в ІПМ НАН України, низькотемпературної твердості хрому до температури рідкого гелію (4,2 К) не було виявлено відхилень від лінійної залежності $HV(T)$. Для більшості матеріалів з різною кристалічною структурою експериментально був підтверджений лінійний характер залежності $\delta_H(T)$ при низьких температурах $T < T^*$. Це дало можливість визначити значення $\delta_H(0)$ для ряду матеріалів шляхом екстраполяції залежності $\delta_H(0)$ на 0 К. Використовуючи формулу (1), було отримано аналітичний вираз для характеристики пластичності при 0 К – $\delta_H(0)$ у вигляді

$$\delta_H(0) = 1 - \frac{C\sigma_S(0)}{E\epsilon_t} (1 - \nu - 2\nu^2), \quad (8)$$

з якого виходить, що підвищення напруження Пайерлса-Набарро, а також будь-яке зміцнення матеріалу, навіть те, що має атермічний характер (підвищення щільності дислокацій, зменшення розміру зерна, твердорозчинне зміцнення легуючими елементами, дисперсійне твердіння та ін.), призводять до зниження характеристики пластичності $\delta_H(0)$. Разом з тим, підвищення модуля Юнга E , що супроводжується зростанням міцності, приводить одночасно до зростання пластичності $\delta_H(0)$.



а



б

а – метали Cr, Mo, Nb;

б – тугоплавкі сполуки
WC, NbC, ZrC, TiC.

Для Mo і Cr відзначені значення
характеристичної температури T^*
і температури рекристалізації T_r .

Рисунок 1 – Температурна
залежність характеристики
пластичності δ_H

В роботі вперше введена та
обґрунтована характеристика
пластичності при 0 К ($\delta_H(0)$) – як
фундаментальна характеристика
пластичності при надбар'єрному русі
дислокацій (у відсутності термічних
флуктуацій атомів), тобто в умовах, при яких визначається напруження Пайерлса-Набарро $\sigma_{ПН}$, що необхідне для руху дислокацій при 0 К.

Встановлено аналітичний зв'язок пластичності $\delta_H(0)$ з параметрами термічно активованого руху дислокацій (енергією активації руху дислокацій U й активаційним об'ємом V), а також з температурою плавлення T_m та модулем Юнга E

$$\delta_H(0) \approx \delta_{H \text{ менл}} - \frac{U^{0,5} T_m^{0,5} \ln \frac{M}{\dot{\varepsilon}}}{VE} B, \quad (9)$$

де $\delta_{H \text{ менл}}$ – пластичність в температурному інтервалі теплої деформації ($T^* < T < T_r$, де T_r – температура рекристалізації), $\delta_{H \text{ менл}} \approx \text{const}$ (див. рис. 1). Параметр B розраховується як

$$B = \frac{Ck(1 - \nu - 2\nu^2)}{\varepsilon_t \sqrt{21} k^{1/2}}. \quad (10)$$

Збільшення висоти потенціальних бар'єрів (U), зниження їх ширини, що пропорційне активаційному об'єму V , та підвищення T_m призводять до зниження $\delta_H(0)$.

Аналіз реальних значень $\delta_H(0)$ для ряду ГЦК, ОЦК і ГЦУ металів високої чистоти, а також тугоплавких сполук (табл. 3) показав, що ГЦК метали зберігають задовільний рівень пластичності, достатній для їх пластичної поведінки при випробуваннях на розтяг ($\delta_H > \delta_{H \text{ cr}}$), не тільки при кімнатній температурі, але і при криогенних температурах, включаючи температуру рідкого азоту і навіть гелію.

Таблиця 3 – Фізико-механічні властивості (HV , E , ν) і характеристика пластичності при кімнатній температурі $\delta_H(20^\circ\text{C})$ та при 0 К – $\delta_H(0)$

Матеріал		HV , ГПа	E , ГПа	ν	$\delta_H(20^\circ\text{C})$	$\delta_H(0)$
ГЦК-метал	Al	0,16	71	0,35	0,99	0,98
ОЦК-метали	Cr	1,30	298	0,31	0,97	0,81
	Mo (111)	1,85	324	0,293	0,96	0,81
	Fe	1,40	211	0,28	0,95	0,88
ГЦУ-метал	Zr	1,07	98	0,38	0,95	0,86
Тугоплавкі сполуки	TiC (100)	24	465	0,191	0,46	0,28
	NbC (100)	24	550	0,21	0,54	0,48
	WC (0001)	16,7	700	0,31	0,81	0,79

Для високочистих ОЦК-металів при кімнатній температурі $\delta_H > \delta_{H \text{ cr}}$, отже вони мають деяку пластичність і при випробуванні на розтяг. Однак при зниженні температури внаслідок значної частки ковалентної складової в міжатомному зв'язку і високого напруження Пайєрлса-Набарро в цих металах різко зростають границя плинності і твердість, а δ_H різко знижується, і при 0 К вже $\delta_H(0) < \delta_{H \text{ cr}}$, тобто, при зниженні температури нижче кімнатної відбувається перехід пластичність – крихкість. В ОЦК і ГЦУ металах поблизу 0 К $\delta_H(0) < \delta_{H \text{ cr}}$, тобто при випробуванні на розтяг ці матеріали крихкі. Однак значення δ_H для цих металів у всьому вивченому інтервалі температур значно вище, ніж для тугоплавких сполук, для яких при $T \leq 293$ К – $\delta_H < \delta_{H \text{ cr}}$.

Таким чином, пластичність при 0 К $\delta_H(0)$ істотно розрізняється для матеріалів з різним типом міжатомного зв'язку та атомною структурою і може розглядатися як фундаментальна характеристика матеріалу при дислокаційному механізмі

деформації і повинна враховуватися для кожного матеріалу одночасно з величиною напруження Пайерлса-Набарро.

В четвертому розділі наводиться розроблена методика побудови кривих деформації матеріалів методом індентування пірамідальними інденторами та проаналізовано відповідність кривих деформації, отриманих стандартними методами та індентуванням, для сталей 45, У8 і титанового сплаву ВТ6. Показано, що використання набору тригранних інденторів із різними кутами при вершині ($\gamma = 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ$) дозволяє змінювати ступінь деформації під індентором від 2 до 30 % та будувати деформаційні криві в координатах HM – загальний ступінь деформації ε_t . Використання кожного індентора дозволяє отримувати одну точку на кривій деформації. Деформаційна крива містить стільки точок, скільки було використано інденторів з різними кутами при вершині індентора. Пружна частина ε_e кривої будується із співвідношення (5); пластична деформація ε_p розраховується за формулою (3), а загальна ε_t – за формулою (6).

