

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Запорізько-Фізичний факультет  
(повне найменування інституту, назва факультету)

Фізичного матеріалознавства  
(повна назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

МАгіСТР

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему Теоретичне дослідження колітального  
пшеничного зерна в гомогених та гетеро-  
генних системах

Виконав: студент V курсу, групи ФФ-213  
спеціальності (напряму підготовки)

132. «Матеріалознавство»  
(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Новицький Є.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Ольшанський В.Ю  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Сіменів В.А. В.П.  
(прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя  
2018 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Запорізький національний технічний університет**  
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Інженерно-фізичний  
 Кафедра Прикладного матеріалознавства  
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) Магістр  
 Спеціальність Прикладне матеріалознавство  
(код і назва)  
 Напрямок підготовки 132 "Матеріалознавство"  
(код і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри [Підпис]  
Ольшанецький В.Ю.  
"17" грудня 2018 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

Мовшурин Євген Володимирович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Теоретичне дослідження поведінки шпичу рослин зерен в гомогенних та гетерогенних середовищах

керівник проекту (роботи) Ольшанецький Володимир Іванович д.т.н., професор,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "15" 10 2018 року № 264

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) теоретичні розробки з наукових джерел

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Поверхнева та реальна сили росту зерна  
2. Математичні моделі зовнішніх моделей росту зерна  
3. Скорона праці

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

Рис. 1 - моделі зовнішніх зерен. Рис. 2 - Форма фронту росту великої келірки. Рис. 3 - Схема призеренної одноразової ланки. Рис. 4 - Схема зовнішньої келірки, що, уперше, в теоретичній літературі.  
Рис. 5, 6, 7, 8 - графіки кіметричних факторів. Рис. 9 - Схема  $\beta \rightarrow \alpha$

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Оен. частини	Ольшанецький В.Ю. з.т.н., професор		
Охорона праці	Местеров О.В. к.т.н., доцент		
Норма-контроль	Клімов О.В. к.т.н., доцент.		
Рецензент			

7. Дата видачі завдання 19.09.2018

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Потенціальна та реальна сили росту зерна	21.09.18 - 03.10.18	
2.	Судинистий ріст пластанчатих зерен в едифраційному середовищі	03.10.18 - 14.10.18	
3.	Тривалий та зворотний ріст пластанчатих зерен	15.10.18 - 01.11.18	
4.	Визначення шиграти зерен при механічній частинці пластанчатих зерен	02.11.18 - 20.11.18	
5.	Статистичний ріст групи пластанчатих зерен в процесі фізичного метаб. зв'язку	21.11.18 - 01.12.18	
6.	Охорона праці	02.12.18 - 12.12.18	

Студент

(підпис) Мовишук М.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис) Ольшанецький В.Ю.  
(прізвище та ініціали)

## Реферат

ПЗ: с. 63 , рис. 9 , джерел 26.

В дипломній магістерській роботі розглядаються теоретичні аспекти кооперативного росту зерен в металевих системах, розглядаються процеси росту зерен в гомогенному середовищі, кінетика поздовжнього паралельного росту різних структур колоніального типу.

При виконанні дипломного проекту вирішуються такі питання:

- 1)Потенціальна та реальна сили росту зерна
- 2)Математичні моделі двомірних моделей росту зерна

ДВОМІРНА СТРУКТУРА, ВІЛЬНА ПОВЕРХНЕВА ЕНЕРГІЯ, РУШІЙНА СИЛА, ЕЛЕМЕНТАРНА КОМІРКА, ЗЕРНО, КОЛОНІЯ, СТОВПЧАСТА СТРУКТУРА, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, ГРАНИЧНИЙ ФРОНТ.

## Зміст

Вступ.....	5-6
Розділ 1 Потенціальна та реальна сили росту зерна.....	7-18
Розділ 2 Сумісний ріст пластинчастих зерен в однофазному середовищі.....	19-24
Розділ 3 Прямий та зворотній ріст пластинчастих (стовпчастих) зерен в присутності надлишкових виділень.....	25
Розділ 4 Випадок міграції меж зерен при нерухомих частинках надлишкової фази.....	26-34
Розділ 5 Випадок міграції меж зерен разом з частинками надлишкової фази.....	35-41
Розділ 6 Сумісний ріст групи пластинчастих зерен в процесі фазового перетворення типу $\beta \rightarrow \alpha$ ].....	42-46
Розділ 7 Висновки.....	47
Розділ 8 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	48
8.1. Аналіз потенційних небезпек.....	48
8.2. Заходи забезпечення техніки безпеки.....	49-52
8.3. Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	53-54
8.4. Заходи з пожежної безпеки.....	55-60
Список літератури .....	61-63

## Вступ

Така галузь, як аерокосмічне виробництво, потребує все нових і нових матеріалів, таких як листові жароміцні металокомпозити із жаростійкими матрицями (хромонікелева сталь, сплави на основі нікелю (типу ніхром), ніобію, титану) та волокнами арматури з вольфрамових та молібденових сплавів. Ці матеріали мають вкрай нестабільні термодинамічні системи, які за сприятливих термічних умов можуть вступати в певну фізико-хімічну взаємодію. В результаті чого може відбутися розчинення волокон арматури, утворення перехідних зон зміненого хімічного складу (навіть утворення інтерметалідних прошарків), а також периферійна рекристалізація з активним збиральним ростом неспотворених зерен в матеріалі волокна.

Оскільки лінійноармовані тугоплавкими волокнами металокомпозити уявляють собою дворівневі колоніальні структури (стовпчастого типу), то питання їх стабілізації зводиться до створення ефективних перешкод як для коалесценції субволокон (в матеріалі арматури) при їх частковому вивільненні від дислокацій (кінцева стадія полігонізації), так і поперечному переміщенню міжфазних меж матриця-волокна арматури при розчинній деградації волокон (дифузна коалесценція волокон, як супровідний процес в цьому випадку не відбувається, оскільки кривина їх циліндричних поверхонь залишається однаковою у всьому об'ємі металокомпозиту).

Такими бар'єрами для вищевказаних процесів можуть бути термічно стабільні дисперсні вкраплення окислів надлишкової фази, які або додаються на певному етапі технології отримання високомодульного армувального матеріалу (наприклад, порошкових волокон вольфраму з домішкою двоокису торію ( $\text{ThO}_2$ ), молібдену з домішкою окислу лантану ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) тощо), або вже містяться в порошковій лігатурі, яка утворює проплавлений шар між матрицею та волокнами при формуванні металокомпозитних карт. Також пори, що присутні в порошковому матеріалі в кількості 1,5...3% при його неповному спіканні, можуть слугувати ефективними стабілізаторами колоніальних структур.

Теоретико-експериментальні дослідження дозволяють з усією впевненістю стверджувати, що незалежно від розміру такі вкраплення третинної фази ефективно гальмують або навіть повністю усувають боковий ріст стовпчастих складових колоніальних груп, породжуючи значні термодинамічні сили опору будь-якому варіанту збирального росту (поперечного або поздовжнього) елементів структури на двох рівнях структурної дискретності – внутрішньозеренному (волокно) та двофазному (композит в цілому).

Відомо, що структура зі стовпчастими зернами характеризується значно меншою сегрегацією домішок, пористістю ніж рівновісна; також відсутність меж зерен, що орієнтовані поперечно напрямку діючих напружень, приводе до значного збільшення границі повзучості, термостійкості, що є дуже важливим для робочих лопаток газових турбін, виготовлених із жароміцних сплавів на нікелевій основі. Однак до недоліків будови матеріалів зі структурою спрямованої кристалізації, що можуть проявити себе при їх отриманні, можна віднести такі: 1) на різних відстанях від кристалізатору може спостерігатися неоднорідність інтервалів між дендритами, ступеня пористості, а також розмірів та кількості частинок фази, що виділилася; 2) можливе помилкове зародження центрів кристалізації та утворення ізомірних зерен (для запобігання цих дефектів необхідно здійснювати ретельний контроль швидкості росту та температурного градієнта); 3) зерна можуть поступово відхилятися від осьового напрямку під час стовпчастого росту (необхідно, щоб орієнтація зерна не відхилялася більш ніж на декілька градусів від напрямку відведення тепла), й такі зерна можуть бути несприятливо орієнтовані відносно розподілу напружень; 4) оскільки під час твердіння межі зерен співпадають із міждендритними жолобами, вони мають хвилеподібну форму, так що деякі складові межі орієнтовані перпендикулярно до прикладеного напруження. В цьому розділі роботи зроблено спробу в теоретичному аспекті розглянути колоніальний ріст стовпчастих (пластинчастих в поздовжньому перерізі) зерен металевій системи в присутності дисперсних сферичних частинок вторинної фази (рухомих та нерухомих), під впливом основної термодинамічної сили чисто хімічної природи ( $P$ ), тобто переміщення граничного фронту розглянути як результат кристалізаційного процесу, в якому  $\beta$ -фаза є материнською, а  $\alpha$ -фаза – дочірньою. При цьому для спрощення ситуації приймалося, що при фазовому перетворенні хімічний склад обох фаз не змінюється, і, отже, основна рушійна сила процесу також не змінюється в часі (це такі види перетворення як, наприклад, кристалізація сплаву, склад якого відповідає проекції точки "перетяжки" сигароподібної двофазної області діаграми рівноваги та ін.). При розгляді такого перетворення були прийняті до уваги ще й додаткові рушійні та протирушійні термодинамічні сили, які разом з основними визначали переміщення граничного фронту реакції як двостадійний процес, що має на початковій стадії росту нестационарний характер.

## Розділ 1

### Потенціальні та реальні рушійні сили міграції для різних двовимірних моделей зеренної структури

В гомогенному середовищі, для оцінки схильності зеренного конгломерату до збільшення розміру середнього ізомерного зерна вдаються до поняття потенційної рушійної сили. Потенційні рушійні сили визначаються з термодинамічного аналізу поведінки таких конгломератів (при укрупненні зерен) і можуть бути виражені через співвідношення енергетичних і розмірних параметрів. Якщо прийняти, що всі зерна характеризуються однаковою формою і розміром. При цьому форма плоского та об'ємного зерна буде визначатися типом моделі зеренної структури, вибраної для розгляду [1,2].

Стосовно процесів росту потенційна рушійна сила міграції меж (росту комірок, зерен), як і кожна термодинамічна рушійна сила, буде рівною модулю від'ємної зміни питомого значення вільної енергії при уявній реалізації переміщення меж вибраної ізомерної комірки (зерна) в напрямі збільшення лінійного розміру елемента структури.

В загальному вигляді потенційна рушійна сила росту комірок чи зерен являє собою похідну граничної енергії по простору, мірність якого відповідає мірності його структурного елемента. Для двовимірного структурного простору (в якості реального аналогу виступає дислокаційна ґратка) ця рушійна сила ( $P_S$ ) визначається похідною :

$$P_S = \frac{dF_L}{dS} = \varepsilon \frac{dL}{dS} \quad (1)$$

$F_L$ - вільна енергія лінійних границь комірок структури;  $L$ - загальна довжина границь;  $S$ - площа розглянутої ділянки простору;  $\varepsilon$  - питома вільна енергія лінійної межі поділу комірок (наприклад лінійний натяг, відноситься

до одиниці довжини лінії дислокації або у випадку комірок деформації-одиниці довжини сегменту дислокаційного «сплетіння»).

Для об'ємної зеленої структури потенційна рушійна сила росту визначається так:

$$P_V = \frac{dF_S}{dV} = \gamma \frac{dS}{dV} \quad (2)$$

$F_S$ - вільна енергія зеленої структури;  $S$ - загальна площа меж зерен;  $V$ - об'єм розглянутої області зеленої структури;  $\gamma$  - питома вільна енергія поверхні розділу зерен (поверхневий міжзеренний натяг). Відмітимо що  $\epsilon$  та  $\gamma$  являються середніми системними характеристиками.

Фізична розмірність рушійної сили відповідає розмірностям наступних параметрів, які широко використовуються у фізиці пограничних явищ; лапласовій силі, що діє по нормалі на ділянку одиничної довжини викривленої лінії межі (двовірний простір) і лапласовому тиску, що діють на двічі викривлену граничну поверхню (мається на увазі поверхня з двома рівнозначними головними радіусами кривизни) у випадку трьохвірного простору.

Розглянемо декілька варіантів комірок плоских та об'ємних моделей, оцінимо їх потенційні рушійні сили росту для випадку метастабільної рівноваги (натяги на стиках комірок стабілізовані).

