

Дніпропетровський державний університет

На правах рукопису

БАЛЮК Зоя Вікторівна

МОДЕЛЮВАННЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ НАДШВИДКОЇ
КРИСТАЛІЗАЦІЇ НА КРИСТАЛІЧНИХ І СКЛОПОДІБНИХ ПІДКЛАДКАХ
ТА ФАЗОВОСТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛИТОГО
МІКРОПРОВОДУ

(01.04.07 - Фізика твердого тіла)

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дніпропетровськ - 1997



00398630 (Т)

Дисертація є рукопис
Роботу виконали в Дніпрі

Наукові керівники :

доктор фізико-математичних наук,
професор
Мірошниченко Іван Степанович

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Башев Валерій Федорович

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
професор Воробйов Геннадій Михайлович;
кандидат фізико-математичних наук,
доцент Лисенко Олександр Борисович

Провідна установа:

Донецький фізико-технічний інститут
НАН України

Захист відбудеться " 7 " 07 1997 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 03.01.06 по захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук при Дніпропетровському державному університеті за адресою: 320625, м. Дніпропетровськ, провулок Науковий 13, корпус 11, аудиторія 300.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Дніпропетровського державного університету.

Автореферат розісланий " 6 " 06 " 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради -
доктор технічних наук

Спиридонова І.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Багато властивостей металів та сплавів формується в процесі їх твердіння, тому керувати структуроутворенням неможливо без розуміння фізичних закономірностей механізму процесу кристалізації.

Використання методів прискореного і надшвидкого охолодження у сучасному виробництві швидкоохолоджених гранул, порошків і плівок, литого мікропроводу дає можливість репрезентувати продукцію з надзвичайно особливими властивостями.

Запровадження цих методів поставило перед металознавством нові питання. Так, ще практично не вивчені кінетичні аспекти процесів, які супроводжують кристалізацію мікропроводу. Актуальною і досі нерозв'язаною у повному обсязі є задача формування литого виробу із заданою первинною монокристалічною, полікристалічною або аморфною структурами.

Відомо, що із збільшенням величини переохолодження підвищується дисперсність структури, формуються як пересичені тверді розчини і фази, відсутні на діаграмах стану, так і аморфна або монокристалічна структура. Але питання щодо того, чи є ця структура результатом кристалізації, чи виникла вона внаслідок перетворень уже в твердому стані, є предметом дискусій.

Особливе значення для фізики твердого тіла мають питання, нерівноваженості аморфного стану, ступінь якої залежить від багатьох причин, які ще в недостатній мірі контролюються у виробництві.

Складність експериментів, пов'язаних з вивченням умов отримання швидкоохолоджених та аморфних металів, потребує використання методів математичного моделювання процесів кристалізації, термодинаміки незворотних процесів, що дозволить збудувати кількісну основу теорії кристалізації швидкоохолод-

жених сплавів. Це положення підкреслює важливість та актуальність вибраної теми.

Мета роботи. Дисертаційна робота, що підводить підсумки оригінальних розробок автора в галузі кристалізації швидкоохолоджених сплавів, націлена на:

- ♦ розробку чисельних методів вимірювання швидкостей охолодження мікропроводів у скляній ізоляції та обумовлення теплофізичних аспектів їх формування;

- ♦ розробку методики вибору термодинамічних параметрів кристалізації та їх залежності від температури і зовнішнього тиску;

- ♦ аналіз рівнянь кристалізації та побудову алгоритму кристалізації крапель металу і мікропроводу;

- ♦ проведення обчислювальних дослідів з метою виявлення впливу геометричних розмірів зразків та швидкості охолодження на формування кінцевої структури;

- ♦ проведення обчислювальних дослідів з метою визначення умов формування та температурної стійкості аморфних сплавів;

- ♦ теоретичну побудову метастабільних і стабільних діаграм стану;

- ♦ експериментальні дослідження властивостей швидкоохолоджених речовин з метою перевірки теоретичних розробок;

- ♦ розробку методів вивчення фізико-механічних властивостей мікропроводів із врахуванням їх форми та розмірів.

Наукова новизна. Дисертаційна робота містить оригінальні результати, які можна вважати внеском автора в теорію нерівноважної кристалізації сплавів. Вони такі:

1. Розроблено метод визначення коефіцієнту тепловіддачі на межі "мікропровід - охолоджуюче середовище" залежно від

геометричних розмірів мікропроводу (товщини ізоляції та діаметра жири) і властивостей охолоджуючої речовини. Здобуто формулу для теоретичного визначення швидкості охолодження мікропроводу (МП). Показано вплив товщини ізоляції на швидкість охолодження МП. Одержано формулу для обчислення мінімального радіуса МП. Показано, що обмеження мінімального розміру жири та товщини ізоляції не дозволяють отримувати в мікропроводі надмірно великих швидкостей охолодження.