Значення HM були перераховані на напруження плинності σ за існуючими теоріями – за співвідношеннями Тейбора ($\sigma_{Тейбор}$), Джонсона ($\sigma_{Джонсон}$) і Танаки ($\sigma_{Танака}$) та зіставлені з результатами стандартних механічних випробувань на стиск ($\sigma_{стиск}$) і розтяг ($\sigma_{розтяг}$) (рис. 2). При порівнянні кривих деформації багатофазних сплавів, отриманих при випробуванні на розтяг і стиск, виявляється т.зв. SD-ефект (коли напруження плинності при випробуванні на розтяг менше, ніж при випробуванні на стиск), серед досліджених сплавів менший SD-ефект спостерігався у сталі 45 і титанового сплаву ВТ6 (11 і 9 %, відповідно). Для цих матеріалів отримано задовільний збіг результатів стандартних механічних випробувань (на стиск і розтяг) та результатів індентування, перерахованих за співвідношенням

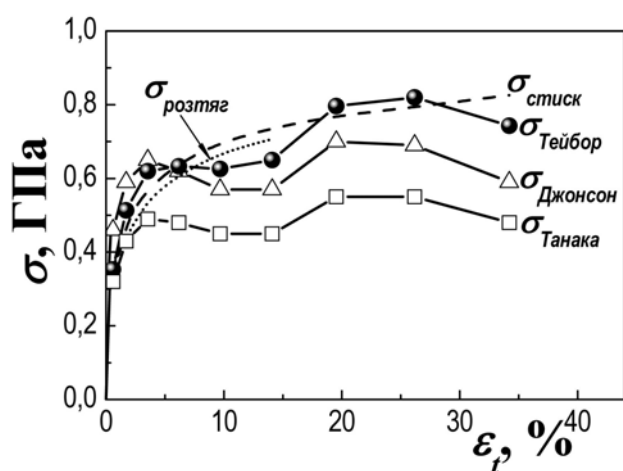


Рисунок 2 – Деформаційні криві для сталі 45, отримані стандартними методами (розтяг і стиск) та методом індентування

Тейбора, у всьому діапазоні деформацій. Це дослідження проводилося для того, щоб в подальшому розширити можливості побудови кривих деформації методом індентування пірамідальними інденторами на крихкі малопластичні матеріали, для яких можливості визначення традиційними методами механічних властивостей вельми обмежені в зв'язку з крихким руйнуванням при напруженнях, близьких до границі плинності і навіть більш низьких, а при локальному навантаженні жорстким індентором ці матеріали можуть бути продеформовані до значних ступенів деформації без макроскопічного

руйнування. Побудова кривих деформації методом індентування пірамідальними інденторами для металів також актуальна тому, що дозволяє проводити випробування безпосередньо на виробі або на невеликих зразках, що приводить до економії коштів на виготовлення стандартних зразків для механічних випробувань.

Методом локальної деформації нами вивчались особливості механічної поведінки і механізму деформації сплавів системи Cr-Mn, які інтенсивно двійникуються при деформації та руйнуються крихко при кімнатній температурі при стандартних механічних випробуваннях. Досліджувались сплави (ваг.%): Cr-42Mn, Cr-50Mn (з розміром зерна 30 мкм) та для порівняння низьколегований хромовий сплав Cr-0,3Y (розмір зерна 50 мкм), в якому двійникування при кімнатній температурі при вимірюванні мікротвердості відсутнє. Для сплавів Cr-0,3Y, Cr-42Mn і Cr-50Mn із вимірних значень твердості за Віккерсом HV (при кімнатній температурі) розраховувалася характеристика пластичності, яка склала $\delta_H = 0,95$; 0,83 і 0,82, відповідно. Значення характеристики пластичності для сплавів Cr-42Mn і Cr-50Mn нижче встановленого критичного значення $\delta_{Hcr} = 0,9$, що також підтверджує їх крихкість при стандартних механічних випробуваннях. Інформація про механічні властивості цих сплавів, отримана методом індентування, має науковий і практичний інтерес. Дослідження залежності твердості від навантаження показало, що для сплавів Cr-0,3Y і Cr-50Mn (як і для інших кристалічних матеріалів) при збільшенні навантаження P на індентор Віккерса або Берковича твердість зменшується, тобто спостерігається прямий масштабний ефект. Однак для сплаву Cr-42Mn, що двійникується найбільш сильно, відзначається аномальна залежність $H(P)$ – з ростом навантаження на індентор твердість зростає (зворотний масштабний ефект) (рис. 3). Це пов'язано з тим, що збільшення P призводить до більш інтенсивного двійникування, яке зменшує середню довжину площини ковзання, тому що двійникові границі є великокутовими границями.

При використанні тригранного пірамідального індентора ($\gamma = 60^\circ$) двійники навколо індентора в сплаві Cr-42Mn з'являються вже при навантаженні 0,2 Н. При цьому відстань між двійниковими пластинами становить $\lambda = 2 \dots 10$ мкм і знижується при зростанні навантаження на індентор, а також при зменшенні кута при вершині γ , тобто з ростом ступеня деформації під індентором ε_i (рис. 4, 5).

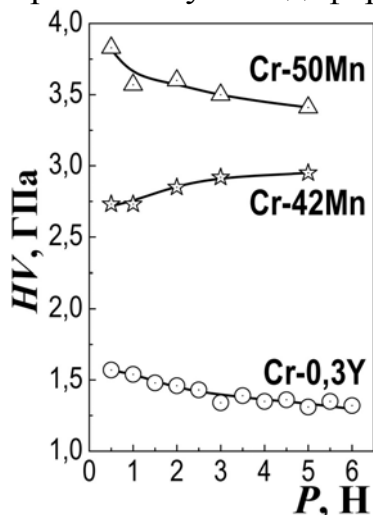


Рисунок 3 – Залежність мікро-твердості HV сплавів Cr-50Mn, Cr-42Mn, Cr-0,3Y від навантаження на індентор Віккерса

Оскільки λ істотно менше за розмір зерна, то границі двійників виконують роль бар'єрів для ковзних дислокацій і обмежують довжину площини ковзання для основного механізму пластичної деформації – ковзання. Кількість двійникових пластин навколо відбитків твердості (на відстані 10 мкм від кожної сторони відбитка) та їх залежність від ступеня деформації при індентуванні ε_i показано на рис. 5.

