НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА
ім. І.М.ФРАНЦЕВИЧА

На правах рукопису

ПОДРЕЗОВ ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

СТРУКТУРНІ АСПЕКТИ ДЕФОРМАЦІЇ ТА РУЙНУВАННЯ ПОРОШКОВИХ ОЦК-МЕТАЛІВ

спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття ученого ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1994

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00778404 (U)

Дисертацію в рукопис.
Робота виконана в Інституті
ім. І.М.Францевича НАН Украї

Науковий консультант: чл.-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор Фірстов С.О.

Офіційні опоненти: чл.-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор Мільман Ю.В.

доктор технічних наук, професор Мешков Ю.Я.

доктор фізико-математичних наук, професор Новиков В.В.

Провідна організація: Фізико-технічний інститут НАН України (м. Донецьк).

Захист відбудеться "____"_____1994 р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої ради Д 016.23.01 в Інституті проблем матеріалознавства НАН України (252680, Київ, ГСП, вул.Кржижанівського, 3).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ІПМ НАН України.

Автореферат розіслано "____"_____ 1994 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Вчений секретар
спеціалізованої ради
Д 016.23.01
к.т.н. Ю.Б.ПАДЕРНО

АВ-31.737

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Технології порошкової металургії широко використовуються при розробці нових матеріалів. Унікальні можливості порошкової металургії дозволяють конструювати матеріали, що за структурою та хімічним складом не мають собі аналогів. Це обумовлює необхідність поглибленого вивчення структури та фізико-механічних властивостей матеріалів цього класу.

Порошкове тіло являє собою один з найскладніших матеріалознавчих об'єктів, структура якого поєднує стуктурні елементи компактного матеріалу (кристаліти, дисперсну фазу, атоми домішку та легуючих елементів, дислокаційну субструктуру) і специфічні структурні елементи, існування яких зумовлене особливостями порошкової технології (пори, міжчасткові контакти та міжчасткові границі).

На момент початку роботи найбільше поширення здобули реологічні та структурно-геометричні моделі деформування пористого тіла. Великий внесок в розробку таких моделей зробили українські вчені В.В.Скороход, М.С.Ковальченко, М.Б.Штерн та інші. Результати, одержані за допомогою такого підходу, з успіхом використовуються при розробці технологічних процесів деформування та ущільнення порошкових напівфабрикатів. Проте ці теорії мають обмежену прогностичну силу при вирішенні матеріалознавчих проблем. У зв'язку із зростаючим інтересом до розробки загальних принципів структурної інженерії порошкових матеріалів набуває актуальності проведення фундаментальних досліджень механізмів деформації та руйнування матеріалів цього класу.

Окремі приклади використання фізичних ідей для аналізу механічної поведінки порошкового матеріалу, що надані в роботах провідних зарубіжних та українських вчених М.Ю.Бальшина, М.А.Шлесара, Ю.Г.Дорофєєва, Ю.В.Мільмана, С.О.Фірстова, В.Ф.Моісєєва, свідчать про безумовну перспективність цього наукового напрямку. Проте розробка фізичної теорії міцності ще далека до завершення і потребує розвитку детальних уявлень про природу плинності, механізми зміцнення, еволюцію деформаційної структури при ущільненні, структурну підготовку та механізми руйнування.

Ціль роботи полягає в розробці загальних структурно-фізичних моделей формування механічних властивостей порошко-

вих матеріалів, виходячи з методології фізики міцності компактних матеріалів та з урахуванням структурних особливостей порошкових металевих матеріалів.

В роботі особлива увага приділяється дослідженню впливу структурних дефектів, характерних для порошкових матеріалів, на механізми деформації та руйнування та аналізу структурної чутливості механічних властивостей стосовно вибраних структурних параметрів. Це знайшло відображення в обраних напрямках дослідження, постановці та вирішенні відповідних задач:

1. Вивчення структурної чутливості границі плинності порошкових матеріалів.

2. Аналіз закономірностей деформаційного зміцнення у зв'язку з еволюцією пор та структури твердої фази.

3. Дослідження особливостей творення деформаційної субструктури при ущільненні порошкових матеріалів.

4. Вивчення закономірностей формування граничних властивостей порошкових матеріалів при різноманітних механізмах руйнування.

5. Аналіз впливу властивостей структурних елементів на механізм розповсюдження тріщини по внутрішніх границях.

6. Дослідження механізму міжчасткового руйнування у зв'язку з еволюцією контакту при ущільненні та спіканні.

7. Вивчення впливу попередньої деформації на енергію руйнування матеріалів на базі аналізу взаємодії тріщини з деформаційною субструктурою.

Наукова новизна роботи. Розроблено новий структурно-фізичний підхід до проблеми механічної поведінки порошкових матеріалів, який дозволяє встановити зв'язок між технологією, структуротворенням, умовами іспиту з одного боку та механізмами деформування і руйнування з другого. При розробці цього напряму в роботі отримано ряд нових теоретичних, експериментальних та методичних результатів.

Вперше процес зміцнення порошкового матеріалу проаналізовано з урахуванням двох взаємопов'язаних процесів: еволюції дислокаційної структури твердої фази та якісних і кількісних змін поруватості під час деформації. Запропоновано фізичну схему впливу структури на деформуючу напругу порувато-го матеріалу. В межах цієї концепції вивчена структурна чутливість границі плинності твердої фази порошкового заліза у зв'язку із змінами механізмів деформування матеріалу в

широкому інтервалі температур іспиту. Вивчена структурна чутливість кривих зміцнення порошкових матеріалів в областях мікропластичності та макродеформації в умовах одноосного розтягу та одноосного стиснення.

Класифікацію механізмів руйнування матеріалів на основі ОЦК-металів поширено на клас відповідних порошкових матеріалів з урахуванням їх структурних особливостей. При крихкому руйнуванні механічні характеристики аналізуються у зв'язку із зміною механізму розповсюдження тріщини. Для матеріалів, що руйнуються за механізмом сколу з релаксацією, запропонована структурно-фізична модель, яка дозволяє описати немонотонну залежність тріщиностійкості від поруватості. Теорія ямкового руйнування дисперсно-зміцнених матеріалів розповсюджена на клас порошкових з урахуванням їх структурних особливостей.

Розроблені нові методи дослідження механічних властивостей окремих структурних елементів, які дозволили проаналізувати етапи руйнування матеріалів по внутрішніх межах розподілу. Розвинуті фізичні уявлення про структуротворення міжчасткового контакту та вплив цього процесу на граничні властивості порошкових матеріалів. Запропоновано характеризувати умови формування якісних контактів температурою T_{50} - температурою спікання, завдяки якій кількість міжчасткових фасеток у зламі зменшується до 50 %.

Вперше систематично досліджені особливості еволюції деформаційної структури твердої фази порошкового матеріалу при ущільненні. З ростом ступеню деформації спостерігаються ті ж самі структурні зміни, що і в компактному матеріалі. Деяке запізнення структурних переходів пояснюється великою площиною вільної поверхні, на яку виходять дислокації. Вперше виконано систематичне вивчення впливу дислокаційної субструктури деформованих ОЦК-металів на енергетичні закономірності розповсюдження тріщини. Встановлено, що енергія руйнування чутлива до структурних змін, що відбуваються в матеріалі при деформуванні. Ці ефекти спостерігаються на широкому класі матеріалів і мають загальний характер.

Оригінальні експерименти та теоретичні розробки узагальнені у вигляді структурно-фізичної схеми руйнування порошкових матеріалів, яка враховує особливості їх структури.

Практична цінність роботи. Оригінальні результати до-

слідження впливу порошкової технології на структуротворення матеріалів використовуються для оптимізації технологічних режимів отримання виробів з порошкового заліза, вольфрама, хрому та інших ОЦК-металів, а також швидкоріжучих сталей.

В роботі запроваджено декілька нових методик та запропоновано ряд фізичних характеристик, які дозволяють контролювати якість порошкових матеріалів.

Розроблені фізико-структурні схеми деформації та руйнування порошкових матеріалів дозволяють прогнозувати характер руйнування та механічні властивості, виходячи із структурних параметрів твердої фази та порового простору.

Встановлені зв'язки між структурою порошкового матеріалу та його міцністю можуть бути покладені у фундамент при розробці загальних принципів структурної інженерії порошкових матеріалів.

НА ЗАХИСТ ВИНОСИТЬСЯ

1. Методологія дослідження структурної чутливості границі плинності порошкового матеріалу, яка базується на експериментальному визначенні границі плинності твердої фази та аналізі цього параметру у відповідності з принципом адитивності внесків від різних мікромеханізмів зміцнення. У загальному випадку вплив поруватості не обмежується геометричним роззміцненням. Границя плинності твердої фази не інваріантна відносно поруватості у зв'язку з дією мікроструктурних та мікромеханічних факторів. В окремому випадку, коли пори діють тільки як геометричний фактор, макроскопічні коефіцієнти зміцнення змінюються з поруватістю подібно до границі плинності матеріалу.