2. Побудовано модель кристалізації, засновану на принципі гомогенного зародження кристалів в умовах безперервного охолодження, та розроблено математичний апарат для її використання при вивченні процесу кристалізації крапель і мікропроводу. Застосування математичних методів моделювання дозволило пояснити розбіжності в структурах швидкоохолоджених крапель та плівок. Показано, що в краплях при швидкостях охолодження $10^3 - 10^{10}$ K/c можна отримати весь спектр структур: від монокристалічної до мікрокристалічної чи аморфної. Критичні швидкості охолодження, при яких змінюються структури, залежать від розмірів крапель. Показником зміни характеру структури є співвідношення швидкості виділення теплоти при кристалізації та швидкості тепловідводу теплоти.

3. Теоретично обумовлено можливість отримання у мікропроводі монокристалічної структури. Розроблені методи визначення параметрів кристалізації, які дозволяють в залежності від умов виробництва цілеспрямовано отримувати ті чи інші структури. Монокристалічні структури були отримані і досліджені в мікропроводах як із мідною жирию, так і з спелук на базі міді та нікелю.

4. Запропоновано модель зменшення в'язкості переохолоджених рідин при зростанні швидкості охолодження, що пояснює залежність релаксаційних процесів в аморфних сплавах від способу їх виготовлення.

5. Розроблено методика побудови стабільних та метастабільних діаграм стану сплавів, котра ґрунтується на напівемпіричній теорії Мієдеми. За допомогою цієї методики можна будувати діаграми сплавів, для яких дослідні методи не спрацьовують внаслідок різних експериментальних труднощів. Побудовано діаграми для ряду сплавів, які доводять, що підвищення тиску, при якому йде процес кристалізації, має такий же вплив на вигляд діаграми стану, як і підвищення швидкості охолодження.

6. Розроблено оригінальні методики дослідження фізичних властивостей мікропроводу. Сконструйовано і впроваджено в практику розривну машину для експресного вимірювання механічних властивостей МП. Розроблено методик вимірювань та визначення необхідної довжини зразка МП для механічних іспитів в залежності від геометричних параметрів проводу. Проведено експериментальні металографічні, рентгеноспектральні дослідження структури мікропроводу. Виявлено наявність дефектності структури та аксіальної текстури мікропроводу, що обумовлено самим методом виробництва. Дослідли електричних характеристик крапель та мікропроводу з сплавів на основі міді та нікелю показали наявність в структурі зон ближнього упорядкування, які найбільше виявляються в мікропроводах.

Практична цінність роботи. Наукова і практична цінність результатів полягає в поглибленні знань у галузі кристалізації металів та сплавів в умовах значного віддалення від стану рівно-

ваги; в появі нових можливостей у дослідженні структур та властивостей швидкоохолодженого мікропроводу. Методика дослідів має велике значення в умовах неможливості проведення експериментальних дослідів. Відпрацьована методика експресного аналізу електричних властивостей промислового мікропроводу, отримання практично нульового (10^{-6} К⁻¹) ТКО.

Особистий внесок автора. Автор безпосередньо брав участь у постановці задачі, в розробці і налагодженні пристроїв та установок для створення аморфних та швидкоохолоджених металів та сплавів, вимірюванні механічних властивостей мікропроводу, проведенні всіх дослідних робіт. Провів теоретичний пошук і отримав критерії для інтерпретації результатів роботи.

Основні наукові положення, що виносяться на захист.

1. Умови охолодження мікропроводу значно залежать від охолоджуючої рідини. При охолодженні в маслі коефіцієнт тепловіддачі практично не залежить від діаметра проводу. При охолодженні у воді зменшення діаметра жили веде до значного зростання коефіцієнту, який може досягти значень $\sim 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²с.

2. У процесі лиття мікропроводу в рідкому металі, який входить у капіляр, внаслідок різниці тиску утворюються капілярні хвилі. Коли амплітуда коливань часток металу досягає значень, рівних радіусу жили, тоді безперервний потік металу перетворюється в окремі краплі, що обмежує швидкість витягування мікропроводу і швидкість його охолодження.

3. В'язкість аморфного металу залежить від швидкості охолодження рідини під час отримання зразка, а структури швидкоохолоджених сплавів - від параметрів кристалізації.

4. Перехід від кристалічної структури до аморфної здійснюється через рентгено-аморфну структуру.

5. Зростання тиску при нерівноважній кристалізації спричиняє такий же вплив, як зростання швидкості охолодження. Діаграми стану при великих тисках, у багатьох випадках, споріднені з метастабільними діаграмами стану при значних швидкостях охолодження.

