

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний

(повне найменування інституту, факультету)

Фізичне матеріалознавство

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження впливу поверхневоактивних
домішок на енергетичні характеристики високочистого
нікелю.

Виконав: студент(ка) _____ курсу, групи Фз-219м.

Спеціальності 132 матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство
Ілюпа О.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Вальчонецький В.Ю.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Скрібцов А.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інженерно фізичний
Кафедра Фізичного матеріалознавства
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 132 матеріалознавство
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« 16 » грудня 20 20 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Ілюпа Оксана Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Вивив форми применових виділень втаринних фоз на відносно лімфазну енергію

керівник проєкту (роботи) В.Ю. Омишанецький,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « » 20 року №

2. Строк подання студентом проєкту (роботи)

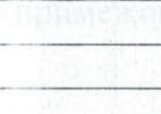
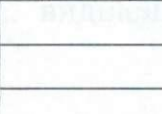
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) ліній зерен, малакутова границя, багатокривна границя, нікелеві сплави, мікрорелієф гострих жароміцності, мікроелектроніка

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) лінійний огляд, матеріали і методи досліджень, результати досліджень і їх аналіз, охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях, висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Форма перерізів гострих применових виділень із криволінійних лінійних мен, нормальний переріз рівновісного лінійного зерна, третины перерізу одного з варіантів симетричного виділення надлишкової фази

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	Ольшанецкий В.Ю.		
4	Нестеров А.В.		
Н.К.	Мкоя Д.В., Климов С.В.		

7. Дата видачі завдання « _____ » _____ 20 _____ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1.	Резерват, літературний огляд, зв'язок геометричної форми прикладних властивостей надвисокої фази із великою відносною різноманітністю енергії.	28.09.20 - 20.10.20	
2.	Матеріали і методи досліджень, схеми та устрій МІМ-8	25.10.20 - 17.11.20	
3.	Результати досліджень і їх аналіз.	20.11.20 - 27.11.20	
4.	Оцінка проєкту та безпека в надзвичайних ситуаціях, аналіз потенційних небезпек.	20.11.20 - 16.12.20.	

Студент(ка)


(підпис)

Ольшанецкий В.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Ольшанецкий В.Ю.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 92 с., 32 рис., 2 табл., 50 джерел.

Об'єкт дослідження: примежові виділення вторинних фаз.

Мета роботи: визначення впливу форми примежових виділень вторинних фаз на відносну міжфазну енергію.

В ході виконання дипломної роботи було досліджено межі зерен як один із дефектів кристалічної будови. Визначено, що аналіз статистичних наборів характеристик дає прямий, а отже, дуже цінний метод визначення середнього значення відносної вільної енергії (відносного натягу) міжфазної межі. Також, було досліджено аналітичні методики оцінки відносної міжфазної енергії для моделей примежових виділень надлишкової фази із прямими та зігнутими межами поділу. Вивчено устрій та принцип роботи мікроскопів МИМ-8 та растрового електронного мікроскопу.

Було визначено аномальну характеристику впливу лантаноїдів на зерномежову енергію і рушійну силу міграції меж в нікелі та залізі підвищеної чистоти, а також вплив ітрію та лантаноїдів на відносну зерномежову енергію.

МЕЖІ ЗЕРЕН; МАЛОКУТОВА ГРАНИЦЯ; БАГАТОКУТОВА ГРАНИЦЯ; НІКЕЛІВІ СПЛАВИ; МОРФОЛОГІЯ ЧАСТИНОК; ЖАРОМІЦНІСТЬ; МІКРОЛЕГУВАННЯ

Зміст

Вступ	6
1 Літературний огляд	7
1.1 Зв'язок геометричної форми примежових частинок надлишкової фази із величиною відносної міжфазної енергії	7
1.2 Аналітична оцінка відносної міжфазної енергії для моделей примежових виділень надлишкової фази із зігнутими межами поділу	17
2 Матеріали і методи досліджень	25
2.1 Схема та устрій MIM-8	25
2.2 Схема та устрій растрового електронного мікроскопа	27
3 Результати досліджень і їх аналіз	30
3.1 Аномальна характеристика впливу лантаноїдів на зерномежову енергію і рушійну силу міграції меж в нікелі та залізі підвищеної чистоти	30
3.2 Мікролегування ітрієм та лантаноїди для покращення структурного стану меж зерен	46
4 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	58
4.1 Аналіз потенційних небезпек	58
4.2 Заходи по забезпеченню безпеки працівників	58
4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	64
4.4. Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях	68
Висновки	71
Список використаних джерел	72
ДОДАТОК А	78

Вступ

Границею зерен, а також субзерен називають поверхню, від якої з обох сторін кристалічні ґратки відрізняються просторовою орієнтацією. Ця поверхня є двовірним дефектом, який має макроскопічні розміри в двох вимірах та атомні – в третьому вимірі. Двовірний дефект може бути плоским.

Взаємну орієнтацію ґраток сусідніх зерен часто характеризують, указуючи спільний для обох зерен кристалографічний напрямок (uvw) та кут повороту θ навколо нього, що приводить до паралельності ґраток сусідніх зерен. Відповідна умовна форма запису: $\theta(uvw)$. Якщо вісь обертання лежить в площині границі зерен (субзерен), то таку границю називають границею нахилу, а якщо вісь обертання перпендикулярна площині границі, то має місце границя кручення. У деяких загальних випадках границя змішаного типу складається із елементів і нахилу, і кручення. Границі з орієнтацією сусідніх зерен менше $\sim 10^\circ$ відносять до малокутових, а з більшою розорієнтацією – до висококутових (великокутових).

1. Літературний огляд

1.1 Зв'язок геометричної форми примежових частинок надлишкової фази із величиною відносної міжфазної енергії [1]

Сміт [2] вперше вказав на чіткий функціональний зв'язок форми примежових частинок, що розташовані в подвійних і потрійних стиках зерен основної фази, із зерномежевою і міжфазною енергіями (натягами) меж поділу. При цьому конкретна форма певного типу частинок (рис. 1.1) визначається величиною двогранного кута в стику двох суміжних зерен матриці виділенням примежової фази, що характеризується криволінійними (у перерізі) межами, відповідно до виразу

$$\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \frac{1}{2 \cos \frac{\theta}{2}}, \quad (1)$$

де $\gamma^{ij}(\bar{\gamma}^{ij})$ – міжфазна енергія (натяг) на межі матриця-виділення; $\gamma^{ii}(\bar{\gamma}^{ii})$ – міжзеренна енергія або натяг на межі поділу матриця-матриця; θ – рівноважний двогранний кут. Відношення $\gamma^{ij}/\gamma^{ii} = \gamma_{\text{вмф}}$ уявляє по суті безрозмірну енергетичну характеристику (відносну міжфазну вільну енергію). Енергією порівняння в цьому випадку є вільна зерномежева енергія.

Аналіз статистичних наборів таких характеристик дає прямий, а отже, дуже цінний метод визначення середнього значення відносної вільної енергії (відносного натягу) міжфазної межі. При цьому рівноважний двогранний кут вимірюється або в одному із стиків зерна виділення, що лежить на ділянці межі матриця-матриця, або в одному з симетричних стиків виділеного з

матриці зерна, розташованого в потрібному граничному вузлі (точці сходження трьох меж матриці).

Методика і результати такого визначення відносної міжфазної енергії викладені в роботі [3]. У цій же роботі, а також в роботах [4-7] наводяться ще і конкретні дані про вплив легувальних і мікролегувальних елементів на характер зміни обговорюваного енергетичного параметра для меж поділу цементит-ферит, цементит-аустеніт, ферит-аустеніт і, нарешті, карбід-нікельхромовий твердий розчин.

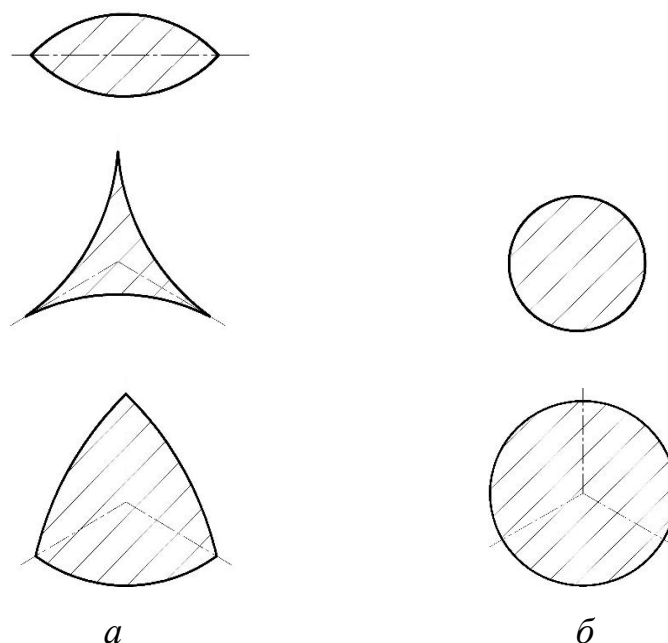


Рисунок 1.1 – Форма перерізів частинок примежових виділень із криволінійними міжфазними межами: *а* – реальний випадок: рівноважний двогранний кут менший за 180° ; *б* – умовна ситуація при рівноважному куті, що максимально наближений до 180°

Вплив елементів на відносну міжфазну енергію і через неї на морфологічний вигляд примежових виділень можна оцінювати за їх пороговими значеннями. Так, якщо $\gamma_{\text{вмф}} \leq 1/2$, то $\theta = 0^\circ$, і примежові виділення уявляють собою безперервну (монолітну) сітку, яка оточує зерна

основної фази. Якщо ж $1/2 < \gamma_{\text{вмф}} \leq 1/\sqrt{3}$ то $0^\circ < \theta \leq 60^\circ$, що вже свідчить про ізольовані виділення, які мають достатньо гострі краї (у перерізі). У разі, якщо $1/\sqrt{3} < \gamma_{\text{вмф}} \leq 1/\sqrt{2}$, двогранний кут відповідає нерівності $60^\circ < \theta \leq 90^\circ$, і виділення набувають достатньо компактної форми, яка наближена до сфероїдальної. І, нарешті, при $1/2 < \gamma_{\text{вмф}} \leq 1$ значення двогранних кутів задовольняють нерівності $90^\circ < \theta \leq 120^\circ$. В цьому випадку, що реалізується практично лише для виділень, що розташовані в потрійних стиках зерен матричної фази, ми вже стикаємося зі сфероїдальними частинками надлишкової фази. Мабуть, нерівність $\gamma_{\text{вмф}} > 1$ не відповідає реальній картині, оскільки з модельних уявлень (кращий ступінь «припасування» атомів на межі поділу матриця-фаза виділення, ніж на міжзеренній межі [126]). Міжзеренна енергія γ^{ii} завжди повинна перевищувати енергію міжфазної межі (γ^{ij}) для одного і того ж виду матричної фази.

Вказані вище порогові значення були використані в роботах [3, 4, 8], в яких встановлені групи елементів, що сприяють створенню (або посиленню) термодинамічного стимулу до диференціації (дроблення) і подальшої сфероїдизації виділень сіткового типу, або, навпаки, до стабілізації початкової сітки (аж до «розтікання» по граничній поверхні компактних (через їх генезис) виділеннях надлишкової фази).

Співвідношення (1) може бути легко отримане із механічного принципу віртуальних переміщень [9] і є абсолютно точним для однофазної або гетерофазної структури, якщо лише межі поділу характеризуються простою геометрією. Наприклад, відрізки меж між стиками зерен мають в перерізі мінімальну протяжність, тобто є нічим іншим, як прямими лініями. Твердження Сміта про застосовність виразу (1) до стиків зерен із криволінійними межами має апіорний характер, оскільки безпосередньо не витікає з вказаного вище принципу і тому, природно, потребує доведення. Отже, достатньо важливе значення набуває необхідність з'ясувати наскільки взагалі справедлива оцінка середньої величини відносної міжфазної енергії за

формулою (1), особливо, з урахуванням специфічних особливостей геометрії меж включень (в останньому випадку мова йде вже про коректність самого підходу до проведення такої оцінки аналітичним методом при заздалегідь відомому середньому значенні величини рівноважного двогранного кута θ).

Нижче буде показана цілковита правомірність такої постановки питання при переході від звичайних прямолінійних моделей, а також моделей лінзовидного типу (на міжзеренних межах) або променево-компактного типу (у потрійних стиках матричних меж) до більш складних за формою геометричних конфігурацій меж в стиках зерна виділення із двома або трьома зернами матричної фази.

Для обґрунтування справедливості тих або інших аналітичних оцінок відносної міжфазної енергії використаємо чисто енергетичний підхід [10]. Спочатку покажемо правомірність співвідношення (1) для надлишкових частинок, що оконтурені (у перерізі) круговими дугами (ситуація, що є характерною для рідких включень іншої фази). Випадок, який ми розглядатимемо, в плані постановки питання є найменш очевидним, оскільки мова йде про встановлення середніх значень $\gamma_{\text{вмф}}$ для ізольованих частинок твердої надлишкової фази, що розподілені по межах зерен матриці при стійкій термодинамічній рівновазі в цій гетерогенній системі.

Отже, нехай на ділянці межі матриця-матриця розташовується лінзоподібне зерно фази виділення (найпростіша структурна ситуація). Цілком очевидно, що таке зерно повинне складатися з двох дотичних по площині межі сферичних сегментів. Проведемо подвійний переріз зерна площинами, які є нормальними до площини межі та розташовані одна від одної на нескінченно малій відстані Δx . Тоді тонкий вирізаний шар зерна виділення матиме вигляд, представлений на рис. 1.2.

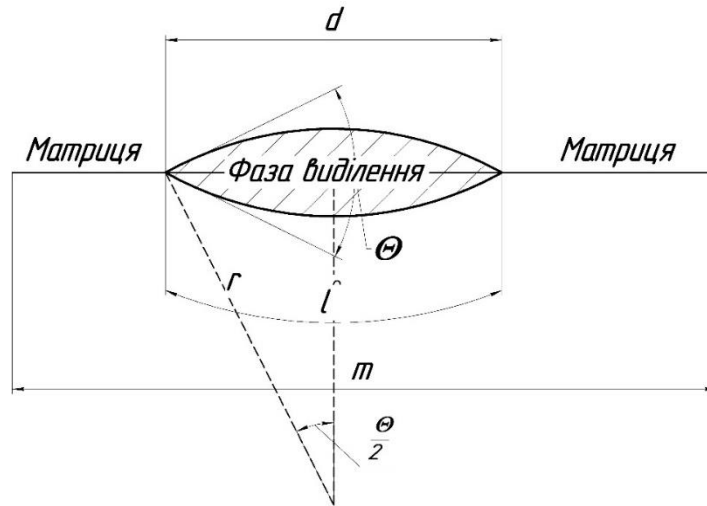


Рисунок 1.2 – Нормальний переріз рівновісного лінзовидного зерна виділення

Об'єм цього шару $\Delta V_{\text{л}} = S_{\text{л}} \cdot \Delta x$, де $S_{\text{л}}$ – площа перетину лінзовидного виділення. Максимальну хорду перерізу «лінзи» $d(\theta)$ виразимо через двогранний кут θ і радіус кривини $r(\theta)$:

$$d(\theta) = 2r(\theta) \sin \frac{\theta}{2}. \quad (2)$$

Площа перерізу, як неважко показати, має вигляд

$$S_{\text{л}} = r^2(\theta)(\theta - \sin \theta). \quad (3)$$

На підставі (2) і (3) запишемо

$$d(\theta) = 2 \sqrt{\frac{S_{\text{л}}}{\theta - \sin \theta}} \cdot \sin \frac{\theta}{2}. \quad (4)$$

Для напівпериметра перерізу «лінзи» тепер легко отримати такий вираз:

$$\ell(\theta) = \theta \cdot r(\theta) = \theta \sqrt{\frac{S_{\text{л}}}{\theta - \sin \theta}}. \quad (5)$$

Прийmemo, що встановлення рівноважної форми примежового виділення надлишкової фази відбувається шляхом стягнення його уздовж контуру межі матриці (двогранний кут при цьому збільшується). У реальних умовах така картина зазвичай і спостерігається, оскільки початковою

нерівноважною формою виділень найчастіше виступають лінійні примежові прошарки у вигляді сітки.

Розглянемо кожне окреме виділення як самостійну підсистему, термодинамічний стан якої відображає і стан всієї системи в цілому. При цьому слід мати на увазі, що в процесі стягнення виділення оголюється ділянка межі матричної фази, вільну енергію якої необхідно обов'язково враховувати при проведенні загальної оцінки термодинамічної ситуації.

Тоді сумарна поверхнева енергія для стягненого тонкого шару лінзовидного виділення і вільної ділянки межі матриці, що при цьому утворилася, може бути представлена такою функцією двогранного кута θ :

$$Y(\theta) = \{[m - d(\theta)]\gamma^{ii} + 2\ell(\theta)\gamma^{ij}\}\Delta x, \quad (6)$$

де m – початкова протяжність перерізу лінзовидного виділення уздовж лінії межі матриці; γ^{ii} і γ^{ij} – як і раніше питомі поверхневі енергії меж матриця-матриця і матриця-фаза виділення.

Простий аналіз показує, що функція $Y(\theta)$ має максимум. Мінімізація цієї функції по суті відображає отримання умови метастабільної механічної рівноваги в термодинамічній системі з внутрішніми межами поділу (тобто умови рівноваги, коли $dV_d = 0$). Надалі відбувається поступове вирівнювання парціальних хімічних потенціалів компонентів в матриці і фазі виділення, що забезпечує встановлення хімічної, а разом з нею і повної рівноваги в системі. При цьому має місце часткове розчинення виділення в матриці без порушення його геометричної форми. Проте, нічого не зміниться, якщо формально прийняти, що хімічна рівновага встановлена заздалегідь. Отже, мінімізуючи функцію $Y(\theta)$ після підстановки в (6) виразів (4) і (5), отримаємо для випадку рівноваги рівність

$$\frac{dY(\theta)}{d\theta} = 0 = \frac{2\gamma^{ij}\left(\theta - \sin\theta - \theta\sin^2\frac{\theta}{2}\right) + \gamma^{ij}\left[2\sin^2\frac{\theta}{2} - \cos\frac{\theta}{2}(\theta - \sin\theta)\right]}{2\sqrt{(\theta - \sin\theta)^3}} =$$

$$\frac{\left(\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{\theta}{2}\right)\left(\gamma^{ij} - 2\gamma^{ij}\cos\frac{\theta}{2}\right)}{\sqrt{(\theta - \sin\theta)^3}}.$$

(7)

При цьому будемо вважати, що $S_{\text{л}} = \text{const}$ і $\Delta x = \text{const}$.

З (7) після скорочення, угруповання членів і нескладних перетворень остаточно маємо (в том числі і для $\theta = 0^\circ$)

$$\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \gamma_{\text{вмф}} = \frac{1}{2\cos\frac{\theta}{2}}.$$

Відзначимо, що при $\theta = 0^\circ$ з виду співвідношення (7) одразу не виходить, що $\gamma^{ii} - 2\gamma^{ij} = 0$, оскільки решта членів цього виразу перетворюється

на нуль. Для розкриття невизначеності у виразі виду $\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{\theta}{2}}{\sqrt{(\theta - \sin\theta)^3}}$

застосуємо правило Лопіталю. Після диференціювання чисельника і знаменника отримаємо значення дробу, яке вже відмінне від відношення нулів. Таким чином, і при $\theta = 0^\circ$ повинна виконуватися тотожність $\gamma^{ii} \equiv 2\gamma^{ij}$, бо інакше порушується умова (7).

Отже, якщо контур нормального перерізу виділення, що розташоване на межі поділу двох зерен, складається з кругових дуг (тобто має мінімальну довжину) при фіксованому значенні площі перерізу виділення в процесі його стягнення, то вираз для відносної вільної енергії за формою аналогічний співвідношенню (1), отриманому за допомогою методу віртуальних переміщень.

Тепер розглянемо більш складний випадок, коли виділення із контуром, що складається з кругових дуг, розташовується в симетричному

стику трьох меж матриці (кожні дві межі формують 120° двограний кут). Відповідне зображення можливих перерізів таких виділень показано на рис. 1.3, а на рис. 1.4 зображено третину перерізу одного з варіантів виділення надлишкової фази.