2. Експериментально встановлені закономірності деформаційного зміцнення порошкового заліза при одновісному навантаженні. Крива деформаційного зміцнення пористого матеріалу формується під впливом двох взаємопов'язаних процесів: еволюції структури твердої фази та еволюції пор під час деформації. Дислокаційна структура пористого заліза обумовлює параболічний стадійний характер деформаційного зміцнення твердої фази. Характерні відхилення від цих закономірностей при розтязі та стисненні пов'язані з морфологічними змінами порового простору в процесі деформування.

3. Фізичні закономірності руйнування порошкових матеріалів

на основі ОЦК-металів. Поруватість змінює температурні інтервали дії низько- та високотемпературних механізмів руйнування матеріалів. Для досліджених механізмів встановлено різний характер залежностей ефективної поверхневої енергії руйнування від поруватості та якості внутрішніх границь розподілу.

4. Фізико-структурна схема формування характеристик руйнування порошкових матеріалів, яка враховує конкуренцію механізмів руйнування за силовим критерієм та структурну чутливість механічних властивостей твердої фази.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: III, IV, VI Всесоюзних конференціях з фізики руйнування (Київ, 1976, 1980, 1989); IX, X, XI, XII Всесоюзних конференціях з фізики міцності металів та сплавів (Куйбишев, 1979, 1983, 1986, 1989); V Міжнародній конференції з порошкової металургії (Познань, 1979); III Всесоюзному семінарі "Структура и свойства границ зерен" (Черноголовка, 1981); Всесоюзній нараді з неорганічних матеріалів (Кемерово, 1982); Всесоюзній конференції "Структура и свойства границ зерен" (Уфа, 1983); VIII Міжнародній конференції з порошкової металургії (Дрезден, 1985); V Республіканській конференції з фізики руйнування (Чернівці, 1985); Республіканській конференції по обробці сталі (Київ, 1985); XV Всесоюзній конференції з порошкової металургії (Київ, 1985); Республіканських семінарах "Реологические модели и процессы деформирования порошковых пористых и композиционных материалов" (Краматорськ, 1987; Луцьк, 1988; Одеса, 1990; Луцьк, 1992); I Всесоюзній конференції "Механика разрушения материалов" (Львів, 1987); Всесоюзній конференції "Кинетика и термодинамика пластической деформации" (Барнаул, 1988); VII Міжнародній конференції з металургії порошків (Краків, 1988); XIII Всесоюзній конференції "Структура и прочность материалов в широком интервале температур" (Каунас, 1989); IV Республіканській конференції з субструктурного зміцнення матеріалів (Київ, 1990); IV Республіканському семінарі з розробки, виробництва та використання інструментальних сталей (Київ, 1990); Міжнародній конференції з механіки руйнування (Варна, 1991); Європейській конференції з матеріалів та технологій "Mat Tex" (Хельсінки, 1991; Санкт-Петербург, 1993); XII Міжнародній конференції з фізики міцності та

пластичності металів та сплавів (Самара, 1992); Міжнародній конференції з руйнування ICF -8 (Київ, 1993).

Публікації. Матеріали дисертації викладені у 85 наукових публікаціях та 2 авторських свідоцтвах. Основні з них наведені в кінці автореферату.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, шости глав, висновків та списку літератури. Повний об'єм 309 сторінок, з них 232 сторінок друкарського тексту. Дисертація включає 7 таблиць, 101 рисунок, бібліографію - 297 робіт.

Особистий внесок автора. Автор самостійно обрав науковий напрям - вивчення фізичної природи структурної чутливості механічних властивостей порошкових матеріалів; визначив задачі дослідження; спланував та виконав велику кількість модельних експериментів з використанням широкого комплексу сучасних методів дослідження; розробив декілька оригінальних методів дослідження структури та механічних властивостей порошкових матеріалів; дослідив фізичні закономірності та механізми за якими відбувається пластична деформація та руйнування порошкових ОЦК-металів; розробив фізичні моделі, за допомогою яких одержав математичні співвідношення для досліджених параметрів. По розглянутих проблемах (про природу плинності, механізми зміцнення, еволюцію деформаційної структури при ущільненні, структурну підготовку та механізми руйнування) зроблені узагальнюючі висновки, які вносять значний вклад в розвиток фізичної теорії міцності. Дослідження виконані або автором особисто, або під керівництвом автора при його активній участі у постановці досліджень та інтерпретації результатів. Основні результати роботи є новими.

Методологія та методи досліджень. В роботі прийнята методологія фізики міцності та пластичності ОЦК-металів, яка передбачає вивчення деформації та руйнування у зв'язку з мікроструктурними процесами, що контролюють формування механічних властивостей. В експериментальній частині роботи наведені числові дані механічних випробувань порошкових матеріалів та результати структурного аналізу, які одержані за допомогою сучасних методів електронно-зондового аналізу.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині роботи визначене місце роботи в тео-

рії міцності порошкових матеріалів. Сформульовані ціль та задачі роботи, визначені головні напрямки досліджень, які обумовили структуру роботи. Обгрунтовані актуальність, наукова новизна та практична цінність результатів. Коротко викладені основні результати, сформульовані положення, що виносяться на захист. Визначений особистий внесок автора та методологічні особливості роботи.

Перша глава роботи присвячена аналізу структурної чутливості границі плинності поруватого матеріалу. В роботі запропоновано методологію аналізу структурної чутливості границі плинності порошкових матеріалів, за допомогою якої теоретично досліджено і обгрунтовано великий обсяг експериментальних даних.

Розглянуто дві схеми впливу поруватості на деформуючу напругу порошкового матеріалу. В тому разі, коли наявність пор та зміна поруватості не впливають на мікромеханізми зміцнення та структуру твердої фази, внесок поруватості у формування механічних властивостей визначається незалежним множником, вплив структури твердої фази враховується згідно з принципом адитивності Кокса і визначається сумою внесків у зміцнення від різних структурних елементів твердої фази. Згідно з цим, вираз для аналізу структурної чутливості границі плинності має вигляд:

$$\sigma_T = f(\theta)\cdot[F(d)+F(\rho)+F(\lambda)+...], \qquad (I)$$

де $f(\theta)$ - функція, що описує вплив поруватості, $F(d)$, $F(\rho)$ та $F(\lambda)$ - функції, що описують вплив розміру зерна d, щільності дислокацій ρ та об'ємної частки дисперсної фази λ на зміцнення, відповідно.

У цьому випадку коефіцієнти зміцнення, що характеризують вплив структурних елементів на деформуючу напругу, змінюються з поруватістю по тому ж закону, що і макроскопічна границя плинності. В роботі наводяться оригінальні результати та літературні дані, які підтверджують зазначений характер залежності коефіцієнтів зернограничного та деформаційного зміцнення від поруватості для матеріалів на основі заліза.

У другому, більш загальному випадку розглядається можливість змін структури твердої фази та механізмів деформації при зміні поруватості. Виділяються дві групи факторів, що порушують інваріантність:

- структурні фактори, які діють в разі зміни структури твердої фази порувато матеріалу при зміні поруватості;

- мікромеханічні фактори, які визначають вплив поруватості на мікромеханізми зміцнення за рахунок градієнтних та розмірно-масштабних ефектів.

Для визначення внеску цих факторів у формування границі плинності порошкового матеріалу необхідно виділити в явному вигляді геометричний фактор роззміцнення за рахунок пор. На відміну від існуючих розрахункових механічних моделей, в роботі пропонується описувати вклад поруватості експериментально вимірюваним параметром E_θ/E_0, де E_θ та E_0 – відповідно модулі пружності поруватого та компактного матеріалів. Характеристика E_θ чутлива до морфології пор та розподілу напруги в деформованному поруватому матеріалі, практично не чутлива до структурних змін в твердій фазі. Експериментальні виміри E_θ/E_0 дозволяють отримати конкретні значення параметру роззміцнення для матеріалів з різною структурою порового простору.

В цьому разі виникає можливість розрахувати деформуючу напругу твердої фази

$$\sigma_T^{TФ} = \sigma_T(\theta)\cdot(E_0/E_\theta) = F(d)+F(\rho)+F(\lambda)+ \ldots \qquad (2)$$

$\sigma_T^{TФ}$ – структурно-чутливий параметр, який дозволяє виявити ефекти, що обумовлені зміною структури твердої фази та мікромеханізмів зміцнення у порошкових матеріалах.

Такі ефекти було проаналізовано в роботі при дослідженні порошкового заліза в широкому інтервалі поруватості та температур іспитів. Виконані в роботі модельні експерименти висвітлили декілька істотних моментів формування напруги твердої фази порошкового матеріалу (рис.1):

- границя плинності твердої фази поршкового матеріалу в загальному випадку не є інваріантою поруватості;

- залежність границі плинності твердої фази від поруватості чутлива до змін мікромеханізмів деформації.

В області низьких температур випробування (77 – 373 К), де основним мікромеханізмом деформації є дислокаційне ковзання, максимальне зміцнення проявляється в матеріалах з малою поруватістю (3-10 %, зона А схеми). Це пояснюється збільшенням об'ємної долі часток другої фази із змень-шенням поруватості. Підвищення деформуючої напруги в матеріалах з великою поруватістю пов'язано з ефектом Бріджмена (зона Б

схеми).