При розгляді двовірних моделей обмежимося рівноважними плоскими комірками у вигляді кола, тетрагона, гексагона і тетрагона зі зрізаними кутами (рис.1), а при переході до трьохвірних моделей-зернами у вигляді сфери, куба (гексаедра) і куба зі зрізаними ребрами (куба з гранями ромбододекаедра). При виборі тієї чи іншої моделі структури треба керуватися не тільки практичними міркуваннями (зручність проведення

математичного аналізу, пов'язаного зі спрощенням форми рівнянь, а і усіх супутніх викладок), але і загальними термодинамічними принципами і енергетичними критеріями. Важливим являється критерій щільного заповнення простору ізомерними елементами структури і мінімум вільної енергії між комірковою (міжзеренною) границь розподілу. Оскільки більш щільне заповнення простору комірками призводить до зменшення протяжності вільних внутрішніх границь розподілу, можна сформулювати дещо інакше: оптимальна ( гранично сувора) модель структури повинна задовольняти вимогам мінімуму протяжності усіх внутрішніх границь розподілу. Тому при розгляді різних геометричних моделей, в принципі придатних до апроксимації будь-якої реальної структури, необхідно обов'язково враховувати, наскільки добре вони задовольняють вищевказаному енергетичному критерію. Так як у виразі (1)  $\frac{dL}{ds} \sim \frac{k}{a}$ , де  $a$ -лінійний параметр, визначаючий розмір комірки (відстань від її центра до будь-якої сторони чи викривленому контуру), а  $k$ -коефіцієнт пропорційності і форми комірки моделі, потенційну рушійну силу зручно представити у вигляді:

$$P = k \frac{\epsilon}{a} \quad (3)$$

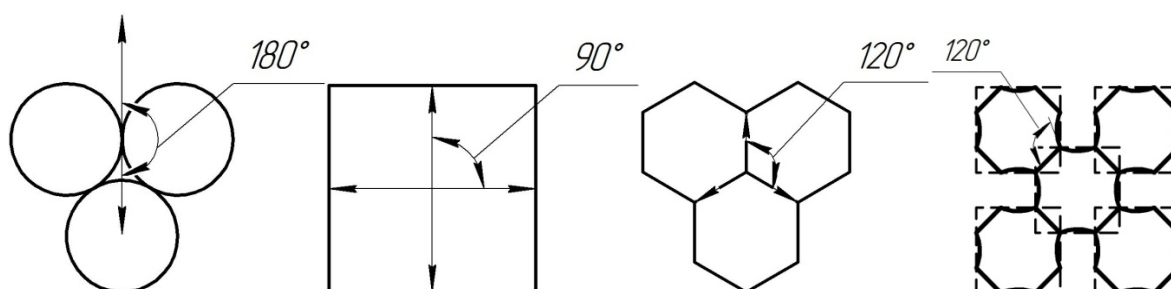


Рисунок 1-Моделі двомірних зерен (комірок) з характерними стиковими зчленуваннями у виді круга, тетрагона, гексагона і нерівнобічного октагона

Тоді на основі найпростіших чисельних оцінок (питома енергія усіх внутрішніх границь поділу приймається рівною) отримуємо у випадку різних видів плоских комірок наступні формули для оцінки P:

для кола ( $a=r, k=1$ )  $P = \frac{\epsilon}{r}$  ;

для тетрагона ( $k=1/2$ )  $P_{(m)} = \frac{\epsilon}{2a}$  ;

для гексагона ( $k=1/2$ )  $P_{(r)} = \frac{\epsilon}{2a}$  ;

для тетрагона зі зрізаними кутами ( $k=3/4$ )  $P =$  ;

В останньому випадку вільні внутрішні границі повинні набувати деяку кривизну (див. рис. 1) для забезпечення рівноваги сил лінійних натягів в потрібних граничних стиках.

Цілком очевидно, що модель структури елементарної комірки у вигляді кола характеризується мінімальною (практично нульовою) між комірковою енергією. Проте часто цю модель (як і об'ємну модель з зернами-сферами) використовують при феноменологічному описанні процесу росту. З інших моделей плоскої структури [3]. Модель з коміркою у вигляді гексагона є найбільш зручною, вона найліпше відповідає енергетичному критерію. Проте вона характеризує гранично рівно вісну ситуацію, коли спонтанні процеси росту вже завершилися. Хоча потенційна рушійна сила росту при такому характері структури завжди може бути визначена по формулам 1 або 3, реальна рушійна сила в цьому випадку просто не існує.

З трьох останніх моделей, для описання процесу росту зерна, найбільш вдала модель з коміркою у вигляді тетрагона. По-перше, ця модель в достатній мірі задовольняє енергетичному критерію (характеризується дещо

підвищеною між комірковою енергією та четверними стиками), по-друге, припускає вбудовування в двомірне середовище особливих топологічних дефектів [4], що мають три граничні стики і виступаючих в ролі центрів активного росту комірок під дією реальної рушійної сили. Перехідна зона між коміркою-дефектом і рештою структури з ізомірними комірками-тетрагонами являє собою область полі гексагонів( трапецій), що являє собою за своїми морфологічними ознаками і сарною граничною енергією гексагональну модель коміркової структури.

Остання модель також прийнятна для розгляду, проте її використання значно складніше піддається математичному описанню і аналізу поведінки зростаючого структурного елемента в загальному процесі укрупнення комірки.

На завершення розгляду практичної прийнятності різних моделей плоскої структури скажемо ще декілька міркувань на користь моделі з коміркою у вигляді тетрагона. Якщо брати рівні площі розглянутих вище геометричних зразків комірок, то їх розмірні параметри у вигляді нерівності мають вигляд:

$$r > a_{\text{окт}} > a_{\text{гекс}} > a_{\text{тетр}}$$

Тетрагональна модель являє є найбільш «динамічною», має максимальний потенціал рушійної сили росту. Окрім того, при переході від плоскої до спорідненої об'ємної моделі структури (зерно у вигляді куба) спрацьовує закон взаємного адекватного відображення, це означає, що всі математичні закономірності, отримані при розгляді однієї структурної моделі, зберігають свою силу з точністю до незначних поправок ( чисельних чи смислових), при заміні її іншою, адекватною.

Тепер перейдемо до більш докладного аналізу об'ємних моделей і їх потенціальних рушійних сил. Дотримуючись описаного вище підходу, можна

записати, що  $\frac{dS}{dV} = \frac{k}{a}$  ;

де, як і раніше, k- коефіцієнт пропорційності і форми зерна моделі,

а-відстань по нормалі від центра ізомерного зерна до його зовнішньої межі. Тоді рушійна сила росту будь-якого рівновісного зерна виражається формулою:

$$P = k \frac{\gamma}{a}; \quad (5)$$

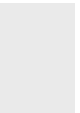
Приведемо значення потенційних рушійних сил деяких простих моделей тримірної зеленної структури і по можливості встановимо їх аналогії при переході до двомірної структури. Так для структури, що складається з контактуючих зерен-сфер (аналогом є двомірна модель з коміркою у формі кола),

$$P = 2 \frac{\gamma}{r} \quad (a=r, k=2); \quad (5,a)$$

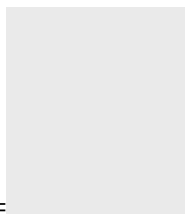
Для структури, що складається з паралельно орієнтованих і суміжних по цілим граням гексаєдрів (аналогом є двомірна модель з коміркою у вигляді тетрагона),

$$P = 2 \frac{\gamma}{r} \quad (k=1); \quad (5,b)$$

Відмітимо одну важливу особливість поведінки коефіцієнта k при переході від однієї моделі структури до іншої в межах окремого структурного простору (простору однієї мірності). Так, у випадку

двомірного простору  $1 \geq k \geq$  , а для трьохмірного  $-2 \geq k \geq 1$ , при чому. При переході від однієї моделі до іншої (адекватної) з підвищенням мірності простору на одиницю k зростає рівно в 2 рази (якщо судити по розглянути моделям-аналогам). Тому, використовуючи обмежений варіант індуктивного підходу, для просторової моделі з зерном у вигляді гексаєдра зі зрізаними

ребрами (двомірним аналогом є модель з коміркою у вигляді октагона), потенційна рушійна сила буде виражатися


$$P = \dots (k=3/2); \quad (5, \text{в})$$

Особливої уваги заслуговує вивчення взаємного відображення моделей простору двох або трьох вимірів, коли у якості двомірної моделі виступає коміркова структура з гексагоном у якості елементарної комірки. Виявляється, що не має суцільно адекватного їй тримірного аналогу.

Реальні двомірні моделі зеренної структури не мають реальних аналогів в тримірному просторі.

Згідно вимог енергетичного критерію, зерна тримірного полікристала повинні мати форму, що забезпечує їм можливість щільно прилягати один до одного. Очевидно, що форма зерна повинна забезпечувати мінімум сумарної граничної енергії зерен. Як відмічено у роботі [5], єдиною вирогідно придатною коміркою для заповнення простору елементарними тілами є зерна у формі кубооктаедра, що має 14 граней мінімальної сумарної площі (вісім шестикутних і шість квадратних граней). Він отримується із стандартного кубооктаедра, в останньому злегка вигнути ребра і надати подвійну кривизну шестикутним граням. В результат ми отримаємо четверний стик ребер з кутом (між якою парю ребер),  $109^\circ 28'$ , що задовольняє правилу Плато [6], згідно якому, рівновага границь настане в тому випадку, якщо двогранні кути потрійних стиків зерен рівні по  $120^\circ$ , а у випадку отримання четверного стику зерен, кути між ребрами відповідають кутам між чотирма висотами кубічного тетраедра (рівні тим же  $109^\circ 28'$ ).

Як показує практика, в реальній зеренній структурі, кубооктаедри (як домінуючий тип багатогранників) не зустрічаються бо вони дуже рідко

утворюються. Детальні експериментальні дослідження, що приведені в роботі [7], тримірних комірок піни та металевих зерен ( $\alpha$ -латунь), показали, що ті та інші по формі наближаються до правильного п'ятикутника-додекаедра. Ребра додекаедра зустрічаються під кутом  $108^\circ$ , а кут між гранями що перетинаються близький до  $120^\circ$ . Після деякого викривлення граней, ця фігура також може вдовольнити вимогам мінімуму поверхневої енергії. Хоча дані багатогранники не можуть заповнити простір без зазорів, проте в симбіозі з іншими фігурами, що задовольняють двом вимогам правила Плато.

Реальна зеренна структура ( тільки гомогенний її варіант) в рівновазі являє собою конгломерат різних за формою багатогранників, що заповнюють без залишку тримірний простір і задовольняють вимогам правил Плато. В цьому і є головна причина відсутності тримірного аналогу з ізомерними рівно вісними зернами в двомірній комірковій структурі з елементарною коміркою у вигляді гексагону.

Розглянемо можливості математичного моделювання різних зеренних структур (однофазних за характером що перебувають в рівноважному стані) геометричними просторовими фігурами певної форми. Найбільш вирогідними фігурами, що у вільних перерізах будуть давати коміркові структури гексагонального типу.

На основі вивчення особливостей форми комірок у двомірних перерізах різних моделей зерен автори роботи [8] виявили, що у кубооктаедра, п'ятикутного додекаедра і ромбічного додекаедра комірки пласких перерізів мали по п'ят шість сторін. Аналіз перерізу дротових моделей зерен заданої форми показав, що комірки перерізу моделей структури з зерном у формі куба мали найчастіше чотири сторони. У випадку використання структури із зерном у вигляді правильного кубооктаедра чи куба зі зрізаними ребрами-шість сторін. Всі названі тривимірні моделі в принципі придатні для моделювання реальних структур, з аналітичної позиції доцільно буде користуватися їх двомірними аналогами з наступним відображенням

отриманих закономірностей на простір більш високого рівня. Особливо вдалою є двомірна модель коміркового типу є тетрагональна модель з вбудованими в її структуру конфігураційними (топологічними по термінології Мартіна і Доєрті [4]) «дефектами»- комірками з іншим числом сторін (більше або менше чотирьох).

Вищезазначені вирази для потенційних рушійних сил росту об'ємних зерен (чи плоских комірок) часто використовують на практиці при аналізі росту зерен в реальних структурах. Наприклад, таку примітивну і в той же час розповсюджену модель, як щільно упакований конгломерат контактуючих в окремих точках зерен-сфер, зазвичай кладуть в основу феноменологічного опису процесів росту зерен в металах і гомогенних сплавах [3]. Використання для оцінки реальної рушійної сили виразу (5) дозволяє отримати широко знаний параболічний закон росту зерен.

