Національна Академія Наук України
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича

На правах рукопису

Даниленко
Микола Іванович

ВПЛИВ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ НА ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИНИ В ПРОКАТАНИХ ОЦК-МЕТАЛАХ

Спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ 1994

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00778757 (+)

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті проблем матеріалознавства НАН України.

Наукові керівники: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор С.О.Фірстов

кандидат фізико-математичних наук Ю.М.Подрєзов

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Д.В.Лоцко

кандидат фізико-математичних наук
П.Ю.Волосєвич

Ведуча організація: Фізико-механічний інститут НАН України
м.Львів

Захист дисертації відбудеться "20" 09 1994 р. в 14^{00} на засіданні Спеціалізованої ради Д 016.23.01 в Інституті проблем матеріалознавства НАН України (м. Київ, вул. Кржижанівського, 3).

Відгуки на автореферат, завірені печаткою установи, просимо направляти за адресою: 252680, МСП, Київ-142, вул. Кржижанівського, 3, Институт проблем матеріалознавства, Вченому секретареві спецради Д 016.23.01 Падерно Ю.Б.

Із дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства НАН України.

Автореферат розіслано "____" _____ 1994 р.

ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
Спецради Д 016.23.01

Ю.Б.Падерно

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

АВ-30,732

Актуальність роботи. Обробка тиском з метою створення деформаційної субструктури являється одним із найбільш ефективних способів підвищення механічних характеристик конструкційних металевих матеріалів. При дослідженні впливу деформаційної структури на властивості основна увага приділялась міцності, пластичності, холодноломкості, проте, практично були відсутні систематичні дані про вплив попередньої пластичної деформації (ППД) на тріщиностійкість. Тріщиностійкість (найважливіша механічна характеристика, яка дозволяє оцінить здатність матеріалу чинити опір розповсюдженню тріщини) являється структурночутливою, оскільки формується в умовах взаємодії тріщини із структурними дефектами. У випадку деформованих матеріалів на основі ОЦК-металів дослідження тріщиностійкості припускає врахування особливостей формування дислокаційної структури при деформації і механізмів взаємодії тріщини з деформаційною структурою при різних типах руйнування, притаманних цим металам.

Систематичні дослідження в даному напрямку представляють інтерес як з точки зору фундаментального матеріалознавства, оскільки розвивають уявлення про структурну підготовку і механізми руйнування, так і з практичної точки зору, оскільки дозволяють оптимізувати способи підвищення механічних властивостей шляхом направленого контролю тонкої структури матеріалу.

Мета роботи. Виявити закономірності формування тріщиностійкості матеріалів на основі ОЦК-металів з попередньо створеною деформаційною структурою.

Для досягненя мети даної роботи вирішувались слідуючі задачі:

1. З'ясувати межі структурних станів досліджуваних матеріалів, прокатаних в інтервалі деформацій 0-96%.

2. Дослідити кореляцію тріщиностійкості, виміряної в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу, із структурним станом досліджуваних матеріалів.

3. Вивчити механізми руйнування матеріалів, випробуваних на тріщиностійкість з врахуванням структурної анізотропії.

4. Систематизувати і узагальнити отримані результати у вигляді фізико-механічної схеми, яка описує формування тріщиностійкості в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу з врахуванням механізмів взаємодії тріщини із структурними елементами.

Наукова новизна дисертаційної роботи. 1. Встановлена чутливість

тріщиностійкості до зміни структурного стану деформованих матеріалів на основі ОЦК-металів.

2. Виявлена немонотонна залежність тріщиностійкості від ступеню попередньої пластичної деформації в широкому інтервалі деформацій.

3. Запропонована оригінальна фізико-механічна схема, яка встановлює зв'язок між структуротворенням при деформації матеріалу та енергетичними закономірностями руйнування ОЦК-металів в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу.

Практична цінність отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи свідчать про доцільність фізико-механічного підходу до вивчення механічних характеристик деформованих ОЦК-металів. Такий підхід встановлює зв'язок технології, структуротворення, умов випробування а також механізмів руйнування, що дозволяє прогнозувати властивості матеріалів для широкого діапазону параметрів. Отримані результати можуть бути основою для розробки загальних принципів теорії руйнування деформованих матеріалів.