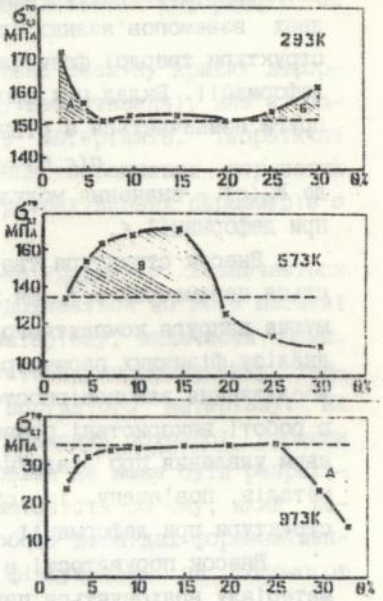


Рис.1. Схема, яка ілюструє неінваріантність границі плинності твердої фази порошкового заліза відносно поруватості при дислокаційному ковзанні (а), динамічному деформаційному старінні(б) та дислокаційній повзучості (в).

В області температур, де проявляється динамічне деформаційне старіння (373 - 773 К), ефект зміцнення найбільший у матеріалів з поруватістю 6-15 % (зона В схеми), що пояснюється збільшенням кількості домішку у твердому розчині в матеріалах з такою поруватістю.

Нарешті, при температурах 773 - 973 К, коли значно прискорюються диффузійні процеси, спостерігається роззміцнення матеріалів з малою поруватістю, що пов'язано з роллю міжфазних границь (зона Г схеми), та роззміцнення високопористих матеріалів за рахунок локалізації деформації на міжчасткових перетинах (зона Д схеми).

Таким чином, запропонований підхід дозволяє встановити зв'язок між макроскопічними властивостями пористого тіла (номінальною напругою та модулем пружності) та мікроскопічними процесами зміцнення, відповідальними за формування границі плинності твердої фази.

<u>В другій главі</u> роботи розглянуто закономірності деформаційного зміцнення порошкових матеріалів. В основу аналізу покладені уявлення фізичної теорії деформаційного зміцнення компактних матеріалів, згідно з якими, зв'язок між напругою і пластичною деформацією обумовлений структурними змінами,

що відбуваються у матеріалі в ході деформації. Деформаційне зміцнення порошкового матеріалу аналізується з урахуванням двох взаємопов'язаних процесів: еволюції дислокаційної структури твердої фази та змін пористої структури під час деформації. Вклад цих процесів у формування деформуючої напруги визначається з рівняння

$$\sigma(\varepsilon,\theta) = \sigma^{\text{ТФ}}(\varepsilon)\cdot E_\theta(\varepsilon)/E_0, \qquad (3)$$

де $E_\theta(\varepsilon)$ - значення модуля пружності поруватого матеріалу при деформації ε.

Внесок структури твердої фази у зміцнення характеризується параметром $\sigma^{\text{ТФ}}$. Ця характеристика, як і істина деформуюча напруга компактного матеріалу, використовується для аналізу фізичних параметрів деформаційного зміцнення. Для дослідження закономірностей зміцнення порошкових ОЦК-металів в роботі використані розвинуті В.І.Трефіловим та В.Ф.Моісєєвим уявлення про стадийність параболічного зміцнення ОЦК-металів, пов'язану із стадійністю еволюції дислокаційної структури при деформації.

Внесок поруватості в деформаційне зміцнення порошкового матеріалу враховується параметром $E_\theta(\varepsilon)/E_0$, який характеризує еволюцію пор при деформації. Дослідження структури порового простору зразків, деформованих в умовах одноосного розтягу, виявило стадийність еволюції пор. На початкових етапах деформації приріст поруватості не фіксується, далі розміри пор збільшуються вздовж осі навантаження, на заключній стадії деформування переважає зростання пор в перпендикулярному до осі напрямку. Параметр $E_\theta(\varepsilon)/E_0$ відображує ці зміни. Залежності E_θ/E_0 від деформації для матеріалів, досліджених в умовах одноосного розтягу та стиснення, мають немонотонний характер, який пояснюється змінами у морфології порового простору під час деформації.

Застосування розвинутого підходу до аналізу експериментальних кривих навантаження порошкового заліза з різною поруватістю дозволило виявити ряд фізичних особливостей зміцнення спечених матеріалів в інтервалі мікро- та макродеформації.

В інтервалі мікроплинності в матеріалах з малою та середньою поруватістю спостерігається параболічне зміцнення, характерне для компактного заліза. Для матеріалів з великою поруватістю проявляється логарифмічне зміцнення, яке харак-

терне для монокристалів. Цей ефект може бути пов'язаний зі зниженням ролі границь зерен при локалізації деформації на міжчасткових перетинах.

Особливу увагу в роботі приділено аналізу кривих деформаційного зміцнення при одновісному навантаженні, яке є базовою схемою механічних випробувань матеріалів. Теоретичне дослідження деформаційного зміцнення порошкових поруватих матеріалів проведено з залученням розрахункових параметрів σ і $\sigma^{ТФ}$.

Деформуюча напруга пористого матеріалу σ визначається з припущення, що її осередження відбувається по всій площині поперечного перерізу порошкового матеріалу, включаючи пори. Цей параметр формально використовується для розрахунку стандартних характеристик зміцнення поруватого матеріалу. На відміну від компактного матеріалу значення поточної площини поперечного перерізу поруватого зразка не може бути розраховане, виходячи з положення про незмінність об'єму, який деформується. Тому в проведених у роботі дослідах формозміненя зразків під час деформування фіксувалось за допомогою фотографування.

Деформуюча напруга твердої фази $\sigma^{ТФ}$ визначається осередженням напруги по об'єму твердої фази з урахуванням змін у структурі порового простору, які призводять до перерозподілу напруги в матеріалі під час деформування:

$$\sigma^{ТФ}(\varepsilon) = E_0/E_\theta(\varepsilon)\cdot[P(1-\varepsilon)/S_0(1-\Delta\theta)], \qquad (4)$$

де P - навантаження, S_0 - початкова площа зразка, $\Delta\theta$ - зміна поруватості під час деформування, E_0 - модуль пружності компактного матеріалу, $E_\theta(\varepsilon)$ - модуль пружності поруватого матеріалу, виміряний при деформації ε. Криві $\sigma^{ТФ} = F(\varepsilon)$ відображують зв'язок структурних перетворень, які відбуваються у твердій фазі під час деформування, з деформуючою напругою, необхідною для розвитку пластичної деформації.

За експериментальними даними побудовано схему стадійності деформації порошкового заліза, обумовленої еволюцією порової структури. Для кожного з етапів запропоновані залежності для розрахунку деформуючої напруги твердої фази.

Розвинуті уявлення дозволили проаналізувати структурну чутливість параметрів зміцнення порошкового заліза при різних температурах іспиту. Встановлено, що коефіцієнт деформаційного зміцнення твердої фази $K_1^{ТФ}$, який характеризує швид-

кість накопичення дислокацій в твердій фазі під час деформації, змінюється з температурою і пористістю за тим же законом, що і границя плинності твердої фази, проявляючи, наприклад, чутливість до ефектів динамічного деформаційного старіння. Це, згідно з фізичною теорією зміцнення ОЦК-металів, свідчить про наявність єдиних мікромеханізмів зміцнення на межі плинності та на початкових етапах деформаційного зміцнення. Підвищення деформуючої напруги твердої фази в інтервалі динамічного деформаційного старіння проаналізовано в рамках моделі Фріделя-Маккормікa. Зростання параметрів $\sigma^{ТФ}$ і $K_1^{ТФ}$ при пористості 6-15 % пов'язується із збільшенням концентрації домішку у твердому розчині порошкового матеріалу в цьому інтервалі пористості.

Розрахунок рівномірної пластичної деформації пористого матеріалу виконано в роботі з урахуванням геометричного роззміцнення, пов'язанного з ростом пор. Виявлено суттєвий вплив еволюції структури порового простору на пластичну нестійкість макрозразків. Результати розрахунку добре узгоджуються з експериментальними даними.

Криві дефомаційного зміцнення порошкового заліза при одновісному розтязі та одновісному стисненні, розраховані з урахуванням особливостей зовнішнього формозмінення та еволюції структури порового простору, наведені на рис.2. Результати показують, що при одновісному стисненні (рис.2а) криві деформаційного зміцнення твердої фази порошкових матеріалів з різною пористістю (3-30 %) практично співпадають у всьому дослідженому діапазоні деформації. При одновісному розтязі (рис.2б) криві співпадають лише на початкових етапах деформації, на подальших стадіях виявляється відхилення від параболічного закону деформаційного зміцнення в напрямку збільшення напруги, що пов'язується із виникненням додаткової компоненти розтягуючої напруги в області мікрошийок (міжчасткових перетинів), тобто з ефектом Бріджмена.

Таким чином, запропонований метод аналізу кривих зміцнення виявляє особливості деформаційної поведінки, пов'язані як з еволюцією структури твердої фази, так і з змінами пористості під час деформації. Стадійний параболічний характер кривих зміцнення твердої фази обумовлений змінами деформаційної структури порошкових матеріалів при деформуванні. Подібність кривих деформаційного зміцнення твердої фази

свідчить про відсутність впливу поруватості на мікромеханізми зміцнення, тоді як відхилення від подібності (для розвинутої деформації) припускає наявність такого впливу.