Параболічний закон рідко виконується на практиці, тому ряд фахівців [9,10] відмовився використання виразів (3) і (5) (з конкретними коефіцієнтами  $k$  в залежності від розглядаємої моделі) в якості апроксиматорів реальних рушійних сил. В своїх дослідження спеціалісти намагалися виділити центри росту (окремі крупні зерна) разом з більш дрібнозернистою структурою, і на цьому фундаменті, використовуючи емпіричний підхід, підбирають найбільш підходящу для рушійних сил формулу, яка може оцінити реальну рушійну силу хоча б у межах порядку її істинної величини. Так Гладманом [9] для випадку рушійної сили рівно зернистої структури була запропонована формула

$$P = \frac{\gamma z f - 4}{d z f}, \quad (6)$$

де  $f = d / \bar{d}$ ,  $d$  – діаметр зерна що росте (у довільній площині перерізу);  $\bar{d}$  - середній діаметр зерен, що безпосередньо контактують з ростучим зерном  $\gamma$ -зерногранична вільна енергія.

Близька по духу формула була запропонована Хіллертом[10]

$$P = \frac{c\gamma}{d} \left( 1 - \frac{1}{f} \right), \quad (7)$$

c- деякий безрозмірний коефіцієнт, що залежить від мірності структури, інші буквені члени мають такий же смисл що і у формулі (6).

Якщо структура певної мірності далека від рівноважного стану чи має у своєму складі чітко явні топологічні дефекти ( зерна чи комірки з числом граней значно відрізняючимся від найбільш розповсюдженого значення), то деякі грані окремих зерен чи комірок будуть значно викривлені. Для таких граней або сторін реальна рушійна сила може бути вказана з високою точністю за допомогою виразу, відомого як формула тиску Лапласа ( чи аналога цієї формули, що використовується при двомірній структурі). Так для викривлених границь маємо співвідношення

$$P = \frac{2\gamma}{r},$$

а для граничних сегментів коміркової структури

$$P = \frac{\epsilon}{\bar{r}}$$

Різниця в значеннях потенційних та рушійних сил росту досить істотна, навіть, якщо вони обчислюються за формулами, однотипними з виразами для

лапласового тиску (сили) в разі наявності подвійної чи одинарної кривизни поверхні (лінії).

Усі наступні судження будемо будувати, виходячи з двомірної моделі зеленної структури ( інколи переходячи до її реального аналогу- коміркової дислокаційної структури) і переносити по мірі необхідності отриманих результатів на її тримірний варіант.

Нехай пласке зерно у вигляді криволінійного багатокутника з числом сторін більше шести оточене «намистом» менш крупним ізомерних зерен. Навіть, якщо, усі потрібні стики границь трьох суміжних зерен (центрального і двох більш дрібних, що примикають до нього) являються рівно вісними (кожен кут такого стику дорівнює  $120^\circ$ ), то в результаті викривлення їх спільних граничних частин (кругових сегментів) виникає рушійна сила

$$\frac{\varepsilon}{r^*}$$

лапласового типу,  $P = \frac{\varepsilon}{r^*}$ , де  $r^*$  - радіус кривизни будь-якого з граничних сегментів центрального зерна, чи любого з граничних сегментів малих плоских зерен, оскільки кожен такий сегмент є спільним (між зерновим).

Ця формула взята що до застосування в об'ємній структурі ( із заміною  $\varepsilon$  на  $\gamma$  і застосування відмінного від одиниці коефіцієнта пропорційності  $k$ ), була застосована Зіннером [11] для оцінки рушійної сили росту зерна в процесі збиральної рекристалізації. При цьому радіус  $r^*$ , що входить у склад формули розглядається не більше як середній радіус кривизни поверхні зерна. Оскільки значення рушійної сили при такому підході виходить досить наближеним, коефіцієнт  $k$  рекомендують вибирати з точністю до порядку його величини, що визначається типом моделі його зеренної структури.

Якщо зробити центральне зерно нескінченно великим, граничний фронт стане прямолінійним, це приведе до зміни радіуса кривизни спільним з ним граничних сегментів.

Таким чином радіус  $r^*$  є зворотним значенням результату складання двох кривизн (зі своїми знаками), одна з яких визначається радіусом кривизни окремого кругового сегмента при наявності прямолінійного (плоского у випадку об'ємних зерен) граничного фронту: великий без розривів ланцюг контактуючих з ним дрібних зерен з викривленими граничними сегментами, а інша – радіусом кривизни самого граничного фронту ( $R$ ), маємо

$$(8)$$

Знак мінус у цьому виразі береться тому, що викривлення граничного фронту являється протилежним по відношенню до вихідного викривлення кожного малого граничного сегмента.

Правомірність виразу (8) не викликає сумнівів лише в тому випадку, якщо при викривленні граничного фронту не накладається ніяких обмежень на поведінку двогранного кута між сегментами граничного фронту що сполучаються (один із кутів потрійного стику). Оскільки в рівно вісній (чи квазірівновісній) ситуації цей стик являється збалансованим по поверхневим натягам, згаданий кут повинен відповідати  $120^\circ$ . Ця вимога може бути легко дотримана, якщо у згаданий вираз ввести коректуючі коефіцієнти  $A$  і  $B$ , отримаємо:

$$(9)$$

Оцінимо чисельно ці коефіцієнти для конкретного випадку.

Для цього перетворимо скоректоване співвідношення (9), помножимо обидві його частини на  $L/2$ , де  $L$ - хорда кругової дуги граничного фронту (див, рис.2). Тоді отримаємо рівність:

$$\frac{L}{2r^*} = \frac{L}{2r} A - \frac{L}{2R} B \quad (10)$$

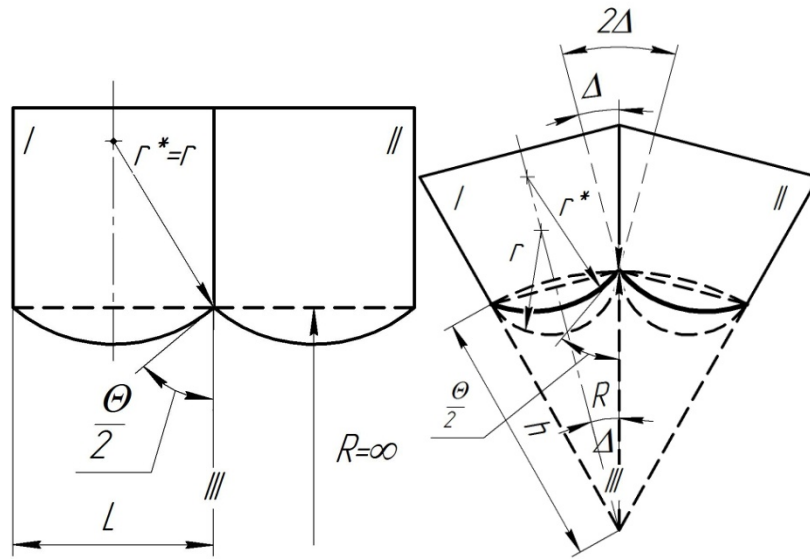


Рисунок 2- Форма фронту росту великої комірки (III), контактуючою з двома суміжними (I, II) квадратними чи трапецевидними комірками (I і II)

Звернувши увагу на рис.2 зазначимо, що  $\frac{L}{2r^*} = \cos\left(\frac{\theta}{2} + \Delta\right), \frac{L}{2r} \cos\frac{\theta}{2}$  (при не викривленому граничному фронті)  $\frac{L}{2R} \sin\Delta$

$\theta$ -постійний кут між кутовими сегмента фронту, а  $\Delta$  - половинне значення кута між нормаллями до хорд цих сегментів. Після введення тригонометричних членів співвідношення (10) набуває вигляду

В той же час

$$\cos\left(\frac{\theta}{2} + \Delta\right) = \cos\frac{\theta}{2} \cos\Delta - \sin\frac{\theta}{2} \sin\Delta$$

Звідки

$$A = \cos \Delta = \frac{h}{R} \text{ (} h \cong R \text{ при } \Delta \leq 15^\circ \text{)} \text{ і } B = \sin \frac{\theta}{2}.$$

Оскільки  $\Delta_{\max} = 30^\circ$  (випадок межової комірки – гексагона), а  $\theta = 120^\circ$  (нас в подальшому будуть цікавити переважно рівноважні ситуації), то  $1 \geq A \geq \sqrt{3}/2$ ,  $B = \sqrt{3}/3$  й, внаслідок цього,

$$\frac{1}{r^*} \cong c \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right),$$

де  $c$  – деякий коефіцієнт, що наближений до одиниці.

Таким чином, найпростіші математичні операції, на кшталт додавання, віднімання, з власним значенням кривизни окремого кругового сегмента і усього граничного фронту є в значній мірі досить законними, оскільки забезпечують досить високу точність збігів (до постійного множника порядку одиниці) отримуваних результатів з фактичною кривизною сегмента викривленого граничного фронту.

Ми можемо розглядати кожен граничний сегмент різностороннього топологічного дефекту два рази і в протилежні сторони викривлений граничний елемент. Тепер вираз для рушійної сили лінійного граничного сегменту можна записати в кінцевій формі

$$P = \varepsilon \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right). \quad (12)$$

Запропоновані математичні вирази Хіллертом і Гладманом [9,10] для рушійної сили міграції великої практичної цінності не мають ( хоча вони і враховують різницю в розмірах суміжних зерен), оскільки дозволяють оцінити лише фіксовані середні значення цього термодинамічного параметра, і не в змозі функціонально прогнозувати його зміни в процесі росту зерен.

## Розділ 2

### Сумісний ріст пластинчатих зерен в однофазному середовищі

Розглядаючи кінетику повздовжнього паралельного росту різних колоніальних структур, як і в попередньому випадку сила росту має різну природу, проте з точки зору термодинаміки вона дорівнює різниці питомих значень об'ємної вільної енергії з обох боків фронту реакцій. Досліджуючи кристалізаційні явища або явища, пов'язані з міграцією меж у гомогенному середовищі, ми стикаємося з утворенням такого роду колоній: колонії-комірки за умов переривчастого розпаду твердої матриці, утворення евтектичних колоній під час кристалізації багатоконпонентної рідини, та інші.

Різним процесам, що формують колоніальні структури, властиві спільні ознаки, що дозволяє розглядати кінетику їх росту з єдиної позиції. Це наявність проти рушійної сили спільного росту кристалів, що є окремою групою. Опір росту пояснюється тим, що межовий фронт колонії складається з опуклих колових сегментів, вздовж усієї лінії фронту ширина межі весь час відрізняється від нуля, і не являється безперервною функцією радіуса кривизни.

Якщо розглядати колоніальну групу, що тільки-но сформувалася, як зародок, готовий для подальшого росту (поперечний ріст таких груп досить детально описаний в літературі, (див., наприклад, [12]), то рушійна сила вздовж усього фронту росту буде постійною, або буде змінювати свою величину періодично.

Враховуючи існування стримувальної сили, можна вважати, що колоніальні структури формуються під дією результуючої, змішаної сили, що проявляється у одночасному рості кристалів однієї або декількох фаз [13].

Ріст колонії кристалів у поздовжньому напрямку реалізовується за допомогою двох режимів: стаціонарного і нестаціонарного. Для стаціонарного характерна постійна швидкість росту всіх кристалів колонії, оскільки кривизна сегментів межового фронту починаючи з деякого моменту перестає змінюватися.

Розглядаючи найпростіший випадок, маємо змогу визначити головні закономірності процесу росту колоніальної групи і отримання загального диференційного рівняння росту. Мається на увазі ріст стовпчастої колонії в однофазному середовищі (звичайна рекристалізація металу або однофазного сплаву з надлишком вільної енергії).

На рис.3 Зображено колонію, яку приймемо за елементарну (де  $H$  - максимальна довжина стовпчастого зерна,  $L$  - ширина,  $h$  і  $r$  - максимальна висота і радіус будь-якого сегменту фронту межі).

Нехай початкові умови росту відповідають такій конфігурації, коли вздовж межового фронту виконується умова,  $\theta = 120^\circ$ , отже,  $r_0 = L$  ( $r_0$  - початкове

значення радіуса кругового сегмента). Відповідно до рисунка,  $\theta$ - двогранний кут потрійного стику, двох зерен колонії з великим зерном деформованої матриці. Така конфігурація фронту межі колонія матриця буде стійкою за умови рівності рушійної та проти рушійної сил міграції для кожного межового сегмента.