Враховуючи загальний характер та відтворюваність результатів, можна рекомендувати їх для оптимізації деформування промислових конструкційних матеріалів.

Результати роботи вносять суттєвий вклад в терію фізичного матеріалознавства, сприяють розвитку структурної інженерії деформованих матеріалів.

Основні наукові полрження, винесені для захисту. 1. Немонотонна залежність тріщиностійкості від ступеню ППД має загальний характер для ОЦК-металів в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу і зумовлена як стадійністю структурних змін при деформуванні, так і особливостями взаємодії тріщини з дислокаційною структурою при крихкому та квазікрихкому руйнуванні.

2. Максимум тріщиностійкості в інтервалі деформацій 15-30% зумовлений особливостями взаємодії дислокацій, емітованих вершиною тріщини із слаборозорієнтованими межами комірок. Цей процес має термоактиваційний характер, що приводить до температурної залежності ефекту.

3. Характер залежності тріщиностійкості від ступеню деформації залежить від механізму руйнування. Так для матеріалів схильних до міжзеренного руйнування (сплави на основі Mo) немонотонна залежність не виявлена. Монотонне зниження тріщиностійкості із ступенем деформації зумовлене зменшенням шорсткості поверхні руйнування.

Апробація роботи. По основних положеннях дисертаційної роботи були зроблені доповіді на: XI і XII Всесоюзних і XIII Міжнародній конференціях по фізиці міцності та пластичності металів і сплавів, Куйбишів, 1986, 1989 і 1992; конференції "Субструктурне зміцнення і дифракційні методи дослідження", Київ, 1985; V і VI Всесоюзні конференції "Фізика руйнування", Чернівці, 1985, Київ, 1989; I Всесоюзному симпозіумі "Механіка руйнування", Житомир, 1985; XII Всесоюзній науково-технічній конференції "Структура і міцність матеріалів в широкому діапазоні температур", Каунас, 1989; IV Республіканській конференції "Субструктурне зміцнення металів", Київ, 1990; Міжнародній конференції по руйнуванню ICF-8, Київ, 1993.

Публікації. По матеріалах дисертації опубліковано 22 роботи, з них 10 в наукових журналах і 12 в збірниках доповідей конференцій.

Структура і об'єм. Дисертація складається із вступу, шести глав і висновків. Робота написана на 117 сторінках машинописного тексту, вміщує 48 малюнків, 6 таблиць, список літератури із 99 найменувань.

Основний зміст роботи.

В першій главі висвітлюється фізико-структурний аспект пластичної деформації і руйнування, зв'язаний з аналізом необоротних внутрішніх процесів на мікрорівні, які забезпечують весь комплекс механічних властивостей. Приведений огляд літературних даних про еволюцію дислокаційної структури в процесі пластичної деформації, а також про вплив різних типів дислокаційного розподілу на механічні властивості матеріалу.

В першому розділі розглянуто вплив різних факторів на формування коміркової структури. При постійній температурі внутрішня структура змінюється з ростом ступеню деформації по слідуючій схемі: окремі дислокації - клубки, "ліс" дислокацій - коміркова фрагментована структура. Значний вплив на еволюцію дислокаційної структури чинить величина енергії дефекту упаковки (е.д.у.). Відмічена структурна неоднорідність матеріалу, зумовлена формуванням кристалографічної текстури.

В другому розділі розглянуто вплив ППД на механічні властивості. Приведені та проаналізовані літературні дані про чутливість коефіцієнтів деформаційного зміцнення та температури в'язко-крихкого

переходу до зміни структурного стану ОЦК-металів. Приведені експериментальні дані по впливу ступеню ППД на тріщиностійкість матеріалу, приведені емпіричні залежності тріщиностійкості від інших механічних властивостей та параметрів структури. Показано, що K_{1C} зростає з ростом $\sigma_т$ при в'язкому руйнуванні і зменшується з ростом $\sigma_т$ при крихкому руйнуванні.

В третьому розділі розглянуто вплив температури на зміну механізмів руйнування.