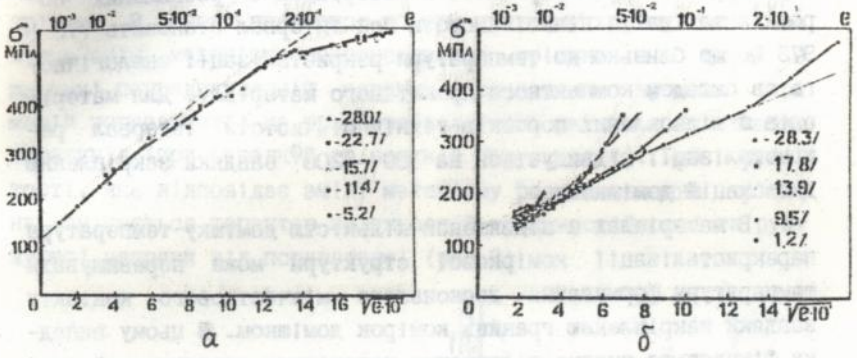


Рис.2. Деформаційне зміцнення твердої фази порошкового заліза при одновісному стисненні (а) та розтязі (б).

Вивчення закономірностей структурних змін в порошковому матеріалі при деформуванні набуває особливої актуальності, зважаючи на те, що в порошкових технологіях обов'язково присутня стадія деформування. Проблеми структуротворення при ущільненні порошкового матеріалу розглянуті у третій главі роботи. На момент початку роботи дані про еволюцію дислокаційної структури при ущільненні поруватих матеріалів були відсутні, що обумовлювалось складністю виготовлення об'єктів для трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ). В роботі запропоновані методики, які дозволили провести дослідження дислокаційної субструктури порошкового матеріалу методом ТЕМ.

Систематичні дослідження структури порошкового заліза, продеформованного пресуванням у клиновій пресформі, показали, що при ущільненні порошкового матеріалу в його твердій фазі відбуваються зміни деформаційної структури. Послідовно змінюючись, формуються структура лісу дислокацій, слаборазорієнтована коміркова структура та разорієнтована коміркова структура. Встановлено, що при деформації поруватого матеріалу зміна структурного стану відбувається при декілька більших ступенях деформації, ніж у компактному матеріалі, що пояснюється наявністю внутрішніх вільних поверхонь, на які виходять дислокації.

Рекристалізація при спіканні матеріалів з деформаційною субструктурою, сформованою при ущільненні, відбувається при різних температурах в залежності від хімічного складу та структури вихідних порошків. В матеріалах з розпилених порошків заліза технічної чистоти цей інтервал становить 773 - 973 К, що близько до температури рекристалізації аналогічного за складом компактного прокатаного матеріалу. Для матеріалів з відновлених порошків технічної чистоти інтервал рекристалізації підвищується на 100 - 200° завдяки закріпленню дислокацій домішками.

В матеріалах з підвищеною кількістю домішку температура перекристалізації коміркової структури може перевищувати температуру формування досконалого міжчасткового контакту завдяки закріпленню границь комірок домішком. В цьому випадку фіксується значне підвищення механічних властивостей спеченого заліза за рахунок наявності в його структурі деформаційної субструктури, не зруйнованної під час спікання.

При ущільненні в умовах гарячої деформації ($T > 0{,}4\ T_{пл}$) формується структура аналогічна структурі гарячедеформованих компактних матеріалів. Для відновлених порошків, ущільнених методом динамічного гарячого пресування, встановлено, що при ступінях деформації 0,25-0,35 (що відповідає ущільненню з пористості 10 % до 1 %) в твердій фазі гарячедеформованого матеріалу активізуються процеси динамічної рекристалізації з формуванням дрібного зерна. Матеріали з такою структурою мають підвищену міцність та тріщиностійкість.

У четвертій главі роботи проаналізовані закономірності руйнування пористих порошкових матеріалів та формування механічних властивостей, пов'язанних з моментом руйнування.

Відзначається, що в численних роботах, присвячених аналізу впливу пористості на формування граничних механічних властивостей, розглядаються моделі, які не враховують мікромеханізми руйнування. Це у багатьох випадках призводить до помилкової трактовки результатів іспитів. Запропонований в роботі підхід дозволяє уникнути цих недоліків. Різноманітність механізмів руйнування матеріалів на основі ОЦК-металів передбачає аналіз механічних характеристик стосовно конкретних моделей руйнування. Існуюча класифікація механізмів руйнування ОЦК-металів за структурними та енергетичними ознаками поширена на порошкові матеріали з урахуванням їх струк-

турних особливостей.

Крихке руйнування розглядається в термінах теорії Гриффітса, яка пов'язує руйнуючу напругу з енергією, необхідною для утворення вільних поверхонь при розповсюдженні крихкої тріщини. В роботі показано, що при крихкому руйнуванні має місце зміна механізму розповсюдження тріщини від сколу в площині перпедикулярній напряму прикладення зусилля (при малій поруватості) до транскристалітного сколу міжкристалітних перетинів (при середній та великій поруватості). При поруватості, яка відповідає зміні механізму розповсюдження тріщини, змінюється характер залежностей тріщиностійкості та руйнуючої напруги від поруватості (рис.3).

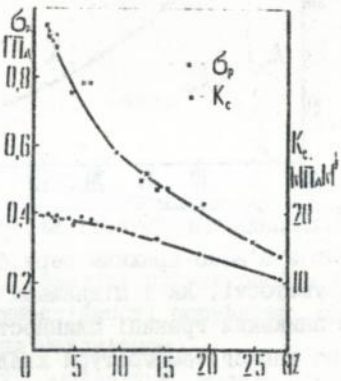


Рис.3. Залежності міцності(x) та тріщиностійкості(•) від поруватості вуглистого заліза, випробованого при 77 К.

Немонотонна залежність руйнуючої напруги від поруватості в цьому випадку обумовлена як зміною механізму зародження тріщини, так і зміною механізму її розповсюдження. В матеріалах з великою кількістю пор критичний дефект формується на міжкристалітному перетині, тоді як в матеріалах з малою поруватістю руйнування зароджується на порах. Тому при $\theta > \theta_{кр}$ розмір критичного дефекту слабо залежить від поруватості, а при $\theta < \theta_{кр}$ змінюється з поруватістю згідно залежності $C_{кр} \propto \theta^{1/3}$.

В області квазісколу формування механічних властивостей розглядається в рамках теорії Орована - Ірвіна з урахуванням особливостей формування пластичної зони перед вершиною тріщини. Наведено експериментальні дані, які свідчать про зростання пластичної зони з ростом поруватості, що пояснюється зниженням границі плинності порошкового матеріалу. Як наслі-

док, спостерігається збільшення тріщиностійкості з ростом поруватості в матеріалах, що руйнуються за механізмом квазісколу.

В інтервалі температур в'язко-крихкого переходу встановлена немонотонна залежність тріщиностійкості порошкового заліза від поруватості, обумовлена зміною механізму руйнування від сколу до злиття пор зі збільшенням поруватості (рис.4).

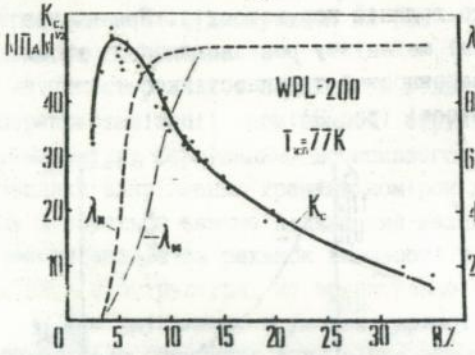


Рис.4. Залежності тріщиностійкості, відсотку в'язкого зламу в області біля надрізу ($\lambda_н$) та відносно повної площі зламу ($\lambda_м$) від поруватості для матеріалу на основі порошку WPL-200.

Вплив поруватості на тріщиностійкість описано за аналогією з в'язко-крихким переходом в ОЦК-металах. Збільшення поруватості, як і підвищення температури іспиту, призводить до зниження границі плинності і росту пластичної зони. Введено аналог температури хладоламкості - критична поруватість $\theta_{кр}$.

Ямкове руйнування (руйнування злиттям пор за пластичним механізмом) досліджувалось, виходячи з мікромеханічних моделей, згідно з якими граничний стан (гранична деформація) досягається завдяки структурній підготовці матеріалу під час деформування. Враховуючи структурні особливості порошкових матеріалів, за базову вибрана модель Герланда, що пов'язує механізм руйнування дисперсно-зміцнених матеріалів з зародженням пор на частках другої фази та їх розвитком під час деформації.

Структурні дослідження показали, що ця модель може бути модифікована для поруватих матеріалів з урахуванням як об'ємної долі вихідних пор θ так і об'ємної долі часток другої фази $f_ч$. Тому для опису структурної чутливості граничної деформації спечених матеріалів введено структурний параметр $\theta + f_ч$. Експериментальні дані (рис.5) добре узгоджуються з

теоретичною залежністю

$$e_r=\frac{1}{2}\cdot\ln\{1+\frac{k_2^2}{k_1}\cdot[\frac{2}{3}\cdot\frac{1+2(f_ч+\theta)}{f_ч+\theta}\cdot\exp(-e_r/2)-2]^2\}, \qquad (6)$$

де e_r - гранична деформація, k_1 - коефіцієнт, що враховує концентрацію деформації, k_2 - коефіцієнт, що залежить від співвідношення розміру деформованних пор та міжпорової відстані. Встановлена залежність дозволила проаналізувати вплив якості вихідного порошку на граничну деформацію при ямковому руйнуванні.