6. Методики досліджень фізичних властивостей мікропроводу мають право вважатися оригінальними.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи доповідались на Міжнародних конференціях: 12 Європейська конференція з кристалографії (Москва, 20-29 серпня 1989 р.); Композити (Москва, жовтень 1989); Всесоюзних конференціях з росту кристалів (Рига, 1987, 1990) та з питань кристалізації (Іжевськ, 1986, 1988); Міжнародній конференції "Евтектика-IV" (Дніпропетровськ, 1997).

Структура та обсяг дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота складається із вступу, 6 глав, загальних висновків, містить 150 сторінок з ілюстраціями та списком літератури.

Зміст роботи

Перший розділ. Проведено обговорення відомих з літератури положень, щодо структури рідини в переохолодженому стані. Властивістю рідини, яка визначає процеси перебудови структури при переохолодженні, є в'язкість. Велику увагу в літературному огляді займають питання зміни в'язкості та структурної релаксації. З огляду на мету роботи розглянуто теорію гомогенної кристалізації. Особлива увага приділяється питанням термодинаміки гомогенної кристалізації, важливим параметром якої є різниця вільної енергії (ΔG) в рідині та твердому стані. Розгля-

даються усі відомі рівняння для визначення ΔG . Обґрунтовується вибір формули для моделі, що розробляється.

З літератури відомо, що вірогідний процес формування зародка залежить від таких факторів як: температура, в'язкість, енергія активації процесу. Якщо кристалізацію подавлено, то формується особливий стан речовини - аморфний. До сих пір у літературі існують розбіжності відносно того, яким вважати аморфний стан в металах: суттєво аморфним, чи рентгено-аморфним. Аморфною речовина вважається тоді, коли в ній немає жодного кристаліка, навіть його зародка. При рентгено-аморфному стані в структурі металу присутні зародки кристаліків. Але внаслідок того, що їх розміри дуже малі, при рентгено-аморфних методах дослідження структур вони не "відчутні". Їх присутність можливо виявити лише по кінетиці кристалізації.

Значно менше статей, в порівнянні з присвяченими вивченню пливків та крапель, освітлюють питання кристалізації мікропроваду. Без глибокого теоретичного та дослідного обґрунтування наведені дані про наявність у МП монокристалічних блоків. Більш детально розроблені питання, пов'язані з виробництвом МП.

Відзначається, що зовсім неможливе пряме дослідження процесів, які мають місце в металах при швидкій кристалізації. Ось чому для вивчення процесів кристалізації у металах необхідно застосовувати методи математичного моделювання.

У другому розділі розглянуто моделювання процесів кристалізації. Значний матеріал підтверджує той факт, що при значних швидкостях охолодження практично не відбувається гетерогенного зародження кристалів. Зародки ж кристалів з'являються внаслідок флуктуацій в розплаві, тому запропонована модель ґрунтується на теорії гомогенного зародження. У цьому

випадку параметром, котрий в основному керує процесом кристалізації, є швидкість зародження центрів нової фази (1).

Для великих переохолоджень, що їх розглянуто в роботі, параметр I має вигляд

$$I = - \frac{K}{\eta(T)} \exp\left(-\frac{A_k}{kT}\right),$$

де A_k - робота по утворенню критичного зародка, K - предекспоненційний коефіцієнт, який дорівнює 10^{32} .

Зменшення швидкості обміну молекулами між розплавом та твердою фазою при збільшенні переохолодження оцінюється в'язкістю $\eta(T)$.

Кристалізація починається тієї миті, коли з'являється перший зародок; і температуру початку кристалізації визначає рівняння

$$IV\tau = 1,$$

де τ - час досліду, який залежить від швидкості охолодження.

Співвідношення між часом релаксації та часом досліду впливає на повноту молекулярних перетворень у рідині, а це, у свою чергу, - на в'язкість, яка може бути параметром кількісної характеристики цих перетворень. Якщо швидкість охолодження розплаву ще невелика, то час релаксації значно менший від часу досліду: у цьому випадку структурні перетворення у рідині встигають за зміною температури. Тоді для кількісного обчислення в'язкості доцільне використання формули Фулчера. В іншому випадку час досліду значно менший за час релаксації, і структурні перетворення не встигають за зміною температури. При низьких температурах фіксується структура, що відповідає більш високій температурі. З метою кількісної оцінки співвідношення часу досліду та релаксації в роботі була одержана формула для обчислення ефективного часу охолодження (τ_{eff}):

$$t_{ep} = \frac{\tau_i}{Q \left(d \ln \frac{\tau}{dT} \right)} \left[\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_i} \right],$$

де τ_i - час релаксації при температурі T_i , τ_0 - час релаксації при температурі плавлення.