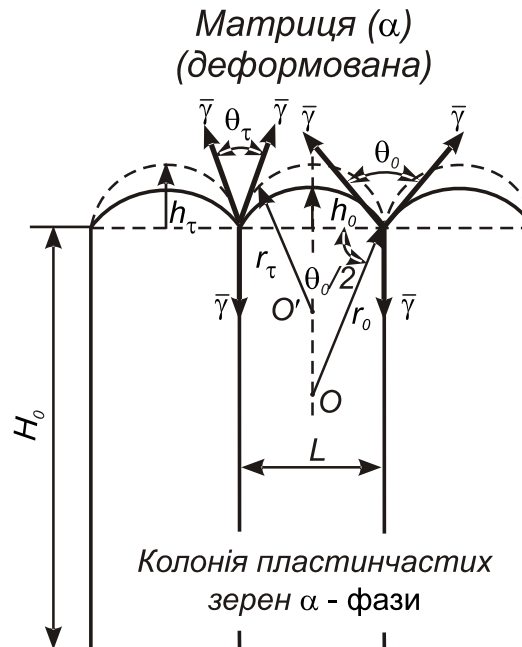


Рисунок 3- Схема тризеренної однофазної колонії пластинчастого типу  
(двовірна модель)

Тут  $\theta_0$  – початковий "двогранний" кут потрійного стику межового фронту;  $\theta_\tau$  – поточне значення "двогранного" кута;  $h_0$  і  $h_\tau$  – відповідно початкова і поточна висоти кругового сегмента межового фронту;  $r_0$  і  $r_\tau$  – відповідно початкове та поточне значення радіуса кривини межового сегмента;  $\bar{\gamma}$  – зерномежовий натяг;  $L$  – ширина пластинчастого зерна колонії  
Швидкість повздовжнього росту будь-якої колонії визначається:

$$\frac{dH}{d\tau} = m \left( P - \frac{2\bar{\gamma}}{r} \right) \quad (13)$$

Де  $m$  - рухомість межового сегмента;  $P$ - рушійна сила росту;  $\bar{\gamma}$ - питома вільна енергія будь-якої межі поділу ( $2\bar{\gamma}/r$ - проти рушійна сила). Окрім цього

$H = H_2 + h$ , де  $H_2$  - довжина загальної ділянки межі суміжних стовпчастих зерен ( в умовах нестационарного процесу  $H_2$  зберігає постійне значення). У цьому режимі росту  $h$  характеризує зміну висоти колового межового сегменту.

Ця висота пов'язана з радіусом межового сегменту співвідношенням:

$$H = r \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2r}\right)^2} \right]$$

Як можна замінити наближеним виразом, оскільки  $L/2r < 1$  (бо завжди  $\theta > 0$ ,  $L/2r = \cos|\theta/2|$ )

Рівняння, що пов'язує максимальну висоту межового сегмента з часом нестационарного росту  $\epsilon$ :

$$h = \quad (13)$$

Для того, щоб процес нестационарного росту стовпчастої структури був згасним, повинна виконуватися нерівність  $\frac{d^2h}{dr^2} < 0$ .

Ця умова практично очевидна, якщо  $1/L - P/2\gamma < 0$ . Покажемо що остання нерівність завжди виконується. Перепишемо її у вигляді  $r^2 \left(\frac{r}{L} - \frac{P}{2\gamma}\right) < 0$ . З фізичного змісту цієї ситуації випливає, що  $r/L < 1$ .

Стационарний режим росту встановиться у тому випадку, якщо рушійна сила переміщення стиків зрівняється з рушійною силою міграції сегментів фронту цієї колонії. Рушійну силу переміщення стиків можна оцінити виразом:

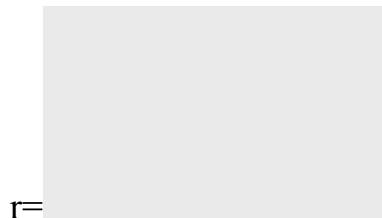
$$P = \gamma \left( 2 \cos \frac{\theta}{2} - 1 \right) \frac{1}{L} \quad (14)$$

Де  $1/L$  – густина стовпчастих кристалів, кількість межових стикових смужок на одиницю довжини фронту колонії,  $\gamma$  – модуль вектора поверхневого витягу. В початковій ситуації  $\theta=120^\circ$ ,  $P_{ст}=0$ . Потім у міру зменшення кута  $\theta$ ,  $P_{ст}$ , а результуюча рушійна сила міграції – слабшає, оскільки кривизна сегментів збільшується. Під час досягнення рівності  $P = P_{ст}$  конфігурація межового фронту вже не зазнає в часі ніяких змін, оскільки стики зерен переміщуються з тією самою швидкістю, що і центральні частини їх головних сегментів (сегменти вже не змінюють радіусу).

Тепер знайдемо порогове значення радіуса межового сегмента, після досягнення якого зміниться характер процесу росту (нестаціонарний переходить у стаціонарний). Для цього скористаємося рівністю рушійних сил:

$$P = \dots \quad (15)$$

Тут використано співвідношення  $L/2r = \cos\theta/2$ .



Якщо  $P$  перетвориться на нуль (ріст великого зерна з плоским межовим фронтом, що поглинає паралельно орієнтовані гексаедри), то  $\cos \frac{\theta}{2} = 0$ ,  $\theta/2 = 90,4^\circ$ , тобто  $\theta = 180,8^\circ$ , отже ситуація зміниться на зворотну ( $\theta$  з переходом до стаціонарного режиму росту в такому разі зростає в порівнянні з початковим, рівноважним для стану спокою значенням).

Для випадку стаціонарного росту вираз стає:

$$v_{ст} \frac{dh}{dt} = m \left( P - \frac{2\gamma r}{r_{пор}} \right) = \frac{1}{3m} \left( P - \frac{2\gamma}{L} \right) \quad (16)$$

Стримувальна сила стаціонарного росту прямопропорційна міжзеренній енергії та густині розташування стовпчастих кристалів, що добре узгоджується з термодинамікою цього процесу. Після інтегрування отримаємо:

$$h = h_{\text{нестаци}} + \quad (17)$$

Де  $h_{\text{нестаци}}$  - пройдений шлях центральною ділянкою кругового межового сегмента під час нестационарного росту;  $\tau_{\text{пор}}$  - час порогів, після досягнення якого відбувається зміни режиму росту.

$$\tau_{\text{пор}} = \frac{L^2 \ln 3}{b} \approx \frac{L^2}{m\gamma}$$

Пороговий час в першу чергу залежить від питомої енергії та рухомості меж.

Фізик розглянутого явища вимагає, щоб зміни процесу росту здійснювалися плавно ( на кривій процесу росту зерен колоній не повинен спостерігатися розрив в точці  $\tau_{\text{пор}}$  ). Криві обох процесі росту ( криві вигляду  $h=h(\tau)$  гладко застосовуватимуться в точці  $\tau_{\text{пор}}$  лише тоді коли їх кутові коефіцієнти миттєві швидкості) в цій точці збігатимуться  $k_{\text{ст}}=k_{\text{істин.}}$ . на підставі цього маємо:

$$k_{\text{іст}}(\tau_{\text{пор}}) = \frac{d\lambda_{\text{пласт}}}{d\tau} = \frac{b(1-\alpha L)}{8} \exp\left(-\frac{b}{L^2} \tau_{\text{пор}}\right) \quad (18)$$

Для доведення рівності цих кутових коефіцієнтів достатньо перетворити перший із наведених виразів

$$K_{\text{ст}} = \quad (19)$$

В кінці обговоримо деякі деталі механізму поздовжнього росту стовпчастих зерен колонії в однофазному середовищі. По-перше, вибір початку міграції складно профільної межі поділу є дещо умовним. Точка

відліку часу відповідає  $\sum_{i=1}^1 0$ , причому  $|\bar{\gamma}_1| = |\bar{\gamma}_2| = |\bar{\gamma}_3|$ , і, отже  $\theta = 120^\circ$ , а  $L = r_0$ .

Якщо  $|\bar{\gamma}_3|$ -питома енергія (модуль натягу) межі перше зерно- загальна частина матриці,  $|\bar{\gamma}_2|$ - енергія межі обох суміжних зерен, то умовою міграції стику у напрямку результуючої рушійної сили росту виступає нерівність  $\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2 > \bar{\gamma}_3$  (у стартовій позиції  $\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_3$ ). Ця сама нерівність у вигляді

$k = \frac{|\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2|}{\bar{\gamma}_1} > 1$  визначатиме її умову росту стовпчастої колонії. В режимі нестационарної міграції центральної частини будь-якого кругового сегменту межового фронту однофазної стовпчастої структури наведені вище нерівності завжди виконуються.

Якщо  $\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2 < \bar{\gamma}_3$ , але  $P_{рез} > P_{ст}$  то в процесі міграції колонії з матрицею відбувається видозміна межового профілю аж до встановлення рівноважної стартової конфігурації, а далі процес росту вже повністю відповідає розглянутій вище картині.

### Розділ 3

#### Прямий та зворотній ріст пластинчастих (стовпчастих) зерен в присутності надлишкових виділень

В цьому розділі розглянуті особливості кінетики утворення та усунення структур стовпчастого типу в однофазному та двофазному середовищах з метою теоретичної оцінки ролі фактора як нерухомих, так і рухомих дисперсних вкраплень вторинної фази [14-20]. Для цього було створено

теоретичну модель, що уявляє собою сукупність стовпчастих зерен з певною формою рівноважного профілю фронту (колові сегменти у перерізі) та трійчастими стиками зі збалансованими поверхневими натягами на початковій стадії.

Були враховані різні рушійні та гальмівні сили термодинамічного походження, що надало можливість розділити процес пересування фронту на дві стадії: стадію нестационарного росту (викривлення граничних сегментів при нерухомих стиках зерен) та стадію стаціонарного росту (коли складений межовий фронт колонії зерен просувається разом із потрійними стиками суміжних стовпчастих зерен). Згідно з роботами [13,21] вважали, що мікроскопічна рухомість фронту росту є наперед заданою, а всі особливості його переміщення обумовлені енергетикою різних меж поділу, яка визначає як рушійні сили росту колонії, так і сили опору цьому процесові.

#### Розділ 4

##### Випадок міграції меж зерен при нерухомих частинках надлишкової фази

На рис. 4 приведено схему перерізу елементарної двозеренної колонії. Нехай колоніальний фронт (в перерізі) є сукупністю однакових колових сегментів, які з'єднанні між собою в точках виходу поздовжніх меж зерен колонії, і утворюють таким чином потрійні стики суміжних зерен-пластин

колонії із контактуючим з нею великим зерном деформованої матриці. Цей рисунок за позначеннями не відрізняється від рис 3.

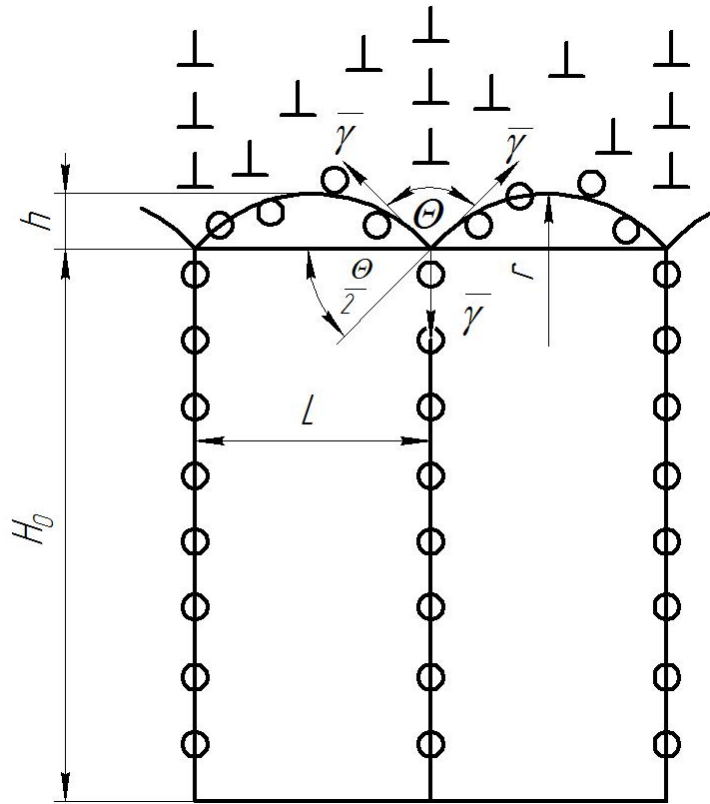


Рисунок 4 – Схема двозеренної колонії (у нормальному перетині), що проростає в деформовану матрицю під дією рушійної сили пружної природи

Швидкість поздовжнього росту пластинчастих зерен колонії визначається виразом на основі рівняння

$$\frac{dH}{d\tau} = \frac{dh}{d\tau} = mP_{\Sigma}, \quad (20)$$

у якому сумовна рушійна сила  $P_{\Sigma}$  має дещо інший зміст.