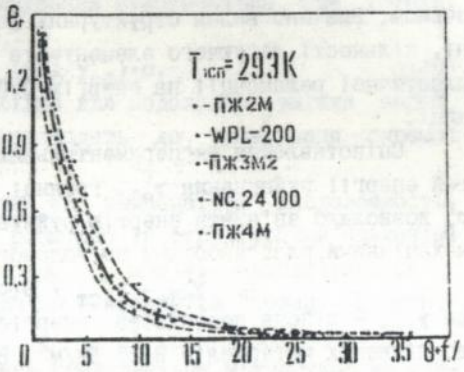


Рис.5. Залежність граничної деформації від параметру $(\theta+f)$ для різних порошкових матеріалів на основі заліза.

Уявлення про характер структурної чутливості граничної деформації використані в роботі для аналізу структурної чутливості ударної в'язкості та тріщиностійкості поруватих матеріалів, які руйнуються за ямковим механізмом.

В роботі запропонована фізико-механічна модель формування дійсної руйнуючої напруги при ямковому механізмі руйнування. В рамках цієї моделі руйнуюча напруга $\sigma_{ря}$ пористого матеріалу визначається як

$$\sigma_{ря}=(E_{\theta}/E_0)\cdot\{[\sigma_т+Ke_r^{1/2}(\theta)]\}, \qquad (6)$$

де K - коефіцієнт деформаційного зміцнення твердої фази, $e_r(\theta)$ - гранична деформація поруватого матеріалу. Модель оперує структурно-чутливими параметрами, які характеризують морфологію порового простору та її зміну під час деформування, параметрами, що відображують еволюцію дислокаційної структури, а також параметрами, які враховують вплив структури на граничну деформацію при ямковому руйнуванні. Запропоновані уявлення добре узгоджуються з експериментом.

В п'ятій главі проаналізовано вплив внутрішніх границь розподілу (границь зерен, субзерен та комірок) на характеристики міцності порошкових матеріалів. При аналізі міжкристалітного руйнування використані моделі Мак Ліна та Глікма-

на, що пов'язують зернограничне руйнування з сегрегаційними ефектами на границях. Вивчено різні етапи міжкристалітного руйнування: зародження тріщини в межах окремої границі, взаємодія її з суміжжям зерен, катастрофічне розповсюдження тріщини. За розробленними оригінальними методиками досліджені властивості структурних елементів, що входять до полікристалу.

Закономірності розповсюдження тріщини в межах окремої границі досліджено на модельних сплавах вольфраму з великим зерном. Вивчено вплив структурних факторів (структури границі, кількості легуючого елементу та домішку) та механізмів пластичної релаксації на енергію руйнування $\gamma^{г}_{еф}$ окремої границі.

Співставлення експериментальних температурних залежностей енергії руйнування $\gamma^{г}_{еф}$, границі плинності $\sigma_т$ та міцності $\sigma^{г}_{р}$ дозволило зв'язати енергію руйнування окремої границі з механічними властивостями за допомогою рівняння

$$\gamma^{г}_{еф} = \gamma_{1ст} + B(\sigma^{г}_{р}/\sigma_т), \qquad (7)$$

де $\gamma_{1ст}$ - дійсна поверхнева енергія, B - коефіцієнт. Для досліджених матеріалів B=25 Дж/м^2. Вираз (7) дозволяє аналізувати вплив сегрегаційних ефектів (що впливають на параметр $\sigma^{г}_{р}$) та дислокаційних механізмів (що впливають на параметр $\sigma_т$) на енергію руйнування окремої границі.

На модельних матеріалах з вольфраму та молібдену з великим зерном досліджено взаємодію тріщини з суміжжям зерен. Вивчено вплив кута повороту тріщини на енергію руйнування границі. Залежність енергії руйнування від кута повороту дається у вигляді

$$\gamma^{г}_{еф}(\varphi) = \gamma^{г}_{еф} \cdot f(\varphi), \qquad (8)$$

де $\gamma^{г}_{еф}(\varphi)$ - енергія, що необхідна для руйнування границі, площина якої повернута відносно тріщини на кут φ; $f(\varphi)$ - кутова функція, вигляд якої залежить від розподілу напруги в голові тріщини.

При кутах повороту $\varphi > \varphi_{кр}$ тріщина не розвертається у сумізну границю, а розповсюджується по прямій траєкторії в тіло зерна. В роботі запропоновано графічний метод визначення долі міжзеренного руйнування по величині критичного кута. Показано, що доля міжкристалітної поверхні у зламі залежить від співвідношення енергії руйнування границі та тіла зерна $\gamma^{г}_{еф}/\gamma^{т}_{еф}$.

Закономірності, що встановлені при дослідженні властивостей окремих елементів структури, дозволили уточнити уявлення про механізм міжкристалітного руйнування полікристалу. Показано, що при низьких температурах іспитів розмір критичного дефекта, який призводить до руйнування, не перевищує розміру структурних елементів. При великому розмірі зерна критичною стадією руйнування є розповсюдження тріщини в межах окремої границі, при малих - подолання тріщиною суміжжя зерен. Зміна механізму руйнування відбувається при розмірі зерна

$$d = (\gamma_{еф}^{ст}/\gamma_{еф}^{г})\cdot c, \qquad (9)$$

де $\gamma_{еф}^{ст}$ - енергія, що необхідна для подолання суміжжя зерен, с - розмір дефекту, який призводить до руйнування окремої границі.

При температурах, вищих за температуру хладоламкості, дефекти, що порівнянні за розміром із структурними елементами, перестають бути критичними і можуть накопичуватись в матеріалі, що призводить до SD - ефекту та "полиці пластичності".

В роботі особлива увага приділяється міжкристковому руйнуванню порошкових матеріалів, яке є найбільш поширеним видом браку порошкової технології. Наведені в роботі експериментальні дані свідчать про різке зниження міцності та тріщиностійкості (в 2-4 рази) матеріалів, схильних до міжкристкового руйнування.

На відміну від існуючої концепції міжкристкового руйнування, запропонованої Шлесаром і пов'язаної з наявністю та еволюцією при спіканні площинних пор, в роботі розглянута більш загальна структурна схема, згідно з якою схильність до міжкристкового руйнування залежить від структури міжкристкового контакту та структури сформованих міжкристкових границь і може бути пов'язана як з наявністю площинної поруватості, так і з послабленням міжкристкових границь елементами домішку.

Аналіз експериментальних даних дозволив виділити три стадії еволюції контакту при спіканні порошкового заліза.

- В неспеченому матеріалі на початкових стадіях спікання здебільшого присутні контакти деформаційного походження з великою кількістю площинних пор. Схильність до міжкристкового руйнування і низькі механічні властивості в цьому випадку

пов'язані з малою площиною контактуючих поверхонь. Структурна чутливість механічних властивостей добре описується в рамках моделі Шлесара.

- При підвищенні температури спікання формується міжфасткова границя з потужною сегрегацією домішку. Схильність до міжфасткового руйнування та низькі механічні властивості пов'язані з малою когезивною міцністю границі завдяки зниженню енергії руйнування границі при наявності домішку.

- При подальшому підвищенні температури спікання відбувається перекристалізація міжфасткових границь з переходом домішку у матрицю матеріалу. З цього моменту властивості матеріалу в області міжфасткового контакту стають близькими до властивостей матриці. При формуванні досконалих контактів міжфасткове руйнування зникає.

В роботі встановлено, що температура формування досконалого контакту залежить від хімічного складу поверхні вихідного порошку, умов ущільнення (зусилля пресування), пористості пресовки, яка підлягає спіканню, та атмосфери спікання. Спікання при температурах вищих за температуру перекристалізації міжфасткової границі забезпечує різке зниження схильності до міжзеренного руйнування та значне підвищення механічних властивостей матеріалу (рис.6). У зв'язку з цим в роботі пропонується характеризувати здатність порошкової пресовки до спікання температурою спікання T_{50}, при якій у зламі залишається 50 % міжфасткових фасеток.

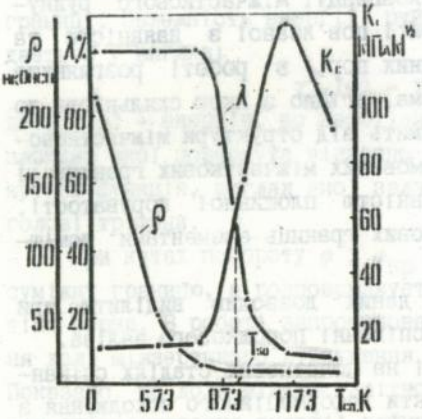


Рис.6. Вплив температури спікання на тріщиностійкість, відсоток міжфасткової поверхні у зламі (λ) та питомий електроопір (ρ) у порошковому залізі ПЖ2М з пористістю 5 %.