Із аналізу літератури слідує, що на момент постановки даної роботи були відсутні розвинені уявлення про вплив ППД на розповсюдження тріщини в деформованому матеріалі. Тому питання про вплив деформаційної субструктури на енергетичні закономірності розповсюдження тріщини являється актуальним. В даній главі зформульовані мета і задачі цієї роботи.

В другій главі обоснований вибір досліджуваних матеріалів та приведені режими їх отримання. Описані методичні особливості випробовування зразків деформованих матеріалів. Відмічається, що температура випробування визначалась таким чином, щоб забезпечити крихке і квазікрихке руйнування матеріалів. Мікроструктурні дослідження виконані методами ТЕМ і РЕМ. Хімічна мікронеоднорідність поверхні руйнування вивчалась методами локальної оже-електронної спектроскопії.

В третій главі приведені результати випробувань на тріщиностійкість деформованих сплавів заліза, молібдену та хрому при введенні тріщини в площину перпендикулярну напрямку прокатки.

В першому розділі розглядається вплив ступеню ППД на тріщиностійкість заліза. Випробовування на тріщиностійкість проводили при температурі 77К на литому залізі і залізі, отриманому методом порошкової металургії. На мал. 1а-г представлені результати випробовувань прокатаного при температурах 293К (мал. 1а,б) і 673К (мал. 1в порошкового заліза отриманого в результаті холодного пресування (із спіканням (мал. 1б,в) і без спікання (мал. 1а)), гарячого допресування та гомогенізуючого відпалу. Після гарячого допресування залізо не мало залишкової пористості. Результати випробовувань литого заліза, деформованого при кімнатній температурі представлені, на мал.1г.

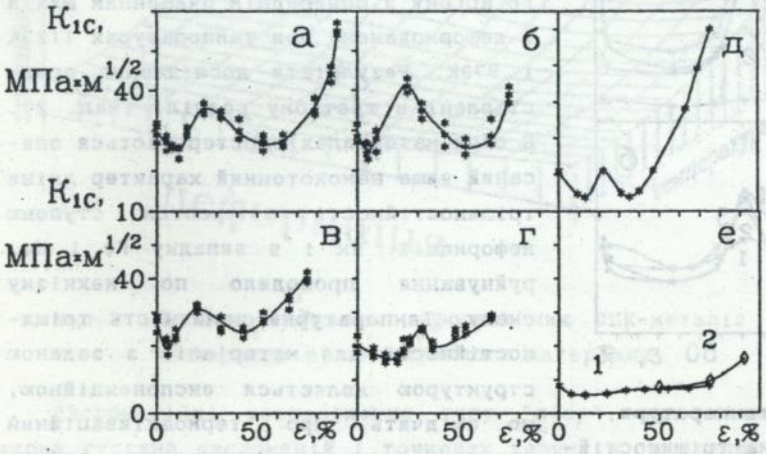
Тріщиностійкість з ростом ступеню деформації змінюється немонотонно. В інтервалі деформацій до 15% тріщиностійкість знижується.

Зростання тріщиностійкості спостерігається в інтервалі деформацій 15 - 25%. Збільшення ступеню ППД приводить до зниження тріщиностійкості і тільки після деформування понад 60% спостерігається різке зростання K_{1C}.

Електронномікроскопічні дослідження методом ТЕМ показали, що існування однорідного розподілу дислокацій (ε=0-15%) приводить до зниження тріщиностійкості. Максимум тріщиностійкості спостерігається в інтервалі деформацій (ε=15-25%), коли в матеріалі формується слаборозорієнтована коміркова структура. В інтервалі середніх ступеней деформації (ε=25-50%), коли в матеріалі існує коміркова структура, спостерігається зниження K_{1C}. Формування розорієнтованої коміркової структури (ε>50%) приводить до росту тріщиностійкості.

В результаті фрактографічного дослідження встановлено, що руйнування проходило за механізмом сколу, а при деформаціях ε>50-60% відбувається зміна механізму руйнування від сколу до скслу з розшаруванням.