Цю результуючу рушійну силу, що діє на кожний сегмент межового фронту росту, можна представити у вигляді суми

$$P_{\Sigma} = P - \frac{2\gamma}{r} + \frac{2\gamma}{r} \epsilon_1, \quad (21)$$

де  $P$  – пружна рушійна сила;  $\frac{2\gamma}{r}$  – лапласівська сила гальмування викривлення сегменту, що спрямована до центра кривини колового сегмента ( $\gamma$  – питома зерномежова енергія), а  $\frac{2\gamma}{r}\varepsilon_1$  – додаткова рушійна сила росту, яка обумовлена термодинамічно вигідним збільшенням кількості частинок на циліндричній сегментній (в перерізі) смужці фронту росту при зменшенні радіуса кривини. Тут  $\varepsilon_1 = n_s \pi \rho^2$  ( $n_s$  – поверхнева густина нерухомих надлишкових сферичних частинок дисперсної фази виділення;  $\rho$  – радіус окремої частинки). Ця безрозмірна величина визначає середню частку прирощеної площі смужки граничного сегменту, що заміщена перерізами сфероїдів виділень (при цьому  $0 \leq 2\varepsilon_1 < 1$ ).

Оскільки, як і раніше,  $dh = -\frac{L^2}{8r} dr$  та  $dh > 0$ , виразу можна надати форму диференціального рівняння (відносно змінного параметра  $r$ )

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{16m\gamma}{L^2} r \left( \frac{P}{2\gamma} r - 1 + \varepsilon_1 \right), \quad (22)$$

звідки отримуємо розв'язання у вигляді інтегрального виразу

$$\int_{r_0}^r \frac{dr}{r(ar - 1 + \varepsilon_1)} = \frac{b}{L^2} \tau. \quad (23)$$

Тут  $a = \frac{P}{2\gamma}$ ,  $b = 16m\gamma$ , а інтервал інтегрування по часу ( $\tau$ ) включає нульову точку.

Після інтегрування (23) з урахуванням  $h \cong \frac{L^2}{8r}$  отримуємо для  $h$  таку часову залежність:

$$h(\tau) = \frac{L^2}{8(1-\varepsilon_1)} \left[ a + \left( \frac{1-\varepsilon_1}{L} - a \right) \right] e^{-\frac{b}{L^2}(1-\varepsilon_1)\tau}. \quad (24)$$

Перевірка (24) на відповідність крайовим часовим умовам дає:

$$h(0) = \frac{L}{8}, \text{ тобто } r=r_0=L \text{ та } h(\infty) = \frac{L^2}{8(1-\varepsilon_1)} \cdot \frac{P}{2\gamma} = \frac{L^2 P}{16\gamma(1-\varepsilon_1)}, \text{ звідки знову з}$$

урахуванням  $h \cong \frac{L^2}{8r}$  баланс рушійних та гальмівних сил складе

$$P + \frac{2\gamma}{r} \varepsilon_1 = \frac{2\gamma}{r}. \quad (25)$$

Отже, співвідношення (24) повністю відповідає фізичній реальності.

Узявши похідну від (24) по часі, отримаємо вираз для швидкості нестационарного збільшення висоти граничного сегмента при його нерухомих кінцях (потрійних стиках суміжних зерен)

$$v_h = \frac{dh}{d\tau} = m \left[ P - \frac{2\gamma}{L}(1-\varepsilon_1) \right] e^{-\frac{b}{L^2}(1-\varepsilon_1)\tau}. \quad (26)$$

По мірі подальшого викривлення граничних сегментів фронту росту рушійна сила, що діє на потрійні стики, зростає та складає у функції радіуса  $r$  залежність виду

$$P_{ст} = \frac{\gamma}{L} \left( 2 \cos \frac{\theta}{2} - 1 \right) + \frac{\gamma}{L} \varepsilon_2 = \frac{\gamma}{r} - \frac{\gamma}{L} (1 - \varepsilon_2), \quad (27)$$

де  $L^{-1}$  – приблизна кількість межових стикових смужок на одиницю довжини фронту колонії (тобто щільність розташування стовпчастих зерен);  $\frac{\gamma}{L} \varepsilon_2$  – додаткова рушійна сила міграції фронту реакції, що пов'язана із деяким

термодинамічним виграшем при потраплянні сферичних частинок на плоску межу поділу двох суміжних пластин зростаючої колонії ( $\varepsilon_2$  має такий ж зміст, що й  $\varepsilon_1$ ; при чому в загальному випадку  $2\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 < 1$ ).

Неважко побачити, що на початковій стадії, коли  $\theta=120^\circ$ ,  $P_{ct} = \frac{\gamma}{L} \varepsilon_2$ .

Далі при поступовому зменшенні кута  $\theta$  рушійна сила  $P_{ct}$  збільшується, а результуюча сила  $P_\Sigma$ , навпаки, послаблюється, оскільки кривина межових сегментів увесь час зростає. Після досягнення балансу рушійних сил  $P_\Sigma = P_{ct}$  конфігурація межового фронту у часі вже не змінюється (тобто стики стовпчастих зерен будуть пересуватися з тією ж швидкістю, що і центральні частини колових сегментів). Процес пересування складеної межі фронту росту набуває стаціонарного характеру.

Рівняння балансу рушійних сил, що діють на сегменти граничного фронту та його потрійні стики, в розкритій формі має вигляд

$$P - \frac{2\gamma}{r} + \frac{2\gamma}{r} \varepsilon_1 = \frac{\gamma}{r} - \frac{\gamma}{L} (1 - \varepsilon_2). \quad (28)$$

Із урахуванням  $\frac{L}{2r} = \left| \cos \frac{\theta}{2} \right|$  знайдемо пороговий радіус  $r_{II}$ , пороговий

двограний кут  $\theta_{II}$  та пороговий час  $\tau_{II}$ , що визначають момент включення в процес міграції (початок стаціонарного процесу) й самих міжзеренних стиків:

$$r_{II} = \frac{(3 - 2\varepsilon_1)\gamma}{P + \frac{\gamma}{L}(1 - \varepsilon_2)}, \quad (29)$$

$$\theta_{II} = 2 \arccos \frac{aL + \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_2)}{3 - 2\varepsilon_1}, \quad (30)$$

$$\tau_{II} = \frac{L^2}{b(1-\varepsilon_1)} \ln \left[ \frac{(3-2\varepsilon_1)(1-\varepsilon_1-aL)}{(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)-aL} \right] \quad (31)$$

(в останньому рівнянні знову для зручності використовуються введені раніше позначення  $a$  та  $b$ ). При цьому приймали  $(aL)_{max}=2\div 2,5$ .

Після підстановки у вихідне рівняння, отримуємо вираз швидкості росту колонії в умовах стаціонарного процесу

$$v_{ст} = \frac{m}{3-\varepsilon_1} \left[ P - \frac{2\gamma}{L} (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2) \right]. \quad (32)$$

При цьому важливо відмітити, що при стаціонарному переміщенні усього складеного (багатосегментного) фронту росту  $\varepsilon_l$  повинно бути обов'язково враховано, оскільки з точки зору фізики процес міграції фронту повинен розглядатися як поперемінне (поетапне) включення в дію двох мікропроцесів: деякого додаткового викривлення сегментів, що приводить до збільшення їх довжин, і подальшого підтягування стиків, що викликає також збільшення довжин (у перерізі), але вже плоских меж, які розділяють суміжні пластини-зерна колоніальної групи. До речі, саме це подовження плоских меж і викликає результуючу силу опору переміщення стиків в напрямку вектора росту  $\frac{\gamma}{L}(1-\varepsilon_2)$ .

Тепер розглянемо випадок, коли рушійна сила пружної природи відсутня (тобто  $P=0$ ), а всі інші не змінюють характер свого впливу. Для цієї ситуації маємо систему співвідношень, що описують процес односпрямованої збиральної рекристалізації:

$$\left. \begin{aligned}
h &= \frac{L}{8} e^{-\frac{b}{L^2}(1-\varepsilon_1)\tau}; r^2 - L^2 \cong 2b(1-\varepsilon_1)\tau, \\
\text{при } \frac{2b(1-\varepsilon_1)}{L^2} \tau &< 1; \\
v_{\text{н}} &= -\frac{2m\gamma(1-\varepsilon_1)}{L} e^{-\frac{b}{L^2}(1-\varepsilon_1)\tau} (dh < 0); \\
r_{\text{н}} &= \frac{(3-2\varepsilon_1)L}{1-\varepsilon_2}; \\
\tau_{\text{н}} &= \frac{L^2}{b(1-\varepsilon_1)} \ln \left[ \frac{3-2\varepsilon_1}{1-\varepsilon_2} \right]; \\
v_{\text{ст}} &= -\frac{2m\gamma}{(3-2\varepsilon_1)} (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)
\end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Наприкінці цього розділу доцільно зробити деякі уточнення щодо створеної моделі. Перш за все необхідно відмітити, що вибір початку міграції складеного фронту росту є дещо умовним (початок відліку часу відповідає  $\sum_{j=1}^3 \overline{\gamma}_j = 0$ , при цьому  $|\overline{\gamma}_1| = |\overline{\gamma}_2| = |\overline{\gamma}_3| = \overline{\gamma}_j$ ; й, внаслідок цього,  $\theta=120^\circ$ , а  $L=r_0$ .

Якщо  $\overline{\gamma}_1(\overline{\gamma}_2)$  – питома енергія (модуль натягу) межі перше (друге) зерно–загальна частина матриці;  $\overline{\gamma}_3$  – вектор натягу (енергія) межі обох суміжних зерен, то як умова міграції стику в напрямку результуючої рушійної сили росту виступає нерівність  $\overline{\gamma}_1 + \overline{\gamma}_2 > \overline{\gamma}_3$  (в стартовій позиції  $\overline{\gamma}_1 + \overline{\gamma}_2 = \overline{\gamma}_3$ ). Ця ж

нерівність у формі  $\frac{|\overline{\gamma}_1 + \overline{\gamma}_2|}{\overline{\gamma}_3} > 1$  визначає собою й умову росту пластинчастої

(стовпчастої) колоніальної структури в цілому. Припускається, що в режимі нестационарної міграції центральної частини будь-якого колового сегмента граничного фронту однофазної стовпчастої колонії вищевказані нерівності завжди виконуються, що з геометричних міркувань (рис. 4) є зрозумілим, якщо для стартової позиції  $\overline{\gamma}_1 + \overline{\gamma}_2 = \overline{\gamma}_3$  ( $\theta=120^\circ$ ).

Якщо ж  $\overline{\gamma}_1 + \overline{\gamma}_2 < \overline{\gamma}_3$ , але  $P_\Sigma > P_{\text{ст}}$ , то в процесі міграції межі колонії відбувається зміна профілю межі колонії до встановлення рівноважної

стартової конфігурації, а далі вже процес росту повністю буде відповідати розглянутій вище картині.

Тепер проаналізуємо отримані математичні залежності. Графіки зміни  $\tau_{II}$ ,  $v_H$  та  $v_{ст}$  від фактора  $\varepsilon$  (та часу для  $v_H$ ) приведені на рис. 5. При їх побудові враховувалися всі варіанти розподілу частинок надлишкової фази: рівномірне ( $2\varepsilon_1=\varepsilon_2$ ); переважно паралельне фронту переміщення межі поділу зростаючого великого плоского зерна та колонії пластин-зерен, що "поглинається" ним ( $\varepsilon_1\neq 0$ ;  $\varepsilon_2\cong 0$ ); та нарешті, переважно поздовжній розподіл, паралельний вектору руху граничного фронту ( $\varepsilon_1\cong 0$ ;  $\varepsilon_2\neq 0$ ). Відмітимо, що всі ці залежності мають перш за все якісний характер і відображують деяку загальну тенденцію поведінки кінетичних факторів в присутності частинок фаз виділення.

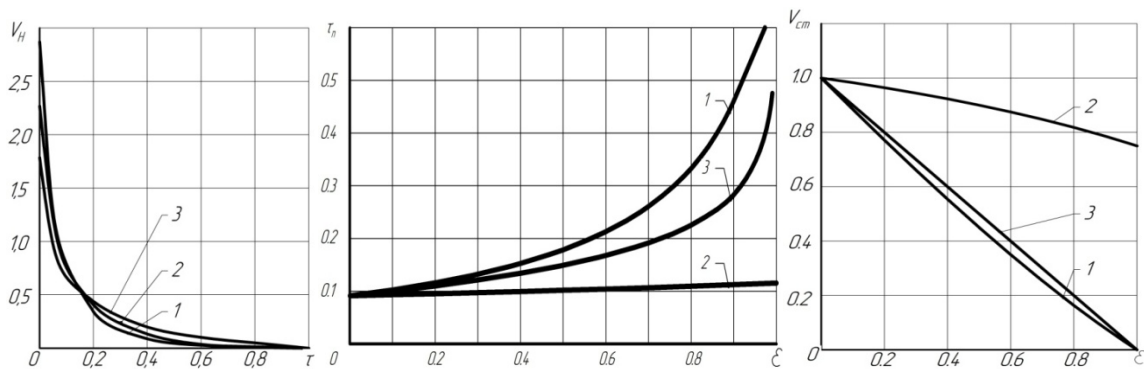


Рисунок 5 – Графіки розрахункових кінетичних факторів для випадку зворотного поздовжнього росту колонії. Для кривих  $v_H(\tau)$  1 відповідає умовам: 1 –  $\varepsilon_1=\varepsilon=0,10$ ; 2 –  $\varepsilon_1=\varepsilon=0,25$ ; 3 –  $\varepsilon_1=\varepsilon=0,4$ . Для кривих  $\tau_{II}(\varepsilon)$  та  $v_{ст}(\varepsilon)$  1 відповідає таким умовам:  $2\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon$ ; 2 –  $2\varepsilon_1=\varepsilon$  ( $\varepsilon_2\cong 0$ ); 3 –  $\varepsilon_2=\varepsilon$  ( $\varepsilon_1\cong 0$ ). Примітка: при розрахунках приймали, що  $m=1$ ;  $P=0$ ;  $\gamma=3$  та  $L=2$  (все в умовних одиницях, що не порушує співвідношень розмірностей).