Встановлено, що кількість двійників різко збільшується, а відстань між двійниковими пластинами зменшується при збільшенні ступеня деформації під індентором. При цьому в сплаві Cr-42Mn кількість двійників в 3...5 разів більше, а відстань між двійниковими пластинами приблизно в 5

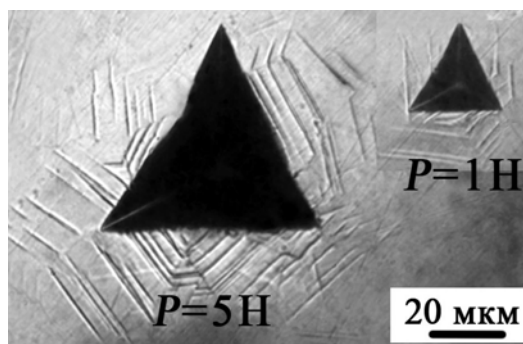


Рисунок 4 – Відбитки мікротвердості на сплавi Cr-42Mn при навантаженні на індентор 5 та 1 Н ($\gamma = 60^\circ$)

разів менше, ніж в сплавi Cr-50Mn. Як відомо, двійникування – це додатковий механізм пластичної деформації, що призводить до зменшення ефективного розміру відбитка твердості і, отже, до підвищення мікротвердості. Для досліджених сплавів були побудовані криві деформації методом індентування (рис. 6). Встановлений для сплаву Cr-42Mn зворотний масштабний ефект також спостерігається на деформаційних кривих, отриманих методом індентування.

Для всіх сплавів спостерігається деформаційне зміцнення при збільшенні ступеня деформації до величини $\varepsilon_i \approx 26\%$. Деяке знеміцнення або стабілізація значень σ відзначається при збільшенні деформації до максимального досягнутого значення $\varepsilon_i \approx 34\%$.

За рівнянням Людвика

$$\sigma = \sigma_0 + N\varepsilon_p^n, \quad (11)$$

(де σ_0 прийнято рівним границі пропорційності, N і n – коефіцієнт і показник деформаційного зміцнення, відповідно) була проведена обробка кривих деформації, яка показала, що зміцнення низьколегованого хрому (Cr-0,3Y) має одностадійний характер, а для сильно легованих сплавів Cr-Mn, що двійникуються при деформації, чітко розрізняються дві стадії деформаційного зміцнення ($\varepsilon_i < 10\%$ та $> 10\%$). При цьому зміцнення сплавів Cr-Mn ($N \approx 1,5$ ГПа) значно сильніше, ніж низьколегованого сплаву Cr-0,3Y ($N \approx 0,25$ ГПа).

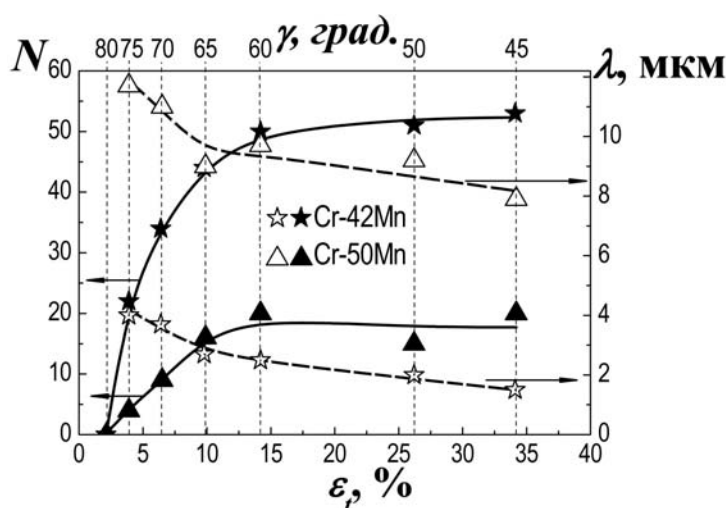


Рисунок 5 – Середня кількість двійників N і відстань між ними λ навколо відбитка твердості в залежності від ступеня деформації при індентуванні ε_i (або кута при вершині індентора γ)

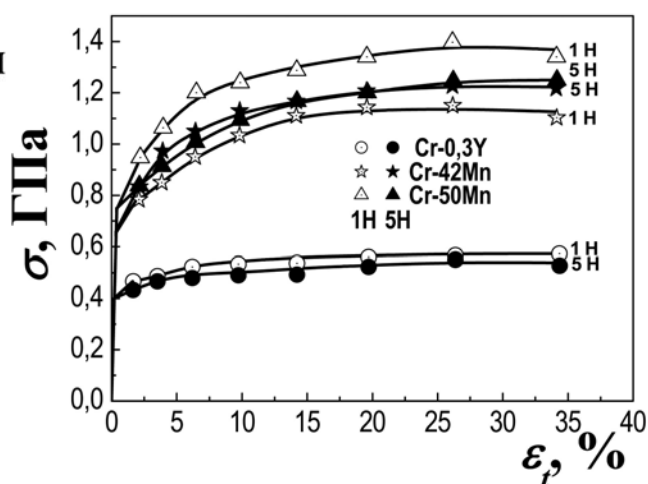


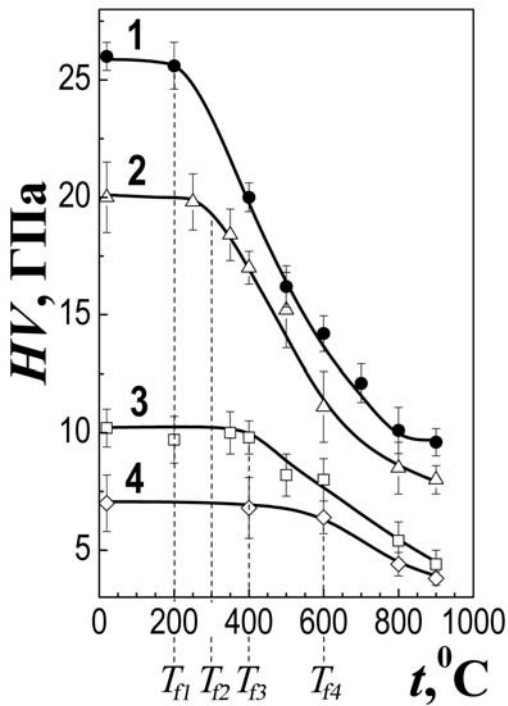
Рисунок 6 – Залежність напруження плинності σ від загальної деформації під індентором ε_i для вивчених сплавів при навантаженнях 1 і 5 Н