Нехай S_b – площа третини перерізу симетричного виділення, що розташоване в потрібному граничному вузлі. Легко бачити, що

$$S_b = S_{\Delta ABC} \pm S_{Al(l')C}$$

(S_{Δ} і $S_{\cap}$ – площі трикутника і кругового сегмента відповідно). Далі,

$$S_{\Delta ABC} = \frac{\sqrt{3}}{4} a^2 = \frac{\sqrt{3}}{3} r^2 \sin^2 d \quad (\text{оскільки} \quad \frac{d}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} a = r \sin \alpha), \quad \text{а}$$

$$S_{\cap} = \frac{1}{2} r^2 (2\alpha - \sin 2\alpha) \quad (\text{при } \alpha > 0 \text{ або } \alpha < 0 \text{ і } r > 0 \text{ або } r < 0). \quad \text{Таким чином, маємо}$$

$$r(\alpha) = \sqrt{\frac{S_b}{\frac{1}{\sqrt{3}} \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha)}}. \quad (8)$$

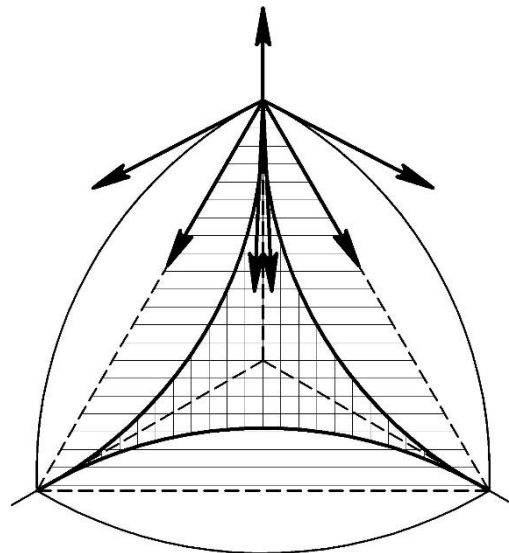


Рисунок 1.3 – Варіанти можливих нормальних перерізів частинок виділень із криволінійними та прямолінійною міжфазними межами в рівноважному стикі трьох зерен матриці

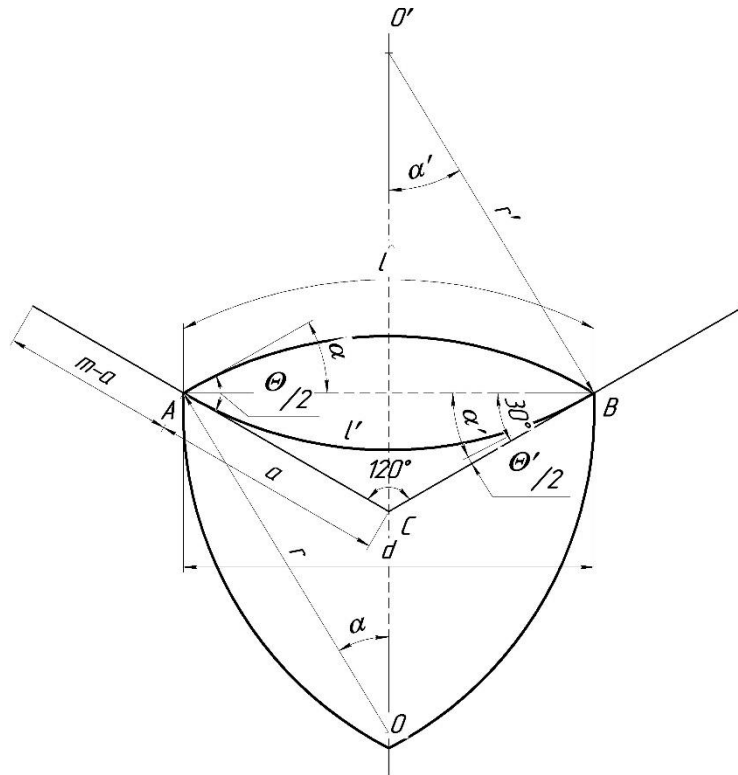


Рисунок 1.4 – Третина перерізу одного з варіантів симетричного виділення надлишкової фази

При $\alpha = 0$ маємо $r = \infty$, і криволінійний трикутник перерізу виділення перетвориться у правильний трикутник із прямолінійними сторонами. Відзначимо ще і таку обставину: для різнозначних (але однакових за модулем) кутів α будуть і різні значення r (при одній і тій же величині площі S_b). При цьому $\alpha = \frac{\theta}{2} - 30^\circ$.

Сумарна поверхнева енергія для тонкого шару стягнутого виділення (завтовшки Δx) і трьох ділянок межі матриці, що стали вільними (із загальною довжиною $3m$), складе в нашому випадку

$$Y(\alpha) = 3 \left\{ [m - a(\alpha)] \gamma^{ii} + \ell(\alpha) \gamma^{ij} \right\} \Delta x = 3 \left\{ \left[m - \frac{2}{\sqrt{3}} r(\alpha) \sin \alpha \right] \gamma^{ii} + 2\alpha r(\alpha) \gamma^{ij} \right\} \Delta x. \quad (9)$$

Після мінімізації цього виразу і перетворень в чисельнику матимемо

$$\begin{aligned} \frac{dY(\alpha)}{d\alpha} = 0 &= \frac{(\alpha \cos \alpha - \sin \alpha) \left[2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \right) \gamma^{ij} - \gamma^{ii} \right]}{\sqrt{\left[\frac{1}{\sqrt{3}} \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha) \right]^3}} = \\ &= \frac{\alpha \cos \alpha - \sin \alpha}{\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sin^2 \alpha + \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)^3}} \cdot \left(2\gamma^{ij} \cos \frac{\theta}{2} - \gamma^{ii} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

оскільки $\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha = \cos(\alpha + 30^\circ) = \cos \frac{\theta}{2}$. Оскільки $\alpha \cos \alpha - \sin \alpha \neq 0$, якщо $\alpha \neq 0$ ($\theta \neq 60^\circ$), то $\gamma^{ii} = 2\gamma^{ij} \cos \frac{\theta}{2}$, що знов-таки співпадає з (1).

У випадку $\alpha = 0$ ($\theta = 60^\circ$) співвідношення (1) збереже свою силу, якщо величина дробу у виразі (10) відрізнятиметься від нуля (при $\alpha \rightarrow 0$).

Покажемо, що це дійсно має місце

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\alpha \cos \alpha - \sin \alpha}{\sqrt{\left[\frac{1}{2\sqrt{3}} (1 - \cos 2\alpha) + \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]^3}} &= \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\alpha - \frac{\alpha^3}{2} + \frac{\alpha^5}{24} - \dots - \alpha + \frac{\alpha^3}{6} - \frac{\alpha^5}{120} + \dots}{\sqrt{\left[\frac{1}{2\sqrt{3}} \left(2\alpha^2 - \frac{2}{3}\alpha^4 + \dots \right) + \alpha - \frac{1}{2} \left(2\alpha - \frac{4}{3}\alpha^3 + \dots \right) \right]^3}} = -\frac{1}{\sqrt[4]{3}}. \end{aligned}$$

Тут ми використовували розкладання тригонометричних функцій дробового виразу в ряди виду $\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots$ і

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots$$

Таким чином, справедливість співвідношення (1) є доведеною і для випадку $\alpha = 0$. Інакше і бути не могло, оскільки при реалізації вищезгаданого граничного переходу будь-яка гранична кругова дуга (додатної і від'ємної кривини) вироджується у пряму лінію, що забезпечує отримання в перерізі виділення надлишкової фази правильного трикутника ($\theta = 60^\circ$). А цей варіант

перерізу виділення може бути розглянутий і з позиції механічного принципу віртуальних переміщень, внаслідок чого отримаємо ту ж саму формулу (1).

Слід відзначити одну важливу обставину, яка забезпечувала існування криволінійного граничного фронту виділення з постійним значенням міжфазної енергії γ^{ij} як в стані рівноваги фронту, так і в процесі його еволюційної зміни (зміни кривини) при стягненні або «розтіканні» фази виділення уздовж лінії (або ліній) межі суміжних матричних зерен. Вказана обставина зводиться до того, що через специфіку атомної будови деяких міжфазних меж матриця-виділення (наприклад, в системі Cu-Pb [2]) відповідна вільна гранична енергія або не має взагалі або ж має слабку орієнтаційну залежність. Останнє свідчить про низький рівень порядку в будові кожної такої межі, що наближає її до межі поділу типу тверда-рідка фаза.

1.2 Аналітична оцінка відносної міжфазної енергії для моделей примезових виділень надлишкової фази із зігнутими межами поділу [1]

Як показує експериментальна практика, нормальні перерізи реальних виділень надлишкової фази рідко характеризуються плавно викривленими (близькими до кругових дуг) межами поділу з матрицею. Це відразу ж ставить під сумнів правомірність використання співвідношення (1) для оцінки середньої величини відносної міжфазної енергії. Тому спробуємо, використовуючи той же енергетичний підхід, отримати декілька модифікацій цього співвідношення для ряду моделей примезових виділень, відмінних формою від тих, які вже були розглянуті раніше.

Проаналізуємо варіант, коли надлишкові примезові виділення твердої фази мають форму багатогранників, тобто розглянемо випадок, що найбільш відповідає реальній ситуації [10]. Такий характер морфології реальних

виділень пояснюється ймовірно тим, що їх грані входять у сполучення з відповідними в структурному відношенні атомно-кристалічними площинами матриці відповідно принципу орієнтаційної узгодженості.

На підставі аналізу мікроструктурних картин розподілів примежових частинок карбідної фази (рис. 1.5) стає ясно, що, з точки зору форми виділень, для нашого термодинамічного розгляду в більшості випадків цілком підходить модель одноразово зігнутого напівконтура розрізу окремого виділення (його нормальним перетином є ромб). Схему такого розрізу приведено на рис. 1.6.

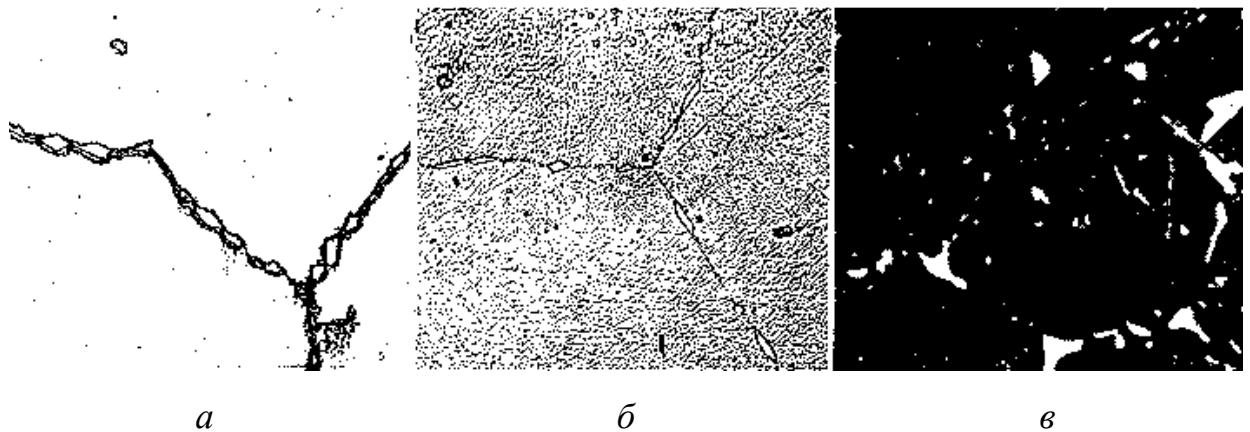


Рисунок 1.5 – Примежові виділення надлишкової фази (карбідів) по межах сплавів: *a* і *б* – карбідні виділення в сплаві типу фехраль; *в* – карбідні виділення у високовуглецевій сталі

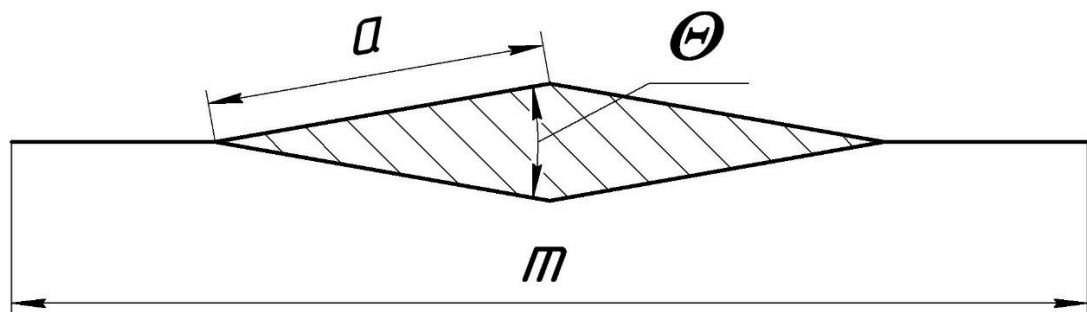


Рисунок 1.6 – Ромбовидний переріз рівноважного зерна виділення на межі поділу матриця-матриця

Для встановлення характеру співвідношення питомих поверхневих енергій міжфазної і міжзеренної меж поділу при ромбовидній формі перерізу виділення використаємо той же, що і раніше прийом. Слід при цьому взяти до уваги, що наш енергетичний підхід в даному випадку дозволить отримати лише наближений (в порівнянні з істинним) результат, оскільки при відтворенні фізичної ситуації, ми обмежимося розглядом лише симетричного варіанту перерізу виділення (тобто матимемо справу з дійсними ромбами, а не з ромбоподібними за формою геометричними фігурами), що далеко не завжди зустрічається в реалії. Проте, зазвичай, відхилення від правильної форми виділень є відносно невеликими (див. рис. 1.5).

Для вирізаного шару виділень у вигляді тонкої ромбічної пластинки і ділянки межі матричної фази, що стала вільною (в процесі стягнення цього виділення), повну поверхневу енергію, що є функцією двогранного кута θ (в стику зерна виділення з двома зернами матриці), запишемо так:

$$Y(\theta) = \left\{ \left[m - 2\alpha(\theta) \cos \frac{\theta}{2} \right] \gamma^{ii} + 4\alpha(\theta) \gamma^{ij} \right\} \Delta x. \quad (11)$$

Тут m – знов-таки початкова протяжність ромбоподібного розрізу виділення; $\alpha(\theta)$ – сторона ромба, що змінюється; γ^{ii} , γ^{ij} і Δx мають той же зміст, що і в попередньому розділі. Величина $\alpha(\theta)$ визначається таким співвідношенням:

$$\alpha(\theta) = \sqrt{\frac{S_p}{\sin \theta}}, \quad (12)$$

де S_p – площа перерізу виділення (площа ромба).

Далі, після мінімізації і простих перетворень, отримаємо остаточний вираз для відносної міжфазної енергії, що відповідає умові рівноваги в системі матриця-виділення

$$\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \gamma_{\text{вмф}} = \frac{1}{2 \left(\cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)}. \quad (13)$$

Строго кажучи, при диференціюванні виразу (11) ми повинні були зважити на те, що похідна $d\gamma^{ij}/d\theta$ не обов'язково дорівнює нулю (через орієнтаційну залежність міжфазної енергії) і, отже, у виразі, який отриманий після мінімізації (11), повинен з'явитися додатковий член виду $4\alpha(\theta)\frac{d\gamma^{ij}}{d\theta}$. Проте, внеском цього члена, мабуть, можна знехтувати, на підставі таких міркувань загального характеру. Якщо будова міжфазної межі така, що її вільна енергія має лише слабку орієнтаційну залежність, то похідна $d\gamma^{ij}/d\theta$ є малою і вплив вказаного вище додаткового члена на оцінку відносної міжфазної енергії у край несуттєвий (особливо, коли включення другої фази досить компактні навіть на початковій стадії свого формування), тобто в цьому випадку коливання номіналів таких оцінок із-за значущої величини $d\gamma^{ij}/d\theta$ не виходять з їх інтервалу похибок, які пов'язані з неточностями визначення величини θ . І, навпаки, якщо орієнтаційна залежність міжфазної відносної енергії є значною (це завжди має місце при прагненні виділень до встановлення кристалогеометричного зв'язку з матрицею), можна також допустити, що $d\gamma^{ij}/d\theta = 0$, бо зміна кута згину напівконтура нормального розрізу виділення в процесі встановлення рівноважної подоби такого перерізу потребує безперервної зміни мікропрофілю міжфазної межі (рис. 1.7).

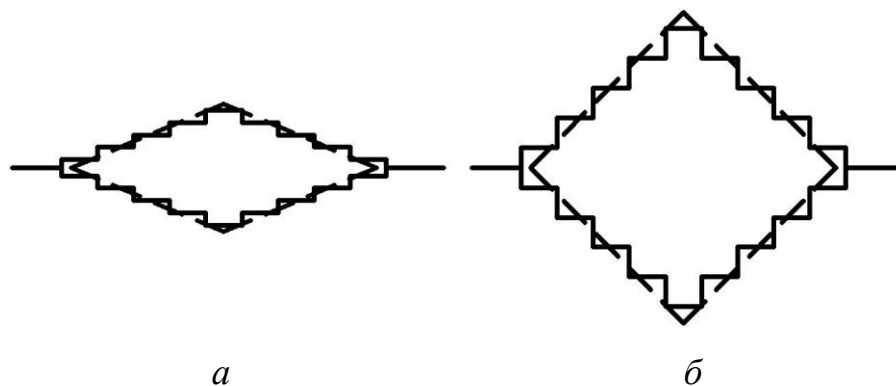


Рисунок 1.7 – Зміна мікропрофілю перерізу примежової ромбовидної частинки (гіпотетична схема) в умовах збереження кристалогеометричного

зв'язку із матричною фазою: a – вихідна позиція; b – кінцевий варіант перерізу

В результаті не повинен порушуватися і встановлений кристалогеометричний зв'язок між матрицею і виділенням надлишкової фази (при зміні кута θ змінюється лише співвідношення зв'язаних із матрицею мікросторін елементарних трикутників граничного профілю, що орієнтовані по середній лінії контуру перерізу виділення).

Отже, отримана нами формула (13) на зовнішній вигляд вже відрізняється від співвідношення (1), що обумовлено вигнутістю контуру перерізу виділення. Проте очевидно, що завдяки малим значенням дійсних двограних кутів цю відмінність можна не враховувати, оскільки добуток $\sin \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$ є величиною другого порядку малості. При середніх же значеннях кутів θ визначення відносної вільної енергії за формулою (13) дає більш точні результати, ніж ті, які виходять при використанні виразу (1).

Слід мати на увазі, що формула (13) стає дещо неточною для $\theta > 60^\circ$, оскільки підвищення «кривини» згинів контуру перерізу збільшує ймовірність його згладжування (через часткове дифузійне розчинення виділення відповідно до закону Томсона-Фрейндліха) із поступовим перетворенням на пару плавно викривлених ліній (некругового типу).

Особливо цікавим представляється випадок розташування зерна надлишкового виділення (у вигляді опуклого або увігнутого багатогранника) в точці сходження трьох меж матриці.

Для цього розглянемо симетричний 120° стик, який є характерним для стійкої термодинамічної рівноваги системи (при рівності сил поверхневих натягів на всіх вільних межах матриці). В даному випадку обмежимося моделлю, у якій контурна лінія частини нормального перерізу виділення з боку кожного з трьох зерен матриці, що стикаються з ним, є одноразово зігнутою. Схему перерізу такого виділення представлено на рис. 1.8.

Розглянемо термодинамічну рівновагу виділення, використовуючи прийнятий нами підхід. Сумарна поверхнева енергія тонкого шару виділення і ділянки матриці, що стала вільною, визначатиметься виразом [10]:

$$Y(\theta) = 3 \left\{ \left[m - \frac{2}{\sqrt{3}} a(\theta) \sin \left(120^\circ - \frac{\theta}{2} \right) \right] \gamma^{ii} + 2a(\theta) \gamma^{ij} \right\} \Delta x, \quad (14)$$

у якому m – знову початкова довжина частини виділення з боку будь-якої з його вершин, що лежить на лінії межі матриці; $a(\theta)$ – сторона рівнобічного багатокутника перерізу виділення, що змінюється. Причому

$$a(\theta) = \sqrt{\frac{\sqrt{3} S_b}{2 \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \left(120^\circ - \frac{\theta}{2} \right)}} \quad (15)$$

(тут S_b – третина від загальної площі перерізу виділення (див. рис. 1.8).

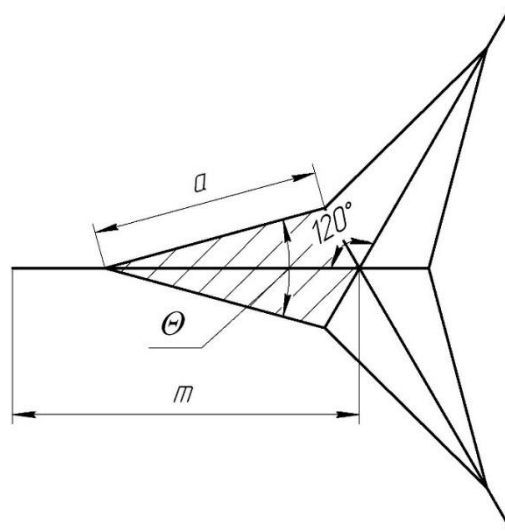


Рисунок 1.8 – Нормальний переріз рівноважного зерна виділення (випадок багатократно зігнутого контуру), яке розташоване в симетричному 120° -стику трьох меж матриці

Після мінімізації виразу (14) і ряду спрощень для випадку рівноваги остаточно отримаємо

$$\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \gamma_{вмф} = \frac{1}{2} \frac{\sin \left(120^\circ - \frac{\theta}{2} \right)}{\sin(120^\circ - \theta)}. \quad (16)$$

Цікаво відзначити, що вираз (16) переходить в (1), якщо $\theta = 60^\circ$ ($\gamma_{вмф} = \frac{1}{\sqrt{3}}$). При такому значенні двогранного кута багатокутник перерізу перетвориться в правильний трикутник.

Формула (16) може бути перетворена до виду

$$\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \frac{1}{2 \left[\cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} - 30^\circ \right) \right]}, \quad (16 \text{ а})$$

що робить її дуже схожою (по конструкції) на вираз (13). Тут член $\sin \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} - 30^\circ \right)$, пов'язаний з наявністю згинів контурної лінії перетину виділення другої фази, при $\theta \rightarrow 0$ також стає малою величиною, якою можна нехтувати, але тільки в дуже вузькому інтервалі значень θ навколо нульової точки.

На рис. 1.9 представлені графіки залежностей відносної міжфазної енергії від двогранного кута (в системі матриця-виділення іншої фази), що відповідають різним робочим формулам (1), (13) і (16).

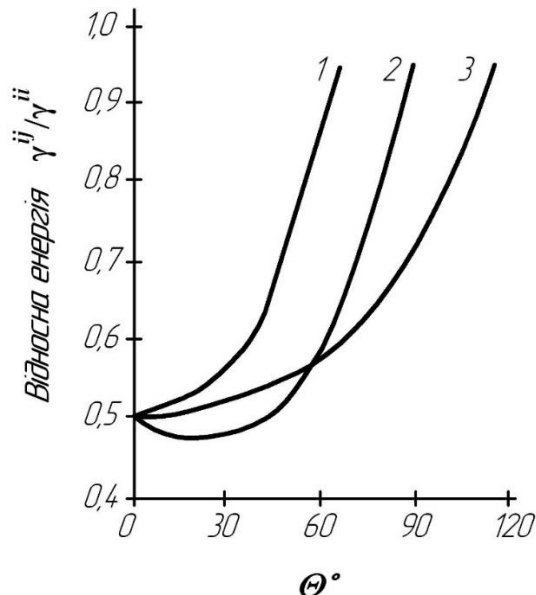


Рисунок 1.9 – Графіки залежностей відносної вільної енергії міжфазної межі γ^{ij}/γ^{ii} від двогранного кута θ : 1 – для співвідношення (13), 2 – для співвідношення (16), 3 – для співвідношення (1)

На підставі всього викладеного вище, а також аналізу приведених на рис. 1.9 кривих можна зробити такі висновки:

1. Оскільки обговорюваний рівноважний двогранний кут може бути експериментально встановлений при будь-якій зовнішній формі примежових виділень надлишкової фази, необхідно підходити надто обережно до використання традиційно вживаного виразу типу (1) при оцінці середньої величини відносної вільної енергії міжфазної межі. В окремих випадках (існування сильної орієнтаційної залежності такої енергії), мабуть, правильніше буде користуватися виразами (13) і (16), виведеними для зігнутих меж перерізів виділень.