Як впливає з аналізу графіків, присутність дисперсних частинок вторинної фази збільшує пороговий час і знижує швидкість розповсюдження

фронту збиральної рекристалізації для обох режимів усунення колоній пластинчастих зерен; причому, характер цих змін залежить як від величини  $\varepsilon$ , так і самого розподілу (рівномірного або дискретного) частинок фази виділення, тобто забезпечує певну стабілізацію такої структури.

Врахування фактору постійно діючої основної рушійної сили пружної природи ( $P \neq 0$ ) приводить до помітної зміни в характері залежностей  $\tau_{II}(\varepsilon)$ ,  $v_n(\varepsilon, \tau)$  та  $v_{ст}(\varepsilon)$  (рис. 6). Так, якщо  $v_n$  веде себе аналогічно вище розглянутому випадку, то  $v_{ст}$  для всіх варіантів розподілу частинок надлишкової фази тільки збільшується. Пороговий час в залежності від  $\varepsilon$  також поводить себе протилежно своїй поведінці при збиральній рекристалізації, що обумовлено складнішим характером всіх рушійних та протирушійних сил в аналізованій ситуації.

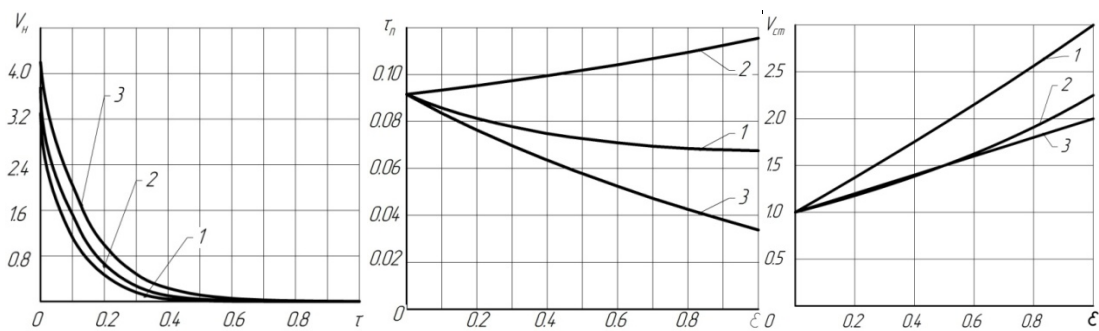


Рисунок 6 – Графіки розрахункових кінетичних факторів для випадку прямого поздовжнього росту колонії. Цифри на кривих мають той же зміст, що і на рис. 5. Розрахунки приведені в тих же умовних одиницях, що вказані в примітці до рис. 5 (крім рушійної сили  $P$ , яка тут має значення, рівне 6).

Наприкінці цього розділу можна відзначити одну цікаву особливість виразу  $v_{ст} = \frac{m}{3 - \varepsilon_1} \left[ P - \frac{2\gamma}{L} (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \right]$ . У ньому присутній доданок, що містить добуток двох змінних факторів –  $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ . Це пов'язано з тим, що при  $\varepsilon_2 \neq 0$  на лініях стиків колоній розташовуються частинки, які водночас належать як криволінійним сегментам фронту росту, так і прямолінійним загальним межам суміжних зерен-пластин (у перерізі колонії). Від'ємний

знак вказаного добутку говорить про наявність опору відриву стикових ліній від розташованих уздовж них частинок  $\left(-\frac{2\gamma}{L}\varepsilon_1\varepsilon_2\right)$  при пересуванні фронту колонії. І це є зовсім зрозумілим, оскільки такий відрив приводить до локальних підвищень вільної енергії пристикових смужок росту при їх вільному "ковзанні" в режимі стаціонарного процесу.

Отже, як було з'ясовано вище, присутність дисперсних частинок надлишкової фази в слабогетерогенній металевій системі здатна сильно впливати на кінетику зміни її структурного стану при реалізації тих або інших фізичних процесів, що приводять до підвищення термодинамічної стабільності.

## Розділ 5

### Випадок міграції меж зерен разом з частинками надлишкової фази

Тут розглядається така ж сама модель сукупності стовпчастих зерен (рис. 4), що зростає або усувається в присутності дисперсних сферичних частинок, але таких, які здатні захоплюватися колоніальним фронтом, що рухається, а потім переміщуватися разом із ним шляхом дифузійного «перекачування» своєї маси в тілі межі в напрямку вектору росту зерен однофазної колонії [14,15,17-19].

Швидкість пересування будь-якої межі разом із дисперсними частинками відповідає залежності

$$v \cong \frac{D\omega}{kT} \cdot \frac{P_\Sigma}{\rho^3 n_s} = \frac{D\omega}{kT} \cdot \frac{P - \frac{2\gamma}{r}}{\rho^3 n_v r}, \quad (34)$$

де  $D$  – коефіцієнт об'ємної дифузії в матричній фазі;  $\omega$  – атомний об'єм;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура за Кельвіном;  $\rho$  – радіус частинки;  $P$  – рушійна сила міграції вільної межі;  $n_s$  – поверхнева густина частинок.

;  $n_s$  та  $n_v$  – відповідно поверхнева та об'ємна густина таких вкраплень;  $P_\Sigma$  – результуюча рушійна сила;  $P$  – основна рушійна сила пружної природи;  $\frac{2\gamma}{r}$  – лапласівська сила опору ( $\gamma$  – міжзеренна вільна енергія).

Враховуючи, що висота сегмента дорівнює  $h = \frac{L^2}{8r}$ , а

$dh = -\frac{L^2}{8r^2} dr > 0$  (оскільки  $dr < 0$  на нестационарній фазі росту при

нерухомих стиках зерен) та  $v = \frac{dh}{d\tau}$ , легко отримати диференціальне рівняння

росту, що пов'язує  $dr$  та  $d\tau$  (як і раніше, тут  $L$  – ширина стовпчастого зерна,  $r$  – радіус кривини, а  $\tau$  – час). Розв'язання цього рівняння в інтегральній формі має вигляд

$$\int_{r_0}^r \frac{dr}{ar - 1} = -16 \frac{\gamma A}{L^2} \tau, \quad (35)$$

де  $r_0$  – початкова кривина сегмента (при цьому  $r_0 = L$ , оскільки в «стартовій позиції» всі потрібні стики фронту колонії збалансовані за натягами  $\sum_{j=1}^3 \overline{\gamma_j} = 0$ ) та, відповідно, двогранний кут  $\theta$  для кожного такого стику дорівнює  $120^\circ$ );

$$A = \frac{D\omega}{kT\rho^3 n_v} \quad \text{та} \quad a = \frac{P}{2\gamma}.$$

Після інтегрування отримаємо для радіусу кривини сегмента таку часову залежність:

$$r = \frac{1}{a} \left[ 1 + (aL - 1) e^{-\frac{16\gamma a A \tau}{L^2}} \right]. \quad (36)$$

Рівняння (36), як легко бачити, задовольняє крайовим умовам (початковому та кінцевому): так, при  $\tau=0$ , маємо  $r=L=r_0$ , а при  $\tau=\infty$  отримуємо  $P - \frac{2\gamma}{r} = 0$  (тобто, ріст колонії зерен в нестационарному режимі повністю припиняється, як тільки сила опору росту буде дорівнювати рушійній силі, що відповідає нескінченно більшому часу в умовах «згасаючого» процесу).

Стационарний ріст колонії зерен (одночасне переміщення сегментів фронту колонії разом із його потрійними стиками) починається в той момент, коли результуюча рушійна сила, що діє на сегменти фронту, буде врівноважена із такою силою для його потрійних стиків. Рушійна сила, що діє на стики, як і для випадку нерухомих вкраплень, описується виразом:

$$P_{\text{ст}} = \frac{\gamma}{L} \left( 2 \cos \frac{\theta}{2} - 1 \right) + \frac{\gamma}{L} \varepsilon_2. \quad (37)$$

З урахуванням того, що  $\cos \frac{\theta}{2} = \frac{L}{2r}$ , відповідне рівняння балансу буде мати вигляд

$$P - \frac{2\gamma}{r} = \frac{\gamma}{r} - \frac{\gamma}{L} (1 - \varepsilon_2), \quad (38)$$

де  $\varepsilon_2$  – фактор вкраплень (частка поздовжніх плоских меж зерен колонії, що усувається з розгляду при потраплянні на них вкраплень надлишкової фази, тобто  $\varepsilon_2 = \pi \rho^2 n_s$ ).

З виразу (5.114) отримуємо залежність для порогового радіусу кривини сегмента, по досягненні якого починається стационарний процес росту

$$r_{II} = \frac{3\gamma}{P + \frac{\gamma}{L}(1 - \varepsilon_2)}. \quad (39)$$

Далі, отримуємо співвідношення для порогового часу  $\tau_{II}$ , до якого спеціально введений ще й фактор вкраплень для циліндричних сегментних смужок  $\varepsilon_1$ , що має такий же фізичний зміст, як і фактор  $\varepsilon_2$  (при цьому  $\varepsilon_1 = 10\rho^3 n_v$ )

$$\tau_{II} = \frac{L^2 \varepsilon_1}{160\gamma a A^*} \ln \left[ \frac{2aL - \varepsilon_2 + 1}{aL + \varepsilon_2 - 1} (aL - 1) \right], \quad (40)$$

де  $A^* = \frac{D\omega}{kT}$ .

Оскільки в розглядаємому випадку

$$h(\tau) = \frac{L^2}{8} \cdot \frac{a}{1 + (aL - 1)e^{-\frac{\beta a}{L^2 \varepsilon_1} \tau}}, \quad (41)$$

(тут  $\beta = 160\gamma A^*$ ), то зміна швидкості нестационарного процесу у часі (аж до порогового моменту) складе вираз

$$v_H = \frac{dh(\tau)}{d\tau} = \frac{20}{\varepsilon_1} \cdot \frac{a^2 (aL - 1) \gamma A^* e^{-\frac{\beta a}{L^2 \varepsilon_1} \tau}}{\left[ 1 + (aL - 1)e^{-\frac{\beta a}{L^2 \varepsilon_1} \tau} \right]^2}, \quad (42)$$

а при  $\tau = \tau_{II}$  починається стаціонарний процес переміщення усього колоніального фронту в цілому зі швидкістю, що визначається виразом, що отриманий підстановкою

$$v_{ст} = \frac{20}{9} \cdot \frac{A^* \gamma}{L^2 \varepsilon_1} (2aL - \varepsilon_2 + 1)(aL + \varepsilon_2 - 1). \quad (43)$$

Відмітимо, що  $\theta_{II} = 2 \arccos \frac{L}{2r_{II}}$  (пороговий кут потрійного стику

зерен) є функціями не тільки числових значень факторів вкраплень  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  ( $0 < \varepsilon_1 \leq 1$  та  $0 \leq \varepsilon_2 \leq 1$ ), але й змінюють свою аналітичну форму. На рис. 7 показано вплив факторів часу та рухомих вкраплень на кінетичні фактори  $\tau_{II}$  та  $v_{ст}$  прямого поздовжнього росту колонії.