Інтенсивне деформаційне зміцнення (високе значення коефіцієнта N) сплавів Cr-Mn на стадії $\varepsilon_i < 10\%$ супроводжується інтенсивним розвитком двійникування (рис. 5), що підтверджує істотну роль процесу двійникування в механізмі пластичної деформації цих сплавів. Разом з тим деформаційне зміцнення цих сплавів на першій стадії має параболічний характер ($n \approx 0,5$).

З літератури відомо, що такий характер зміцнення типовий для дислокаційного механізму зміцнення, коли в процесі деформації утворюється „ліс дислокацій”, тобто дислокації розподілені після деформації хаотично. Саме такий характер дислокаційної структури характерний для сплавів Cr-Mn з низькою енергією дефекту упаковки γ_e (що й обумовлює інтенсивне двійникування при деформації). Одночасно зниження дефекту упаковки ускладнює поперечне ковзання гвинтових дислокацій, що утруднює пластичну деформацію ковзанням і обумовлює підвищення границі плинності. Підвищене деформаційне зміцнення в сплавах Cr-Mn обумовлено як ускладненням ковзання дислокацій, так і зменшенням ефективного розміру зерна в процесі деформації за рахунок інтенсивного двійникування. Друга стадія деформації зі зменшеним деформаційним зміцненням в сплавах Cr-Mn настає при $\varepsilon_i > 10\%$ коли, як видно з рис. 5, інтенсивність двійникування різко зменшується. Таким чином, підвищене значення границі плинності та різке деформаційне зміцнення в сплавах Cr-Mn обумовлює крихкість цих сплавів при стандартних механічних випробуваннях і тільки метод індентування дозволяє побудувати криві деформації цих сплавів і вивчити їх деформаційне зміцнення.

В п'ятому розділі вивчався вплив пористості θ (0; 5; 16; 20 %) на температурну залежність (20...900 °C) твердості HV карбідокремнієвої кераміки при навантаженні на індентор $P = 50$ Н (рис. 7, 8). Було визначено коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} при кімнатній температурі, який для компактної та пористої кераміки ($\theta = 5; 16$ і 20%) склав 5,20; 3,26; 2,85 і 2,81 МПа·м^{1/2}, відповідно, тобто схильність до руйнування досліджуваної карбідокремнієвої кераміки зростає зі збільшенням пористості θ . Виконаний фрактографічний аналіз зламів показав, що пори мають гострокутну форму та є небезпечними концентраторами напружень.

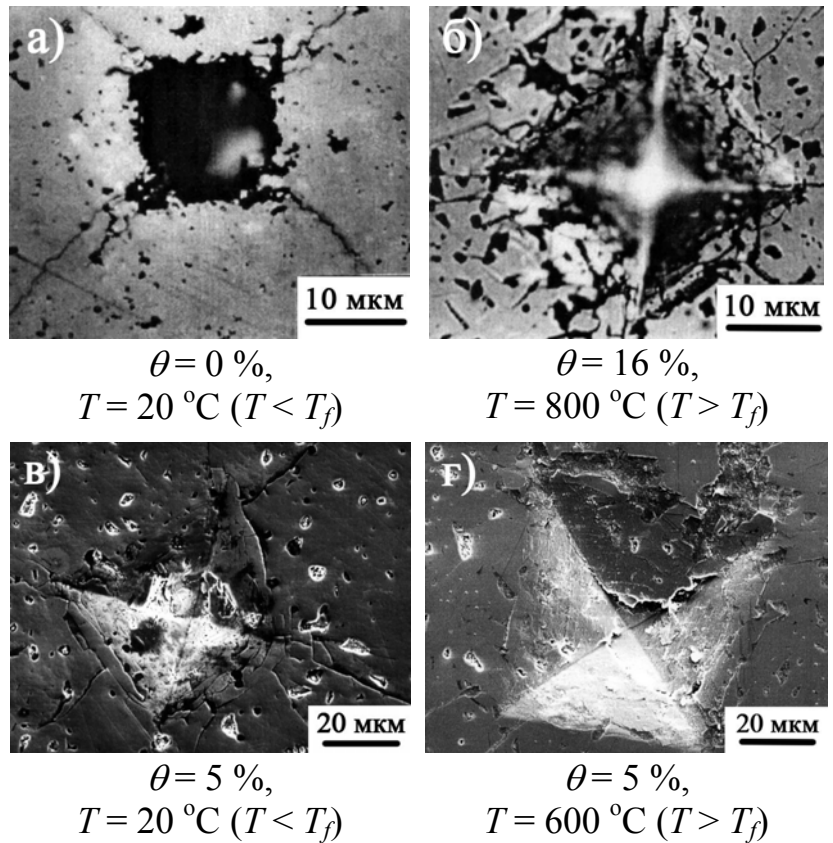
На температурній залежності твердості $HV(T)$ чітко виявляються два температурні інтервали з різним характером залежності твердості від температури. При підвищених температурах вище деякого критичного значення температури в'язко-крихкого переходу T_f залежність $HV(T)$ різка і відповідає теоретичним уявленням про температурну залежність границі плинності σ_s ковалентних кристалів з високим рівнем напруження Пайєрлса-Набарро. Довжина атермічних інтервалів твердості ($T < T_f$) зростає з ростом θ , тобто збільшення пористості полегшує процес формування відбитка твердості за рахунок руйнування, низькотемпературний інтервал розширюється (температура T_f збільшується). Значення T_f для компактної і пористої кераміки ($\theta = 5; 16$ і 20%), отримані з точок перегину на рис. 7, складають: 200; 300; 400 і 600 °C, відповідно.



1, 2, 3, 4 – $\theta = 0, 5, 16$ і 20% , відповідно.