Таким чином, вибір формули для оцінки середньої відносної вільної енергії міжфазної поверхні поділу вимагає обов'язкового прийняття до уваги типової геометричної форми примежових виділень надлишкової фази.

2. Вирази (13) і (16) дозволяють пояснити відмінності в значеннях кута θ при вершинах надлишкових виділень, які знаходяться в подвійних і потрійних стиках зерен матриці (рис. 1.5), що часто спостерігаються в експериментальній практиці. На підставі цього можна стверджувати, що для багатьох значень відношення γ^{ij}/γ^{ii} , величина якого у кожному конкретному випадку визначається фізичною природою фаз, що стикаються, двогранні кути при вершинах виділень, які розташованих в потрійних симетричних стиках матричних меж, перевершують відповідні кути виділень (принаймні для $\gamma^{ij}/\gamma^{ii} \leq 0,58$), зосереджених на окремих ділянках меж матриця-матриця (рис. 1.5 і [2]).

3. У разі концентрації рівноважних виділень в потрійних вузлах матриці можна передбачити (через наявність мінімуму у кривій (16) при $\theta \cong 20^\circ$) існування двох розподілів кутових величин (в інтервалі дійсних двогранних кутів $0 \dots 40^\circ$) для кожного із значень відносної міжфазної енергії.

Розділ 2 Матеріали та методика досліджень

Нікель є основою найбільш поширених на сучасному етапі жароміцних сплавів для деталей ГТУ. Передумовами широкого використання цих сплавів є висока температура плавлення та щільне пакування гратки нікелю. В ГЦК гратці дифузійна рухомість атомів менша ніж в ОЦК.

Нікель – перехідний метал, належить VIIIА підгрупі періодичної системи елементів. Атомний діаметр нікелю 0,249 нм, густина – 8,907 г/см³. При високих температурах в нікелі розчиняються Cr, V, Mo, Ta, W до 35–40 %; Al, Ti, Nb – від 2,5 до 20 %. Зі зниженням температури розчинність легувальних елементів зменшується, що дозволяє зміцнювати сплави за рахунок дисперсійного твердіння. За характером взаємодії з нікелем легувальні елементи поділяють на такі групи:

- елементи, що переважно знаходяться в g–твердому розчині (хром, молібден, вольфрам, залізо, кобальт);
- елементи, що утворюють з нікелем γ' –фазу (алюміній, титан, ніобій, тантал);
- елементи, що утворюють сегрегації на межах зерен (магній, бор, вуглець, цирконій).

Дослідження нікелю проводять за допомогою металографічного мікроскопу та растрового електронного мікроскопу.

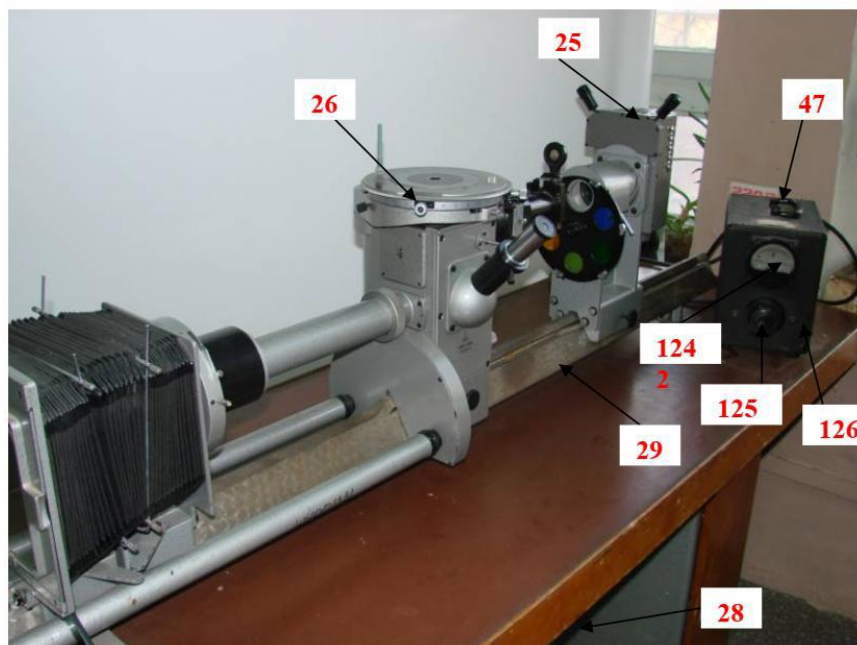
2.1 Схема та устрій МІМ-8

Горизонтальний металографічний мікроскоп МІМ-8 призначений для дослідження мікроструктури металів і інших непрозорих об'єктів в світлому

полі при прямому і косому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження об'єктів мікроскоп забезпечений монокулярними та бінокулярними насадками.

Власне збільшення бінокулярної насадки - 2,5 х. Набір ахроматичних та апохроматичних об'єктивів і окулярів забезпечує збільшення мікроскопа при візуальному спостереженні - від 100х до 1350х. Предметний столик мікроскопа забезпечений механізмами для координатного переміщення об'єкта. Освітлення здійснюється від електроламп розжарювання потужністю 170Вт, 17В, що живиться від освітлювальної мережі 220В через понижуючий трансформатор, забезпечений секційним перемикачем для регулювання яскравості напруження лампи. Сам мікроскоп та всі його частини встановлені на станині, що представляє собою оптичну лаву довжиною 1,8м. 45

Станина встановлюється на чотири демпфера, призначених для запобігання мікроскопа від вібрації. Демпфери вмонтовані в стіл, який має з боків дві тумби з висувними ящиками для зберігання речей. Зовнішній вигляд мікроскопа показаний на рис. 2.1.



25 - освітлювальний пристрій; 26 - центральна частина мікроскопа; 28 - стіл; 29 - оптична лава; 47 - трансформатор; 124 - вольтметр; 125 - передня кришка трансформатора; 126 - секційний перемикач напруги

Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд мікроскопа МИМ-8

Весь прилад складається з трьох основних частин: освітлювального пристрою 25; центральної частини мікроскопа 26; столу 28. Перші дві частини розташовані на масивній оптичній лаві 29. Перші дві частини розташовані на масивній оптичній лаві 29.

Правильне використання мікроскопа виходить тільки за умови раціональної комбінації об'єтивів, окулярів. При вживанні їх треба пам'ятати, що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур. Об'єктиви апохроматів в поєднанні з компенсаційними окулярами для візуального спостереження дають збільшення. Крім правильної комбінації об'єтивів і окулярів, одна з значення має і правильне застосування світлофільтрів. Як правило, при роботі з об'єктивами 18 ахроматами слід застосовувати світлофільтри, а з апохроматом можна працювати і без них. Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх квітів видимої частини спектру; з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з нечіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, щодо яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимій частині спектру, жовто-зелені світлофільтри для них зайві [11].

2.2 Схема та устрій растрового електронного мікроскопа

Растрова електронна мікроскопія - це дослідження об'єкта шляхом опромінення тонко сфокусованим електронним пучком, який розгортається в растр по поверхні зразка. В результаті взаємодії сфокусованого електронного пучка з поверхнею зразка виникають вторинні електрони, відбиті електрони, характеристичне рентгенівське випромінювання, оже-електрони і фотони

різних енергій. Вони народжуються в певних обсягах - областях генерації усередині зразка і можуть бути використані для вимірювання багатьох його характеристик, таких як топографія поверхні, хімічний склад, електрофізичні властивості та ін.

Основною причиною широкого використання растрових електронних мікроскопів є висока роздільна здатність при дослідженні масивних об'єктів, що досягає 1,0 нм (10 А). Іншою важливою рисою зображень, одержуваних в растровому електронному мікроскопі є їх об'ємність, зумовлена великою глибиною різкості приладу.

Зручність застосування реєстрового мікроскопа в мікро-і нанотехнології пояснюється відносною простотою підготовки зразка і оперативністю дослідження, що дозволяє використовувати його для міжопераційного контролю технологічних параметрів без значних втрат часу. Зображення в растровому мікроскопі формується у вигляді телевізійного сигналу, що істотно спрощує його введення в комп'ютер і подальшу програмну обробку результатів досліджень.



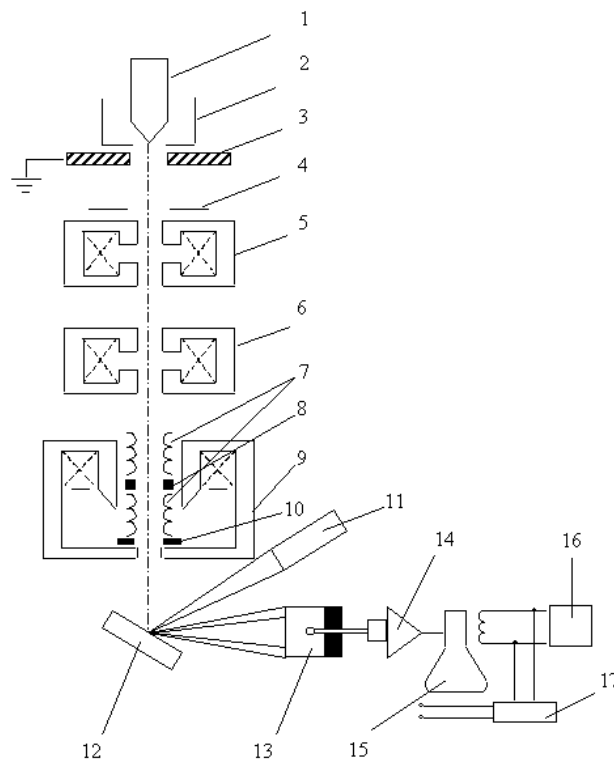
Рисунок 2.2 – Растровий електронний мікроскоп

Розвиток мікротехнологій і поява нанотехнологій, де розміри елементів істотно менше довжини хвилі видимого світла, робить растрову електронну

мікроскопію практично єдиною неруйнуючою методикою візуального контролю при виробництві виробів твердотільної електроніки та мікромеханіки.

Растровий електронний мікроскоп складається з:

- джерела електронів (електронної гармати),
- оптичної системи, що забезпечує фокусування променя і його розгортку в растр,
- стіл об'єктів, що дозволяє позиціонувати зразок в трьох площинах,
- набір детекторів, які реєструють випромінювання, індуковані електронним променем.



1-3 електронна гармата, емітує електрони; 4-10 електроннооптична система, яка формує електронний зонд і забезпечує його сканування на поверхні зразка 12; 11-17 система, яка формує зображення

Рисунок 2.3 - Схема растрового електронного мікроскопа

Системи обробки відеосигналу і його відображення на екрані ЕПТ. Крім того, до складу будь-якого електронного мікроскопа входить вакуумна

система, що підтримує робочий вакуум порядку 10^{-5} - 10^{-8} мм ртутного стовпа. Схема мікроскопа приведена на рисунку 2.3 [12].

Розділ 3 Результати дослідження та їх аналіз

3.1 Аномальна характеристика впливу лантаноїдів на зерномежову енергію і рушійну силу міграції меж в нікелі та залізі підвищеної чистоти

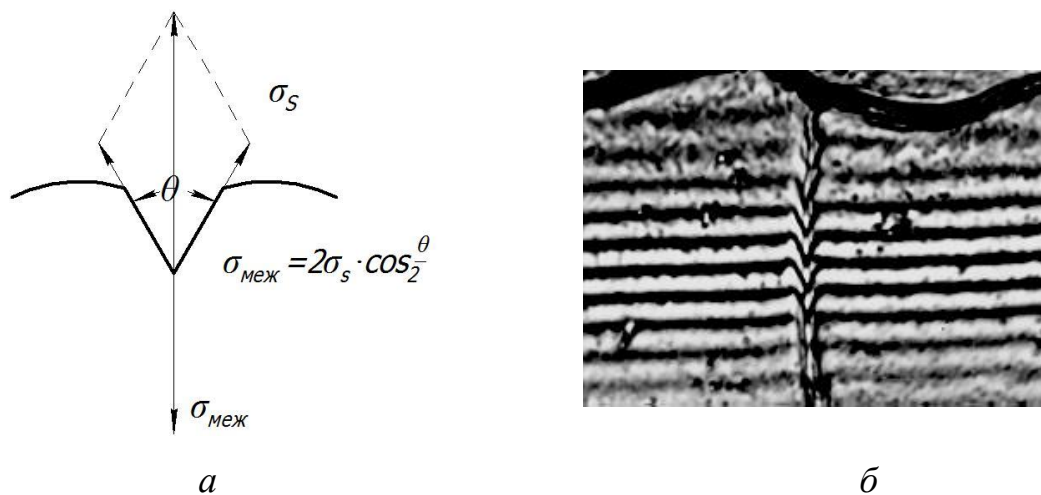
У даному розділі, в основному, представлено первинну інформацію про деякі специфічні особливості впливу елементів групи лантану (Nd, Pr, Ce і La) на зерномежову (відносну) енергію і міграцію меж чистого і особливо чистого нікелю (сплави 0-4 і 5-13). Крім того, розглянуто вплив одного із лантаноїдів (Ce) на ріст зерен в синтетичному ніхромі (сплави 00, 03) [13, 14].

Для порівняльної оцінки енергії меж зерен мікролегованих металевих систем (по відношенню до енергії меж чистої системи) використовували метод термічного травлення зразків у вакуумі протягом 3 годин (при температурі 1000°C та залишковому тиску $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.). За допомогою інтерференційного мікроскопа Лінника (МІІ-4) визначали глибину і ширину канавки травлення, яка формується по лінії межі, і за співвідношенням виміряних величин встановлювали значення двогранного кута профілю межі чистого і мікролегованого металу ($\theta^{\text{д}}$). Розрахунок відносної зерномежової енергії $\gamma_{\text{відн}}$ проводили за формулою [13, 14]

$$\gamma_{\text{відн}} = \frac{\gamma^{\text{д}}}{\gamma} = \frac{\cos \theta^{\text{д}}/2}{\cos \theta/2} \quad (3.1)$$

із припущенням, що малі добавки елементів практично не впливають на вільну енергію поверхні поділу метал-вакуум (індекс «Д» є позначкою мікролегованої системи). При цьому розгляду піддавали лише канавки травлення симетричного інтерференційного профілю (рис. 3.1), тобто

розрахунки проводили для тих меж, які були практично перпендикулярні до площини шліфа. Відносний результат в кожній серії вимірювань знаходили усереднюванням 12-15 відліків параметрів таких канавок. Крім того, в отримані на підставі вимірювань значень кутів вносили 10% поправки, оскільки, згідно оцінкам авторів робіт [15, 16], обчислені значення двогранних кутів завжди дещо перебільшують їх дійсні значення (через використання пучків світла, що сходяться, в інтерференційних мікроскопах). Урахування всіх наведених вище обставин забезпечило достатньо низьку відносну похибку методу (не більше 75%).



а – схема дії сил поверхневих натягів в стику двох суміжних зерен при утворенні канавки травлення; *б* – характер зламу інтерференційних ліній при перерізі їх міжзеренною межею, яка перпендикулярна поверхні шліфа (випадок канавки симетричного профілю)

Рисунок 3.1 – До методики визначення відносної зерномежової енергії

Був також проведений оціночний розрахунок відносної вільної енергії міжзеренних меж із використанням значень питомої поверхні поділу зерен після закінчення збиральної рекристалізації зразків, деформованих стискуванням (для усунення кристалографічної текстури) на 50%.

Питому поверхню меж зерен S_v визначали методом січних [17] за формулою

$$S_v = \frac{S}{V} = \frac{2N}{L}, \quad (3.2)$$

де N – кількість перетинів меж зерен довільними прямими із загальною довжиною L . Метод випадкових січних є дуже зручний тим, що дозволяє обчислити з необхідною точністю величину питомої поверхні міжзеренних меж, що нас цікавить.

У даній серії експериментів, як і в усіх подальших серіях, кількість довільних прямих (січних), вибирали такою, щоб кількість перетинів меж цими прямими була близько 500...600 (це забезпечувало низьку, не більше 2-4%, відносну помилку обчислень [17]). Січні наносили безпосередньо на матове скло світлового мікроскопа; при цьому в залежності від величини зерна структури варіювали збільшення мікроскопа і кількість полів зору. Критерієм достатності кількості перетинів слугувало досягнення монотонності залежностей S_v від часу, що свідчило про високий рівень достовірності отримуваних результатів.

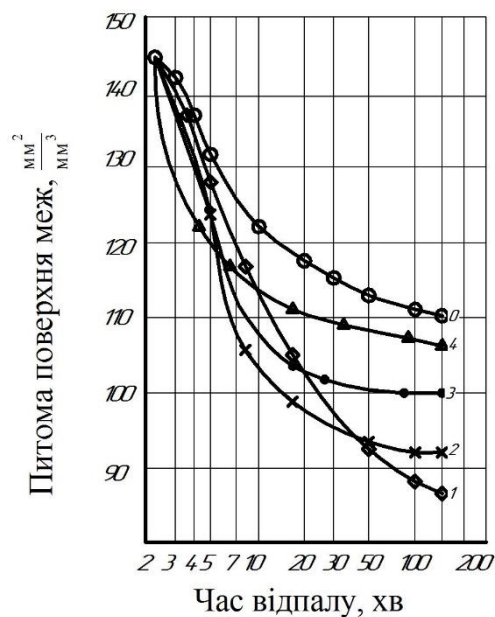
Спочатку [13, 14], для визначення відносної міжзеренної енергії використовували співвідношення

$$\gamma_{\text{відн}} = \frac{\gamma^D}{\gamma} = \frac{(S_v)_\Pi}{(S_v^D)_\Pi}, \quad (3.3)$$

де, як і раніше, γ^D – міжзеренна вільна енергія нікелю із мікродобавкою РЗМ; γ – те ж без мікродобавки, а $(S_v^D)_\Pi$ і $(S_v)_\Pi$ – ординати паралельних ділянок відповідних кривих $S_v^{(D)}(\tau)$, що узяті в спільній точці часу.

Точність цього виразу вельми приблизна, оскільки криві часових залежностей $S_v^{(D)}(\tau)$ штучно суміщали лівими кінцями в одній точці (рис. 3.9). Такого роду графічний зсув здійснювали з метою приведення всіх побудованих залежностей до однакових вихідних даних (як за часом початку збиральної рекристалізації, так і за величиною вихідного зерна [13, 14]). Хоча ця процедура заслуговує на певну критику (через її недостатню строгість –

дивися про це докладніше в розділі, присвяченому методиці більш коректного визначення $\gamma_{\text{відн}}$), все ж її реалізація не створювала протиріччя кінцевій мікроструктурній картині, що спостерігається в зразках чистого та мікролегованого нікелю. Припускалося, що дана операція в якійсь мірі усуває з розгляду стимул до росту зерен, викликаний відмінністю у початкових значеннях їх поверхонь поділу, і не спотворює скільки-небудь помітним чином вихідний стимул росту, пов'язаний лише з відмінністю у величині зерномежової енергії досліджуваних систем.



○ – Ni; ▲ – Ni+La; ● – Ni+Ce; × – Ni+Pr; ◇ – Ni+Nd

Рисунок 3.2 – Часові залежності питомої поверхні меж зерен чистого і мікролегованого нікелю, що приведені до однакових вихідних даних (збиральна рекристалізація при 600°C)

Як було показано в роботах [18, 19], невеликі добавки РЗМ в жароміцні сплави на нікелевій основі сприяють сфероїдизації примежових виділень іншої фази, що побічно підтверджує позитивну адсорбційну активність (горофільність) важкорозчинних РЗМ по відношенню до нікелевої матриці складного складу. Практично ж нерозчинність таких мікродобавок у чистому нікелі дозволяє припустити їх горофільність і по відношенню до останнього.

Для підтвердження цього припущення було досліджено залежність періоду ґратки нікелю чистотою 99,99% і нікелю такої ж вихідної чистоти, мікролегованого РЗМ, від величини зерна. Лінійні параметри визначали методом зворотної зйомки в мідному випромінюванні (віддзеркалення $(331)_\alpha$ і $(420)_\alpha$).

У роботі [20] показано, що при зменшенні об'єму міжкристалітної перехідної зони металу, яке відбувається при укрупненні зерна до максимального розміру, частина домішок, адсорбованих по межах, розчиняється в товщі зерен. Це приводить до збільшення періоду ґратки металу.

На рис. 3.3 показані зміни періоду ґратки нікелю при легуванні його РЗМ. Збільшення періоду ґратки при зменшенні загальної протяжності меж зерен, тобто при зменшенні об'єму міжкристалітних перехідних зон, очевидно, підтверджує горофільність Nd, Pr, Ce і La по відношенню до нікелю.

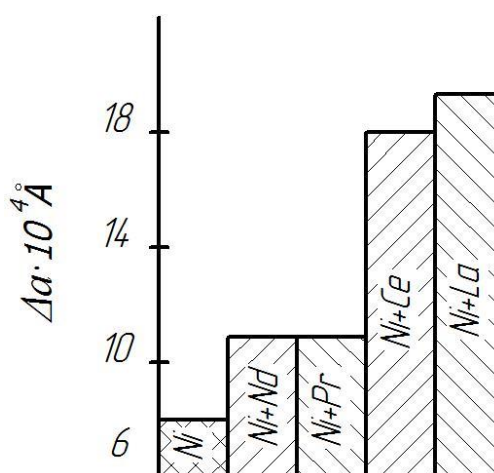


Рисунок 3.3 – Зміна періоду кристалічної ґратки нікелю при мікролегуванні РЗМ (сплави 0-4)

Таким же доказом горофільності атомів РЗМ є чітко виражена дифузія їх по межах зерен, що виявляється в особливому характері фронту дифузії церію (поява виступів на мікрофотографії нікелю (рис. 3.4)).