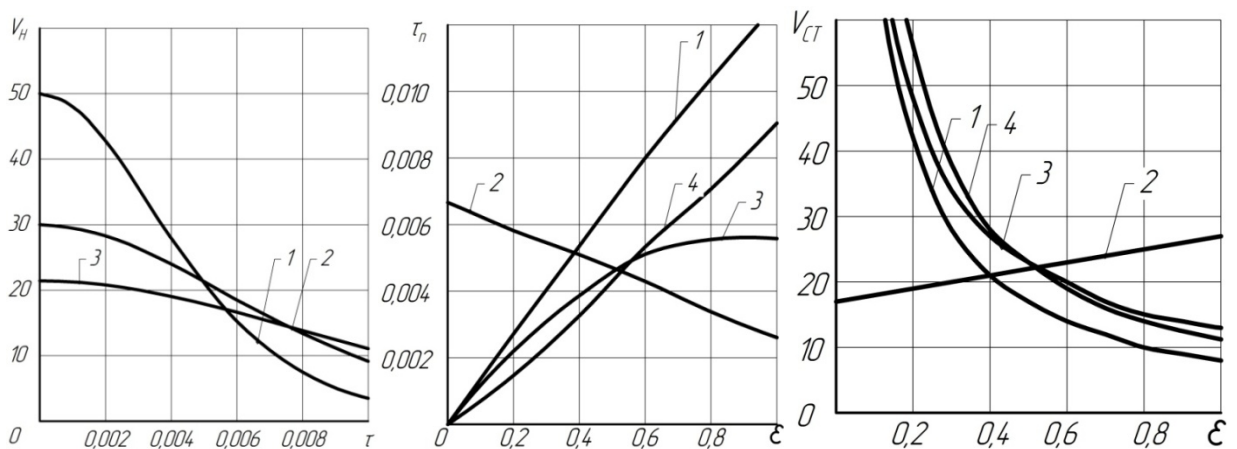


Рисунок 7 – Вплив факторів часу та рухомих вкраплень на кінетичні характеристики прямого поздовжнього росту колонії. Для кривих  $v_n(\tau)$  відповідає умовам: 1 –  $\varepsilon_1 = \varepsilon = 0,30$ ; 2 –  $\varepsilon_1 = \varepsilon = 0,5$ ; 3 –  $\varepsilon_1 = \varepsilon = 0,7$ . Для кривих  $\tau_{II}(\varepsilon)$  та  $v_{ст}(\varepsilon)$  1 –  $\varepsilon_1 = \varepsilon$ ;  $\varepsilon_2 = 0$ ; 2 –  $\varepsilon_1 = 0,5$ ;  $\varepsilon_2 = \varepsilon$ ; 3 –  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ ; 4 –  $\varepsilon_1 = \varepsilon$ ;  $\varepsilon_2 = 0,5$ . При розрахунках приймали, що  $\gamma = 3$ ,  $L = 2$ ,  $P = 6$ ,  $A^* = 1$  (все в умовних одиницях, що не порушує співвідношень розмірностей)

Проаналізувавши усі ці залежності, можна констатувати, що за умов неоднорідного розподілу (найбільш характерного для випадку рухомих

частинок) кінетичні фактори ( $\tau_{II}$  та  $v_{ст}$ ) можуть змінюватися прямо протилежним чином: зменшуватися або збільшуватися.

Цікавим є випадок, коли основна рушійна сила процесу росту колонії відсутня (тобто  $P=0$ ). В такій ситуації починається здійснюватися «від'ємний» поздовжній ріст (збиральний процес), що призводить до поступового усунення колоніальної структури. Такому процесу буде відповідати така система залежностей

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{L^2}{8} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{a}{1 - (aL - 1)e^{-\frac{\beta a}{L^2 \varepsilon_1} \tau}} = \frac{1}{8} \cdot \frac{L^4}{L^3 + \frac{10\beta}{\varepsilon_1} \tau} \\ r_{II} &= \frac{3L}{1 - \varepsilon_2} \\ \tau_{II} &= \frac{L^2 \varepsilon_1 (2 + \varepsilon_2)}{160A^* \gamma (1 - \varepsilon_1)} \\ v_n &= -20 \frac{L^4 A^* \gamma \varepsilon_1}{(L^3 \varepsilon_1 + 160A^* \gamma \tau)^2} \\ v_{ст} &= -\frac{20}{9} \cdot \frac{A^* \gamma}{L^2 \varepsilon_1} (1 - \varepsilon_2)^2 \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

На рис. 8 показано вплив часу та рухомих краплень на кінетичні фактори  $v_n$ ,  $\tau_{II}$  та  $v_{ст}$  зворотного поздовжнього росту колонії (збиральний процес).

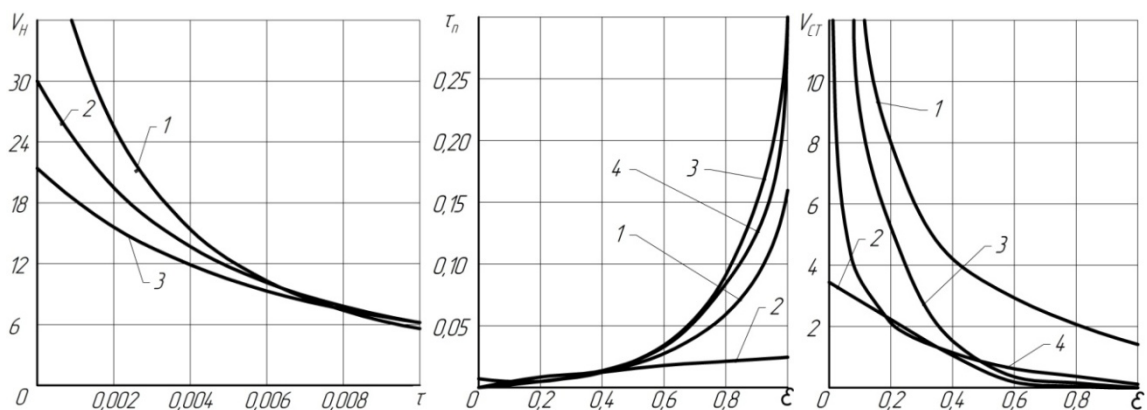


Рисунок 8 – Вплив факторів рухомих вкраплень на кінетичні характеристики зворотного поздовжнього росту колонії (збиральний процес): Для кривих  $v_n(\tau)$  відповідає умовам: 1 –  $\varepsilon_1=\varepsilon=0,30$ ; 2 –  $\varepsilon_1=\varepsilon=0,5$ ; 3 –  $\varepsilon_1=\varepsilon=0,7$ . Для кривих  $\tau_{II}(\varepsilon)$  та  $v_{ст}(\varepsilon)$  1 –  $\varepsilon_1=\varepsilon$ ;  $\varepsilon_2=0$ ; 2 –  $\varepsilon_1=0,5$ ;  $\varepsilon_2=\varepsilon$ ; 3 –  $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon$ ; 4 –  $\varepsilon_1=\varepsilon$ ;  $\varepsilon_2=0,5$ .  
Приймали, що  $\gamma=3$ ,  $L=2$ ,  $P=0$ ,  $A^*=1$  (все в умовних одиницях, що не порушує співвідношень розмірностей)

Як впливає з аналізу цих залежностей (рис. 8), при будь-якому характері розподілу вкраплень нестационарна швидкість росту  $v_n$  тільки зменшується, порогова характеристика  $\tau_{II}$  завжди тільки збільшується, а швидкість стаціонарного процесу, навпаки, зменшується (ступінь зменшення швидкості збирального росту колонії для стаціонарного режиму залежить як від кількості вкраплень на обох типах поверхонь поділу, так і від характеру їх розподілу на межах зерен колонії, що усувається).

Таким чином, виходячи із вищезазначеного, можна стверджувати, що рухомі вкраплення надлишкової фази дозволяють забезпечувати високий рівень орієнтованості колоніальної структури на етапі її формування ( $P \neq 0$ ), а коли цей процес завершується ( $P=0$ ), ті ж самі вкраплення стабілізують отриману структуру, суттєво послаблюючи або навіть повністю запобігаючи зворотному (збиральному) росту зерен колонії.

## Розділ 6

### Сумісний ріст групи пластинчастих зерен в процесі фазового перетворення типу $\beta \rightarrow \alpha$

Тепер розглянемо випадок (що реалізується, наприклад, при спрямованій кристалізації), якщо колонія пластинчастих (стовпчастих) паралельно орієнтованих зерен, яка проростає в матрицю, відрізняється від неї не тільки питомим значенням об'ємної вільної енергії, що забезпечує появу термодинамічної рушійної сили, іншої, вже чисто кристалізаційної природи, але і типом структури. Це, звичайно, одразу приведе до зміни профілю багатосегментної межі. Відмінність від попереднього випадку полягатиме в тому, що  $r_0 \neq L$  і  $\theta \neq 120^\circ$  (у потрібному стику матриця - суміжні зерна колонії). Протирушійна сила міграції межового фронту колонії і тут залишається тією ж – лапласівською.

Нехай колоніальна структура відповідає фазі  $\alpha$ , а матриця –  $\beta$ . Тоді рушійну силу позначимо як  $P_\alpha$ , а протирушійну –  $P_\beta = \frac{2\gamma_{\alpha\beta}}{r}$ . Як і раніше, стартова позиція профілю межі колонії (цей профіль для двох суміжних стовпчастих зерен приведений на рис. 9) визначається рівністю  $\sum_i \bar{\gamma}_i = 0$  або в більш конкретному варіанті  $\bar{\gamma}_{\alpha\beta} + \bar{\gamma}_{\alpha\beta} = \bar{\gamma}_{\alpha\alpha}$ , що відповідає співвідношенню

$2\gamma_{\alpha\beta} \cos \frac{\theta}{2} = \gamma_{\alpha\alpha}$ . При цьому, як витікає з того ж рисунка, кут  $\theta$  обов'язково

відрізнятиметься в той або іншій бік від  $120^\circ$ , оскільки  $\gamma_{\alpha\beta} \neq \gamma_{\alpha\alpha}$ . Для поздовжнього росту колоній із вказаною стартовою позицією необхідно, щоб автоматично виконалася нерівність  $k > 1$  або, що все одно  $\bar{\gamma}_{\alpha\beta}^{(1)} + \bar{\gamma}_{\alpha\beta}^{(2)} > \bar{\gamma}_{\alpha\alpha}$ .

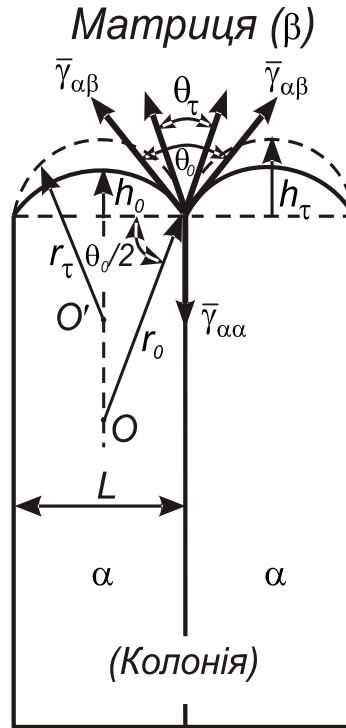


Рисунок 9 – Схема двох суміжних пластинчастих зерен зростаючої плоскої колонії  $\alpha$ -фази ( $\beta$  – матрична фаза). Тут  $\bar{\gamma}_{\alpha\alpha}$  – міжзеренний натяг колонії;  $\bar{\gamma}_{\alpha\beta}$  – міжфазний натяг (вздовж межового фронту колонії). Інші позначення такі ж, що і на рис. 3

Отже, нехай  $\bar{\gamma}_{\alpha\beta} > \bar{\gamma}_{\alpha\alpha}$ ; тоді  $\cos \frac{\theta}{2} < \frac{1}{2}$  і  $\theta > 120^\circ$ . В цьому випадку

$$r_0 = \frac{L}{2 \cos \theta/2} = L \frac{\gamma_{\alpha\beta}}{\gamma_{\alpha\alpha}}, \text{ тобто } r_0 > L. \text{ Заміна в передекспоненціальному}$$

множнику виразу (5.87)  $L$  на  $r_0$  дає нам загальний вид (без урахування початкової умови) розв'язку диференціального рівняння

$$r^{-1} = a + \left( \frac{1 - ar_0}{r_0} \right) \exp\left( -\frac{b}{L^2} \tau \right), \quad (45)$$

де вже  $a = \frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}}$ , а  $b = 16m\gamma_{\alpha\beta}$ .

Проведемо підстановку. Тоді максимальна висота межового сегмента буде функціонально пов'язана із часом нестационарного росту колонії залежністю

$$h_\alpha = \frac{1}{8} \alpha L^2 \left[ \frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}} + \left( \frac{1}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} - \frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}} \right) \exp\left(\frac{b\tau}{L^2}\right) \right] \quad (46)$$

(в різних викладеннях за участю цього виразу, як і раніше, вважатимемо, що  $\alpha \cong 1$ ). Покажемо, що і в цьому випадку процес нестационарного росту (збільшення  $h$ ) переважно є згасаючим.

Неважко бачити, що ріст можливий частіше всього лише у разі, якщо  $2\gamma_{\alpha\beta} \cos \frac{\theta}{2} - \gamma_{\alpha\alpha} > 0$ .