$T_{f1}, T_{f2}, T_{f3}, T_{f4}$ – температури в'язко-крихкого переходу.

Рисунок 7 – Вплив пористості на температурну залежність твердості карбідо-кремнієвої кераміки



а, б – оптична мікроскопія,

в, г – скануюча електронна мікроскопія
Рисунок 8 – Типові відбитки твердості карбідо-кремнієвої кераміки з різною пористістю при різних температурах

При температурі $T < T_f$ діагоналі відбитка погано або взагалі не розглядаються (рис. 8 а, в). Ймовірно, це пов'язано з додатковим руйнуванням відбитка в процесі розвантаження індентора. При температурах $T > T_f$ діагоналі відбитка твердості проявляються досить чітко, хоча тріщини всередині відбитка утворюються в пористій кераміці. Сітка тріщин чітко розглядається на гранях відбитка (рис. 8 б, г).

В крихкій пористій кераміці на основі карбіду кремнію твердість відповідає величині границі плинності тільки вище деякої температури T_f , тоді як нижче цієї температури твердість відповідає напруженню крихкого руйнування. При цьому вище температури T_f спостерігається різка температурна залежність твердості, яка характерна для напруження плинності, тоді як нижче T_f твердість дуже слабо залежить від температури, що характерно для напруження руйнування. Таким чином, температура T_f може розглядатися як температура в'язко-крихкого переходу при вимірюванні твердості, яка залежить від пористості. Величина твердості знижується з ростом пористості θ в обох температурних інтервалах. Але залежність твердості від пористості більша в низькотемпературній області ($T < T_f$).

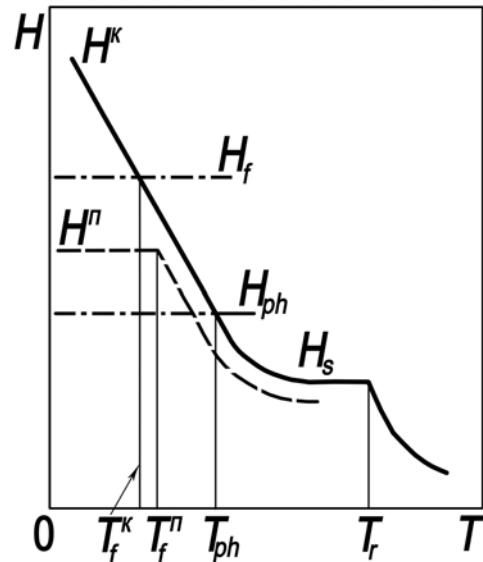
На підставі отриманих результатів та літературних даних запропонована схема (рис. 9) температурної залежності твердості матеріалів з високим рівнем напруження Пайерлса-Набарро, в якій на різних температурних відрізках твердість може визначатися такими процесами:

- H_s – пластичною деформацією і визначається при цьому границею плинності, яка відповідає деформації під індентором;
- H_{ph} – фазовим переходом під тиском і визначається критичним тиском фазового перетворення (згідно з літературними даними зазвичай перехід типу напівпровідник → метал для кристалів з ґраткою алмазу);
- H_f – процесами крихкого руйнування і визначається при цьому напруженням крихкого руйнування.

В кожному температурному інтервалі реально діє той механізм формування відбитка твердості, який здійснюється при найменшому тиску під індентором, тобто відповідає найменшій твердості.

Також було показано, що цю схему можливо розширити на тугоплавкі ОЦК метали, для яких при індентуванні при низьких температурах спостерігається атермічна область деформації при двійникуванні. В цьому випадку твердість в атермічній області відповідає границі плинності при пластичній деформації двійникуванням.

В шостому розділі метод індентування застосовувався для вивчення особливостей локальної пластичної деформації при ударному навантаженні мішені з алюмінієвого сплаву АМг5 полусферичним кінетичним ударником ($\varnothing 9$ мм, $m = 5,9$ г). Визначена критична швидкість проникання кінетичного ударника в перешкоду товщиною 5 мм $v_{cr} = 387$ м/с як швидкість, при якій кінетичний ударник пробиває перешкоду і застряє в ній. Процес проникання кінетичного ударника в мішень має багато загальних рис з методом індентування і може розглядатися, як глибоке індентування. Для мішеней після динамічного впливу ударника з різними швидкостями навантаження (261, 384, 387 та 415 м/с) були побудовані карти розподілу мікротвердості HV в зонах прилеглих до каналу проникання/або пробиття та розрахована характеристика пластичності δ_H . Проведене додаткове дослідження статичним стиском зразків зі сплаву АМг5 на 2, 10, 20, 30, 40, 60, 80 % деформації



H^k і H^n – твердості компактного і пористого матеріалу, відповідно;

H_s – твердість, що відповідає напруженню плинності;

H_{ph} – твердість, що обумовлена фазовим переходом під індентором;

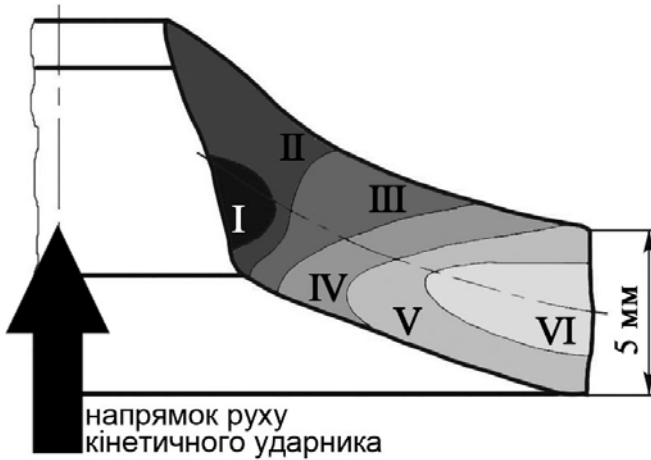
H_f – твердість, що обумовлена напруженням руйнування;

T_f^k / T_f^n – температура в'язко-крихкого переходу компактного або пористого матеріалу;

T_{ph} – температура, нижче якої можливо фазовий перехід при індентуванні

Рисунок 9 – Схема температурної залежності твердості матеріалів з високим рівнем напруження Пайерлса-Набарро

дозволило отримати відповідність між значеннями твердості HV і пластичної деформації ε_p . Таким чином, карти розподілу мікротвердості HV стали також картами розподілу пластичної деформації ε_p і характеристики пластичності δ_H в мішенях після динамічного навантаження (рис. 10).