Порівняльні експерименти показали, що відновлені порошки заліза мають значно нижчу характеристичну температуру T_{50}

ніж аналогічні за складом розпилені порошки. Це пояснюється великою кількістю домішку на поверхні вихідних розпилених порошків і формуванням більш потужних сегрегацій на міжкристалітних границях, що заважає процесу перекристалізації. Підвищення схильності до спікання із зростанням зусилля пресування пов'язане з двома факторами: по-перше, із зменшенням кількості пор на міжкристалітних границях, по-друге, із збільшенням деформації твердої фази. Обидва фактори прискорюють рекристалізаційні процеси.

У заключній шостій главі роботи розглядається структурно-фізична схема механізмів руйнування порошкових матеріалів, яка узагальнює результати досліджень, приведені у попередніх розділах, і демонструє чутливість граничних механічних характеристик і механізмів руйнування до структури матеріалів (поруватості та якості контактів) і умов іспиту.

На схемі (рис.7) наведені характерні типи залежностей тріщиностійкості від поруватості, які були експериментально одержані при різних механізмах руйнування порошкового матеріалу в залежності від його структури та умов іспиту.

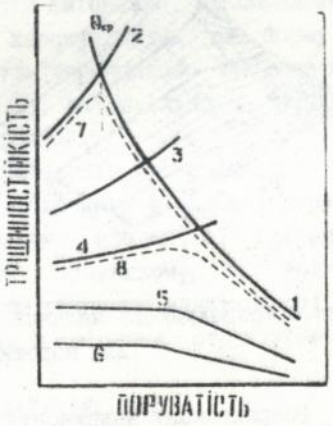


Рис.7. Схема структурної чутливості тріщиностійкості порошкових ОЦК-металів: 1 - ямкове руйнування; 2 - квазіскол, 3 - міжкристалітне + квазіскол, 4 - міжкристалітне, 5 - крихкий скол, 6 - крихке міжкристалітне, 7 та 8 - результуючі залежності.

Виконані в роботі дослідження дозволили провести теоретичне моделювання залежності тріщиностійкості від поруватості при різних механізмах руйнування, змінюючи параметри матеріалу та враховуючи вплив зовнішніх факторів (температури іспиту). Розрахункова схема виходить з принципу конкуренції механізмів руйнування за силовим критерієм.

Для аналізу структурної чутливості тріщиностійкості при крихкому та квазі-крихкому руйнуванні (сколом та по міжзеренним границям) використовується рівняння:

$$K_{1C}^{ск}(\theta) = \sigma_{ру}(\theta)\cdot\sqrt{\pi d}, \qquad (10а)$$

де залежність $\sigma_{ру}(\theta)$ береться у вигляді:

$$\sigma_{ру}(\theta) = \sigma_{ск}^{к}(1-\theta_{п})\cdot\{1+[\sigma_{ру}^{2}(\theta)/2\pi\sigma_{т}^{2}(\theta)]\}, \qquad (10б)$$

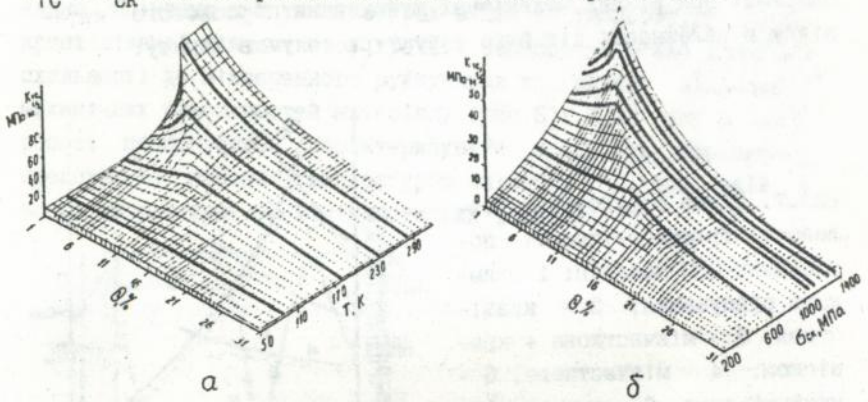
де $\sigma_{т}(\theta)$ - границя плинності поруватого матеріалу, $\sigma_{ск}^{к}$ - сколова напруга компактного матеріалу, яка визначається при температурі хладоламкості, $\theta_{п}$ - поруватість на поверхні руйнування, d - розмір зерна.

Для ямкового руйнування:

$$K_{1C}^{в} = n[3E(\theta)\cdot\sigma_{т}(\theta)\cdot e_{г}(\theta)\cdot L_{в}/2]^{1/2}, \qquad (11)$$

де $E(\theta)$ - модуль пружності поруватого матеріалу, $\sigma_{т}(\theta)$ - границя плинності поруватого матеріалу, $e_{г}(\theta)$ - гранична деформація поруватого матеріалу, n - показник деформаційного зміцнення, $L_{в}$ - коефіцієнт.

В роботі виконані розрахунки залежностей K_{1C}-θ-Т та K_{1C}-θ-$\sigma_{ск}$ для матеріалів на основі заліза (рис.8 а,б).



а б

Рис.8.Розрахункові залежності K_{1C}-θ-Т (а) та K_{1C}-θ-$\sigma_{ск}$ (б) для порошкового заліза.

Розрахункові залежності змінюються із зниженням температури іспиту у слідуючій послідовності: монотонно спадаюча (відповідає кривій 1 на схемі, рис.7), немонотонна з максимумом (відповідає кривій 7) та немонотонна з переламом (відповідає кривій 8).

Збільшення концентрації домішку на внутрішніх границях розділу веде до зниження тріщиностійкості, пригнічування

максимума та його зміщення в напрямку більшої поруватості. Цій ситуації відповідають криві 3 та 4 на схемі.

Результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними. Криві, виділені на рис.8 а, експериментально відтворені при іспитах на тріщиностійкість порувато залізо-вуглистої сталі при температурах 77, 193 та 293 К. Криві, виділені на рис.8 б, експериментально спостерігалися при іспитах порошкового заліза різної чистоти при сколовому та міжчастковому характері руйнування.

Узагальнення експериментальних та теоретичних результатів свідчить про те, що різноманітний та складний характер залежностей механічних властивостей від поруватості обумовлюється структурними особливостями порошкових матеріалів та конкуренцією різних механізмів руйнування. Розроблені в роботі структрно-чутливі фізико-механічні моделі дозволяють прогнозувати механічну поведінку порошкових матеріалів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В рамках структурно-фізичного підходу встановлено, що вплив поруватості не обмежується геометричним розміцненням. Для характеристик, що формуються при пластичній деформації (границя плинності, коефіцієнти зміцнення, максимальна напруга та інші), і, особливо, для характеристик, що формуються під час руйнування, пори можуть принципово змінювати механізми деформації та руйнування, і, як наслідок, структурну чутливість механічних властивостей.

2. У випадку незмінності мікромеханізмів зміцнення і структури твердої фази матеріалів в широкому діапазоні поруватості внесок поруватості у формування ефективної границі плинності визначається незалежним множником, а вплив структури твердої фази з урахуванням принципу адитивності - сумою ефектів зміцнення, пов'язаних з різними структурними факторами

$$\sigma_T = f(\theta)\cdot[F(d)+F(\rho)+F(\lambda)+\ldots],$$

де $f(\theta)$ - функція, що описує вплив поруватості, $F(d)$, $F(\rho)$ та $F(\lambda)$ - відповідно функції, що описують вплив розміру зерна d, щільності дислокацій ρ та об'ємної частки дисперсної фази λ на зміцнення.

Існує дві групи факторів, що порушують інваріантність зміцнення твердої фази матеріалів в широкому діапазоні пору-

ватості:

- структурні фактори (в разі змін в структурі при отриманні матеріалів з різною поруватістю);

- мікромеханічні фактори (неоднорідний розподіл напруги в мікрооб'ємах матеріалу, масштабні та розмірно-структурні ефекти, а також інші фактори, що змінюють мікромеханізми зміцнення).

Кількісні оцінки ефектів, пов'язаних з варіаціями структури і мікромеханізмів зміцнення, можуть бути виконані в термінах виразу

$$\sigma_T^{TФ} = \sigma_T(\theta)\cdot(E_0/E_\theta) = F(d)+F(\rho)+F(\lambda)+ \ldots,$$

де E_0/E_θ - відношення модулів пружності компактного та поруватого матеріалів - характеризує зміни геометричної структури; $\sigma_T^{TФ}$ - границя плинності твердої фази. Запропонований вираз встановлює зв'язок між макроскопічними властивостями поруватого тіла та мікропроцесами, що контролюють формування деформуючої напруги твердої фази.

Експериментальне дослідження порошкового заліза в діапазоні температур 77 - 973 К виявило неінваріантність $\sigma_T^{TФ}$ в широкому діапазоні поруватості.

3. Деформаційне зміцнення порошкового матеріалу треба аналізувати у зв'язку із структурними змінами в процесі деформації, враховуючи два взаємопов'язаних процеси: еволюцію дислокаційної структури твердої фази та зміни поруватої структури. Внесок цих процесів у формування деформуючої напруги може бути визначений з виразу

$$\sigma(\varepsilon,\theta) = \sigma^{TФ}(\varepsilon)\cdot E_\theta(\varepsilon)/E_0,$$

де $E_\theta(\varepsilon)$ - значення модуля пружності поруватого матеріалу при деформації ε; $\sigma^{TФ}(\varepsilon)$ - деформуюча напруга твердої фази.