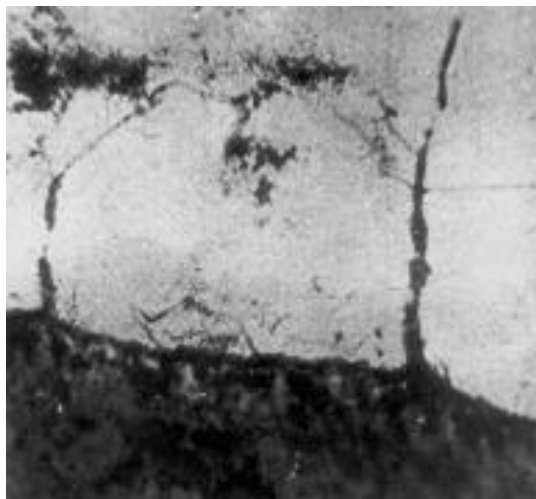


Рисунок 3.4 – Дифузія церію по межах зерен карбонільного нікелю при 850°С за 32 години ($\times 300$)

Сегрегація горофільних домішок по межах зерен, як прийнято вважати, сприяє зменшенню термодинамічного стимулу до росту зерен в процесі збиральної рекристалізації, оскільки накопичення домішок в примежових зонах пов'язують зі зменшенням надлишкової вільної енергії останніх.

Крім того, окрім коттреллівської і електричної взаємодій розчинених атомів із межею зерна, міграція останньої в процесі росту зерен повинна сильно змінитися, оскільки при своєму переміщенні межа повинна захоплювати атмосферу домішок.

Тому слід очікувати, що введення мікродобавок РЗМ у нікель повинно уповільнити процес міграції меж при збиральній рекристалізації (у порівнянні з нікелем без добавок).

Проте, дані, що отримані для електролітичного нікелю і його сплавів із концентрацією мікродобавок Nd, Pr, Ce і La 0,21 ат. %, показали, що всі без винятку мікродобавки зменшують питому поверхню меж зерен (ослаблення ступеня впливу відповідає порядку їх переліку), що приводить зрештою до збільшення розміру зерна сплаву Ni-РЗМ (після закінчення збиральної рекристалізації).

Введення мікродобавок РЗМ у вказаній кількості підвищує відносну енергію меж зерен, причому в деяких випадках це підвищення складає 17%. Розрахунок відносної зерномежової енергії різними вказаними вище способами показав ідентичність характеру її зміни і задовільне узгодження отриманих результатів (рис. 3.5).

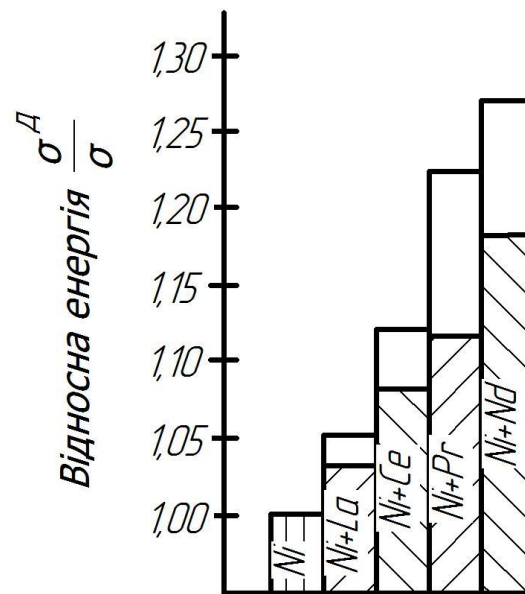
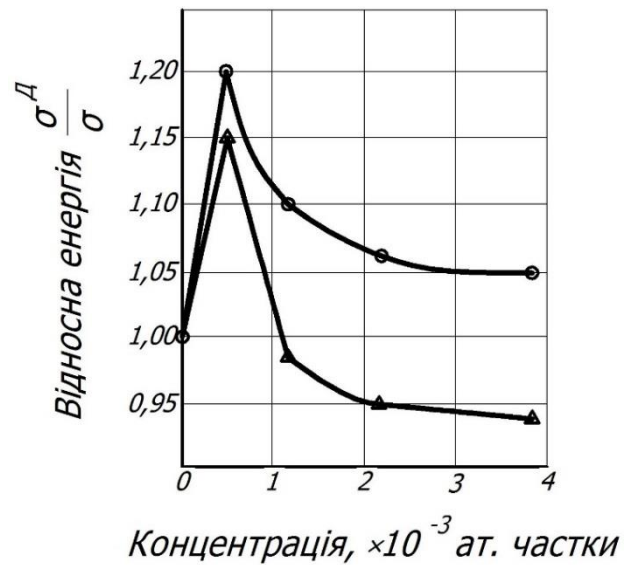


Рисунок 3.5 – Зміна відносної енергії меж зерен при мікролегуванні його РЗМ (сплави 0-4)

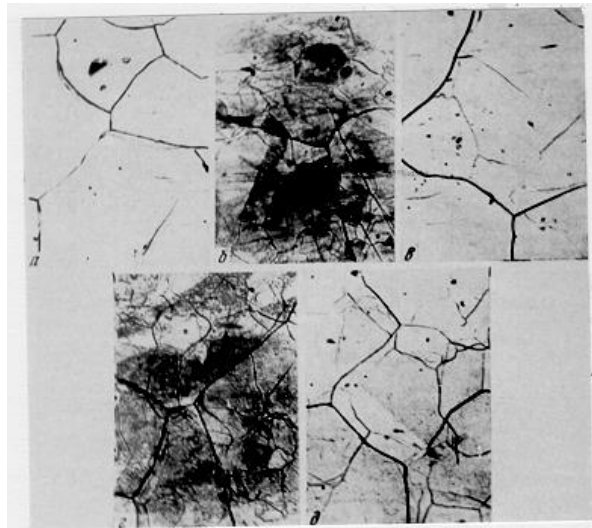
Визначення концентраційної залежності відносної вільної енергії для карбонільного нікелю, якого було відпалено в середовищі водню і переплавлено у вакуумі, дає криву з максимумом при вмісті мікродобавки Се або La 0,05 ат. % (рис. 3.6) [13, 14]. Подальше підвищення вмісту мікродобавок вже приводить до зниження відносної енергії меж зерен нікелю. При цьому слід зазначити, що розмір зерен карбонільного нікелю, які вирости в процесі збиральної рекристалізації, є пропорційним величині відносної енергії (рис. 3.7). Аналогічна картина спостерігається і у разі мікролегування РЗМ карбонільного заліза [21, 22] (цікаво відзначити, що автор роботи [23] також наводить експериментальні дані щодо збільшення розміру зерен армко-заліза при дифузійному насиченні металу церієм,

розглядаючи отриманий результат як аномальний, оскільки на його думку логічніше було б очікувати у цьому випадку зменшення величини зерна).



$\circ$ – Ni+Ce; Δ – Ni+La

Рисунок 3.6 – Концентраційні криві відносної зерномежової енергії карбонільного нікелю, що мікролегований РЗМ



a – чистий (99,99 % нікель; b – Ni + $4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки Nd;
 v – Ni + $4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки Pr; z – Ni + $4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки Ce;
 d – Ni + $4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки La

Рисунок 3.7 – Мікроструктура чистого і мікролегованого нікелю після відпалення при 1000°C ($\times 150$)

Таким чином, при введенні деякої критичної кількості РЗМ в нікель або залізо відбувається помітне прискорення процесу міграції меж зерен (див. [24-27]) (рис. 3.8 і 3.9). Поряд з цим підвищується (згідно розрахункам) і відносна зерномежова енергія (за умови горофільності РЗМ ця енергія, як завжди вважають (наприклад, [19]), повинна знижуватися). Вказану аномалію можна спробувати пояснити таким чином.

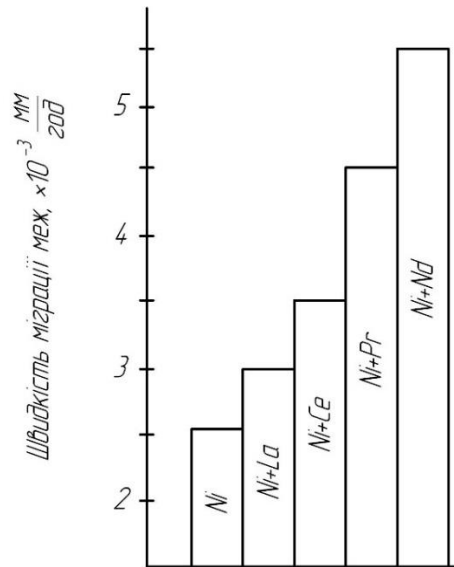


Рисунок 3.8 – Вплив мікродобавок РЗМ на швидкість міграції меж зерен нікелю (99,99% чистота)

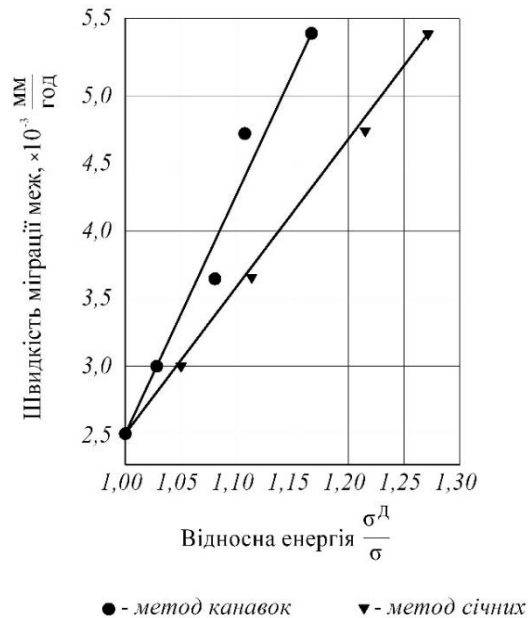


Рисунок 3.9 – Залежність швидкості міграції меж мікролегованого електролітичного нікелю ($C_{\text{РЗМ}}=4,0 \cdot 10^{-4}$ ат.частки) від відносної зерномежової енергії

У загальному випадку швидкість мікроскопічної міграції меж визначається рівнянням [28]

$$V = m (P_\gamma - P_F) = m \Delta p, \quad (3.4)$$

де $P_\gamma = 2\gamma/R$ – рушійна сила міграції, яка обумовлена прагненням системи до мінімуму зерномежової енергії γ (R – радіус зерна) [29]; $P = 3/2\gamma N_0$ – сила, що перешкоджає міграції меж і є результатом їх взаємодії із частинками виділень надлишкової фази (вона оцінюється кількістю частинок на одиницю довжини); при цьому $N_0 = 0$, якщо $c = 0$ (c – концентрація домішки); m – мікроскопічна рухомість меж [30].

Тоді залежність швидкості міграції від концентрації мікродобавки може бути записана таким чином:

$$V = m (P_\gamma - P_F) = m \Delta p, \quad (3.5)$$

де

$$P_F^*(c) = \left[1 - \frac{3R}{4} N_0(c) \right].$$

З рівняння (3.4) виходить, що вид результуючої кривої $V(c)$ і $N_0(c)$, залежить від характеру зміни функцій $\gamma(c)$ і $N_0(c)$, що визначають відповідно і характер зміни співмножників $P_\gamma(c)$ і $P_F^*(c)$ у виразі (3.5). Можлива концентраційна залежність m не може вплинути на форму кривої $V(c)$.

Невеликі добавки РЗМ внаслідок малої розчинності в нікелі (через високу невідповідність атомних діаметрів [31]) розташовуються переважно по межах зерен (і мабуть блоків), різко збільшуючи зерномежову енергію (у припущенні, що товщина межі зерна складає тільки 3 ат. шари [32]) (рис.3.6). Проте, ступінь підвищення вільної енергії при цьому має бути менше, ніж у разі збереження атомів РЗМ в твердому розчині, тобто розподіл таких атомів уздовж різних меж забезпечує системі відносний мінімум вільної енергії.

Подальше збільшення кількості мікродобавок РЗМ приводить до зростання їх концентрації по межах, що сприяє, ймовірно, утворенню (починаючи з певного вмісту) в примежовій зоні субмікророзділень хімічної

сполуки типу MeNi_5 , які зв'язують мікродобавки, що були розташовані раніше по межах зерен. Наслідком цього буде зниження зерномежової енергії γ і рушійної сили міграції P_γ .

Таким чином, функція $\gamma(c)$ повинна мати вид кривої з максимумом, що сповна відповідає експериментальним даним (рис. 3.6).

У випадку, якщо при підвищенні концентрації РЗМ субмікроевиділення ще не утворюються, але вже фіксується зменшення поверхневої зерномежової енергії, то його, ймовірно, слід пов'язувати зі зміною характеру електронної будови примежової зони.

Очевидно, що зі зростанням вмісту РЗМ дисперсність включень $N_0(c)$ буде збільшуватися, збільшуючи тим самим і силу P_F , що перешкоджає міграції (за умови, що $\gamma(c)$ буде змінюватиметься менш помітним чином). P_F^* при цьому завжди тільки зменшується.

Результуюча рушійна сила $\Delta p(c) = \frac{V(c)}{m}$, яка задається співвідношенням величин P_γ і P_F (або P_F^*), також матиме вид кривої з максимумом при певній (критичній) концентрації, що узгоджується з розмірами зерен нікелю або заліза на рис. 3.7.

На рис. 3.10 схематично показано зміну результуючої рушійної сили процесу міграції меж зерен в залежності від концентрації РЗМ.

Зі сказаного вище виходить, що невеликі добавки РЗМ у нікель (залізо) збільшують термодинамічний стимул до росту зерна. При деякому вмісті добавки ($C_{кр}$) рушійна сила міграції може стати значно більше за силу, що стримує міграцію, завдяки взаємодії меж з мікродобавками. В цьому випадку швидкість росту зерна в системі метал-РЗМ буде вищою, ніж в чистому металі.

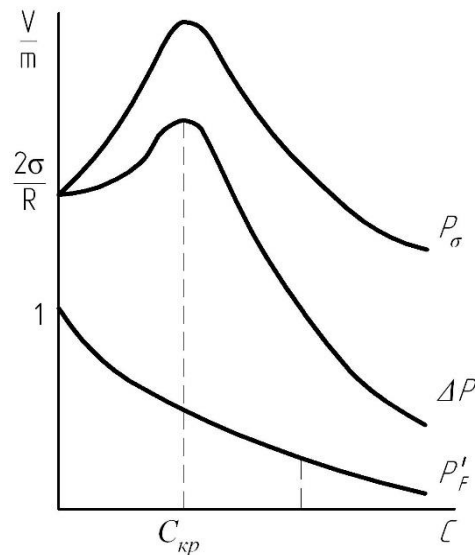


Рисунок 3.10 – Залежність результуючої сили міграції меж зерен нікелю (схема) від концентрації РЗМ (для випадку $\frac{2\sigma}{R} > 1$). На схемі P_σ – істинна рушійна сила міграції меж ($P_\sigma = \frac{2\sigma}{R}$); P'_F – множник, що враховує вплив домішкового фактору опору міграції меж (при $N_0(c) = 0$, $P'_F = 1$)

При вмісті РЗМ більшому за критичну концентрацію сила опору міграції P_F значно збільшується, а термодинамічний стимул росту, навпаки, зменшується (внаслідок зменшення величини зерномежової енергії). Це приводить до суттєвого уповільнення темпу міграції меж. Відзначимо, що швидкість міграції стане рівною нулю при такій концентрації домішок, при якій дисперсність включень складе $N_0 = 4/3R$ (див. рівняння 3.5).

Проте в принципі може бути надане і інше трактування отриманих результатів.

Останні численні дослідження все більше надають упевненості в тому, що чисті, а отже і відповідно тонкі (3-5 ат. шарів) межі відносно рідко спостерігаються навіть в найбільш очищених металах [33]. Це повинно відноситись і до двох сортів високочистого нікелю, використаного в даній роботі. Цілком імовірно, що вони містять домішки, що не виявляються при

хімічному аналізі (невраховані домішки). Очевидно також, що таких домішок буде більше в електролітичному нікелі.

Швидкість міграції меж зерен у присутності домішок контролюється найбільш повільним з двох процесів, залежних від температури: перенесенням атомів нікелю крізь межу або рухомістю домішкових атомів, що сегрегують (зазвичай визначальна роль міграції належить домішкам, які, починаючи з певного вмісту, підвищують енергію активації цього процесу). Крім того, невраховані горофільні домішки, які розташовані по межах зерен, можуть утворювати ланцюжки дрібних включень, що механічно перешкоджають просуванню меж.

Введення горофільних РЗМ, які мають особливо високу хімічну активність, повинно обов'язково приводити до утворення частинок хімічних сполук типу «домішка-РЗМ», великих за розмірами і рідше розташованих на межі, ніж вкраплення неврахованих домішок. Реалізація такого роду змін зменшує гальмівну дію на межу зерна. Крім того, вона збільшує термодинамічний стимул до росту зерен через підвищення зерномежової енергії, оскільки вуглець (карбонільний нікель) і невраховані горофільні домішки переважно будуть зв'язані в ізольовані хімічні сполуки типу «домішка-РЗМ». Все це в результаті повинно викликати збільшення швидкості міграції меж. Очевидно, що максимальний приріст швидкості міграції відповідатиме такому вмісту РЗМ, який здатний зв'язати вуглець і всі невраховані домішки без залишку ($C_{кр}$).

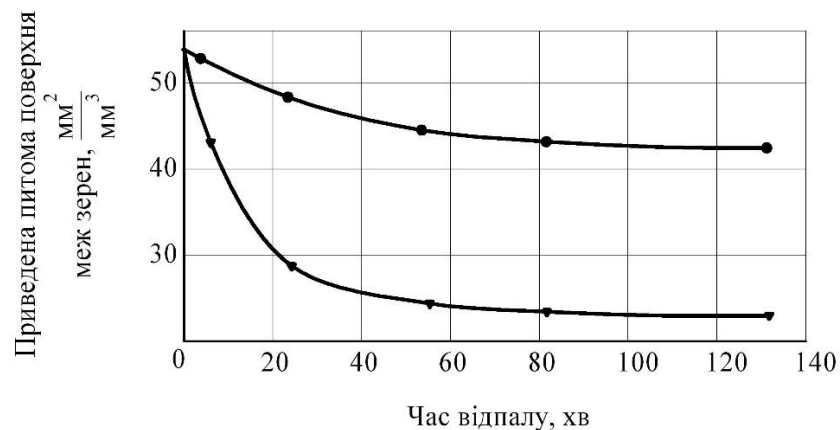
У випадку, коли вміст РЗМ перевищить $C_{кр}$, надлишок добавки, розташовуючись при цьому внаслідок позитивної адсорбційної активності на ділянках меж, вільних від хімічних сполук «домішка-РЗМ», знизить зерномежову енергію (тобто зменшить термодинамічний стимул росту зерен). Внаслідок цього, а також в результаті взаємодії надлишку мікродобавки з межею, зменшиться її швидкість міграції.

Таким чином, і з розглянутої вище точки зору можна отримати результат, аналогічний тому, що виникає за умови підвищення надлишкової

енергії тонкої межі при мікролегуванні металу РЗМ. Проте, як буде показано нижче, інше можливе трактування аномального ефекту підвищення зерномежової енергії при наявності горофільної добавки РЗМ не може розглядатися як домінуюче.

Помітне підвищення зерномежової енергії, ймовірно, ніколи не матиме місця у сплавах на нікелевій (залізній) основі (з високим вмістом другого базового компонента), оскільки межі зерен в цих випадках будуть більш рихлими у порівнянні з чистим нікелем (або залізом). Мікродобавки РЗМ в бінарних або складніших сплавах сегрегатимуть по міжзеренних межах, зменшуючи рихлість останніх, що відповідно приведе до зниження термодинамічного стимулу (зменшить поверхневу енергію) міграції меж зерен [21, 33].

Так, введення церію в кількості 0,1% (мас.) у сплав Ni+11%Cr (рис. 3.11) сприяло (за приблизними оцінками) підвищенню питомої поверхні меж зерен (в електролітичному нікелі така добавка церію знижує її – рис. 3.9) у процесі збиральної рекристалізації.



▼ – Ni + 11 % Cr (мас.)

● – Ni + 11 % Cr + 0,1 % Ce

Рисунок 3.11 – Вплив тривалості відпалу при 850°C на питому поверхню меж зерен сплавів на основі електролітичного нікелю

Слід також зазначити, що сегрегація мікродобавок РЗМ відбувається не тільки на межах субзерен (блоків). Підтвердженням цього слугує той факт, що дослідження залежності величини блоків від концентрації (рис. 3.12) дозволило отримати криву, аналогічну концентраційній кривій зерномежовій енергії (рис. 3.6).