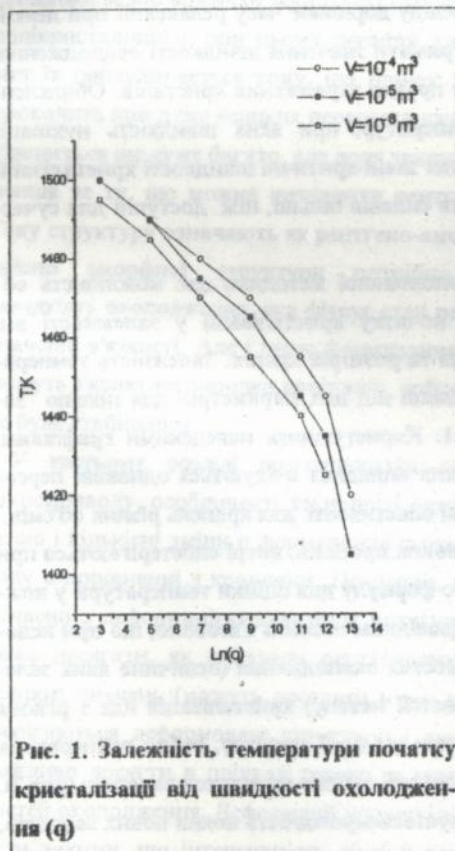


Рис. 1. Залежність температури початку кристалізації від швидкості охолодження (q)

Перехід рідини в склоподібний стан відбувається в інтервалі температур. Температурою аморфізації називають температуру, при якій температурні коефіцієнти властивостей, характерних для рідини та склоподібного стану, рівні. В роботі отримували температуру аморфізації за умов, коли час дослід дорівнює часу релаксації. Ця температура залежить від швидкості охолодження.

Розрахунки проводили для чистих металів Ni, Cu, Ga та сплавів $\text{Au}_{77}\text{Ge}_{13,6}\text{Si}_{9,4}$, $\text{Pd}_{30}\text{Si}_{20}$. Швидкість охолодження змінювали у широкому інтервалі від 10^3 до 10^{12} К/с. Отримані результати тісно корелюють з літературними.

Так, для нікелю при швидкості охолодження 10^3 K/c температура аморфізації дорівнює 450 °C, а при 10^{10} K/c - 540 °C; для сплаву $Au_{17}Ge_{13,6}Si_{9,4}$ при швидкості охолодження 10^3 K/c температура аморфізації 246 °C, а при 10^7 K/c - 270 °C.

За умови, що час досліду дорівнює часу релаксації при деякій температурі, можна отримати значення швидкості охолодження, при якій подавляється процес зародження кристалів. Обчислення проведені для температур, при яких швидкість нукліації найбільша. Отримані так звані критичні швидкості кристалізації для багатьох металів та сплавів більші, ніж доступні для сучасних технологій.

Використання запропонованої методики дає можливість обчислити температуру початку кристалізації у залежності від швидкості охолодження та розмірів краплі. Залежність температури початку кристалізації від цих параметрів для нікелю запропоновано на рис. 1. Користуючись наведеними графіками, можна обчислити, в яких випадках очікуються однакові переохолодження та однакові властивості для крапель різних об'ємів.

На базі балансу теплових процесів, котрі спостерігаються при кристалізації, одержано формулу для оцінки температури у кожний момент процесу. Дослідним шляхом з'ясовано, що при недостатньо великих швидкостях охолодження (величина яких залежить ще і від властивостей металу) кристалізація йде з різким підвищенням температури ще на її початку, тобто температура підвищується при виникненні одного чи кількох зародків (рис.2). При цьому різко зменшується вірогідність появи нових зародків, оскільки при цих переохолодженнях швидкість зародження дуже низька і нові зародки не встигають з'явитись за час кристалізації. Маса твердого металу твориться за рахунок росту вже сформованих кристаліків, структура, отримана за цих об-

ставин є монокристаліною, або крупнокристалічною. При збільшенні швидкості охолодження на останніх етапах кристалізації, оскільки ступень підвищення температури зменшується, вірогідна поява нових зародків. При цьому може реалізуватися структура так звана монокристаліна з полікристалічною кромкою. Зі збільшенням швидкості охолодження структура стає полікристалічною, при цьому розміри кристалів зменшуються, ріст їх припиняється тому, що процес зародження кристалів проходить при дуже великих переохолодженнях (рис. 3) Зародків з'являється ще дуже багато, але доля закристалізованої речовини менша за ту, що можна визначити рентгенівськими методами. Таку структуру означають як рентгено-аморфну. Для отримання дійсно аморфної структури потрібно значно збільшити швидкість охолодження, яка фіксує стан речовини при меншому значенні в'язкості. Але і після формування аморфного стану ще можуть з'являтися зародки кристалів, тобто такий стан речовини не буде стабільним.