Зона	HV , ГПа	ε_p , %	δ_H
I	1,3...1,4	> 70	0,886...0,877
II	1,2...1,3	50...70	0,895...0,886
III	1,1...1,2	26...50	0,904...0,895
IV	1,0...1,1	15...26	0,913...0,904
V	0,9...1,0	7,5...15	0,922...0,913
VI	0,8 ...0,9	0...7,5	0,931...0,922

Рисунок 10 – Карта розподілу HV , ε_p та δ_H в мішені після динамічного навантаження кінетичним ударником $v_{cr} = 387$ м/с

Оптичні і електронно-мікроскопічні дослідження показали, що максимум нерівноосності структури зерен, збільшення щільності дислокацій і зменшення розміру дислокаційної комірки на границі з каналом проникання, відповідає більш, ніж 40 % пластичної деформації при статичному стиску дослідженого сплаву АМг5. Рентгеновське дослідження показало, що внутрішні напруження, які виникають при прониканні ударника в мішень, є мікронапруженнями другого роду (σ_{II}) та становлять ~ 77 % від границі плинності, визначеної при механічних випробуваннях на стиск.

Енергія (w_p), витрачена на пластичну деформацію при динамічному навантаженні, була оцінена по картах розподілу твердості і залишкової пластичної деформації. Показано, що при швидкості $v \approx v_{cr}$ ця енергія досягає приблизно 90 % кінетичної енергії ударника (w_k). Важливо, що при $v > v_{cr}$ зі збільшенням швидкості ударника $w_p \approx const$. У цьому випадку відношення w_p/w_k зменшується.

Таким чином, показана можливість застосування метода індентування для вивчення локальних механічних властивостей і деформаційного зміцнення поблизу каналу проникання мішені для розуміння механізмів деформації при ударному навантаженні кінетичним ударником.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи значного розвитку отримали фізичні уявлення щодо процесів деформації при індентуванні та розроблено нові методики визначення механічних властивостей матеріалів методом індентування.

1. Розроблено методику визначення характеристики пластичності δ_H , що враховує нестискання матеріалу під індентором при визначенні тільки пластичної частини деформації, що дозволяє визначати δ_H високотвердих матеріалів з високим рівнем пружної деформації під індентором. Пластичність δ_H визначена для кристалічних матеріалів з різним типом міжатомного зв'язку і різною кристалічною структурою, а також аморфних металевих сплавів і квазікристалічних матеріалів та

показано, що за зменшенням пластичності δ_H матеріали розташовуються в порядку: метали (0,99...0,92) – інтерметаліди (0,87...0,76) – аморфні металічні сплави (0,60...0,58) – квазікристали (0,71...0,48) – тугоплавкі сполуки (0,81...0,29) – ковалентні кристали (0,44...0,36).

2. Введено поняття про пластичність при дислокаційному механізмі деформації в умовах відсутності термічних коливань атомів при 0 К – $\delta_H(0)$, тобто в умовах, при яких визначається напруження Пайєрлса-Набарро $\sigma_{ПН}$. Отримано рівняння для аналітичного розрахунку $\delta_H(0)$, а також розраховані значення $\delta_H(0)$ для ряду матеріалів з різною кристалічною структурою. Встановлено кореляцію $\delta_H(0)$ з параметрами, які характеризують механічну поведінку матеріалів: модулем Юнга E , енергією активації руху дислокацій U , активаційним об'ємом V і температурою плавлення T_m . Показано, що $\delta_H(0)$ може розглядатися як фундаментальна характеристика матеріалу при дислокаційному механізмі деформації. При розробці матеріалів з оптимальним рівнем механічних властивостей необхідно враховувати $\delta_H(0)$ разом з $\sigma_{ПН}$, а також значення δ_H при робочій температурі разом зі значенням міцності або твердості.

3. Розроблена методика побудови методом індентування пірамідальними інденторами кривих деформації матеріалів, яка дозволяє визначати їх деформаційне зміцнення. Коректність отриманих кривих підтверджена при порівнянні з кривими деформації, отриманими стандартними методами випробувань на сталях 45, У8 та титановому сплаві ВТ6. Показано, що у всьому діапазоні деформацій задовільний збіг результатів стандартних механічних випробувань спостерігається з результатами, отриманими методом індентування, які розраховані за співвідношенням Тейбора $HM/\sigma_S = 3$.

4. На прикладі сплавів системи Cr-Mn, що інтенсивно двійникуються в процесі деформації, та при стандартних механічних випробуваннях руйнуються крихко, методом індентування вивчено механізм пластичної деформації та вперше побудовано криві деформації цих сплавів. Показано, що на першій стадії деформації при $\varepsilon_i < 10\%$ – деформація має дислокаційний характер (показник деформаційного зміцнення $n \approx 0,5$). Водночас деформаційне зміцнення різко збільшується (високе значення коефіцієнту деформаційного зміцнення $N \approx 1,5$ ГПа) за рахунок зменшення в процесі деформації ефективного розміру зерна при двійникуванні та затруднення деформації ковзанням (в зв'язку з низьким значенням енергії дефекту упаковки) і, як наслідок, ускладнення поперечного ковзання гвинтових дислокацій. При $\varepsilon_i > 10\%$ – деформаційне зміцнення зменшується тому, що зменшується інтенсивність двійникування. Показано, що двійникування посилюється при збільшенні навантаження на індентор, що призводить до зворотного масштабного ефекту при індентуванні пірамідальними інденторами.

5. На прикладі карбідокремнієвої кераміки вперше систематично вивчено вплив пористості на температурну залежність твердості крихких матеріалів. Показано, що твердість визначається напруженням плинності та різко залежить від температури вище деякої температури холодноламкості при індентуванні T_f . Нижче T_f спостерігається атермічний інтервал твердості, на якому при утворенні відбитка твердості значну роль відіграють процеси руйнування. Температура T_f зростає при

збільшенні пористості кераміки ($\theta = 0; 5; 16$ і 20%) та складає – 200; 300; 400 і 600°C , відповідно, тобто збільшення пористості полегшує процес формування відбитка твердості за рахунок руйнування.