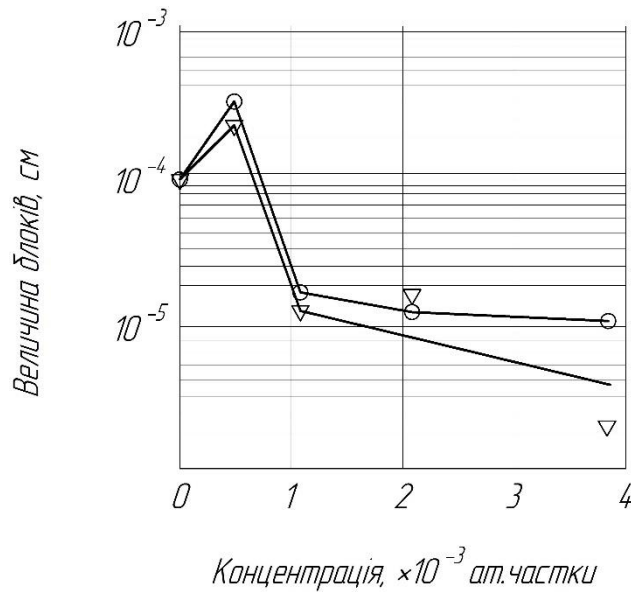


Рисунок 3.12 – Вплив мікродобавок церію (▽) і лантану (O) на величину блоків карбонільного нікелю

У роботах [29, 33] приведені деякі результати дослідження впливу Nd, Pr, Ce і La на структуру меж і властивості сплаву ЖС6К з підвищеним (до 15%) вмістом хрому. Безпосереднє визначення зерномежової енергії в цих випадках фактично не стало можливим (при застосуванні експериментальних методів) через складний структурний стан меж, з одного боку, і їх малорухомості, з іншого. Отже судити про характер зміни вільної енергії меж матриці складного складу під впливом мікролегування тим або іншим лантаном можна лише по чисто непрямим (побічним) ефектах: зміні морфології примежових карбідних виділень і властивостей даного жароміцного сплаву (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Вплив РЗМ на тривалу міцність та ударну в'язкість сплаву типу ЖС6К з підвищеним вмістом хрому

Властивості сплаву	Концентрація РЗМ, % (мас.)												
	Без домішк и	Nd			Pr			Ce			La		
		0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,12
Час до руйнування, год (t=975 ⁰ С; σ=200 МПа)	19	23	42	36	19,5	39	37	30	44	25	28	40	30
Ударна в'язкість a_k , ×10 ² кДж/м ²	1	2	3,5	2,2	1,8	3,8	2	2,2	3,5	1,8	2,1	3	1,8

Одразу відзначимо, що збільшення вмісту хрому у сплаві ЖС6К призвело до значного погіршення жароміцних властивостей і ударної в'язкості (таблиця 3.1). В основному це, мабуть, пов'язано з появою на межах зерен великої кількості карбідів, що утворюють практично неперервну сітку, введення невеликої кількості будь-якого з вище перелічених РЗМ сприяло відновленню властивостей цього сплаву. Оптимальним вмістом кожної з мікродобавок, як витікає з тієї ж таблиці, є концентрація 0,06% мас. (за розрахунком). При такому вмісті РЗМ відбувалася повна сфероїдизація примежових виділень карбідної фази.

Утворення по межах зерен мікролегованих сплавів ланцюжків сфероїдизованих карбідів (замість суцільної сітки) підтверджує позитивну поверхневу активність РЗМ, але сам факт сфероїдизації карбідних частинок начебто суперечить всьому викладеному раніше: процес сфероїдизації провокується перш за все зменшенням зерномежової енергії, а не

збільшенням її (останнє якраз і є характерним для бінарних систем «нікель-мікродобавка РЗМ»).

Проте, тут, цілком неправомірно взагалі наводити які-небудь жорсткі аналогії, оскільки побічні фактори типу однокомпонентного або комплексного легування можуть абсолютно змінити атомну будову і термодинамічні характеристики примежових зон сплавів, а отже, і напрям зміни зерномежової енергії при введенні мікродобавки РЗМ. Цікаво відзначити, що при надмірному мікролегуванні сплаву РЗМ (до 0,12%) відбувалося значне погіршення його властивостей (таблиця 3.1). Ймовірно, це слід пояснювати кардинальною зміною характеру атомної будови меж (збільшенням їх «жорсткості») внаслідок наявності на межах надлишкової кількості атомів РЗМ. Саме такого роду зміни відповідальні за зниження пластичності примежових зон і полегшення розвитку процесу інтеркристалітного руйнування (за умов збереження сприятливої форми примежових карбідів).

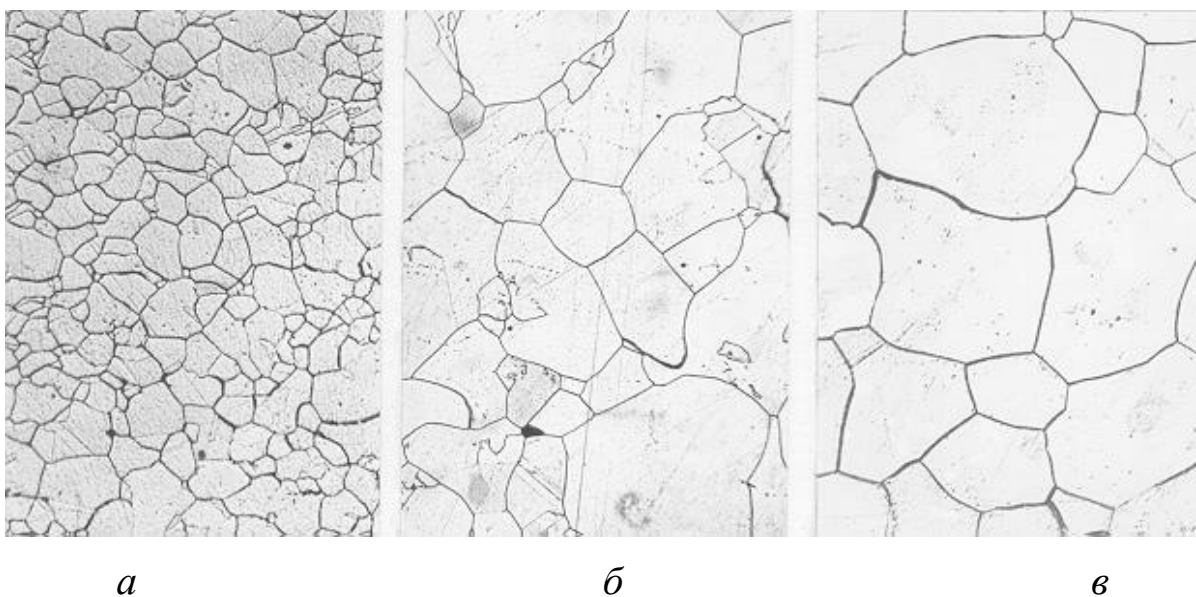
3.2 Мікролегування ітрієм та лантаноїдами для покращення структурного стану меж зерен

Як вже наголошувалося раніше, добавки лантаноїдів в електролітичний нікель приводили до аномальної зміни (підвищення) ВЗЕ. Проте вичленення чистих і індивідуалізованих ефектів, які пов'язані із цим цікавим, і, як нам представляється, важливим проявом наслідків процесу мікролегування, можна здійснити тільки у разі використання гранично чистих базових металів (нікелю, заліза) при отриманні різних модельних систем метал-мікродобавка.

Всі перераховані вище елементи-добавки розрізняються як розчинністю в металі-основі (лантаноїди і ітрій слабо або практично

нерозчинні в обох металах-основах), так і рядом інших фізико-хімічних характеристик (температура плавлення, питомий об'єм, атомна маса тощо). Це, природно, повинно внести до загальної або часткової тенденцій впливи елементів-адсорбатів на енергетичні характеристики міжзеренних меж і інші важливі параметри, які так або інакше пов'язані з внутрішніми межами поділу, певні корективи, неоднакові для різних мікролегувальних елементів.

Кінцевою задачею даного дослідження була побудова концентраційних кривих ВЗЕ; причому, визначення відносної зерномежової енергії планували проводити як з використанням спеціально розробленої для цієї і аналогічних цілей методики, так і за методом канавок (з метою незалежного підтвердження тенденцій, що виявляються). Крім того, було цікаво зпівставити характер зміни ВЗЕ з мікроструктурною картиною розвитку процесу росту зерен (особливо на стадії збиральної рекристалізації).

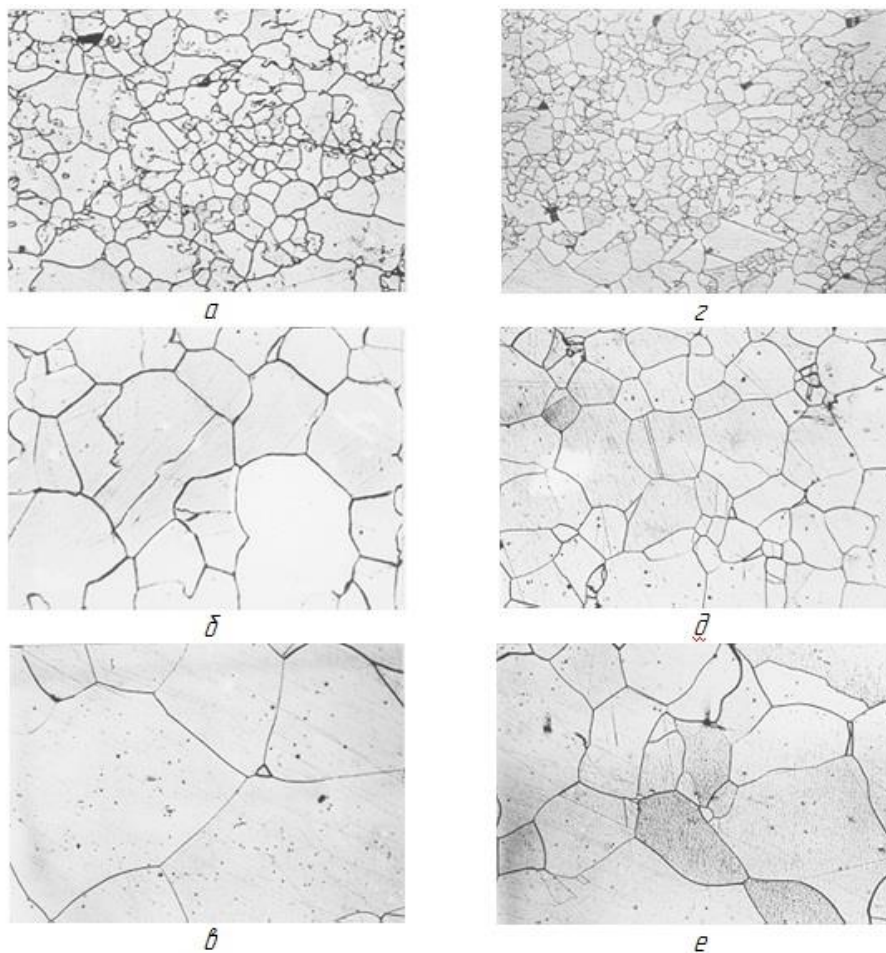


a – 4 хв.; *б* – 10 хв.; *в* – 180 хв.

Рисунок 3.13 – Мікроструктура чистого нікелю після відпалу при температурі 600°C; $\times 200$

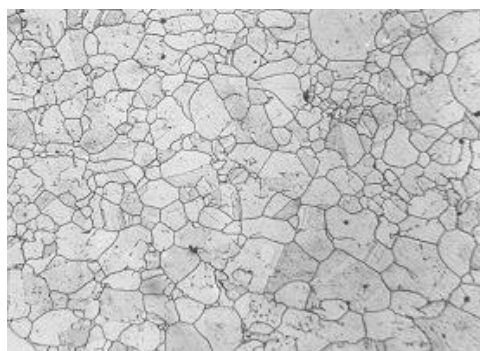
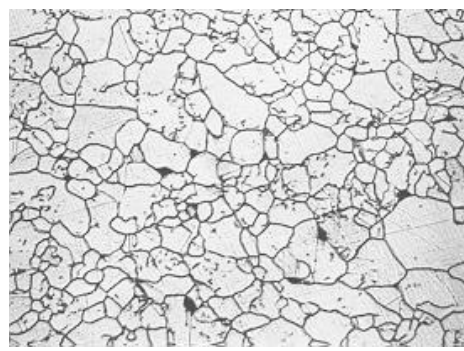
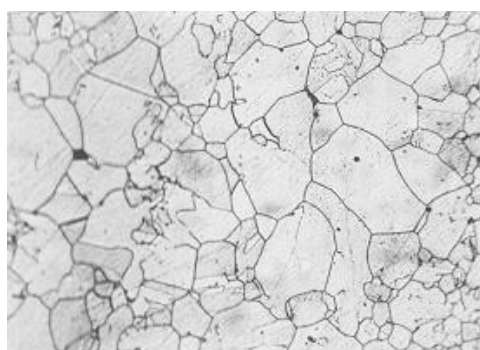
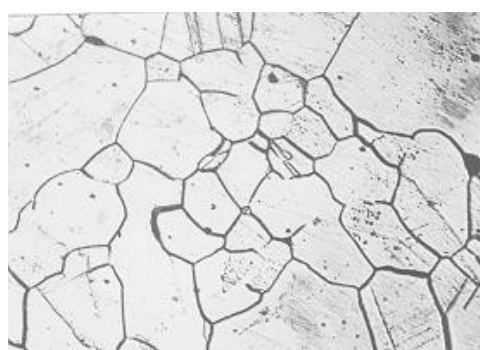
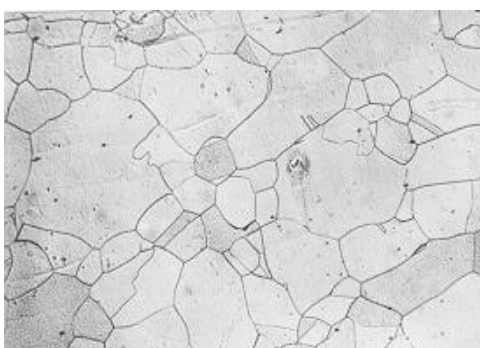
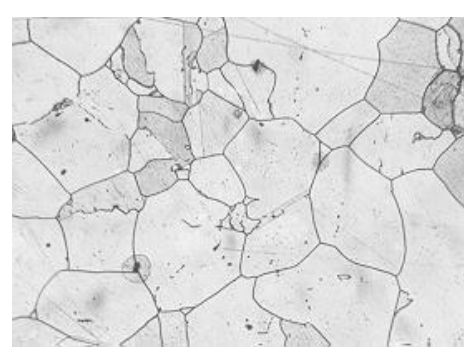
Рекристалізаційний нагрів заздалегідь деформованих стискуванням (50%) зразків мікролегованого нікелю (сплави 100-111) проводили при температурах 500...620°C в соляній ванні. Зразки відпалювали із зупинками

для визначення питомої поверхні меж зерен (S_V) по описаній вище методиці [34-36]. Про зміну розміру зерен у часі (на стадії збирального росту) в деяких з вибраних для вивчення модельних бінарних системах можна судити на підставі мікроструктур, приведених на рис. 3.12-3.13. Всі залежності питомої поверхні меж зерен S_V від часу відпалу τ були кривими з максимумами (рис. 3.16). Ділянки таких кривих, що простираються до максимальної ординати, відповідають етапу первинної рекристалізації, праві ж, спадаючі їх гілки (включаючи «хвости» кривих) характеризують кінетику росту зерен в процесі вже збиральної рекристалізації.



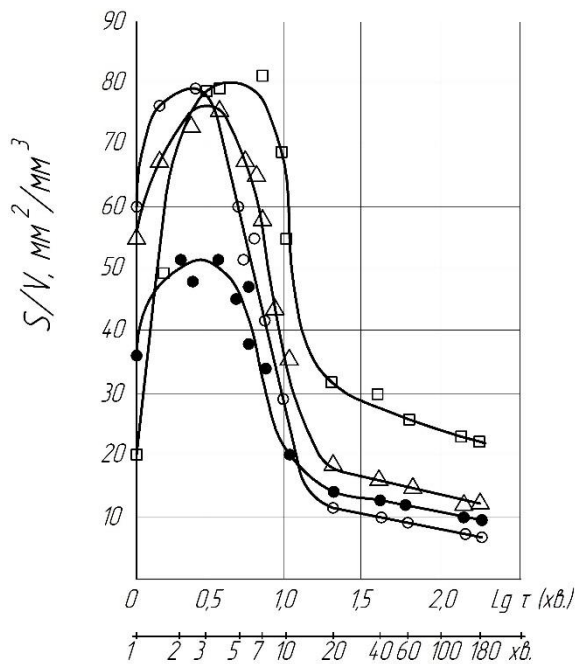
$a, c - 4$ хв., $b, d - 10$ хв., $e, f - 180$ хв.

Рисунок 3.14 – Мікроструктура нікелю, мікролегованого ітрієм ($a, b, c - 0,8 \cdot 10^{-4}$ ат. часток мікродобавки; $d, e, f - 6,0 \cdot 10^{-4}$ ат. часток мікродобавки), після відпалу при температурі 600°C ; $\times 200$

*a**z**б**д**в**е*

a, z – 10 хв.; *б, д* – 60 хв.; *в, е* – 250 хв.

Рисунок 3.15 – Мікроструктура нікелю, мікролегованого $60 \cdot 10^{-4}$ ат. часток ренію (*a, б, в*) і $30 \cdot 10^{-4}$ ат. часток цирконію (*z, д, е*) після відпалу при 600°C ; $\times 115$

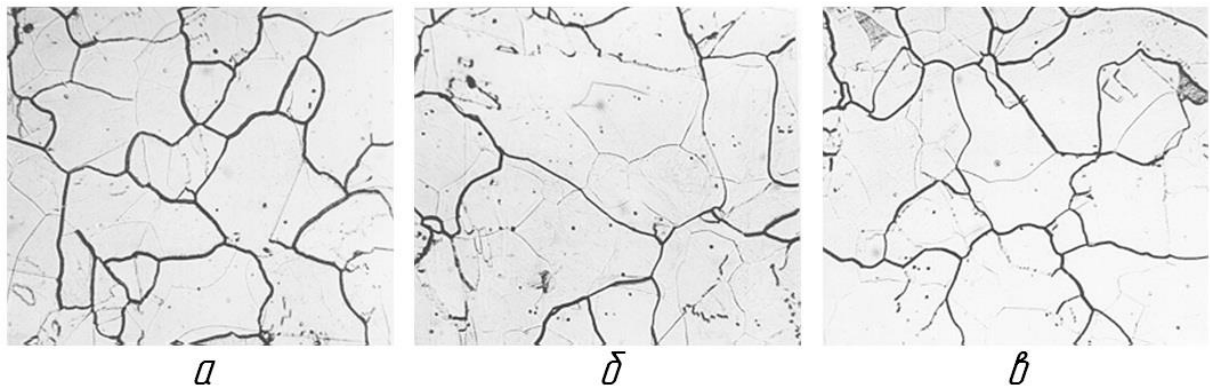


● – нікель; ○ – нікель + $0,8 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію; Δ – нікель + $2,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію; □ – нікель + $6,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію

Рисунок 3.16 – Залежність питомої поверхні меж зерен чистого та мікролегованого нікелю від часу відпалу при 600°C

Відзначимо, що при вмісті в нікелі і залізі мікродобавки РЗМ (церію, лантану) або ітрію, рівної або близької до критичної концентрації $0,8 \times 10^{-4}$ ат. частки, кінці («хвости») кривих S_v (завершальний етап збирального росту зерен) розташовується нижче, ніж відповідні ділянки тих же кривих для чистого нікелю або заліза. Таким чином, величина зерна до кінця відпалу, а значить і швидкість міграції меж зерен у зразків сплавів з таким вмістом мікролегувального елементу більше, ніж у чистого нікелю (заліза). Це підтверджується приведеними на рис. 3.14 мікроструктурами зразків після тривалого відпалу. Головну причину такої поведінки матеріалів при нагріві, мабуть, слід шукати в екстремальному «виписку» зерномежової енергії, що і підтвердилося відповідними розрахунками і вимірюваннями (про це дивися нижче). Аналогічні результати, що ілюструють гранично інтенсивний ріст зерен при заданих умовах експерименту, були отримані і на зразках після відпалу у вакуумі. На рис. 3.17 приведені мікроструктури чистих і

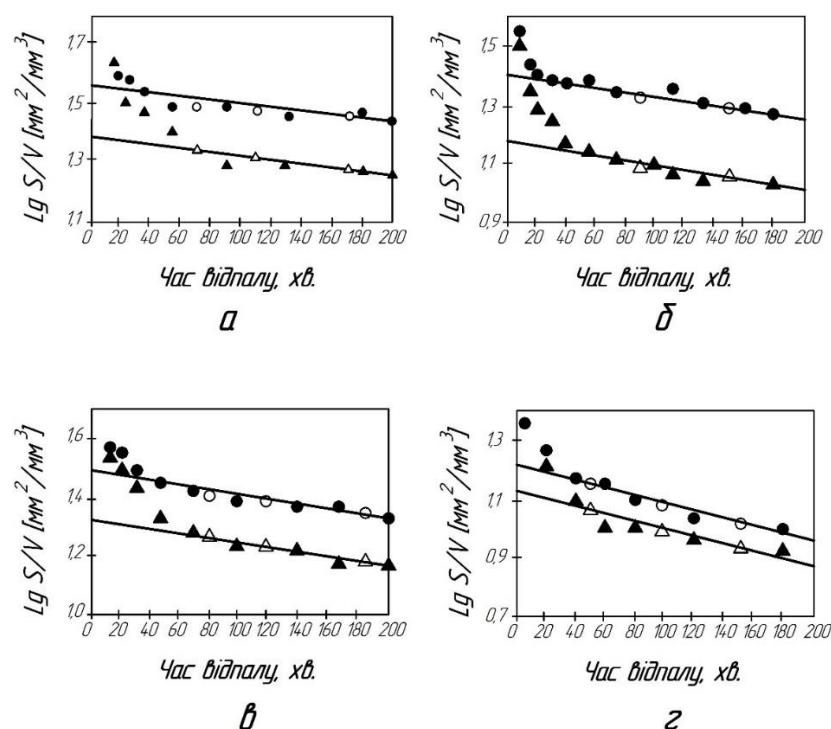
мікролегованих ітрієм і церієм металів після високотемпературного вакуумного травлення. На всіх мікрофотографіях добре помітні сітки первинних контурів меж зерен, які служать орієнтирами при оцінці ступеня структурних змін в досліджуваних матеріалах; що ж до мікродобавок ренію і цирконію, то незалежно від типу металевої основи сплавів, ці елементи не викликають збільшення швидкості росту зерен ні для одного виду добавки в заданому інтервалі концентрації (рис. 3.15). Це, навпаки, вже дозволяє припускати зниження зерномежової енергії нікелю і заліза при мікролегуванні останніх добавками ренію і цирконію.



a – чистий нікель; *б* – нікель + $0,8 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію; *в* – нікель + $6,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію

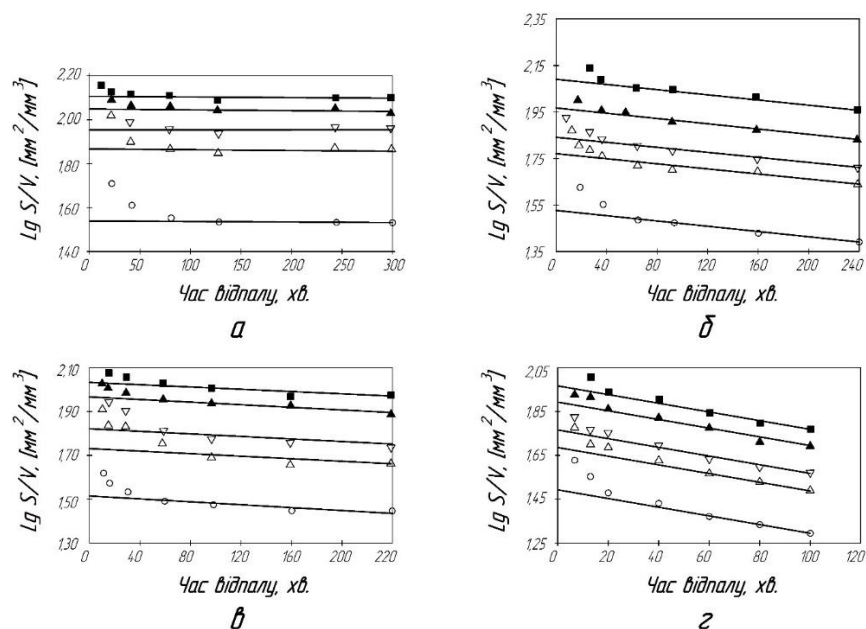
Рисунок 3.17 – Мікроструктура нікелевих сплавів після вакуумного травлення (950°C , 2 год.); $\times 70$

Необхідні для оцінки ВЗЕ (за розробленою методикою) лінеаризовані залежності $S_v(\tau)$ приведені на рис. 3.18-3.20. Основою для отримання всіх цих залежностей виступали «хвости» кривих S_v (див. рис. 3.16), що характеризували собою стадію стабілізованого росту зерен. Результати розрахунку ВЗЕ приведені в таблиці 3.2 (в цій же таблиці приведені і оцінки ВЗЕ за методом канавок травлення), а також надані у вигляді концентраційних залежностей по кожному з досліджених мікролегувальних елементів (рис. 3.20).