У третьому розділі розглядаються питання кристалізації мікропроводу, особливості технології одержання якого вносять якісні і кількісні зміни в формування структури жили мікропроводу в порівнянні з краплями. По-перше, кристалізація йде одночасно з деформацією внаслідок витягування. Ця деформація може досягати, як показали рентгеноструктурні дослідження, великих значень (можуть досягати межі міцності). У МП спостерігаються деформовані структури і такі явища, котрих неможливо досягти в шівках такого ж складу ні за яких швидкостей охолодження. Деформації у кристалічній решітці можуть бути такими, що інтенсивність ліній з великими індексами на рентгенограмах зменшується аж до повного їх зникнення. Технологія МП не дозволяє отримувати тонку жилу при малій тов-

щині ізоляції, а це зменшує швидкість охолодження. Тому можливе отримувати однакову структуру як у тонких, так у товстих МП, але з більш тонкою скляною ізоляцією.

Основу математичної моделі кристалізації мікропровода складає припущення, що метал більш інтенсивно віддає тепло крізь бічну поверхню, ніж іншим порціям металу. Тому жила розбивається на порції, розміри яких залежать від швидкості втягування та охолодження. У тій порції металу, яка першою досягла температури кристалізації, з'являється і перший кристал. Якщо тепловідвід не встигає за швидкістю виділення тепла кристалізації, то температура збільшується і кристалізація проходить за рахунок зростання цього зародка. Одночасно в інших об'ємах можливе формування умов для виникнення інших кристалів. Тоді структура МП виглядає подібно до кладки цеглин. Розміри цеглинок достатньо великі, тому на рентенограмах з'являються еліпси, характерні для монокристалічних структур. Умовно цю структуру названо квазімонокристалічною.

Аморфну структуру в МП отримати, з одного боку, значно важче, тому що швидкості охолодження в цьому випадку значно менші порівняно з краплями та півками, але зростання переохолодження при кристалізації МП на аморфній скляній ізоляції, з іншого боку, сприяє процесу аморфізації.

У четвертому розділі наведені результати, отримані при теоретичних обчисленнях діаграм стану за допомогою EOM.

В останні роки поширився інтерес до теоретичних розрахунків діаграм стану. Розрахунки в роботі ґрунтуються на методі Кауфмана і Бернштейна, де енергія Гібса змішування сплавів обчислюється в приближенні регулярних розчинів. При цьому обчислюються параметри взаємодії у твердих та рідких фазах.