Запропоновано схему температурної залежності твердості матеріалів з високим рівнем напруження Пайєрлса-Набарро, в якій в різних температурних інтервалах твердість може визначатися різними процесами: пластичною деформацією, фазовим переходом під тиском, процесами крихкого руйнування та двійникуванням. В кожному температурному інтервалі реально діє той механізм формування відбитка твердості, який здійснюється при найменшому тиску під індентором, тобто відповідає найменшій твердості.

6. Показана можливість застосування метода індентування для вивчення локальних механічних властивостей і деформаційного зміцнення поблизу каналу проникання мішені для розуміння механізмів деформації при ударному навантаженні кінетичним ударником. Процес проникання кінетичного ударника в мішень розглянуто як випадок глибокого індентування і на прикладі алюмінієвого сплаву АМг5 вперше вивчена зеренна та дислокаційна структура на границі каналу проникання та розрахована пластична деформація ε_p , твердість HV та характеристика пластичності δ_H поблизу каналу проникання. Показано, що формування нерівноосної зеренної структури та дислокаційних комірок, а також збільшення ширини рентгенівських дифракційних ліній відповідає пластичній деформації більш, ніж 40% при статичному стиску сплаву АМг5. Рентгенівське дослідження показало, що внутрішні напруження, які виникають при прониканні ударника в мішень, є мікронапруженнями другого роду та становлять $\sim 77\%$ від границі плинності. Показано, що при швидкості $v \approx v_{cr}$ (v_{cr} – критична швидкість пробиття) енергія витрачена на пластичну деформацію приблизно дорівнює 90% кінетичної енергії ударника.

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мильман, Ю.В. Определение механических свойств малопластичных материалов методом индентирования / Ю.В. Мильман, Б.А. Галанов, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Polish Ceramic Bulletin. – 1996. – Vol.50, No.12. – P.95-102.
2. Milman, Yu. Determination of ductility and stress-strain curve of WC based hard metals by indentation method / Yu. Milman, S. Chugunova, I. Goncharova, S. Luyckx // Science of Sintering. – 1997. – Vol.29(3). – P.155-161.
3. Milman, Yu.V. Temperature dependence of hardness in silicon-carbide ceramics with different porosity / Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova, T. Chudoba, W. Lojkowski, W. Gooch // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 1999. – Vol.17, No.5. – P.361-368.
4. Галанов, Б.А. Исследование механических свойств высокотвердых материалов методом индентирования / Б.А. Галанов, Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Сверхтвердые материалы. – 1999. – №3. – С.25-38.
5. Мильман, Ю.В. Исследование механизма пластической деформации в сильно двойникующихся сплавах с ОЦК-решеткой системы Cr-Mn / Ю.В. Мильман, Г.Г. Курдюмова, И.В. Гончарова // Деформация и разрушение материалов. – 2005. – №12. – С.31-38.

6. Milman, Yu.V. Plasticity characteristic obtained by indentation technique for crystalline and noncrystalline materials in the wide temperature range / Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova // High Temperature Materials and Processes. – 2006. – Vol.25, No.1-2. – P.39-46.

7. Исследование механического поведения малопластичных материалов методом индентирования // Особенности структуры и свойств перспективных материалов / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова; под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – Гл.16. – С.301-322.

8. Milman, Yu.V. Physics of deformation and fracture at impact loading and penetration / Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova, V.A. Goncharuk, N.A. Yefimov // International Journal of Impact Engineering. – 2006. – Vol.33. – P.452-462.

9. Мильман, Ю.В. К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Электронная микроскопия и прочность материалов. – 2008. – Вып.15. – С.3-10.

10. Мильман, Ю.В. Пластичность, определяемая методом индентирования, и теоретическая пластичность материалов / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т.73, №9. – С.1282-1289.

11. Мильман, Ю.В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – Т.98. – С.182-187.

12. Milman, Yu. Plasticity at absolute zero as a fundamental characteristic of dislocation properties / Yu. Milman, S. Chugunova, I. Goncharova // International Journal of Materials Science and Applications. – 2014. – Vol.3, No.6. – P.353-362.

13. Milman, Yu.V. Evolution of structure and mechanical properties of target during impact loading and penetration of a kinetic energy projectile / Yu.V. Milman, W. Gooch, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova, V.A. Goncharuk // Hypervelocity Impact Symposium (HVIS 2003) (Noordwijk, Holland, 8-11 December 2003). Proceedings of the Symposium. – Noordwijk, 2003. – P.104.

14. Гончарова, И.В. Характеристика пластичности, определенная методом индентирования, для кристаллических, аморфных и квазикристаллических материалов в широком интервале температур / И.В. Гончарова, С.И. Чугунова, Ю.В. Мильман // XV Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 100-летию со дня рождения академика С.Н. Журкова (Санкт-Петербург, Россия, 12-14 апреля 2005). Тезисы трудов. – Санкт-Петербург, 2005. – С.43.

15. Курдюмова, Г.Г. Особенности механического поведения интенсивно двойникующихся при деформации сплавов Cr-Mn / Г.Г. Курдюмова, И.В. Гончарова, Ю.В. Мильман // Международная конференция «Современное материаловедение, достижения и проблемы» (Киев, Украина, 26-30 сентября 2005). Тезисы докладов. – Киев, 2005. – С.120-121.

16. Гончарова, И.В., Мильман, Ю.В. Корреляция кривых деформации, полученных стандартными методами и индентированием // 49 Международная

конференція «Актуальные проблемы прочности» АПП-2010 (Киев, Украина, 14-18 июня 2010). Тезисы докладов. – Киев, 2010. – С.98.

17. Мильман, Ю.В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова, А.А. Голубенко // 51-ая Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Харьков, Украина, 16-20 мая 2011). Тезисы докладов. – Харьков, 2011. – С.28.

18. Гончарова, И.В., Мильман, Ю.В. Теоретическая пластичность и пластичность при 0 К – важные характеристики материалов // Міжнародна конференція „Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем” в рамках науково-навчальної сесії, присвячена 70-річчю від дня заснування Інституту металофізики ім.Г.В.Курдюмова НАН України (Київ, Україна, 25-27 травня 2016). Тези доповідей. – Київ, 2015. – С.40.

АНОТАЦІЯ

Гончарова І.В. Визначення методом індентування фізико-механічних властивостей матеріалів з різною кристалічною структурою. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2017.