Таким чином, установлена кореляція між тріщиностійкістю і структурою деформованого матеріалу. Додатковим доказом на користь такої кореляції являється зміщення першого максимуму в область малих деформацій для матеріалу, прокатаного при більш високій температурі



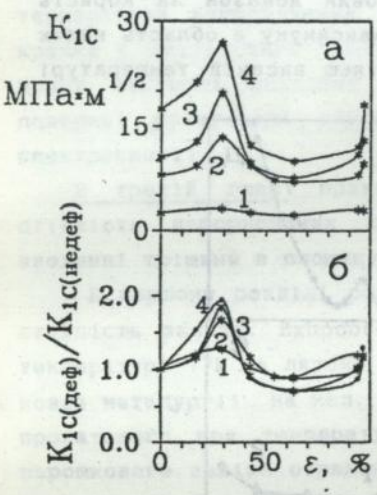
Мал.1. Вплив ступеню пластичної деформації на тріщиностійкість заліза (а-г) і молібденових сплавів МНРЮ (д) і ЦМ-10 і МТ (е). Всі позначення в тексті.

(673К), що відповідає діаграмі структурних станів, згідно якої критична ступінь деформації, при якій формується коміркова структура зменшується з ростом температури.

Незалежно від способу отримання та температури деформації характер залежності тріщиностійкості від ступеню деформації зберігається при даному механізмі руйнування.

У другому розділі аналізується структурна чутливість тріщиностійкості молібденових сплавів МНРЮ, ЦМ10 та МТ (мал.1д,е). Так само, як і в залізі, деформовані молібденові сплави виявляють немонотонну залежність тріщиностійкості при випробуваннях близько $T_x^в$. Оскільки температура в'язко-крихкого переходу сплавів Мо значно вища ніж у заліза, то це дозволило проаналізувати температурну залежність виявлених ефектів при квазікрихкому руйнуванні.

Слід відмітить, що при $T_{випр}$=77К тріщиностійкість практично не змінюється з ростом ступеню деформації і тільки при ступенях деформації понад 70% спостерігається незначне підвищення K_{1C} (мал. 1е).



Мал.2. Вплив температури випробування на тріщиностійкість прокатаного хрому.

Більш детальні дослідження температурної залежності тріщиностійкості виконані на сплавах хрому Хр.3, отриманому плавленням в атмосфері очищеного аргону з попереднім очищенням шихти і деформованому при температурах 1123К і 973К. Результати дослідження представлені в третьому розділі (мал. 2). В обох матеріалах спостерігається описаний вище немонотонний характер зміни тріщиностійкості з ростом ступеню деформації. Як і в випадку Fe і Mo, руйнування проходило по мехнізму сколу. Температурна залежність тріщиностійкості для матеріалів з заданою структурою являється експоненційною, що свідчить про термоактиваційний характер процесів, контролюючих руйнування.

Для того щоб оцінити вклад деформаційної структури в ці процеси, було виконано нормування тріщиностійкості деформованого матеріа-

лу на тріщиностійкість недеформованого матеріалу, визначену при тій же температурі випробування (мал 2б). Результати, приведені на мал. 2б, свідчать про те, що при взаємодії тріщини із слаборозорієнтованими комірками термоактиваційні процеси роблять найбільш відчутний вклад в структурну підготовку руйнування.

В четвертій главі представлена узагальнена схема залежності тріщиностійкості від ступеню ППД і температури випробовування (мал.3). Фізична трактовка немонотонної залежності тріщиностійкості від ступеню деформації передбачає аналіз механізмів взаємодії тріщини з дислокаційною структурою і оцінку енергетичних характеристик руйнування. Враховуючи, що $K_{1C} = 2E\gamma_{еф}$, проаналізуємо вплив різних дислокаційних розподілень на ефективну енергію руйнування при випробуванні на тріщиностійкість.

Мал.3. Тріщиностійкість деформованих ОЦК-металів в інтервалі температур в'язко-крихкого матеріалу.