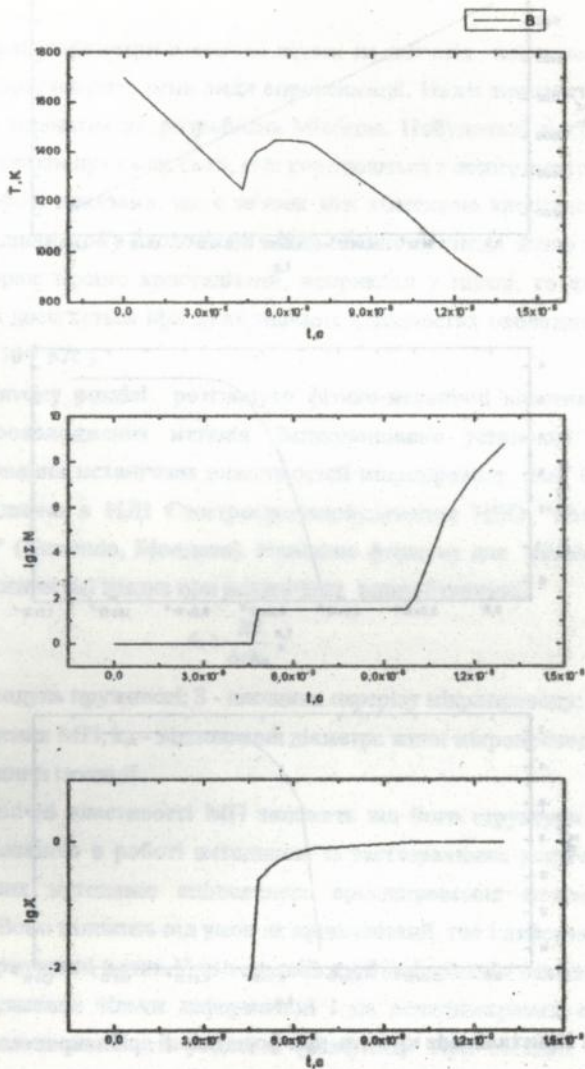


Рис 2. Кристалізація крапель при формуванні монокристалічної структури

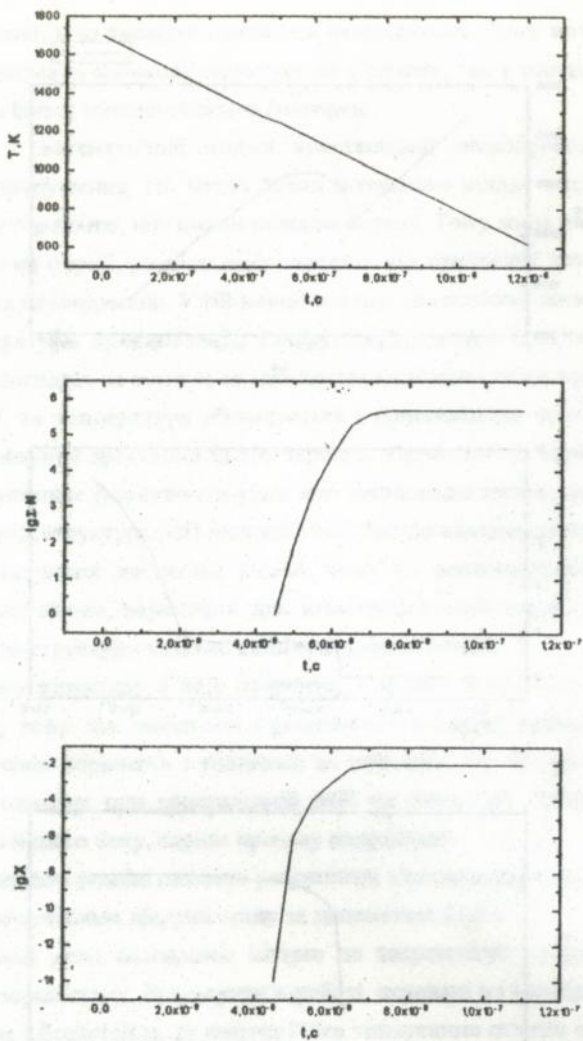


Рис 3. Кристалізація крапель при формуванні дрібнокристалічної структури

Оскільки параметри взаємодії відомі не для всіх компонентів, то використовують різні види апроксимації. Нами використовувалась апроксимація, розроблена Miedema. Побудовані діаграми стану для сполук Cu-Pb , Cu-Cr , Al-Vi корелюються з експериментом.

В роботі показано, що є зв'язок між кінетикою кристалізації при надшвидкому охолодженні і підвищеному тиску. Якщо тиск прискорює процес кристалізації, наприклад у нікелі, то аморфізація досягається при дуже значних швидкостях охолодження ($10^{10} - 10^{12}$ K/c).

У п'ятому розділі розглянуто фізико-механічні властивості швидкоохолоджених металів. Запропоновано установку для вимірювання механічних властивостей мікропроводу, яка була впроваджена в НДІ Електроприладобудування НВО "Мікропровід" (Кишинів, Молдова). Наведено формулу для мінімальної довжини (l_0) зразка при механічних випробуваннях:

$$l_0 \geq \frac{ES}{\Delta \sigma k_m},$$

де E - модуль пружності; S - площа перерізу мікропроводу; Δl - видовження МП; k_m - відношення діаметра жили мікропроводу до товщини ізоляції.

Механічні властивості МП залежать від його структури. За запропонованою в роботі методикою із застосуванням рентгенографічних методів оцінювалось орієнтування монокристалів. Воно залежить від умов як кристалізації, так і деформації при формуванні жили. При товстій жилі деформація невелика, тому кристали тільки деформовані і на рентгенограмах спостерігаються витягнуті рефлекси (астеризм). При більших деформаціях, які характерні для тонких МП, коли напруження перевищує межу міцності металу, на рентгенограмах замість астеризма спостерігаються точкові рефлекси. Орієнтація кристалів

має суттєвий вплив і на механічні властивості МП. Так, при орієнтації кристалів в квазімонокристалній структурі [111] відносно вісі МП на діаграмах "деформація - напруга" можна розпізнати три стадії, які мають різні коефіцієнти зміцнення. Більшість МП розриваються після пружної деформації, але МП з жилкою на основі Cu-Ni має елементи пластичної деформації. Результати дослідів свідчать, що пружність та міцність МП залежить від багатьох факторів: складу, технології отримання та швидкості охолодження. Зі збільшенням швидкості витягування переріз жили зменшується, при цьому зростає кількість дефектів кристалічної решітки, МП стає більш міцнішим і менш пружним. На механічні властивості жили має вплив скляна ізоляція внаслідок різниці температурних коефіцієнтів розширення металу та скла.

Від властивостей МП залежить форма кривої на графіках деформації. Для тонкого МП крива розтягу обривається різко - розрив крихкий. При великій товщині - пластична деформація передує розриву.

На кривих "електроопір - температура" промислового МП Ni-St-Si в області 350-600 °C опір різко зростає. Така поведінка кривої викликана утворенням в структурі металу зон близького упорядкування. Рентгеноструктурні досліді підтвердили утворення близького упорядкування в мікропроводах на основі нікель-мідь. У плівках того ж складу хід кривих аналогічний, але ступінь зростання опору значно менший. Це можна пояснити особливими умовами кристалізації МП, а саме: значні деформації в процесі формування структури мікропроводу в порівнянні з плівками.