●, ○ – чистий нікель; ▲, Δ – нікель + $0,8 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію (темні точки відповідають експериментальним даним, світлі – згладженим кривим $S_v(\tau)$)

Рисунок 3.18 – Часові залежності логарифму питомої поверхні меж зерен (температура відпалу: а – 540°C; б – 560°C; в – 580°C; г – 620°C)



○ – чистий нікель; Δ – нікель + $0,4 \cdot 10^{-4}$ ат. частки цирконію; ▽ – нікель + $0,8 \cdot 10^{-4}$ ат. частки цирконію; ▲ – нікель + $0,4 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ренію; ■ – нікель + $2,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ренію

Рисунок 3.19 – Часові залежності логарифма питомої поверхні меж зерен (температура відпалу: а – 500°C; б – 550°C; в – 580°C; г – 620°C)

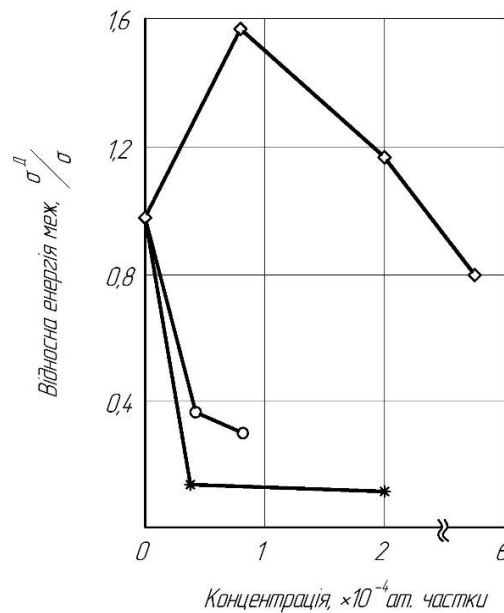


Рисунок 3.20 – Концентраційні залежності відносної зерномежової енергії в системах нікель-ітрію (□), нікель-цирконій (○) і нікель-реній (*)

З цих даних виходить, що вплив РЗМ і ітрію на ВЗЕ за характером абсолютно протилежний впливу ренію і цирконію (особливо чітко це виявляється при малому (докритичному) вмісті елементів першої групи в металі-основі (нікелі)).

Якщо вплив добавок ренію і цирконію як горофільних елементів на поведінку ВЗЕ цілком тривіальний (зерномежова енергія знижується при збільшенні концентрації таких добавок), то роль лантаноїдів і ітрію в зміні ВЗЕ (як за величиною, так і за спрямованістю) заслуговує більш уважного розгляду. Всі залежності ВЗЕ від вмісту La, Ce і Y за характером виявилися ідентичними кривим ВЗЕ для очищеного карбонільного нікелю з мікродобавками церію і лантану, приведеними в роботі [1, 2]. Як витікає з графіку на рис.3.20, збільшення вмісту мікродобавки лантаноїду або ітрію викликає зростання зерномежової енергії, яка досягає максимуму при розрахунковій критичній або близькій до неї концентрації. Максимальна ВЗЕ, мабуть, відповідає нестійкій рівновазі великокутових меж в системі метал-мікродобавка. Зниження ВЗЕ при закритичних концентраціях легувальної мікродобавки скоріш за усе пов'язане з частковим рафінуванням

меж в результаті утворення мікрovidілень іншої фази за участю мікролегувального елемента (деяке наближення до стійкої рівноваги). Детальніше причини аномального ходу такого роду кривих ВЗЕ аналізуються в роботах [1, 2, 24, 37]. Можна припустити, що гомогенне утворення субмікрovidілень відбувається тільки при кристалізації рідкого металу і не може мати місця в процесі міграції меж. Надлишок мікродобавки, що утворюється при зменшенні (S_V), мабуть, усувається не за допомогою нових мікрovidілень, а завдяки розрихленню меж (при цьому критична концентрація домішки знижується і межа у кращому випадку залишається тільки насиченою нею). Рівномірне і слабке розсіювання експериментальних точок відносно прямих $\lg S_V(\tau)$ у системах з докритичним вмістом мікродобавки, а також дані роботи [21] начебто підтверджують це припущення.

Таблиця 3.2 – Чисельні оцінки відносної зерномежової енергії (ВЗЕ), отримані за допомогою аналізу кривих $S_V(\tau)$ і методу канавок

№	Склад (базовий метал + Л.Е., ат частка $\times 10^{-4}$)	Температура, °C	ВЗЕ	
			З кривих $S_V(\tau)$	Метод канавок
1	2	3	4	5
1	Fe + 0,4 La	600	$1,26 \pm 0,05$	$1,26 \pm 0,08$
2	Fe + 0,8 La	600	$1,54 \pm 0,06$	–
3	Fe + 2,0 La	600	$1,54 \pm 0,12$	$1,13 \pm 0,10$
4	Fe + 6,0 La	600	$1,52 \pm 0,12$	$1,03 \pm 0,11$
5	Fe + 0,8 Ce	600	$0,92 \pm 0,04$	$1,25 \pm 0,12$
6	Fe + 2,0 Ce	600	$1,26 \pm 0,07$	$1,04 \pm 0,12$
7	Fe + 6,0 Ce	600	$1,20 \pm 0,09$	$1,01 \pm 0,09$
8	Fe + 0,4 Y	600	$1,51 \pm 0,07$	$1,29 \pm 0,07$
9	Fe + 0,8 Y	600	$1,55 \pm 0,08$	$1,22 \pm 0,09$
10	Fe + 2,0 Y	600	$1,19 \pm 0,07$	$1,01 \pm 0,09$

1	2	3	4	5
11	Fe + 0,8 Re	570	$0,88 \pm 0,14$	$0,98 \pm 0,10$
12	Fe + 60,0 Re	570	$0,59 \pm 0,16$	—
13	Fe + 0,8 Zr	570	$0,80 \pm 0,12$	—
14	Fe + 30,0 Zr	570	$0,67 \pm 0,13$	—
15	Ni + 0,8 Y	600	$1,58 \pm 0,09$	$1,13 \pm 0,05$
16	Ni + 2,0 Y	600	$1,18 \pm 0,11$	$1,04 \pm 0,08$
17	Ni + 6,0 Y	600	$0,79 \pm 0,13$	$1,01 \pm 0,09$
18	Ni + 0,4 Zr	620	$0,37 \pm 0,08$	—
19	Ni + 0,8 Zr	620	$0,30 \pm 0,07$	—
20	Ni + 0,4 Re	620	$0,13 \pm 0,09$	—
21	Ni + 0,8 Re	620	$0,11 \pm 0,12$	—

Як вже наголошувалося раніше, невеликі добавки РЗМ (і аналогічний за поведінкою ітрій) володіють малою або виключно малою (ентропійною) розчинністю (із-за великої для їх атомів величини розмірного фактора) в металі-основі і розташовуються переважно на внутрішніх межах поділу, не зважаючи на деяке збільшення енергії останніх. Процес цей в термодинамічному плані цілком виправданий, якщо переміщення атомів такого роду до меж металевої матриці забезпечує їй помітне (але таке, що перевершує зростання поверхневої енергії) зниження пружної складової вільної енергії у впорядкованій частині її об'єму.

Отже, при збільшенні в металі-основі вмісту певного мікролегувального елемента (лантаноїду, ітрію) понад розрахунково-критичну кількість, достатню для повного вичерпання всіх центрів адсорбції на міжзеренній межі (в процесі сегрегаційного перерозподілу частини атомів елемента-добавки між об'ємом металу і його внутрішньою межею), теоретично припустимі дві можливості зміни структурно-енергетичного стану межі поділу: 1) формування по всій її площі субмікророзділень іншої фази за участю елемента, що сегрегує; 2) розрихлення межі, яке зменшує величину «граничної концентрації» цього елемента до або нижче за

критичний рівень, коли $C_r \leq 1$ (у разі реалізації рівності «об'ємна» гранична концентрація адсорбата не змінюється; кількісне збільшення речовини лінійно корелює з приростом граничного об'єму), і, отже, зерномежова енергія теж фактично не змінюється (принаймні, якісь припустимі зміни енергії межі поділу завдяки ефекту її розрихлення залишаються набагато меншими, ніж у тому випадку, коли має місце помітне зростання граничної концентрації мікролегувального елемента). Приведена на рис. 3.20 концентраційна залежність ВЗЕ, як здається, достатньо переконливо ілюструють можливості системи Ni-Y.

І, нарешті, аналізуючи приведені криві, необхідно підкреслити ще один поза сумнівом важливий момент. Концентраційні криві ВЗЕ (екстремального плану) мікролегованого заліза мають той же вигляд, що і відповідні криві для нікелю з тими ж мікродобавками, незважаючи на певні відмінності в будові великокутових меж цих металів.

Крім того, слід зазначити і той факт, що мікродобавки ітрію в чистий метал спричиняють такий же зерномежовий ефект, як і добавки лантаноїдів (тим більше, що при неформальному підході ітрій через інше місце розташування в періодичній таблиці елементів, повинен відрізнятися від лантаноїдів за величиною хімічної енергії зв'язку з металами-розчинниками). Отже, можна припустити, що визначальний внесок в підвищення зерномежової енергії в розглянутих бінарних системах робить скоріше пружна енергія (розмірний фактор для атомів більшості з розглянутих РЗМ і ітрію приблизно однаковий), а не енергія хімічного зв'язку між атомами основного та мікролегувального металу.

При оцінці впливу на ВЗЕ ренію і цирконію, які повністю розчинні в базових металах у вибраному інтервалі концентрацій, можна стверджувати, що ці елементи зі збільшенням концентрації починають інтенсивно зменшувати зерномежову енергію у нікелі, що дозволяє віднести їх до позитивних адсорбатів для цього базового металу.

Що ж стосується вищезгаданого відносного зменшення зерномежової енергії в нікелевих сплавах більш складного складу при введенні мікродобавок РЗМ, то цей ефект можна спробувати пояснити за допомогою такої гіпотетичної фізико-хімічної моделі.

Межі зерен в складних сплавах зазвичай сильно збагачені різними за природою елементами, які разом відповідальні за розрихлення будь-якої окремої межі і побічно через це і за підвищення її вільної енергії (перш за все завдяки визначальному внеску пружних спотворень перехідної граничної зони). Висока хімічна активність атомів РЗМ забезпечує «витягання» ними різних чужорідних атомів з області межі (ефект рафінування) і утворення в результаті субмікроеділень надлишкових фаз, вбудованих в «тіло» самої межі. В результаті ступінь розрихлення межі зменшується, а ступінь гетерогенності граничної зони, навпаки, зростає, що і приводить до зниження середнього рівня її вільної енергії. Атомна структура межі, очищеної від домішок і окремих атомів РЗМ, стає більш досконалою, так що зони іррегулярності в розташуванні атомів основи в граничній зоні стають менш чіткими.

Розділ 4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

У розділі наведено основні заходи із охорони праці при дослідженні впливу поверхневоактивних домішок на енергетичні характеристики високочистого нікелю.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки, які пов'язані з порушенням роботодавцем вимог щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці шляхом належного облаштування робочих місць і виробничих, санітарно-побутових та інших приміщень на підприємстві, безпечного використання працівниками засобів праці, забезпечення навчання працівників і залучення їх до вирішення питань охорони праці;

б) Недостатня підготовка робітників може бути обумовлена недостатніми знаннями за фахом, відсутність знань технології і експлуатаційній документації, що може призвести до аварійних ситуацій;

в) Можливість ураження електричним струмом у наслідок несправності електрообладнання, яке використовується під час виконання дослідницьких робіт, невиконання правил техніки безпеки при користуванні електричним обладнанням, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електротравм різного ступеню або навіть до летального наслідку;

г) Вірогідність отримати механічні травми при отриманні дослідницьких зразків або виробів для подальшої обробки, це може бути пов'язано з порушенням охорони праці під час роботи з абразивним інструментом та металообробним обладнанням;

д) Небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом електронної металографії з використанням електронних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань.;

ж) Незадовільні параметри мікроклімату робочого місця, у зв'язку із відсутністю приладів, що забезпечують необхідний повітрообмін та опалювальної системи, які можуть викликати загальні захворювання;

з) Недостатнє або надмірне освітлення робочих місць, в зв'язку з несправністю, або хибним вибором освітлювальних приладів, в зв'язку з неправильним розташуванням робочих місць по відношенню до джерел природного та штучного освітлення, що призводить до погіршення зору або ефекту засліплення.

к) Небезпеки, які пов'язані з умовами праці в надзвичайних ситуаціях.

4.2 Заходи по забезпеченню безпеки працівників

а) Згідно вимог НПАОП 0.00-7.11-12 "Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників" [38]:

– Усі працівники повинні пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці відповідно до "положення про порядок проведення навчання" затверджено наказом держнагляду охорони праці"

– Вимоги щодо облаштування робочих зон передбачають справний робочий стан устаткування і захисних пристроїв, сприяння безпечних умов

для усунення виявлених несправностей, які можуть негативно вплинути на безпеку і здоров'я працівників, можливість регулярного контролю і перевірок здатності функціонування захисних засобів і пристроїв, призначених для запобігання небезпеці або їх усунення.

Шляхи пересування в робочій зоні включаючи сходи, стаціонарні переходи, аварійні виходи повинні бути позначені відповідними знаками, мати дороговкази, бути розташовані і мати такі розміри, щоб прохід або проїзд був легким і безпечним. Наприклад: підлоги приміщень не повинні мати нерівностей, отворів або небезпечних ухилів, двері аварійних виходів повинні відкриватись назовні і замикатись, так щоб у випадку необхідності будь-яка особа могла легко і швидко їх відкрити без застосування додаткових засобів, захищеність робочих зон, шляхів пересування, аварійних виходів категорично забороняється.

Роботодавець забезпечує повну і вичерпну інформацію працівників та їх уповноважених представників з питань охорони праці про можливі небезпечні ситуації, про вжиті заходи для їх запобігання або їх ліквідації та про дії працівників у аварійних ситуаціях.

Для забезпечення належного виконання цих заходів роботодавець призначає відповідальних осіб, забезпечує їх підготовку і спорядження відповідно до небезпечності виробництва, масштабів і специфіки підприємства.

Виробниче приміщення повинні мати достатню площу і висоту для раціонального планування відповідно до СНиП 2.09.04-87 «Административные и бытовые здания» [39] та СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания» [40].

б) Нормами радіаційної безпеки встановлюються такі категорії осіб які зазнають опромінювання:

Категорія А (персонал) - особи, які постійно чи тимчасово працюють безпосередньо з джерелами іонізуючих випромінювань.

Категорія Б (персонал) - особи, які безпосередньо не зайняті роботою з джерелами іонізуючих випромінювань, але у зв'язку з розташуванням робочих місць в приміщеннях та на промислових майданчиках об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями можуть отримувати додаткове опромінення.

Для контролю опромінення персоналу встановлюється:

- Для персоналу індивідуальна річна ефективна доза не повинна перевищувати значення ЛД для даної категорії згідно НРБУ.

- Особи, молодші за 18 років, не допускаються до роботи з джерелами іонізуючого випромінювання.

- Радіоактивне забруднення шкіри, спецодягу та робочих поверхонь не повинно перевищувати ДЗА.

- Контроль за опроміненням персоналу регламентується відповідним розділом Основних санітарних правил України (ОСПУ).

- Обсяг і види контролю радіаційного стану на радіаційно-ядерному об'єкті здійснюється відповідно до вимог ОСПУ.

в) Для уникнення ураження електричним струмом згідно ПУЕ -2017 "правила улаштування електроустановок" [41] :

- Всі співробітники лабораторії повинні пройти навчання та перевірку знань з електробезпеки та у відповідності з НПАОП.0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників»[42] отримати 2-3 групу з електробезпеки. Періодично один раз на рік необхідно перевіряти опір заземлення, який не повинен перевищувати 4 Ом. Якість заземлення перевіряється щорічно з оформленням акту відповідно нормативних вимог ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [43].

- Періодично, не рідше ніж два рази на рік, передбачається перевіряти справність контактів електроз'єднань, штепсельних вилок з'єднувальних провідників. В тому випадку, якщо при дотику до не струмопровідних частин

електроприводу відчувається електричний струм, передбачається вимикання приладу від електромережі. Ремонт електричного обладнання проводять особи, котрі мають кваліфікаційну групу (не менше III групи) з електробезпеки.

- Усі ремонтні роботи на мікроскопі проводять тільки після повного відключення від електричної мережі. При зміні катоду після розкриття електронної гармати перед тим, як доторкнутися рукою до фокусуючого електроду, треба зняти заряд з катодного вутла шляхом його заземлення.

- Усі ремонтно-монтажні роботи або огляд високовольтних частин мікроскопу проводити не менш, ніж двома особами.

Для захисту людей від ураження електричним струмом передбачено використовувати подвійну ізоляцію провідників.

г) Для виключення механічних травм при проведенні механічної або абразивної обробки зразків, або дослідницьких виробів передбачено:

- заходи захисту при використанні абразивного інструменту.

Для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно виконувати вимоги інструктажів з охорони праці при роботі на металообробному обладнанні згідно ДНАОП 1.1.10-1.04-01 “Правила безпечної роботи з інструментом і пристосуваннями” [44], ГОСТ 12.3.028-82 «Процесс обработки абразивным и эльборовым инструментом», зокрема, установка абразивних кіл на верстатах повинна проводитися тільки спеціально проінструктованими наладчиками, використання абразивних кіл з дефектами заборонено, абразивні кола повинні мати штамп або наклейку про випробування, порядковий номер кола і підпис особи, відповідальної за випробування, біля кожного верстата необхідно вивісити табличку із зазначенням допустимої роботи колової швидкості використовуваних кіл і частоти обертання шпинделя верстата в хвилину, при обертанні абразивного кола, виступаючі кінці шпинделя і кріпильні деталі захистити захисними кожухами, підручники повинні мати достатній за величиною майданчик для

стійкого положення оброблюваного виробу. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального круга повинен бути не більше 3 мм;

Використовувати індивідуальні засоби захисту, зокрема, для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів.

- при необхідності проведення токарної, фрезерної обробки обов'язковим є виконання інструкцій з техніки безпеки при використанні певного обладнання. Відносно безпеки обов'язковим є використання індивідуальних заходів захисту: окуляри ГОСТ 12.4.013- 97, спецодягу ГОСТ 12.4.100-80, взуття.

- при необхідності очищення поверхні методом піско-струйного оброблення, основним заходом захисту є захисні окуляри або маска, заходи захисту органів слуху беруші за ГОСТ ЕН 13819-2:2014 і захисту рук.

д) При визначенні типу структури використовується горизонтальний металографічний мікроскоп МИМ-8 призначений для дослідження мікроструктури металів та інших не прозорих об'єктів в світловому полі при прямому і відбитому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження об'єктів мікроскоп забезпечений монокулярною і біноклярною насадками. Власне збільшення біноклярної насадки – 2,5 х.

Освітлення здійснюється від електролампи розжарювання потужністю 170 Вт, 17 В, живиться від освітлювальної мережі 220 В через понижуючий трансформатор, забезпечений секційним перемикачем для регулювання яскравості напруження лампи.

Правильне використання мікроскопа виходить тільки за умови раціональної комбінації об'єтивів, окулярів. При використанні їх треба враховувати, тому що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур.

Крім правильної комбінації об'єтивів і окулярів, не менш важливе значення має і правильне застосування світлофільтрів. Як правило, при

роботі з об'єктами-ахроматами слід застосовувати світлофільтри, а з апохроматами можна працювати і без них.

Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами, пофарбованими в основному по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

ж) Неправильне проектування або несправність систем опалення та вентиляції в приміщенні лабораторії може призвести до негативних впливів на здоров'я працівників у вигляді простудних захворювань, перегрівань. Метеорологічні умови в приміщенні лабораторії – температура повітря, відносна вологість повітря й швидкість його переміщення відповідають встановленим санітарно-гігієнічним вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [45].

Роботи в лабораторному приміщенні, належать до категорії І - легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

- у холодний період року: температура 21-23 С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1м/с;

у теплий період року: температура 22-24 С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2м/с.

з) Основними причинами недостатньої або надмірної освітленості робочих місць є несправність або хибний вибір освітлювальних приладів,

неправильне розташування робочих місць по відношенню до джерел освітлення.