4. Номінальні криві деформаційного зміцнення поруватих матеріалів на початкових етапах деформації виявляють параболічне зміцнення. По мірі збільшення деформації спостерігається додаткове зміцнення зразків при стисненні та роззміцнення при розтязі (SD-ефект). Величина SD-ефекту зростає із збільшенням деформації, що в загальному випадку пов'язано як з еволюцією пор так і з процесами декогезії в твердій фазі.

5. Встановлені слідуючі фізичні закономірності деформаційного зміцнення твердої фази порошкового заліза:

а) В інтервалі мікроплинності для матеріалів з малою та середньою поруватістю спостерігається параболічне зміцнення,

характерне для компактного заліза. В матеріалах з великою пористістю виявляється логарифмічне зміцнення, яке характерне для монокристалів, що може бути пов'язано із зменьшенням ролі границь при локалізації деформації на міжчасткових перетинах.

б) При одноосному розтязі в області макродеформації зміцнення має параболічний характер лише на початкових стадіях деформації. При підвищенні ступіню деформації виявляється відхилення від параболічного закону, яке обумовлене виникненням додаткової компоненти розтягуючої напруги в області мікрошийок (ефектом Бріджмена). При одноосному стисненні параболічне зміцнення виявляється у всьому дослідженому діапазоні деформації.

в) Залежності коефіцієнту деформаційного зміцнення твердої фази $K_1^{ТФ}$ від температури та пористості мають той же характер, що і відповідні залежності для границі плинності твердої фази. Це означає, що опір пластичній деформації на границі плинності визначає закон деформаційного зміцнення при подальшому деформуванні матеріалу.

6. При ущільненні порошкового матеріалу в його твердій фазі відбуваються зміни деформаційної субструктури: послідовно змінюючись формується структура лісу дислокацій, слаборазорієнтована коміркова структура та разорієнтована коміркова структура. Зміна структурного стану відбувається при дещо більших деформаціях ніж в компактному матеріалі, що пояснюється наявністю вільної внутрішньої поверхні, на яку виходять дислокації.

7. Механізми руйнування порошкових матеріалів розглянуто в рамках загальної класифікації механізмів руйнування ОЦК-металів по структурних та енергетичних ознаках.

а) При крихкому руйнуванні порошкового матеріалу при збільшенні пористості відбувається зміна механізму розповсюдження тріщини від сколу в площині перпендикулярній напрямку прикладення напруги (при малих пористостях) до внутрикристалітного сколу по міжчасткових перетинах (при середніх та великих пористостях). Зміна механізму розповсюдження тріщини веде до зміни характеру залежності міцності та тріщиностійкості від пористості.

б) В інтервалі температур в'язко-крихкого переходу виявлена немонотонність залежності тріщиностійкості від пору-

ватості, яка пов'язана із зміною механізму руйнування від сколу до злиття пор при рості поруватості. Експериментально встановлене збільшення пластичної зони та відповідне збільшення тріщиностійкості обумовлені зниженням границі плинності спеченого заліза по мірі збільшення поруватості. Вплив поруватості на тріщиностійкість описаний з залученням уявлень про в'язко-крихкий перехід ОЦК-металів з температурою. Введено аналог температури хладоламкості - критична поруватість $\theta_{кр}$.

в) Для аналізу структурної чутливості механічних властивостей поруватих матеріалів, що руйнуються за механізмом злиття пор, використовується критерій граничної деформації. Введено структурний параметр $f_ч+\theta$, де $f_ч$ - об'ємна доля часток, θ - об'ємна доля пор. Залежність $e_г=F(f_ч+\theta)$, описана в рамках модифікованої моделі Гарланда, добре узгоджується з експериментальними даними для порошкового заліза. В межах цієї концепції руйнуюча напруга поруватого матеріалу $\sigma_{ря}$ визначається з рівняння

$$\sigma_{ря} = (E_\theta/E_0)\cdot\{[\sigma_т + Ke_г^{1/2}(\theta)]\},$$

де K - коефіцієнт деформаційного зміцнення твердої фази, $e_г(\theta)$ - гранична деформація поруватого матеріалу. Модель оперує робочими параметрами, що характеризують структуру порового простору та її зміни під час деформації, параметрами, що відображують еволюцію дислокаційної структури, а також параметрами, що враховують вплив структури на граничну деформацію при ямковому механізмі руйнування.

8. Вивчено складові етапи міжкристалітного руйнування: зародження тріщини, розповсюдження тріщини в межах окремої границі, подолання тріщиною суміжних зерен та катастрофічне розповсюдження тріщини. Модельні експерименти виявили енергетичні особливості розповсюдження міжкристалітної тріщини на різних стадіях руйнування. Одержані результати використані при аналізі міжчасткового руйнування порошкових матеріалів.

9. Ефективність спікання порошкових матеріалів визначається структурою та властивостями міжчасткового контакту. Виявлені три стадії еволюції контакту при спіканні:

а) В неспеченому матеріалі та на початкових стадіях спікання переважають контакти деформаційного походження з великою кількістю площинних пор. Схильність до міжчасткового

руйнування та низькі механічні властивості в цьому випадку пов'язані з малою площиною контактуючих поверхонь. Структурна чутливість міцності добре описується в рамках моделі Шлєсара.

б) При підвищенні температури спікання в зоні міжкристалітного контакту формується великокутова міжкристалітна границя з сегрегацією домішку. Схильність до міжкристалітного руйнування та низькі механічні властивості у цьому випадку аналізуються в межах сегрігаційної теорії міжкристалітного руйнування.

в) При подальшому підвищенні температури спікання відбувається перекристалізація міжкристалітних границь з переходом домішку в матрицю матеріалу. З цього моменту властивості матеріалу в зоні міжкристалітного контакту зрівнюються із властивостями матриці. По мірі формування досконалого контакту міжкристалітне руйнування зникає. Схильність матеріалу до спікання характеризується параметром T_{50} - температурою спікання, при якій у злами залишається 50 % міжкристалітних фасеток.

10. Запропоновано структурно-фізичну схему реалізації механізмів руйнування в порошкових матеріалах, яка базується на принципі конкуренції механізмів руйнування за силовим критерієм. Схема демонструє чутливість енергетичних та силових характеристик руйнування до структурних факторів, властивих порошковим матеріалам: об'ємної поруватості, якості контакту та площинної поруватості.

Основний зміст роботи дисертації викладено в роботах:

I. Структура и прочность порошковых материалов / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, И.И.Иванова и др.; под ред. С.А.Фирстова, М.Шлєссара.- Киев: Наук. думка, 1993.- 175 с.

2. О влиянии локальных внутренних напряжений на особенности интеркристаллитного разрушения сплавов молибдена в области вязко-хрупкого перехода / В.А.Денисюк, А.С.Драчинский, Ю.Н.Подрезов и др. // Проблемы прочности.- 1973.- N 8.- С. 80-83.

3. Драчинский А.С., Подрезов Ю.Н., Трефилов В.И. О температуре хладноломкости при разрушении по границам и телу зерна сплавов, склонных к межзеренному разрушению // ФММ.- 1981.- 52, N 2.- С. 417-420.

4. Драчинский А.С., Кущевский А.Е., Подрезов Ю.Н. Влияние пористости на трещиностойкость порошкового железа // Порош-

ковая металлургия.- 1982.- N 12.- С.80-84.
5. Драчинский А.С., Подрезов Ю.Н. Влияние элементов структуры на энергию межзеренного разрушения // ФММ.- 1983.- 55, N 1.- С. 157-164.
6. Влияние масштабного фактора на результаты определения механических свойств порошковых материалов / А.С.Драчинский, А.Е.Кущевский, Ю.Н.Подрезов и др. // Порошковая металлургия.- 1983.- N 3.- С. 88-94.
7. Механизм пластической деформации и разрушения спеченного железа, содержащего дисперсные частицы диоксида титана / А.Н.Демидик, И.И.Иванова, Ю.Н.Подрезов и др. // Порошковая металлургия. - 1983. - N 12.- С. 69-75.
8. Крайников А.В., Подрезов Ю.Н. О трещиностойкости и температуре хладноломкости тела и границ зерен некоторых сплавов вольфрама // Новые порошковые и композиционные неорганические материалы.- Киев: ИПМ АН УССР, 1983.- С. 81-84.
9. Влияние микролегирования на температуру хладноломкости тела и границ зерен сплавов вольфрама, склонных к межзеренному разрушению / А.С.Драчинский, А.В.Крайников, Ю.Н.Подрезов и др. // Там же.- С. 84-88.
10. Деформационное упрочнение и разрушение порошкового железа / А.С.Драчинский, А.Е.Кущевский, Ю.Н.Подрезов, С.А.Фирстов // Порошковая металлургия.- 1984.- N 10.- С. 55-59.
11. Перепелкин А.В., Пеликан К, Подрезов Ю.Н. Разрушение спеченных материалов на основе железа // Материалы VIII Межд. конф. по порошковой металлургии.- Дрезден, 1985.- С. 37-42.
12. Взаимосвязь трещиностойкости с долей межзеренного разрушения порошкового железа / А.С.Драчинский, А.В.Крайников, А.Е.Кущевский, Ю.Н.Подрезов // Порошковая металлургия.- 1986. - N 1.- С. 78-83.
13. Анизотропия структуры и механические свойства малолегированных сплавов вольфрама / Ю.Н.Подрезов, О.Г.Радченко, Н.И.Даниленко и др. // Порошковая металлургия.- 1987.- N 7.- С. 78-84.
14. Подрезов Ю.Н., Радченко О.Г., Даниленко Н.И. Механические свойства и структура малолегированных деформированных сплавов вольфрама // Порошковая металлургия.- 1987.- N 8.- С. 110-116.
15. Влияние пористости на прочность и механизм вязкого раз-

рушения порошкового железа / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, А.Г.Жердин и др. // Порошковая металлургия.- 1987.- N 10.- С. 90-96.