Відпал МП і плівок значно змінює їх властивості. Це можна пояснити тим, що в процесі операції зменшується кількість де-

фектів і напруженість між скляною ізоляцією та жилою. Сильніше змінюються властивості аморфних зразків після відпалу. У роботі було проведено моделювання змін в структурі аморфних металів після відпалу. Бралося до уваги той факт, що в аморфній матриці можуть бути і заморожені кристали. Визначено, що на структурні перетворення має вплив і швидкість нагріву. Так, при швидкості нагріву $\geq 10^{-2}$ К/с кристалізація при температурах, нижчих за T_g не починається, при менших швидкостях нагріву кристалізація відбувається при більш низьких температурах, зріст кристалів уповільнений. Кількість кристалів та їх розмір менші, ніж при швидкості 10^{-3} К/с.

При наявності в аморфній матриці заморожених кристалів зріст останніх починається при температурах, значно менших, ніж температура кристалізації при гомогенному зародженні. При меншій швидкості нагріву доля закристалізованої речовини досягає 10^{-6} .

При звичайних швидкостях охолодження для виготовлення аморфних металів неможливо повністю подавити формування зародків кристалів. Заморожені кристали є ефективними центрами росту кристалічної фази при нагріві. Чим більша швидкість нагріву, тим при більш високих температурах починається кристалізація. При достатньо великих швидкостях нагріву спостерігається вибухова кристалізація.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Побудовано метод чисельних досліджень процесів кристалізації крапель та мікропроводу в умовах надшвидкого охолодження. Запропонований алгоритм розв'язання кінетичних рівнянь гомогенної кристалізації враховує співвідношення швидкості зміни температури і швидкості перебудови структури. Метод математичного моделювання процесів кри-

сталізації дозволяє отримати інформацію про структуру швидкоохолоджених об'єктів в залежності від розмірів та швидкості охолодження. Показано, що, контролюючи ці параметри, можна одержувати широкий спектр структур від монокристалічної до полікристалічної, дрібнокристалічної або аморфної. Розроблений метод дозволяє розраховувати критичні швидкості охолодження для отримання необхідних структур і оцінити процеси, котрі відбуваються при відпалі аморфних структур, визначити робочу температуру аморфного сплаву, при якій структура буде найбільш стабільною.

2. Розроблено методики експериментальних досліджень МП, а саме: рентгеноструктурні, електричні та механічні випробування. Проведені дослідження виявили можливості отримання в МП усього спектра структур, характерних для швидкоохолоджених металів. Вперше в роботах автора знайшли експериментальне підтвердження монокристалічної структури в МП, яким дається належне пояснення.

3. Встановлено, що в МП електричні властивості можуть пояснюватися наявністю мікрообластей із структурою, суттєво відмінною від середньостатистичної. Це положення підтверджують рентгеноструктурні дослідження.

4. Результати розробок знайшли відображення в методах побудови стабільних та метастабільних діаграм стану. Показано відповідність кінетичних характеристик кристалізації при великих переохолодженнях та високому зовнішньому тиску.

5. Результати досліджень знайшли практичне застосування в одержанні нових сплавів для мікропроводу та розробці оригінального устаткування для механічних дослідів МП.

Публікації. Основні результати роботи викладено у статтях:

1. А.с. 989891. Сплав на основе кобальта для микропроводов с аморфной жилой / В.Ф. Башев, З.В. Баллок, В.С. Ларин, И.С. Мирошниченко, Г.А. Сергеев // Открытие. Изобретение. - 1982. - № 34.

2. А.с. 962328, СССР. Сплав на основе железа / В.Ф. Башев, И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок, Ю.К. Покровский // Открытие. Изобретение. - 1982. - № 36.

3. Выбор расчетной длины образца при механических испытаниях микропровода / И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок, А.Л. Злацин // Заводская лаборатория. 1980. № 2. С. 158-159.

4. Деформационное упрочнение и особенности разрушения микропровода. Баллок З.В. // в кн. Физика разрушения. К., 1980. С. 285-286.

5. Текстура и механические свойства медного микропровода. / И.С. Мирошниченко, Т.И. Анищенко, З.В. Баллок // Вопросы формирования метастабильных структур. Днепропетровск, 1981. С. 89-95.

6. Анищенко Т.И., Баллок З.В. Структура и свойства литого микропровода. // Там же. 1982. С.98-102.

7. Температурная устойчивость и свойства литого микропровода с аморфной жилой / В.Ф. Башев, В.И. Заборовский, В.С. Ларин, И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок // Структура аморфных металлических сплавов. М.: МИСиС., 1980. С. 26.

8. Влияние скорости охлаждения на фазовый состав сплавов / В.Ф. Башев, И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок // Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. Днепропетровск, 1986. С. 11.