Дислокаційні розподілення типу "лісу", для яких характерна висока густина дислокацій і точкових дефектів, зумовлюють існування підвищеного рівня дальнодіючих пружних напружень в матеріалі. Розвиток тріщини в такому матеріалі потребує значно менших енергетичних затрат у порівнянні з бездефектним матеріалом. Так, по оцінках Гілмана при густоті дислокацій $\rho \approx 10^{12}$ см$^{-2}$ поверхнева енергія змінюється

на величину порядку 200 ерг/см^2. В роботах Фірстова і Корнюшина відмічається, що при перетині тріщиною різних дислокаційних розподілів зниження поверхневої енергії розраховане за виразом:

$$\Delta\gamma = \frac{G\,b^2}{4k\,\pi}\sqrt{\rho}\,, \qquad (1)$$

для молібдену, при $\rho = 1{,}6 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$, становить 150 ерг/см^2. Таким чином, зниження тріщиностійкості в інтервалі деформацій 0-15%, який відповідає формуванню "лісу" дислокацій, може бути пояснено зниженням енергетичних затрат на руйнування в результаті підвищення рівня пружних напружень в матеріалі з ростом густини дислокацій.

При утворенні в матеріалі коміркової структури рівень дальнодіючих напружень знижується. Крім того формування пластичної зони полегшується в зв'язку з нестійкістю слаборозорієнтованих меж комірок на ранніх стадіях їх формування.

Аналіз літературних даних показує, що при повторній деформації в матеріалі із слаборозорієнтованою коміркової структурою проходить "розсипання" найменш міцних малокутових меж. Зокрема В.Ф. Мойсеєв показав, що первинна коміркова структура, зформована при більш високій температурі T_1, являється нерівновісною при повторній деформації (при T_2), тому, що характеризуюча її пружна енергія перевищує рівноважну на величину:

$$\Delta E = E_0 B^2 (A_2 - A_1)/d_{комі}\,, \qquad (2)$$

де E_0 - енергія ядра дислокації, A_1 і A_2 - швидкість розмноження дислокацій при різних температурах, d - розмір комірки, B - константа.

Експериментальні дані по спостереженню взаємодії тріщини з дислокаційними формуваннями in situ в колоні високовольтного електронного мікроскопу підтверджують теоретичні оцінки. Наявність мобільних дислокацій біля вершини тріщини сприяє активному формуванні пластичної зони і затупленню вершини тріщини. Ріст тріщиностійкості, що спостерігається в матеріалах із слаборозорієнтованою коміркової структурою можна пояснити з врахуванням відміченої вище нестійкості коміркової структури з припущенням, що в інтервалі деформацій 15-30% збільшується густина мобільних дислокацій в зоні процесу. На користь цього припущення свідчать отримані нами немонотонні залежності $\sigma_T(c)$ при повторному навантаженні, для яких характерно зниження в області формування слаборозорієнтованих коміркових структур.

Оцінка ефективної енергії руйнування в даному випадку утруднена із-за відсутності коректних моделей, описуючих механізм взаємодії тріщини із слаборозорієнтованою комірковою структурою.

Підвищення ступеню ППД приводить до стабілізації меж дислокаційних комірок. "Пухкі" межі перетворюються в більш вузькі і чіткі з поступовим збільшенням дезорієнтації. Взаємодія тріщини з такими межами не приводить до їх розпаду, кількість мобільних дислокацій в зоні процесу знижується. В зв'язку з цим спостерігається зниження тріщиностійкості і підвищення межі плинності. Додатковим фактором, сприяючим зниженню $\gamma_{еф}$, являється зменшення шорсткості зламу, яка добре фіксується при фрактографічному аналізі. Цей фактор пов'язаний з текстурними змінами в процесі попередньої пластичної деформації.

При деформації понад 50-55% в матеріалі формується висококутова коміркова структура. Для таких матеріалів зростання тріщиностійкості зумовлене двома факторами: дрібленням зерна і схильністю матеріалу до розшаруваня (розщеплення).

Ослаблені межі зерен і комірок в площині прокатки додатково підвищують тріщиностійкість в площині, перпендикулярній напрямку прокатки. Наявність розтягуючого напруження в вершині тріщини зумовлює виникнення мікротріщин в площині, перпендикулярній до магістральної тріщини. Формування таких мікротріщин являється додатковим джерелом дисипації енергії при руйнуванні.