Незадовільна освітленість на робочому місці або на робочій зоні може бути причиною зниження продуктивності та якості праці, отримання травм. Недостатнє або надмірне освітлення викликає зоровий дискомфорт, що виражається у відчутті незручності або напруженості. Тривале перебування в умовах зорового дискомфорту призводить до розсіювання уваги, зменшення зосередженості, зоровий і загальний втомі.

У лабораторному приміщенні, згідно ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення» [46] передбачене природне та штучне освітлення. Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі або штори. Розрахунок штучного освітлення відбувається в приміщенні розміром 8 x 4 x 3,5м, ЛПО (растровим) типом світильника, числовим значенням коефіцієнта світильника 1,4, колір стелі, стін, підлоги 70%, 50%, 30%.

Площина нормування освітленості, висота площини над підлогою Г–0,8, розряд і під розряд зорової роботи Б-1, освітленість робочих поверхонь при загальному освітленні 300.

1. Розрахувати кількість рядів світильників у приміщенні N_p :

$$N_p = \frac{B}{(H - h_p) \cdot \frac{L}{h}}, \text{ шт;} \quad (4.1)$$

$$N_p = \quad = 1,058 = 2 \text{ шт.}$$

де: B – ширина приміщення, м;

H – висота приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні, м;

L/h - числове значення коефіцієнта світильника.

2. Визначити максимальну припустиму відстань між рядами світильників $L_{\max}$;

$$L_{\max} = B/N_p \text{ м}; \quad (4.2)$$

$$L_{\max} = 4/2 = 2 \text{ м.}$$

де: B – ширина приміщення, м;

N_p – кількість рядів світильників у приміщенні, шт.

3. Визначити значення індексу приміщення i , що характеризує співвідношення розмірів освітлювального приміщення і висоти розміщення світильників:

$$i = \frac{A \cdot B}{(H - h_p) \cdot (A + B)} \quad (4.3)$$

$$i = \frac{8 \cdot 4}{(3,5 - 0,8) \cdot (8 + 4)} = 0,99$$

де: A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

H – висота приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні, м.

4. Визначити значення коефіцієнта використання світлового потоку η , створюваного світильниками вибраного типу.

Коефіцієнт використання світлового потоку при індексі приміщення 1.33 : $\eta=47\%$.

5. Визначити сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному приміщенні Φ_{Σ} :

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot A \cdot B \cdot k_z \cdot z}{\eta}, \text{ лм} \quad (4.4)$$

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{300 \cdot 8 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 1,1}{0,47} = 31455 \text{ лм}$$

де: E_n – рівень нормованого загального освітлення, лк;

A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

k_z – коефіцієнт запасу;

z – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості (відношення середньої освітленості до мінімальної освітленості), як правило дорівнює (для люмінесцентних ламп $z = 1,1$);

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

6. Визначити умовну загальну кількість світильників у приміщенні

$N_{св}$:

$$N_{св} = \frac{A \cdot B}{L_{max}^2}, \text{ шт}$$

(4.5)

$$N_{св} = \frac{8 \cdot 4}{2^2} = 8 \text{ шт}$$

де: A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

L_{max} – максимально припустима відстань між рядами світильників, м.

7. Розрахувати світловий потік умовного джерела світла Φ_l :

$$\Phi_l^* = \Phi_{\Sigma} / N_l, \text{ лм} \quad (4.6)$$

$$\Phi_l^* = 31455 / 32 = 983, \text{ лм}$$

де Φ_{Σ} – сумарний світловий потік освітлювальної установки, лм;

N_l – загальна кількість ламп у світильнику, яка розраховується за формулою:

$$N_l^* = N_{св} \cdot n, \text{ шт} \quad (4.7)$$

$$N_l^* = 8 \cdot 4 = 32, \text{ шт}$$

де: n – кількість ламп у світильнику, шт.

8. Обираємо тип стандартної лампи з найближчим значенням фактичного світлового потоку лампи і визначаємо коефіцієнт m .

Лампа потужністю 18Вт, світловий потік 1050 лк.

$$m = \Phi_{\text{л}}^* / \Phi_{\text{л}} \quad (4.8)$$

$$m = 983/1050 = 0,88$$

9. Визначити оптимальну (фактичну) кількість світильників:

$$N_{\text{св}} = N_{\text{св}}^* \cdot m, \text{ шт} \quad (4.9)$$

$$N_{\text{св}} = 8 \cdot 0,88 = 7,04 = 8$$

де $N_{\text{св}}^*$ - умовна загальна кількість світильників у приміщенні, шт.

m - співвідношення між розрахунковим світловим потоком лампи та фактичним світловим потоком вибраної стандартної лампи.

10. Визначити фактичну кількість ламп у приміщенні $N_{\text{л}}$:

$$N_{\text{л}} = N_{\text{св}} \cdot n, \text{ шт} \quad (4.10)$$

$$N_{\text{л}} = 8 \cdot 4 = 32 \text{ шт}$$

11. Визначити загальну розрахункову освітленість $E_{\text{р}}$ у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп:

$$E_{\text{р}} = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot \eta}{A \cdot B \cdot k_{\text{з}} \cdot z}, \text{ лк}; \quad (4.11)$$

$$E_{\text{р}} = \frac{1050 \cdot 32 \cdot 0,47}{8 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 1,1} = 320,45, \text{ лк}.$$

Таким чином, розрахункова освітленість у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп на 20 лк вища ніж нормована освітленість робочих поверхонь при загальному освітленні, що задовольняє умови освітленості у робочому приміщенні.

к) Рівень пожежної безпеки робочих зон, приміщень та інженерного устаткування повинен відповідати вимогам Правил пожежної безпеки в Україні, затверджених наказом МНС України від 19.10.2004 № 126, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 4.11.2004 за № 1410/10009 (НАПБ А.01.001 – 04) [47], та інших нормативно-правових актів з питань пожежної безпеки.

4.4 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

4.4.1 Заходи з пожежної безпеки

Комплекс протипожежних заходів приміщення обладнаного ПК з ВДТ розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 "Правила пожежної безпеки в Україні" [47].

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у приміщенні, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36-2016 "Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухо-пожежною та пожежною небезпекою" [48], приміщення обладнання ВДТ належить до виробництв категорії "Д" з пожежної небезпеки - простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення, обладнане ПК з ВДТ належить до виробництва категорії "Д", тому згідно вимог ДБН В 1.1-7:2016 "Пожежна безпека з будівництва. Загальні вимоги" [49] вона має II ступінь вогнестійкості.

З технічних та організаційних заходів запобігання пожеж в приміщенні обладнаному ПК з ВДТ передбачені наступні протипожежні заходи. На силовому обладнанні, силових та освітлювальних колах, згідно вимог ПУЕ встановлені захисні пристрої, що вимикають джерело живлення від ділянки електричного кола, у якій виникло коротке замикання.

4.4.2 У відповідності до кодексу цивільного захисту України [50] у разі випадку техногенної небезпечної ситуації зв'язаного з вибухом вибухонебезпечних речовин для захисту людей від використовуються захисні споруди, споруди подвійного призначення та найпростіші укриття. Захисні споруди цивільного захисту – інженерні споруди, призначені для захисту

населення від впливу небезпечних факторів, що виникають внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів.

До захисних споруд цивільного захисту належать:

- сховище – герметична споруда для захисту людей, в якій протягом певного часу створюються умови, що виключають вплив на них небезпечних факторів, які виникають внаслідок надзвичайної ситуації, воєнних (бойових) дій та терористичних актів

- протирадіаційне укриття – негерметична споруда для захисту людей, в якій створюються умови, що виключають вплив на них іонізуючого опромінення у разі радіоактивного забруднення місцевості

- швидко споруджувана захисна споруда цивільного захисту – захисна споруда, що зводиться із спеціальних конструкцій за короткий час для захисту людей від дії засобів ураження в особливий період.

Споруда подвійного призначення – це наземна або підземна споруда, що може бути використана за основним функціональним призначенням і для захисту населення. (підземний простір метрополітену, підземні стоянки, підземні переходи тощо).

Найпростіше укриття - це фортифікаційна споруда, цокольне або підвальне приміщення, що знижує комбіноване ураження людей від небезпечних наслідків надзвичайних ситуацій, а також від дії засобів ураження в особливий період.

Отже, з цього розділу можна зробити висновок, що заходи, які проводяться на підприємстві для забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях створюють безпечні умови праці, попередження травматизму та сприятливий санітарний стан.

Охорона праці включає систему законодавчих актів та соціально-економічні, технічні, санітарно-гігієнічні, організаційні засоби, які направлені на забезпечення безпеки та створення умов збереження.

Пожежна безпека на підприємстві включає в себе не тільки оснащення інструментами пожежогасіння і речовинами, а й розробку плану екстреної евакуації, а також проведення заходів з навчання персоналу.

У розділі було з'ясовано такі питання при проведенні робіт в приміщенні:

- визначено заходи по забезпеченню безпеки;
- проведені розрахунки рівня штучного освітлення у приміщенні та проведене порівняння їх з нормованими показниками для робочого приміщення;
- визначені захисні споруди для захисту населення від деяких факторів небезпеки.

Висновки

Отже, можна припустити, що визначальний внесок в підвищення зерномежової енергії в розглянутої в роботі бінарної системи робить скоріше пружна енергія (розмірний фактор для атомів більшості з розглянутих РЗМ і ітрію приблизно однаковий), а не енергія хімічного зв'язку між атомами основного та мікролегувального металу. Також, в ході виконання дипломної роботи було вставлено, що відбувається відносне зменшення зерномежової енергії в нікелевих сплавах більш складного складу при введенні мікродобавок РЗМ. Було з'ясовано, що при збільшенні в металі-основі вмісту певного мікролегувального елемента (лантаноїду, ітрію) понад розрахунково-критичну кількість, достатню для повного вичерпання всіх центрів адсорбції на міжзеренній межі (в процесі сегрегаційного перерозподілу частини атомів елемента-добавки між об'ємом металу і його внутрішньою межею), теоретично припустимі дві можливості зміни структурно-енергетичного стану межі поділу: 1) формування по всій її площі субмікророзділень іншої фази за участю елемента, що сегрегує; 2) розрихлення межі, яке зменшує величину «граничної концентрації» цього елемента до або нижче за критичний рівень, коли $C_r \leq 1$ (у разі реалізації рівності «об'ємна» гранична концентрація адсорбата не змінюється; кількісне збільшення речовини лінійно корелює з приростом граничного об'єму), і, отже, зерномежова енергія теж фактично не змінюється (принаймні, якісь припустимі зміни енергії межі поділу завдяки ефекту її розрихлення залишаються набагато меншими, ніж у тому випадку, коли має місце помітне зростання граничної концентрації мікролегувального елемента).

Дослідження границь зерен і прогнозування поведінки матеріалів розрахунковими методами при мікролегуванні ітрієм та лантаноїдами сплавів на основі нікелю значно знижує витрати на дослідження, оскільки зменшує

кількість практичних дослідів. Ця методика є економічно вигідною та доцільною.

Список використаних джерел:

1. Олышанецкий В.Е. Связь морфологии пограничных частиц с относительной межфазной энергией / В.Е. Олышанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.–2004. – №1. –С.8-15.
2. Smith C.S. – Trans AIME, 1948, 175, p.15.
3. Натапов Б.С., Олышанецкий В.Е. Влияние поверхностной активности легирующих элементов на форму вторичных выделений при распаде аустенита // Физика металлов и металловедение. – 1964. – Т.18. – Вып.6. – С. 895-903.
4. Натапов Б.С., Олышанецкий В.Е., Потуремец А.А. О распределении граничных выделений второй фазы в легированных сталях и сплавах // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1966. – № 5. – С. 8-9.
5. Олышанецкий В.Е. О сфероидизации пограничных прослоек карбидной фазы в инструментальных сталях // Производство и исследование быстрорежущих и штамповых сталей. М.: Металлургия, 1970. – С. 139-144.
6. Натапов Б.С., Олышанецкий В.Е., Шаблий Н.М., Христофорова Л.И. Об устранении карбидной сетки в стали ХВГ // Производство и исследование быстрорежущих и штамповых сталей. – М.: Металлургия, 1970. – С. 144-147.
7. Олышанецкий В.Е. Исследование закономерностей образования аномальных структур в металлических сплавах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1966. – 21с.
8. Натапов Б.С., Олышанецкий В.Е., Пономаренко Е.П. Влияние легирующих элементов на форму вторичных выделений в жаропрочных

сплавах с никелевой основой // Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. – № 1. – С.12-15.

9. Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. – М.: Металлургиздат, 1960. – 322 с.

10. Олышанецкий В.Е. Об оценке средней относительной энергии в некоторых моделях пограничных выделений // Металлофизика, выпуск 50. – К.: Наукова думка, 1974. – С.89-94.

11. E. Ruska. The Early Development of Electron Lenses and Electron Microscopy. Hirzel, Stuttgart, 1980, 23p.

12. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в двух книгах. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Ф. Изд. Мир, 1984. 303с.

13. Кан Р.У. Возврат и рекристаллизация // Физическое металловедение, 3.-М.: Мир, 1968. – С. 371-442.

14. Beck P.A. – Advances in Phys., 1954, V.3, P. 245.

15. Засимчук Е.Э. Полигонизация, рекристаллизация и термическая стабильность свойств материалов. – К.: Наукова думка, 1976. – 227 с.

16. Грабский М.В. Структура границ зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1972. – 159 с.

17. Борисов В.Т., Голиков В.М., Щербединский Г.В. О связи коэффициентов диффузии с энергией границ зерен / Металлофизика, выпуск 61. – К.: Наукова думка, 1975. – С. 3-17.

18. Приданцев М.В. Влияние примесей и редкоземельных металлов на свойства сплавов. – М.: Металлургиздат, 1962.

19. Олышанецкий В.Е., Коваль А.Д. Влияние поверхностно-активных элементов на структуру границ зерен и свойства металлических сплавов // Физико-химическая механика материалов. – 1972. – № 4 – С. 103-104.

20. Лариков Л.Н. Механизм и кинетика залечивания макро- и микродефектов в металлах // Металлофизика, выпуск 61. – К.: Наукова думка, 1975. – С. 3-17.

21. Коваль А.Д., Ольшанецкий В.Е., Степанова Л.П. Влияние микродобавок церия на разориентировку субзерен в чистом никеле // Металлофизика, выпуск 53. – К.: Наукова думка, 1974. – С. 72-75.
22. Иверонова В.И. Отдых и рекристаллизация твердых растворов // Применение рентгеновских лучей к исследованию металлов. – М.: 1949. – С. 34-46.
23. Ingrund H., Pawlek F. Uber den Einfluss von Beimengungen auf die Reckkristallisation von hochreinem Eisen, – Z. Metallkunde, 1968, 59, №8, S. 652-657
24. Коваль А.Д., Ольшанецкий В.Е. О зависимости зернограничной энергии никеля от концентрации РЗМ // Теория и практика микролегирования и модифицирования сталей (материалы Респ. научн.-техн. конф. 7-9 декабря 1971 г.). – Донецк: ДПИ, 1971. – С. 76-77.
25. Белякова М.Н., Засимчук Е.Э. Влияние молибдена на кинетические параметры рекристаллизации деформированного никеля // Несовершенства кристаллического строения. – К.: Наукова думка, 1968. – С. 84-86.
26. Лариков Л.Н., Засимчук Е.Э. Кинетика собирательной рекристаллизации чистого никеля и никеля с добавками тантала и молибдена // Исследования по жаропрочным сплавам. – М.: Metallurgizdat, 1963. – С. 190-193.
27. Ольшанецкий В. Е., Степанова Л. П., Коваль А. Д. Об особенностях рекристаллизации никеля, микролегированного иттрием // Физика металлов и металловедение. – 1964. – Т.17. – Вып.6 – С.881-885.
28. Ольшанецкий В.Е., Степанова Л.П. Влияние малых добавок рения, циркония и иттрия на кинетику первичной рекристаллизации никеля и железа // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез. докл. Всесоюз. научн.- техн. конф. – Запорожье, 1980. – С. 21-22.

29. Клербро Л.М., Харгриве М.Е., Лоретто М.Х. Изменения внутренней энергии при возврате и рекристаллизации // Возврат и рекристаллизация металлов.- М.: Металлургия, 1966. – С.69-122.

30. Кришталл Ю.И., Давыдов Ю.И., Лернер М.И. Механизм вторичной рекристаллизации в порошковом вольфраме // Взаимодействие между дислокациями и атомами примесей в металлах и сплавах. – Тула: ТПИ, 1969.

31. Ху Х. Отжиг монокристаллов кремнистого железа // Возврат и рекристаллизация металлов. – М.: Металлургия, 1966. – С. 273-326.

32. Лариков Л.Н. Механизм влияния примесей на перемещение и аннигиляцию дислокаций в металлах при рижиге // Атомная структурная межзеренных границ – М.: Металлургия, 1978. – 239-243.

33. Гейтс Р. Роль зернограницных дислокаций в зернограницном проскальзывании // Атомная структурная межзеренных границ – М.: Металлургия, 1978. – С. 220-242.

34. Олышанецкий В.Е., Степанова Л.П., Коваль А.Д. Об оценке относительной зернограницной энергии в никеле и железе, микролегированных лантаноидом и иттрием // Металлофизика, выпуск 64. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 82-90.

35. Олышанецкий В.Е., Степанова Л.П. Об оценке энергии активации роста зерен в металлургических системах на основе никеля и железа // Металлофизика. – 1982. –Т.4. – № 2. – С. 101-107.

36. Степанова Л.П., Олышанецкий В.Е. Метод оценки энергетических параметров процесса роста зерен в металлах и сплавах // Новое в развитии металлографических, физических и механических методов контроля качества металлопродукции: Тез. докл XVIII коллокви. центр. заводск. лабор., г.Днепропетровск – Москва, 1976. – С. 85.

37. Коваль А.Д., Олышанецкий В.Е. Об аномальном изменении зернограницной энергии никеля, микролегированного лантаном или цезием // Металлофизика, выпуск 44. – К.: Наукова думка, 1973. – С. 67-72.

38. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. : МНС України, 2012. – 116 с. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці)

39. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення [Текст] : ДБН В.2.2-28:2010. – На заміну СНиП 2.09.04-87 ; чинний від 2011-10-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 31 с. – (Державні будівельні норми)

40. Промислові споруди [Текст] : СНиП 2.09.02-85 ; чинний від 2005-04-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2005. – 25 с. – (Державні будівельні норми)

41. Правила улаштування електроустановок [Текст] : ПУЕ-2017. – На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21. – К. : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с. – (Правила).

42. Правила безпечної роботи з інструментом і пристосуваннями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00.-1.30-01. – Чинний від 2001-06-05. – К. : Міністерства праці та соціальної політики України, 2001. – URL: https://dnaop.com/html/31713/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00.-1.30-01. – (Нормативно-правові акти з охорони праці)

43. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту [Текст] : ДСТУ 7237:2011. – На заміну ГОСТ 12.1.019-79 ; чинний від 2011-08-01. – К. : Держпоживстандарт, 2011. – 6 с. – (Державні норми України)

44. Правила безпечної роботи з інструментом і пристосуваннями [Електронний ресурс] : ДНАОП 1.1.10-1.04-01. – Чинний від 2001-06-05. – К. : МПіСП України, 2001. – URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dnaop/6-1-0-190> – (Держнагляд охорони праці)

45. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999. – URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. – (Державні санітарні норми)

46. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України)

47. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст] : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки)

48. ДСТУ Б В.1.1-36-2016 "Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухо-пожежною та пожежною небезпекою".