9. Баллок З.В. К расчету критического радиуса литого микропровода // Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов. Днепропетровск, 1983. С. 103-109.

10. Баллок З.В. Изучение процессов теплообмена при охлаждении микропровода. // Там же, 1985. С. 65-68.

11. Анищенко Т.И., Баллок З.В. Монокристалльная структура медных проводов // Там же. С. 148-152.

12. О переохлаждении жилы микропровода в процессе вытягивания / И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок, Г.Д. Майданюк // Там же, 1987. С. 46-49.

13. Рентгеноструктурные исследования литых микропроводов / И.С. Мирошниченко, Т.И. Анищенко, З.В. Баллок // Тез. II совещ. по Всесоюз. комплекс. программе "Рентген". Черновцы - Ереван, 1987, С. 268-269.

14. Кинетика структурообразования в металлах при больших скоростях охлаждения / З.В. Баллок, И.С. Мирошниченко, А.А. Якунин // Моделирование роста кристаллов. Рига, 1987. С. 112.

15. Кристаллизация малых капель при больших скоростях охлаждения / И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок, Т.М. Мальченко // Проблемы промышленной кристаллизации и компьютерное моделирование металлургических технологий. Ижевск, 1988. С. 43.

16. Моделирование структуры литого микропровода / И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок, П.В. Чалов // Структура и свойства быстроохлажденных сплавов. Днепропетровск, 1988. С. 94-98.

17. Определение условий аморфизации при непрерывном охлаждении расплава / И.С. Мирошниченко, З.В. Баллок, Г.И. Мирошниченко // Проблемы исследования структуры аморфных металлических сплавов. М., 1988. С. 17.

18. Miroshnichenko I.S., Baluyk-Z.V. Influence of cooling rates on the kinetics of crystallization and forming of amorphous

structure. // Twelfth European Crystallographic Meeting. Collected abstracts. M., 1989. P. 297.

19. Моделирование процессов кристаллизации быстроохлажденных сплавов / И.С. Мирошниченко, Т.И. Анищенко, З.В. Балюк, Г.А. Сергеев // Проблемы исследования структуры аморфных материалов. Ижевск, 1992. С. 13.

20. Физико-химические свойства аморфных сплавов на основе железа / З.В. Балюк, Т.И. Анищенко, Л.С. Слипченко, // Там же. С. 16.

21. Cast microwire: It's structure and properties / T. I. Anishchenko, Z. V. Balyuk, I. S. Miroshnichenko. // Moscow International Composites Conference. London, 1990. P. 625-629.

22. Анищенко Т.И. Балюк З.В. Особенности структуры меди, полученной различными способами // Изв. вузов. Физика. 1992. N2. С. 77.

23. Анищенко Т.И., Балюк З.В. Кинетика образования замороженных кристаллов и их влияние на процессы кристаллизации аморфных сплавов. // Аморфные прецизионные сплавы. М., 1991. С. 32.

24. Зависимость температуры стеклования от скорости охлаждения расплава / Т.И. Анищенко, З.В. Балюк, Г.А. Сергеев // Сучасні проблеми фізики: Матер. міжвуз. наук. практик. конф. Дніпропетровськ, 1996. С. 13.

25. Балюк З.В., Башев В.Ф. Влияние скорости охлаждения на структурную релаксацию аморфных сплавов // Материалы 3-й Межд. конф. Физические явления в твердых телах. 1997. С.161.

АННОТАЦИЯ

Балюк З.В. Моделирование, исследование механизма сверхскоростной кристаллизации на кристаллических и стеклопо-

добных подложках и фазово-структурных особенностей литого микропровода. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, Днепропетровский государственный университет. Днепропетровск, 1997.

Защищаются 32 научные работы, содержащие результаты исследований процессов кристаллизации металлов и сплавов при различных скоростях охлаждения и условиях получения, а также физико-механических свойств быстроохлажденных пленок и микропроводов в стеклянной изоляции (МИ): Построена математическая модель кристаллизации, которая позволила доказать возможность получения в закаленных из жидкого состояния материалах различных структур от монокристаллической до аморфной в зависимости от технологии получения образцов. Получены формулы для вычисления минимального радиуса микропровода и критических скоростей охлаждения для получения различных структур.

Baluik Z.V. Modeling, investigation of mechanism of superhigh-speed crystallization on the crystalline and similar glassy substrates and phase-structural features of the cast microwire.

Thesis on search of the scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.07 - solid state physics. Dnepropetrovsk State University, Dnepropetrovsk, 1997.

32 scientific works are presented for defense containing the results of the investigation on processes of crystallization metals and alloys under various speed of cooling. It is proved by the possibility of receipt monocrystalline and other structures in microwire and films.

Ключові слова Мікропровід, гомогенна кристалізація, моделювання, аморфна, квазімонокристалічна структура, зародження кристалів, діаграма стану.

1852

AV 38.238