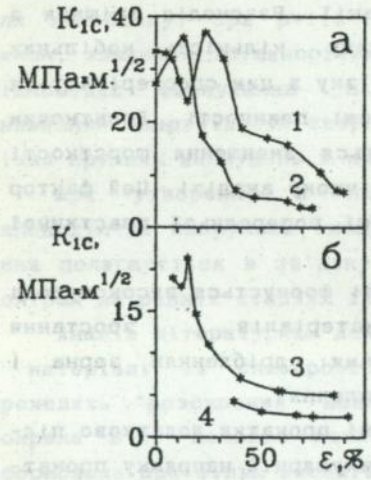
В цьому випадку K_{1C} і $\sigma_т$ значно підвищуються, проте застосування такого матеріалу обмежене низькими властивостями в площині прокатки.

В п'ятій главі главі представлені результати випробовувань на тріщиностійкість в площині прокатки.

Характеристики прокату в найменшому напрямку грають важливу роль, оскільки при подальшій термомеханічній обробці в матеріалі можуть виникати тріщини розшарування. Для вимірювання рівня міцності прокату в площині прокатки застосовують різноманітні методики, наприклад: випробовування хрестоподібних зразків, консольних балок з двома надрізами і зразків у вигляді тарілки. Для виявлення схильності до розшарування дротів застосовують спецметодику на закручування.

В данній роботі для визначення рівня тріщиностійкості при

введенні тріщини в площину прокатки застосовувались захвати-подовжувачі. При цьому зберігалась схема навантаження що і при випробовуванні макрозразків. На мал.4 представлені результати випробувань на тріщиностійкість в площині прокатки.



Мал.4. Тріщиностійкість деформованих заліза (1), сплавів МНРЮ (2), МТ (4) і хрому (3) в площині прокатки.

По класифікації Мільмана розшарування може проявляться або по межах зерен, або по межах комірок (якщо в недеформованому стані матеріал руйнується сколом). З цієї точки зору при аналізі руйнування в площині прокатки досліджувані матеріали можна разділить на 2 группи: матеріали на основі Fe і Cr (в початковому стані руйнуються сколом, розшарування - по межах комірок) і матеріали на основі Mo і W (в початковому стані схильні до міжзеренного руйнування, розшарування - по межах зерен). Спостерігається істотна різниця залежностей $K_{1C}(\varepsilon)$ цих матеріалів (мал. 4). При розповсюдженні тріщини по межах зерен дислокаційна структура, зформована в об'ємі зерна, практично не впливає на структурну підготовку руйнування. Тому спостерігається монотонно спадаюча залежність $K_{1C}(\varepsilon)$ для матеріалів на основі Mo в широкому інтервалі ступеней деформацій (ε>20%). Зниження тріщиностійкості в цьому випадку пов'язано із зменшенням шорсткості поверхні руйнування.

В роботі виконані оцінки впливу форми зерна на тріщиностійкість при міжзеренному руйнуванні. Тріщиностійкість матеріалу при крихкому міжзеренному руйнуванні в залежності від кута повороту змінюється за слідуючим законом:

$$K_{1C}(\varepsilon) + K_{1C}^{r} f(\theta,\varepsilon), \qquad (3)$$

де K_{1C}^{r} - тріщиностійкість межі, залягаючої в площині розповсюдження макротріщини, $f(\theta,\varepsilon)$ - функція, яка враховує кутове розподілення напружень біля вершини тріщини і залежність критичного кута повороту

тріщини від ступеню деформації. Розрахунки, виконані з врахуванням тільки впливу геометричної форми зерна, дають значення дещо вищі експериментальних. Це повязано з тим, що на міцність меж структурних елементів впливає ще й рівень внутрішніх напружень, а також наявність домішок. Оцінка внутрішніх напружень виконана при електронно-мікроскопічному дослідженні, а проведений оже-мікроаналіз виявив наявність домішок проникнення по межах розділу структурних елементів.

На прикладі деформованих сплавів вольфраму було показано, що добавки ренію підвищують пластичні характеристики тіла зерна, а введення окислів гафнію та ітрію зміцнюють межі зерен та конірок. Таким чином, шляхом направленого легування можна отримати матеріал з високим рівнем механічних характеристик в різних напрямках прокатаного листа.