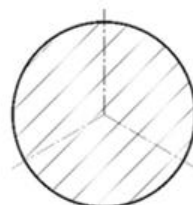
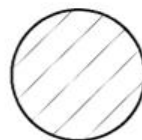
49. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги [Текст] : ДБН В.1.1-7:2016. – На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01. – К. : Мінрегіон України, 2017. – 47 с. – (Державні будівельні норми)

50. Кодекс цивільного захисту України [Електронний ресурс] – Чинний від 2012-11-21. : станом на 01.01.2018 р. – К. : ВР України, 2012. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>. – (Закон України)

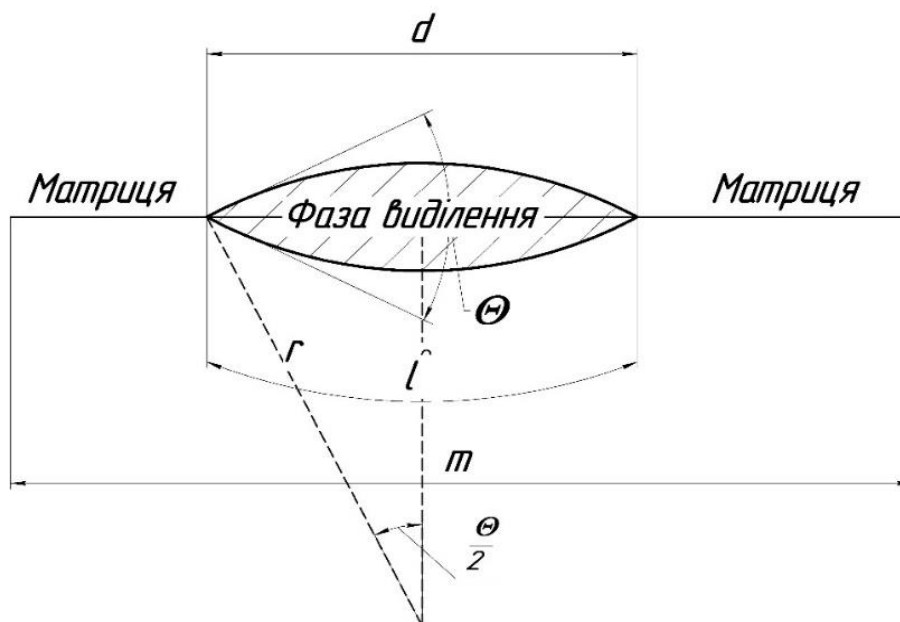
ДОДАТОК А

Ілюстративний матеріал до доповіді

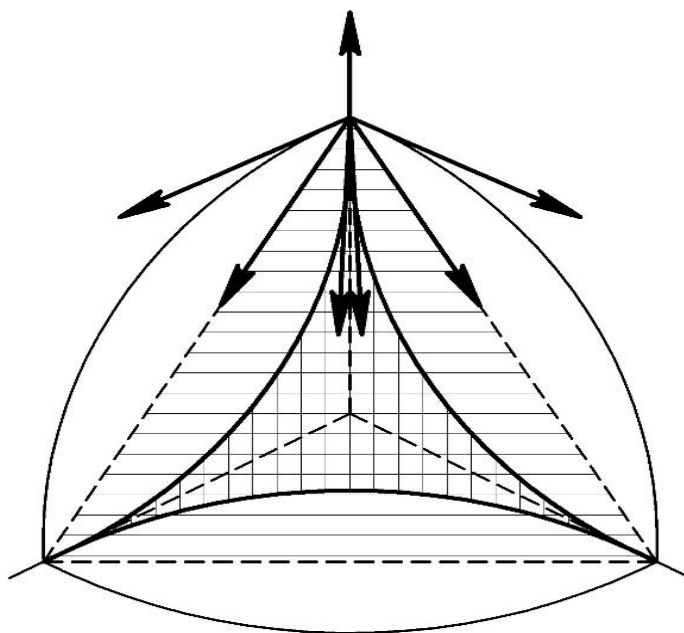
Форма перерізів частинок примежових виділень із криволінійними міжфазними межами: *a* – реальний випадок: рівноважний двогранний кут менший за 180° ; *б* – умовна ситуація при рівноважному куті, що максимально наближений до 180°

*a**б*

Нормальний переріз рівновісного лінзовидного зерна виділення



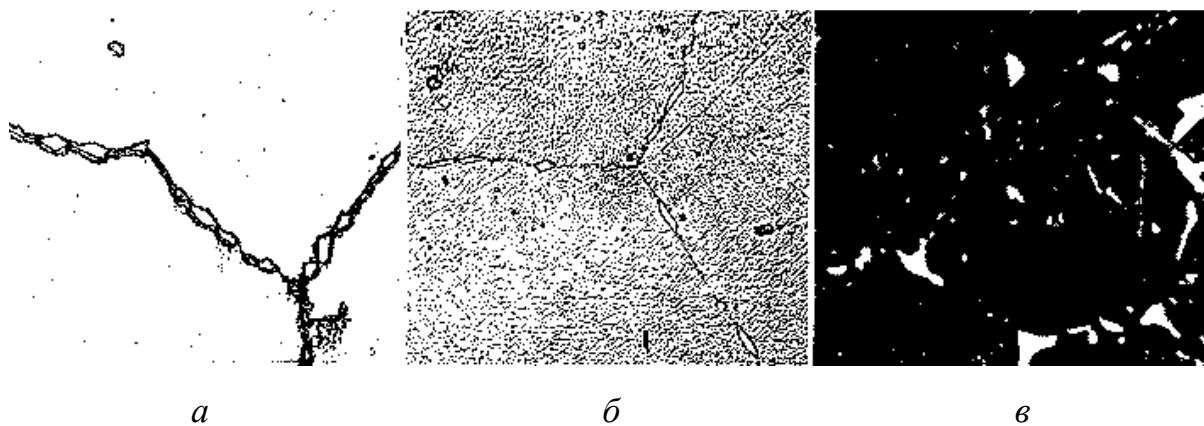
Варіанти можливих нормальних перерізів частинок виділень із криволінійними та прямолінійною міжфазними межами в рівноважному стику трьох зерен матриці



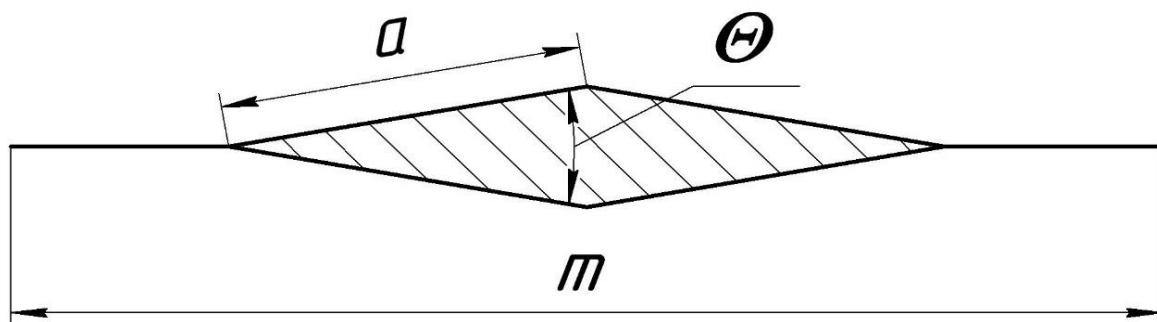
Примежові виділення надлишкової фази (карбідів) по межах сплавів:

a і *б* – карбідні виділення в сплаві типу фехраль;

в – карбідні виділення у високовуглецевій сталі



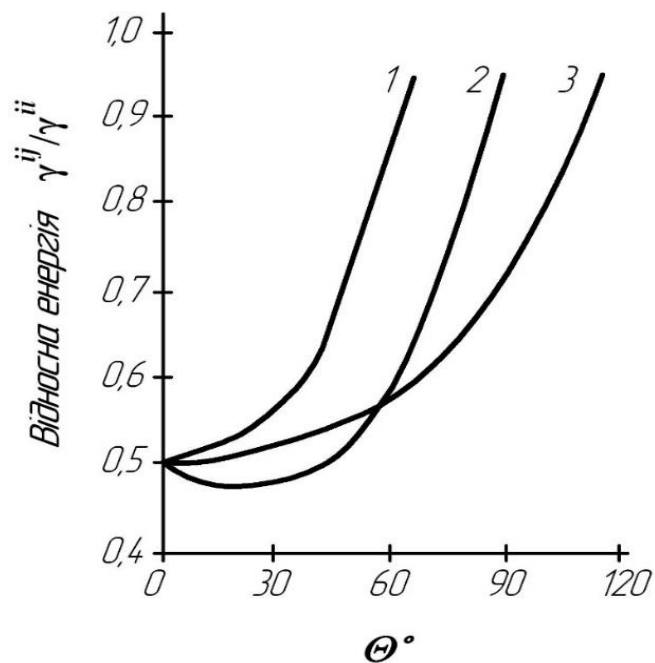
Ромбовидний переріз рівноважного зерна виділення на межі поділу матриця-матриця



Графіки залежностей відносної вільної енергії міжфазної межі γ^{ij}/γ^{ii} від двогранного кута θ : 1 – для співвідношення $\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \gamma_{\text{вмф}} = \frac{1}{2 \left(\cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)}$,

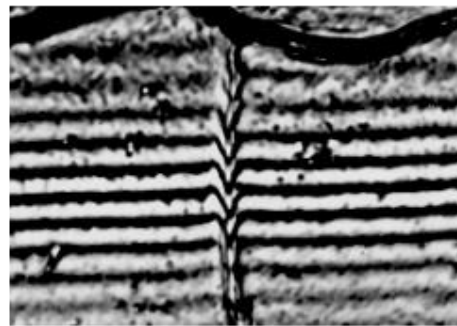
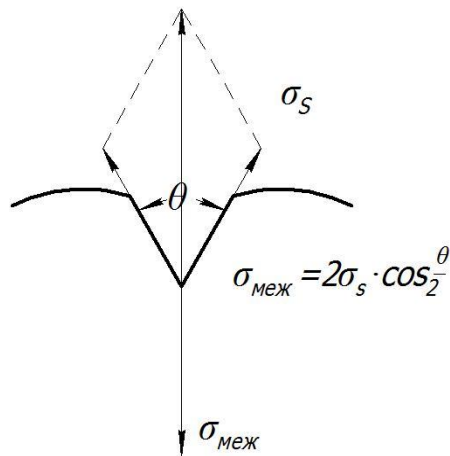
2 – для співвідношення $\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \gamma_{\text{вмф}} = \frac{1}{2} \frac{\sin \left(120^\circ - \frac{\theta}{2} \right)}{\sin (120^\circ - \theta)}$,

3 – для співвідношення $\frac{\gamma^{ij}}{\gamma^{ii}} = \frac{1}{2 \cos \frac{\theta}{2}}$

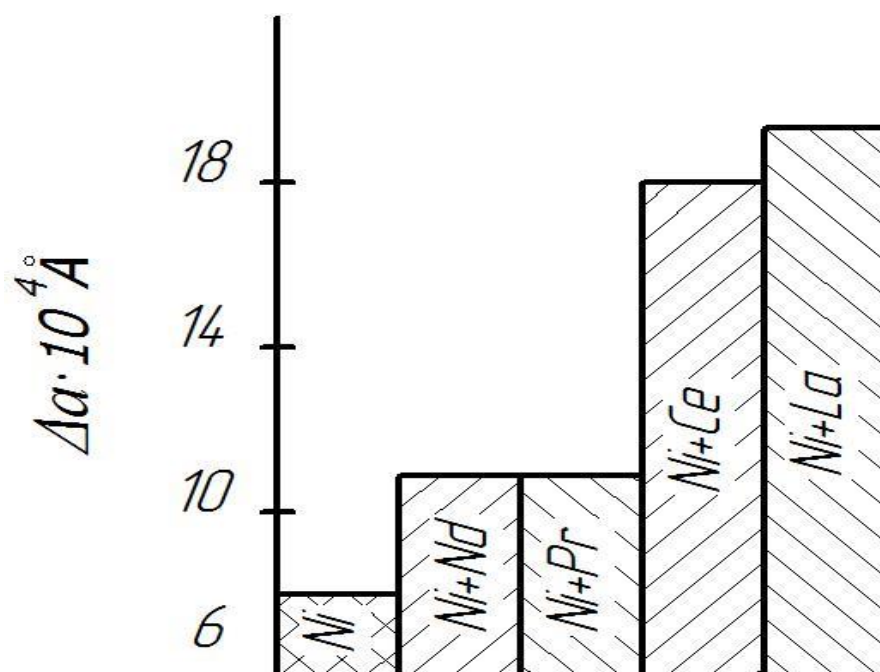


До методики визначення відносної зерномежової енергії

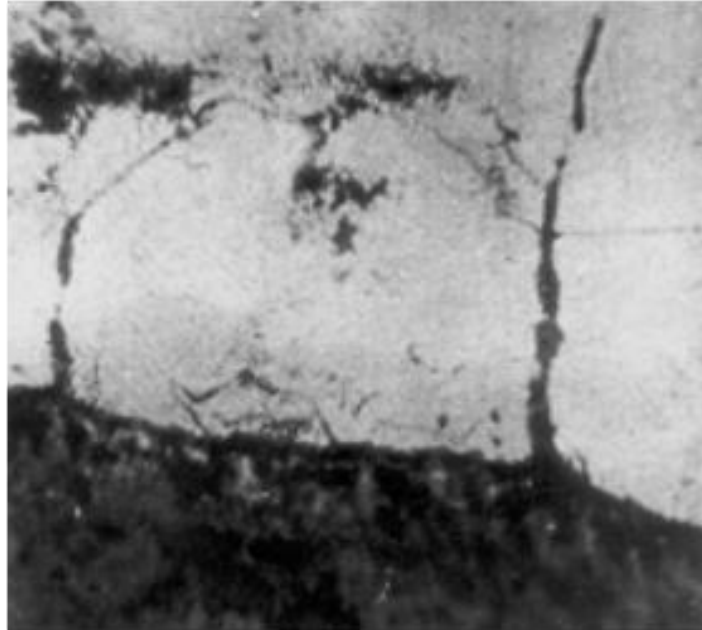
а – схема дії сил поверхневих натягів в стику двох суміжних зерен при утворенні канавки травлення; б – характер зламу інтерференційних ліній при перерізі їх міжзеренною межею, яка перпендикулярна поверхні шліфа (випадок канавки симетричного профілю)



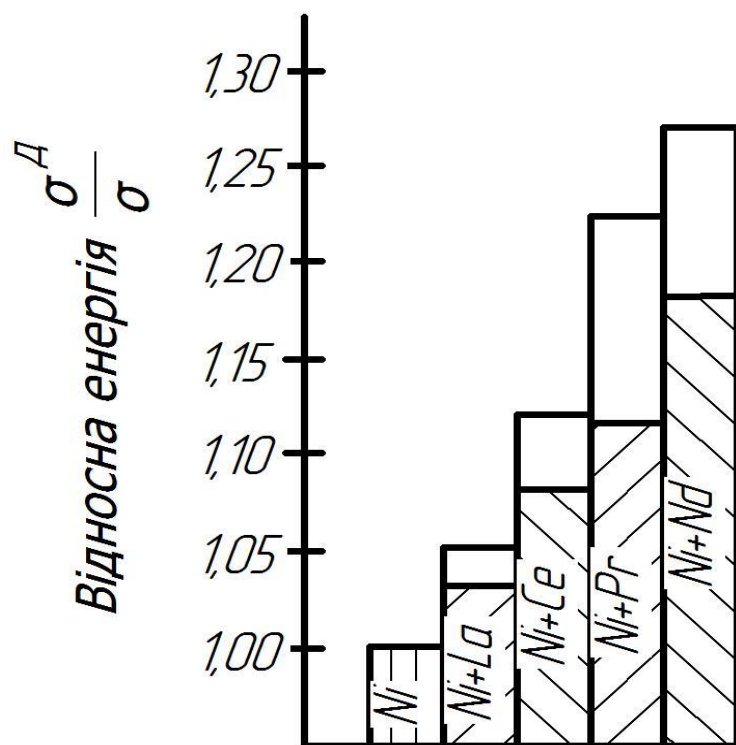
Зміна періоду кристалічної ґратки нікелю при мікролегуванні РЗМ (сплави 0-4)



Дифузія церію по межах зерен карбонільного нікелю при 850°С за 32 години
(×300)

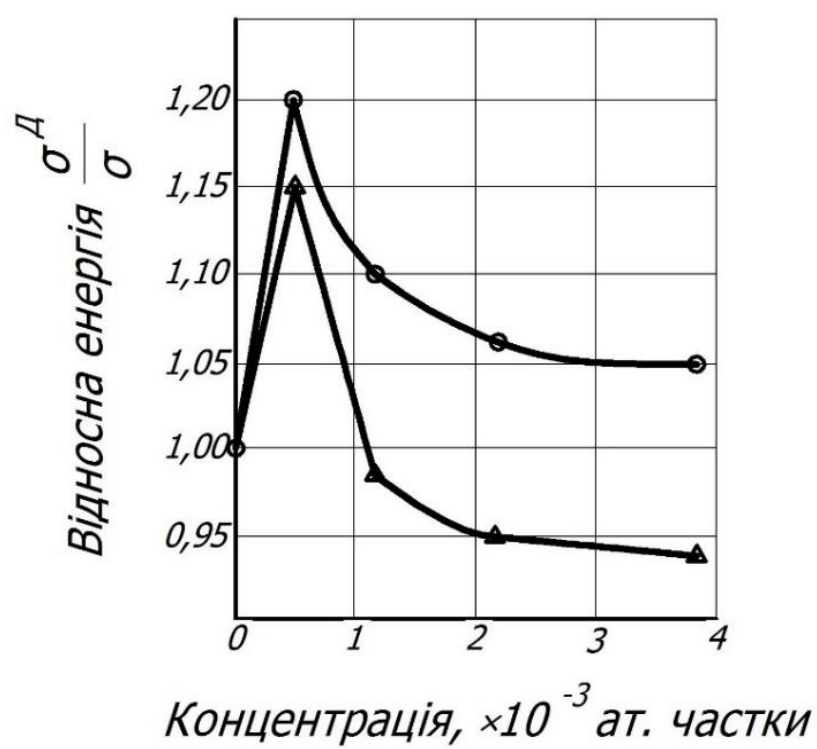


Зміна відносної енергії меж зерен при мікролегуванні його РЗМ (сплави 0-4)

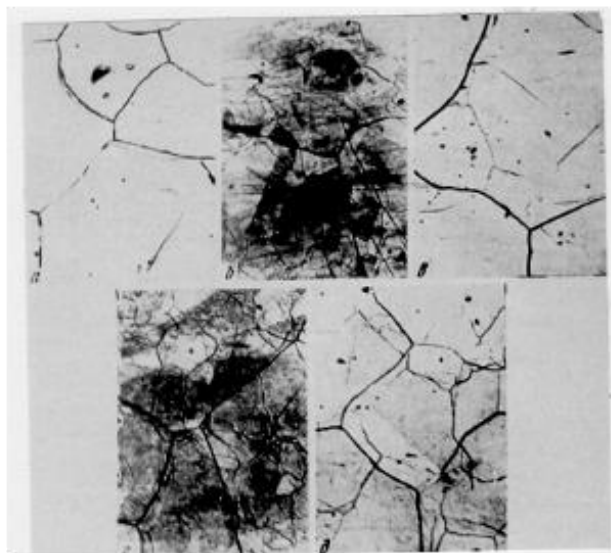


Концентраційні криві відносної зерномежової енергії карбонільного нікелю,
що мікролегований РЗМ

○ – Ni+Ce; Δ – Ni+La



Мікроструктура чистого і мікролегованого нікелю після відпалення при
1000°C ($\times 150$)



а – чистий (99,99 % нікель; *б* – $\text{Ni} + 4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки Nd;
в – $\text{Ni} + 4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки Pr; *г* – $\text{Ni} + 4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки Ce;
д – $\text{Ni} + 4,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки La

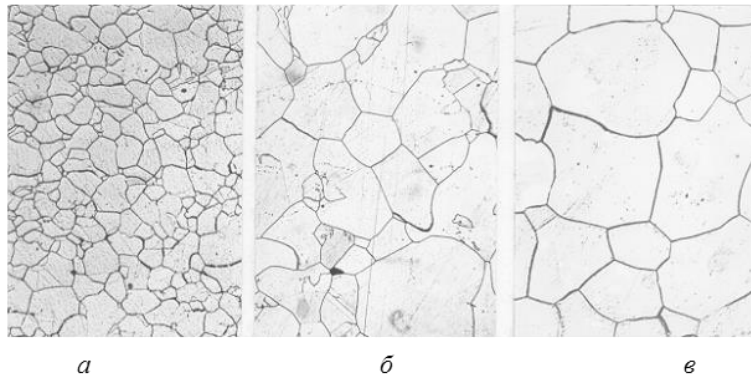
Мікроструктури чистого та мікролегованого ітрію

Мікроструктура чистого нікелю після відпалу
при температурі 600°C ; $\times 200$

а – 4 хв.; б – 10 хв.; в – 180 хв.

після відпалу при температурі 600°C ; $\times 200$

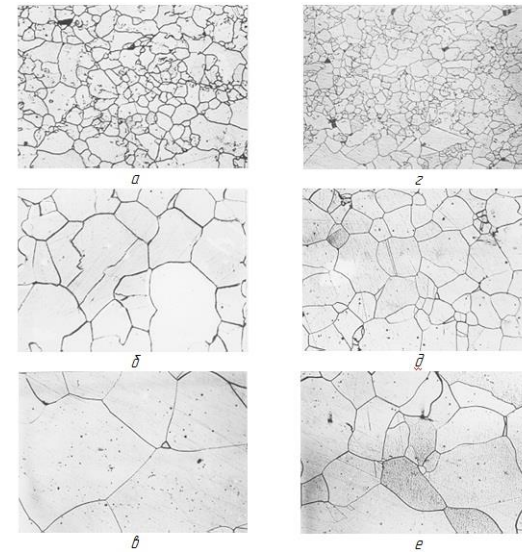
а, г – 4 хв., б, д – 10 хв., в, е – 180 хв



Мікроструктура нікелю, мікролегованого ітрієм

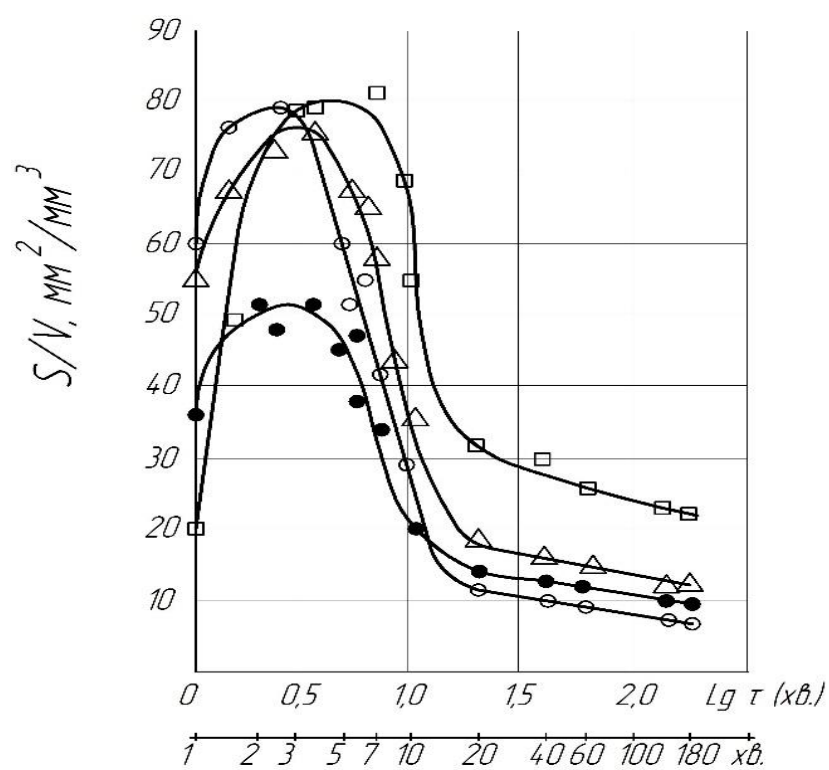
(а, б, в – $0,8 \cdot 10^{-4}$ ат. часток мікродобавки;

г, д, е – $6,0 \cdot 10^{-4}$ ат. часток мікродобавки),



Залежність питомої поверхні меж зерен чистого та мікролегованого нікелю
від часу відпалу при 600°C

- – нікель; ○ – нікель + $0,8 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію; Δ – нікель + $2,0 \cdot 10^{-4}$ ат.
частки ітрію; $\square$ – нікель + $6,0 \cdot 10^{-4}$ ат. частки ітрію



Концентраційні залежності відносної зерномежової енергії в системах нікель-ітрій ($\square$), нікель-цирконій ($\circ$) і нікель-реній (*)