16. Влияние дислокационной ячеистой структуры на вязкость разрушения поликристаллического молибдена / А.Д.Васильев, Н.И.Даниленко, Ю.Н.Подрезов и др. // ФХММ.- 23, N 5.- С. 53-56.

17. Влияние типа железного порошка и режимов горячей штамповки на ударную вязкость заготовок / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, А.Г.Жердин и др. // Порошковая металлургия.- 1987.- N 7.- С. 28-33.

18. Особенности вязко-хрупкого перехода в порошковых материалах на основе железа. I. Механические характеристики порошкового железа в интервале температур вязко-хрупкого перехода / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, Л.Г.Штыка и др. // Порошковая металлургия.- 1988.- N 2.- С. 69-73.

19. Особенности вязко-хрупкого перехода в порошковых материалах на основе железа. II. Физико-механическая схема вязко-хрупкого перехода при испытаниях на трещиностойкость / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, Л.Г.Штыка и др. // Порошковая металлургия.- 1988.- N 3- С. 39-42.

20. Закономерности деформации и разрушения порошкового железа в широком интервале температур испытаний / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, Л.Г.Штыка // Сб. докладов VII Межд. конф. по порошковой металлургии. - Краков, 1988 (5-7 октября) - Т.2.- С. 693-699.

21. Распределение примесей на поверхности разрушения и механические свойства порошкового железа / Ю.Н.Иващенко, А.В.Крайников, Ю.Н.Подрезов и др. // Порошковая металлургия.- 1988.- N 6.- С. 83-88.

22. Влияние пористости на микропластическую деформацию в порошковых материалах на основе железа / А.Г.Жердин, Ю.Н.Подрезов, С.А.Фирстов и др. // Порошковая металлурия.- 1988.- N 7.- С. 79-84.

23. Закономерности пластической деформации и разрушения дисперсно-упрочненных материалов на основе порошкового железа / С.А.Фирстов, И.И.Иванова, А.Н.Демидик, Ю.Н.Подрезов и др. // Порошковая металлургия.- 1989.- N 6.- С. 70-77.

24. Моделирование вязко-хрупкого перехода в пористых металлических материалах в условиях испытаний на трещиностой-

кость / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, Л.Г.Штыка и др. // Порошковая металлургия.- 1990.- N 5.- С. 85-92.
25. Даниленко Н.И., Подрезов Ю.Н., Штыка Л.Г. Исследование структуры спеченного порошкового железа методом просвечивающей электронной микроскопии // Порошковая металлургия.- 1990.- N 6.- С. 56-61.
26. Даниленко Н.И., Васильев А.Д., Подрезов Ю.Н. Влияние степени деформации на особенности разрушения деформированных железа и молибдена // Электронная микроскопия и прочность. - Киев: ИПМ АН УССР, 1989.- С. 72-77.
27. Закономерности пластической деформации и разрушения дисперсно-упрочненных материалов на основе порошкового железа / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, И.И.Иванова // Порошковая металлургия. -1989.- N 6.- С. 70-77.
28. Подрезов Ю.Н. Межчастичное разрушение порошкового железа // Структурная и химическая неоднородность в материалах.- Киев: ИПМ АНУ, 1991.- С. 70-76.
29. Межчастичное разрушение железных порошковых материалов / С.А.Фирстов, Ю.Н.Иващенко, Ю.Н.Подрезов и др. // Порошковая металлургия.- 1991.- N 4.- С. 71-79.
30. Подрезов Ю.Н., Даниленко Н.И., Демидик А.Н. Влияние пластической деформации на энергию разрушения порошкового и литого железа // Порошковая металлургия.- 1991.- N 9.- С. 69-75.
31. Даниленко Н.И., Манилов В.А., Подрезов Ю.Н. Влияние пластической деформации на трещиностойкость сплавов хрома // Электронная микроскопия и прочность - Киев: ИПМ АНУ, 1991. - С. 111-117.
32. Влияние пористости на прочность порошковых материалов при вязком механизме разрушения / С.А.Фирстов, Ю.Н.Подрезов, Н.И.Луговой и др. // Порошковая металлургия.- 1992.- N 5.- С. 56-61.
33. Подрезов Ю.Н., Штыка Л.Г. Механизмы распространения трещины в спеченных порошковых материалах // Физ.-хим. мех. материалов.- 1992.- N 3.- С. 67-75.
34. Структурные изменения при высокотемпературной пластической деформации порошковых быстрорежущих сталей / Ю.Н.Подрезов, В.А.Штакун, Н.И.Даниленко и др. // Порошковые инструментальные стали.- Киев: ИПМ АНУ, 1992.- С. 72-77.
35. Подрезов Ю.Н., Штыка Л.Г., Бродниковский Н.И. Особеннос-

ти деформационного поведения порошкового железа при одноосном растяжении // Проблемы прочности.- 1993.- N 11.- С. 12-18.

36. Даниленко Н.И., Подрезов Ю.Н., Падалка Д.В. Закономерности структурообразования при пластической деформации пористого железа // Электронная микроскопия и прочность материалов.- Киев: ИПМ АНУ, 1993.- С. 118-127.

37. Подрезов Ю.Н., Штыка Л.Г. Структурная чувствительность механических свойств порошковых материалов // Физика и механика порошковых материалов.- Киев: ИПМ АНУ, 1993.- С. 15-32.

38. Подрезов Ю.Н., Сотник А.А., Луговой Н.И. Смена механизма распространения трещины при хрупком разрушении металлокерамик // Электронная микроскопия и прочность материалов.- Киев: ИПМ АНУ, 1993.- С. 1-6.

39. Подрезов Ю.Н., Даниленко Н.И. Некоторые следствия структурной чувствительности вязкости разрушения деформированных сплавов молибдена, хрома, железа // Электронная микроскопия и прочность материалов.- Киев: ИПМ АНУ, 1993.- С. 23-28.

40. Штыка Л.Г., Подрезов Ю.Н. Механические свойства спеченного железа при низких температурах испытания // Тез. докл. VI Всесоюзной конференции "Физика разрушения".- Киев: 26-28 сентября, 1989.- Ч.2 -С. 71-72.

41. Подрезов Ю.Н. Влияние структуры на особенности деформации и разрушения порошковых материалов // Там же.- С. 123-124.

Подрезов Ю.Н. Структурные аспекты деформации и разрушения порошковых материалов. Диссертация в форме рукописи на соискание ученой степени доктора физ.-мат.наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. Киев: Институт проблем материаловедения НАН Украины, 1994 г.

Защищается 85 научных работ и 2 авторских свидетельства, в которых содержатся теоретические исследования, включающие разработку структурно-физических моделей формирования механических характеристик порошковых материалов, а также многочисленные экспериментальные данные о влиянии структуры порошковых материалов на комплекс механических свойств.

Обобщение экспериментальных и теоретических результатов свидетельствует о том, что разнообразный и сложный характер зависимостей механических свойств от пористости обусловлен структурными особенностями порошковых материалов и конкуренцией разных механизмов деформации и разрушения. Разработанные структурно-чувствительные физико-механические модели позволяют прогнозировать механическое поведение порошковых ОЦК-металлов.

Podrezov Yu.N. Structural Aspects of Powder Materials Deformation and Fracture. A thesis in the form of a manuscript presented for the Doctor's Degree in Physics and Mathematics, the speciality 01.04.07 - Physics of Solid State. Kiyiv: Institute for Problems in Materials Science of NAS of Ukraine, 1994.

Eighty five scientific works and two Inventor's Certificates which comprise theoretical studies including structural-physical models of powder materials mechanical properties formation and numerous experimental data illustrating the influence of the microstructure on the complex of mechanical properties are defended.

Generalization of the theoretical and experimental data proves that a complicated character of mechanical properties dependences on porosity is stipulated by structural features of powder materials and by competition of various mechanisms of deformation and fracture. Elaborated physical-mechanical models are sensitive to structure of materials and allow to predict the mechanical behaviour of powder BCC metals.

Ключові слова: деформація, руйнування, механізми, структура, пори, границі.

Підп. до друку 13.10.94 . Формат 60x84/16. Папір офс.
друк. офс. Умов. друк. л. 1,54 . Умов.фарб.-відб. 2,15
Обл.-вид.л. 2,13. Тираж 95 прим. Зам. 698.

Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, дСП, вул.Кржижанівського,3.

Дільниця Оперативної поліграфії
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, дСП, вул.Кржижанівського,3.

4545-89

Ав 31.157