Розроблено методику визначення характеристики пластичності δ_H (δ_H = пластична деформація / загальна деформація під індентором) для високотвердих матеріалів, яка враховує нестискання матеріалу під індентором тільки при визначенні пластичної деформації, що дозволило розраховувати пластичність нових високотвердих матеріалів.

Введено і розраховано фундаментальну характеристику пластичності при 0 К – $\delta_H(0)$ (при дислокаційному механізмі деформації без допомоги термічних коливань атомів), тобто в умовах, при яких визначається напруження Пайєрлса-Набарро $\sigma_{ПН}$.

Нова концепція пластичності вперше дозволила визначати і порівнювати пластичність високоміцних матеріалів крихких при випробуваннях на розтяг.

Розвинені уявлення і методики показали доцільність дослідження мікротвердості супроводжувати визначенням і аналізом характеристики пластичності δ_H .

Розроблені нові методики дослідження механічних властивостей при локальному навантаженні пірамідальними інденторами дозволили отримувати деформаційні криві для крихких при стандартних методах випробування сплавів, в тому числі сплавів, які інтенсивно двійникуються в процесі деформації.

Розроблено фізичні уявлення щодо температурної залежності твердості кераміки від пористості.

На прикладі мішені з алюмінієвого сплаву вперше методом індентування досліджено механічні властивості матеріалу і досліджена зеренна та дислокаційна структура поблизу каналу проникання кінетичного ударника, що необхідно для розвитку фізичних уявлень щодо фізики пробиття мішеней кінетичним ударником.

Ключові слова: твердість, індентор, механічні властивості, пластичність, міцність, деформація, руйнування, температура.

АННОТАЦИЯ

Гончарова И.В. Определение методом индентирования физико-механических свойств материалов с различной кристаллической структурой. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела – Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, 2017.

Разработана методика определения характеристики пластичности δ_H ($\delta_H =$ пластическая деформация / общая деформация под индентором) для высокотвердых материалов, которая учитывает несжимаемость материала под индентором только при определении пластической части деформации. Такой подход к пластичности впервые позволил определить и сравнить между собой пластичность новых высокопрочных материалов, хрупких при испытаниях на растяжение. Впервые приведена классификация кристаллических материалов с различным типом межатомной связи и различной кристаллической структурой, а также аморфных металлических сплавов и квазикристаллических материалов по величине характеристики пластичности δ_H . Снижение δ_H происходит в порядке: металлы – интерметаллиды – аморфные металлические сплавы – квазикристаллы – тугоплавкие соединения – ковалентные кристаллы.

Введена и рассчитана фундаментальная характеристика – пластичность при 0 К – $\delta_H(0)$, которая характеризует пластичность при дислокационном механизме деформации без помощи термических колебаний атомов, т.е. в условиях при которых определяется напряжение Пайерлса-Набарро $\sigma_{ПН}$. Получены уравнения для аналитического расчета $\delta_H(0)$, а также рассчитаны значения $\delta_H(0)$ для ряда материалов с различной кристаллической структурой. Развитые представления и методики делают целесообразным исследование микротвердости сопровождать определением и анализом характеристики пластичности. При разработке новых высокопрочных материалов необходимо учитывать величину пластичности δ_H при рабочей температуре материала.

Впервые разработанные и получившие дальнейшее развитие методики исследования механических свойств при локальном нагружении пирамидальными инденторами позволили получить деформационные кривые в диапазоне деформаций 0,2...34 % для хрупких сплавов, которые интенсивно двойнируются в процессе деформации, и изучить их деформационное упрочнение.

Разработаны физические представления, описывающие влияние пористости на температурную зависимость твердости хрупкой керамики. Предложена схема температурной зависимости твердости для материалов с высоким уровнем напряжения Пайерлса-Набарро, в которой определены механизмы формирования отпечатков твердости на различных температурных участках. На каждом температурном участке действует тот механизм формирования отпечатка твердости, который осуществляется при наименьшем давлении под индентором, т.е. соответствует наименьшей твердости: пластическая деформация скольжением дислокаций, фазовый переход под давлением, процессы хрупкого разрушения и двойникование.

Процесс пробивания кинетическим ударником мишени рассмотрен как случай глубокого индентирования и на примере мишени из алюминиевого сплава АМг5 впервые методом индентирования локально исследованы механические свойства материала (построены карты распределения микротвердости, пластической деформации и характеристики пластичности δ_H), а также исследована зеренная и дислокационная структура вблизи канала пробивания кинетическим ударником, что необходимо для развития физических представлений физики пробивания мишеней кинетическим ударником.

Ключевые слова: твердость, индентор, механические свойства, пластичность, прочность, деформация, разрушение, температура.

ABSTRACT

Goncharova I.V. Determination of physical and mechanical properties of materials with different crystal structures by indentation method. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree, specialty 01.04.07 – solid state physics – Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, Kyiv, 2017.

The method for determination of plasticity characteristic δ_H ($\delta_H = \text{plastic deformation} / \text{total deformation under the indenter}$) for high strength materials was developed, wherein the incompressibility of material under indenter is considered for determination of the plastic deformation only. This method allowed to calculate the plasticity of new high strength materials.

The fundamental plasticity characteristic at 0 K – $\delta_H(0)$ (at the dislocation mechanism of deformation without the help of thermal atomic oscillation), i.e. in conditions when Peierls-Nabarro stress σ_{PN} are defined, is introduced and calculated.

The new concept of plasticity for the first time allowed to determine and compare the plasticity of high strength materials, which are brittle under tensile tests.

Developed conception and methods have shown the appropriateness of definition and analysis the plasticity characteristic δ_H at the study of microhardness.

Developed new methods of study of mechanical properties at the local loading by pyramidal indenter allowed to obtain the deformation curves for brittle at standard mechanical tests alloys, including alloys with intensively twinning during deformation.

The physical conception about the temperature dependence of ceramic hardness on the porosity was developed.

For the first time the mechanical properties of targets after a impact loading by kinetic energy projectile were investigated by indentation method. Grain structure and dislocation substructure near the penetration channel were studied. That is necessary for the development of physical concepts of physics penetration of target by kinetic impact.

Keywords: hardness, indenter, mechanical properties, plasticity, strength, deformation, fracture, temperature.