В шостій главі обговорюються наслідки виявленої нами структурної чутливості тріщиностійкості.

1.Показано, що при одновісному розтязі досліджуваних матеріалів в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу після утворення шийки руйнування іде не по мінімальному перерізі. Позашийкове руйнування зумовлене виникаючою в мінімальному перерізі структурою, для руйнування якої требуються значніші енергетичні затрати, ніж при руйнуванні поза шийкою. Ця різниця не може бути скомпенсована зменшенням поперечного перерізу.

2. Розвинуті в роботі уявлення дозволяють пояснити характер температурної залежності поперечного звуження в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу. Зокрема,в роботах, які опубліковали Хан, Авербах, Оуен і Коен (ХАОК), показано, що на залежності $\psi(T)$ при деякій температурі шийкоутворення спостерігається стрибок від 20 до 60%. Цей ефект зумовлений енергетичною невигідністю розповсюдження тріщини в матеріалі зі слаборозрієнтованою структурою (мал.1). Різке підвищення σ_p на кривій "σ-T" відповідає зміцненню зразків в даному інтервалі деформацій при $T=T_d$.

Таким чином, ефект ХАОК має структурну природу.

Висновки

1. Встановлено, що немонотонна залежність тріщиностійкості від ступеню попередньої пластичної деформації (ППД), отримана в

результаті випробувань матеріалів на основі ОЦК-металів (Fe, Mo і Cr) близько $T_x^в$, зумовлена стадійністю еволюції дислокаційної структури при ППД.

2. Виявлено, що наявність в матеріалі хаотичного розподілу дислокацій приводить до зниження тріщиностійкості. Утворення слаборозорієнтованої коміркової структури зумовлює підвищення тріщиностійкості. Дальше збільшення ступеню деформації приводить до стабілізації меж комірок і до зниження тріщиностійкості. Формування високорозорієнтованої коміркової структури дає різке підвищення значень тріщиностойкості.

3. Вплив температури попередньої деформації проявляється в зміщенні максимума, який відповідає слаборозорієнтованій коміркові структурі, в область менших деформацій при підвищенні температури ППД, що свідчить на користь однозначної кореляції тріщиностійкості із структурою отриманою при ППД.

4. Дослідження тріщиностойкості в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу показало, що процеси, контролюючі структурну підготовку до руйнування мають термоактиваційну природу. Залежність $K_{1C}(\varepsilon)$ підсилюється з ростом температури випробувань. Найбільш суттєвий внесок в ці процеси вносять слаборозорієнтовані структури.

5. Показано, що формування залежності тріщиностійкості від ступеню ППД зумовлено механізмами руйнування, характерними для досліджуваних матеріалів. Так, при руйнуванні матеріалів на основі Fe, Mo і Cr по механізму сколу і квазісколу спостерігається немонотонний хід кривої $K_{1C}(\varepsilon)$. Тоді як для сплаву МТ, схильного до міжзеренного руйнування, характерна монотонно спадаюча залежність $K_{1C}(\varepsilon)$.

6. Формування структурної текстури при прокатці приводить до анізотропії тріщиностойкості. В площині, перпендикулярній напрямку прокатки при температурах нижче T_x руйнування проходить крихко по тілу зерен і комірок. В площині прокатки з ростом ступеню ППД транскристалітне руйнування змінюється на менш енергоємне міжзеренне та міжкоміркове.

7. Схильність до розшарування досліджуваних матеріалів обумовлюється геометричною формою зерен і властивостями меж розділення структурних елементів, які залежать від рівня внутрішніх напружень і вмісту домішок проникнення. В сплавах хрому зниження K_{1C} зумовлене текстурними змінами і збільшенням розміру зерна в напрямку

прокатки.

8.Сукупність уявлень про енергетичні закономірності розповсюдження тріщини деформованих матеріалів дозволила запропонувати узагальнюючу схему формування тріщиностійкості з врахуванням механізмів руйнування:

деформація 0-15% - зниження тріщиностійкості із-за підвищення рівня дальнодіючих пружних напружень, руйнування - квазіскол;

деформація 15-30% - підвищення значень тріщиностікості зумовлене нестійкістю зформованої слаборозорієнтованої комірковой структури; максимум $K_{1C}(\varepsilon)$ крелює з мінімумом $\sigma_T(\varepsilon)$, руйнування - квазіскол;

деформація 30-50% - стабілізація меж комірок приводить до росту тріщиностійкості, руйнування - квазіскол;

деформація понад 50% - ріст тріщиностійкості обумовлений зменшенням ефективного розміру зерна і підвищенням схильності матеріалу до розшарування, руйнування - квазіскол з розшаруванням.

9. Встановлені в роботі закономірності дозволяють пояснити слідуючі ефекти при одновісному ростязі в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу.:

1. Ефект позашийкового руйнування досліджуваних матеріалів.
2. Різкий стрибок залежності $\psi(T)$ з підвищенням температури.

Основний зміст роботи викладено в слідуючих публікаціях:

1.Даниленко Н.И., Фирстов С.А. Электронномикроскопическое исследование напряжений, связанных с внутренними границами раздела// Структура и свойства границ зерен: Сб. тез. докл. Всесоюзн. науч. конф. -Уфа, 1983. -С.93.

2.Даниленко Н.И., Васильев А.Д., Подрезов Ю.Н. Субструктура, механизмы и вязкость разрушения молибденового сплава МТ // Субструктурное упрочнение металлов и дифракционные методы исследования: Сб. тез. докл. науч. конф. - Киев, Наукова думка, 1985 -С.97.

3.Влияние дислокационной ячеистой структуры на вязкость разрушения поликристаллического молибдена / Н.И.Даниленко, А.Д.Васильев, Ю.Н.Ивашенко и др. // Физико-химическая механика материалов. - 1987. - N5. - С. 53-58.

4.Влияние степени деформации на особенности разрушения деформированного железа и молибдена / Н.И.Даниленко, А.Д.Васильев, Ю.Н.Подрезов, С.А.Фирстов // Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. науч. трудов Под ред. Фирстова С.А. - Киев, 1989. - С. 72-77.

5.Исследование структуры спеченного порошкового железа методом просвечивающей электронной микроскопии/ С.А.Фирстов, Н.И.Даниленко, Ю.Н.Подрезов и др.//Порошковая металлургия

458167

Ав 30.732

6. Даниленко Н.И., Васильев А.Д. [illegible] чувствительность вязкости разрушения молибдена, хрома и железа: Сб. тез. докл. IV Респуб. науч. конф. "Субструктурное упрочнение металлов". - Киев, 1990. -С. 69.
7. Влияние пластической деформации на трещиностойкость хрома / Н.И.Даниленко, В.А.Манилов, Ю.Н.Подрезов и др. // Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. науч. трудов Под ред. Фирстова С.А. - Киев, 1991. - С. 111-117.
8. Влияние пластической деформации на энергию разрушения порошкового и литого железа / Н.И.Даниленко, А.Н.Демидик, Ю.Н.Подрезов, А.П.Рачек // Порошковая металлургия.N9 - Киев, 1991. -С. 74-79.
9. Влияние пластической деформации на трещиностойкость прокатанных сплавов молибдена,хрома и железа / Н.И.Даниленко, А.Д.Васильев, Ю.Н.Подрезов, С.А.Фирстов: Сб. тез. докл. XIII Междунар. науч. конф. "Физика прочности и пластичности металлов и ссплавов". -Самара, 1992 -С.179.
10. Даниленко Н.И., Подрезов Ю.Н. Некоторые следствия структурной чуствительности вязкости разрушения деформированных сплавов молибдена, хрома и железа // Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. науч. трудов Под ред. Фирстова С.А. - Киев, 1993. -С.23-28.
11. Danilenko N.I., Podrezov Yu.N. The Influence of Plastic Deformation on Fracture Toughness of Molybdenum, Chromium and Iron // Fracture Mechanicics: Successes and Problems: Collection of Abstracts Ed. Panasyuk V.V., Rama Rao P., Andreykiv A.Ye., Kuznyak N.V., Savruk M.P. - Lviv, 1993. - v.2. -P. 423.

ІПМ АН України. 1997р. Зак. 556-30