Оскільки  $2 \cos \theta/2 = L/r$  (див. рис. 11), то з приведеної нерівності безпосередньо виходить

$$\gamma_{\alpha\beta} \left( 2 \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} \right) = \gamma_{\alpha\beta} \left( \frac{L}{r} - \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} \right) = \frac{\gamma_{\alpha\beta} L}{r} \left( 1 - \frac{r}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} \right) > 0$$

і  $\frac{r}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} < 1$  (оскільки  $\frac{\gamma_{\alpha\beta}}{r} \cdot L > 0$ ).

Далі  $\frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}/r} > 1$  (із фізичного змісту явища) і таким чином

$$\frac{r}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} - \frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}} \cdot r = r \left( \frac{1}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} - \frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}} \right) < 0.$$

Оскільки  $r$  величина не є від'ємною, остаточно маємо те, в чому необхідно було переконатися, а саме:  $\frac{1}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} - \frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}} < 0$ .

Тепер знайдемо аналітичний вираз для порогового часу, при якому відбувається зміна режимів росту (стаціонарний процес змінюється на нестаціонарний). Тут ми знову використовуємо той же самий підхід, що і у попередньому випадку. Проте умова дії однакових рушійних сил на потрійний стик і сегмент межового фронту, в порівнянні з виведеною раніше (умова (5.91)), вже буде дещо відрізнятися за формою (через те, що  $\gamma_{\alpha\beta} \neq \gamma_{\alpha\alpha}$ )

$$\left(2\gamma_{\alpha\beta} \cos \frac{\theta}{2} - \gamma_{\alpha\alpha}\right) \frac{1}{L} = \left(\frac{L}{r_{nop}} \gamma_{\alpha\beta} - \gamma_{\alpha\alpha}\right) \frac{1}{L} = P_\alpha - \frac{2\gamma_{\alpha\beta}}{r_{nop}}. \quad (47)$$

Звідси

$$r_{nop} = \frac{3\gamma_{\alpha\beta}}{P_\alpha + \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{L}} \gamma_{\alpha\beta}. \quad (48)$$

Тоді вихідне рівняння стаціонарного росту

$$v_{стац} = \frac{dh_\alpha}{d\tau} = m \left( P_\alpha - \frac{2\gamma_{\alpha\beta}}{r_{nop}} \right) \quad (49)$$

перетвориться до виду

$$\left(\frac{dh_\alpha}{d\tau}\right)_{стац} = \frac{1}{3} m \left( P_\alpha - \frac{2\gamma_{\alpha\alpha}}{L} \right), \quad (50)$$

тобто як і у попередньому випадку, швидкість стаціонарного процесу, окрім  $P_\alpha$ , також визначатиметься ще і величиною питомої зерномежової енергії зростаючої колонії стовпчастих зерен (при заданому значенні  $L$ ).

Шлях же, пройдений фронтом багатосегментної межі з постійною швидкістю ( $v_{\text{стац}}$ ), отримаємо інтегруванням в границях  $h_{\text{стац}}^\alpha - h_\alpha$  і  $\tau_{\text{пор}} - \tau$

$$h_\alpha = h_{\text{нестаци}}^\alpha + \frac{1}{3} m \left( P_\alpha - \frac{2\gamma_{\alpha\alpha}}{L} \right) (\tau - \tau_{\text{пор}}). \quad (51)$$

Для визначення  $\tau_{\text{пор}}$  необхідно

$$\frac{1}{3L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} + \frac{2}{3} a = a + \left( \frac{1}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} - a \right) \exp\left(-\frac{b}{L^2} \tau_{\text{пор}}\right).$$

Після простих перетворень одразу одержуємо вже знайомий за попереднім аналогічним розглядом вираз  $\tau_{\text{пор}} = \frac{L^2 \ln 3}{b}$ , який в розкритому виді дає нам

$$\tau_{\text{пор}} \approx \frac{L^2}{m\gamma_{\alpha\beta}}. \quad (52)$$

Отже, якщо  $\tau_{\text{пор}}$  залежить як від міжфазної ( $\gamma_{\alpha\beta}$ ), так і міжзеренної вільної енергії ( $\gamma_{\alpha\alpha}$ ), то час  $\tau$  обернено пропорціональний лише міжфазній енергії  $\gamma_{\alpha\beta}$ , а також рухомості  $m$ .

Визначимо і в цьому випадку кутовий коефіцієнт кривої нестаціонарного процесу ( $h = h(\tau)$ ) в точці  $\tau_{\text{пор}}$  (тобто миттєву швидкість росту стовпчастих зерен в даний часовий момент)

$$\begin{aligned} k_{\text{нестаци}}(\tau_{\text{пор}}) &= -2m\gamma_{\alpha\beta} \left( \frac{1}{L} \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{\gamma_{\alpha\beta}} - \frac{P_\alpha}{2\gamma_{\alpha\beta}} \right) \exp(-\ln 3) = -\frac{2}{3} m \left( \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{L} - \frac{P_\alpha}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{3} m \left( P_\alpha - \frac{\gamma_{\alpha\alpha}}{L} \right) = k_{\text{стац}} \end{aligned}$$

Таким чином, і в цьому випадку в точці  $\tau_{\text{пор}}$  спостерігається плавна зміна одного процесу росту стовпчастої колонії іншим.

## Розділ 7

### Висновки

Виходячи із співвідношення вільних енергій меж поділу, часто створюються енергетичні ситуації, що сприяють кооперативному, (сумісному) меж поділу, що призводить до утворення структури пакетного типу (сумісних пластинчастих зерен), які мають однакову орієнтацію у просторі і створюють «пакет» з різними властивостями як у повздовжньому так і в поперечному напрямках.

При наявності вкраплень іншої фази, в залежності від рівня дисперсності самих частинок за поданою вище термодинамічною схемою різні кінетики (двох типів) при яких мігруючі межі долають механічний опір нерухомих частинок або процес при якому шляхом відповідного масопереносу мігруюча межа зерна рухається разом з частинками залишкових фаз.

## РОЗДІЛ 8

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В дипломній роботі досліджуються і розглядаються теоретичні аспекти кооперативного росту зерен в металевих системах, розглядаються процеси росту зерен в гомогенному середовищі, кінетика поздовжнього паралельного росту різних структур колоніального типу.

#### 8.1. Аналіз потенційних небезпек [25]:

а) ураження електричним струмом через порушення правил електричної безпеки, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

б) негативний вплив світлового потоку мікроскопа при вивченні структури зразків.

в) хімічні опіки при травленні зразків через необережному поводженні з хімічними реактивами.

г) незадовільні параметри повітряного середовища у лабораторії через неефективну роботу систем опалення та вентиляції.

д) незадовільні параметри освітлення через вихід з ладу та підвищеної запиленості освітлюючі приладів.

е) можливість загорянь через порушення правил пожежної безпеки або коротких замкнень, що можуть призвести до пожежі.

є) неправильні дії персоналу в умовах надзвичайної ситуації, фякі можуть призвести до паніки.

## 8.2. Заходи забезпечення техніки безпеки[25]

а) для виключення ураження електричним струмом електрообладнання має відповідати ГОСТ 12.2.007.0-75 «Вироби електротехнічні. Загальні вимоги безпеки», ГОСТ 12.2.003-91 «Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки» та ПУЄ- 207. Експлуатація електрообладнання та електроустановок має проводитися відповідно «правила технічної експлуатації електроустановок» (ПУЄ), «Правила технічної експлуатації електроустановок» ( ПУЄ), «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачем» та « Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем»[26].

Під електричною безпекою розуміється система організаційних заходів і технічних засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики.

Навіть при розвиненій системі захисних заходів не слід вважати, що вони створюють умови абсолютної безпеки. У всіх випадках необхідно високоякісне виконання електричних установок і періодичний контроль їх, підтримання якісного стану ізоляції, висока дисципліна персоналу і дотримання правил безпеки.

Небезпека травмування при роботі з електроустановками може виникнути в наступних випадках:

- від доторкання до неізольованих проводів, контактів різного устаткування, що знаходиться під напругою;
- від доторкання до корпусів машин і апаратів, які опинилися під напругою випадково, в результаті пошкодження ізоляції;

- від близькості людини де впав на землю провід, що знаходиться під напругою;

Основними заходами захисту в цих випадках є забезпечення недоступності струмоведучих частин від випадкового доторкання, застосування захисного відключення, застосування індивідуальних засобів захисту та інші. Огорожа струмоведучих частин повинно бути передбачено конструкцією електроустановки і є його складовою частиною. Таку конструкцію має більшість що випускаються промисловістю електричних машин, апаратів і приладів, у яких корпусу, кожухи і оболонки надійно захищають струмопровідні частини від доторкання.

При спорудженні електроустановок неізолювані дроти і шини, а також прилади та апарати, що мають незахищені струмопровідні частини, поміщають в спеціальні ящики, шафи, камери та інші пристрої, що закриваються суцільними або сітчастими огороженнями. Розміщення струмоведучих частин на недоступній висоті виробляють в тих випадках, коли ізоляція і захист їх виявляються неможливими чи недоцільними..

Значення електричного струму що проходить через тіло людини є основним чинником, що обумовлює результат ураження. Разом з тим великий вплив надає тривалість дії струму, його частота, а також інші фактори. Тривалість проходження струму через організм істотно впливає на результат поразки, ніж тривалу дію струму, тим більша ймовірність важкого або смертельного результату.

б) для виключення негативного впливу світлового потоку мікроскопа передбачено: використання світофільтрів (зелених, жовтих, синіх), обираються індивідуально

в) для виключення хімічних опіків передбачено:

- зберігання кислот у місцях, де можливе їх стикання з деревиною та іншими речовинами органічного походження ( для нейтралізації розлитих

кислот місця їх зберігання необхідно забезпечувати готовими розчинами крейди, вапна або соді);

- під час зберігання азотної та сірчаної кислот треба вжити заходів до недопущення стікання їх з деревиною та іншими речовинами органічного походження. Концентровану азотну кислоту не дозволяється розливати у скляні сулії;

- під час роботи використовувати гумові рукавиці ГОСТ 20010-93 «Перчатки резиновые технические. Технические условия», окуляри «Очки защитные» ГОСТ Р 12.4.013 -97, респіратор ГОСТ 12.4.028 -78 ССБТ. Респіратори ШБ-1 «Лепесток». Технические условия (с Изменением 1,2), спеціальний одяг ГОСТ 12.4.011-89 «Средства защиты работающих» ;

- мати поблизу нейтралізуючі речовини, аптечку, джерело проточної води.

г) Параметри повітряного середовища в приміщенні дослідницької лабораторії. Мікроклімат виробничих приміщень, в основному, впливає на тепловий стан організму людини і його теплообмін з навколишнім середовищем. Основним нормативним документом, який визначає параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ГОСТ 12.005-88. В основу принципів нормування параметрів мікроклімату покладена диференціальна оцінка оптимальних та допустимих метеорологічних умов в робочій зоні залежно від теплової характеристики виробничого приміщення, категорії робіт по ступеню тяжкості і періоду року.

Для створення нормальних умов праці, необхідно забезпечити не тільки комфортні метеорологічні умови, але і необхідну чистоту повітря: установка спліт-системи, системи водяного опалення, які повинні забезпечувати норми, які встановленні у ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общесанитарно - гигиенические требования к воздуху раб очей зонь» та ДНС 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми параметрів мікроклімату». Внаслідок виробничої діяльності в повітряне середовище приміщень можуть надходити різноманітні шкідливі речовини, які використовуються в технологічних процесах. Швидкість повітря також впливає

на розподіл шкідливих речовин в приміщенні. Повітряні потоки можуть розповсюджувати їх по всьому об'єму приміщення, переводити пил з осілого стану у зважений стан. Під час впливу високої температури повітря, інтенсивного теплового випромінювання є можливість перегріву організму людини, котрий характеризується підвищенням температури тіла, яким потовиділенням, прискореним пульсом і диханням, різкою слабкістю.

### 8.3. Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці:

- удосконалення технологічних процесів та устаткування;
- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції та ін. засобів;
- нормальне функціонування систем опалення, загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очищення викидів;
- попередні та періодичні медичні огляди робітників, які працюють у шкідливих умовах, профілактичне харчування, дотримання правил особистої гігієни;
- контроль за вмістом шкідливих речовин у повітрі робочої зони;
- використання засобів індивідуального захисту.

д). параметри виробничого освітлення та підвищеної запиленості освітлюючих приладів. Для створення сприятливих умов роботи, що виключають швидке стомлення очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків та сприяють підвищенню продуктивності праці та якості продукції, виробниче освітлення повинне відповідати наступним вимогам:

- створювати на робочій поверхні освітленість, відповідну характеру зорової роботи, не нижче встановлених норм;
- забезпечити достатню рівномірність і постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях, щоб уникнути частою переадаптації органів зору;
- не створювати на робочій поверхні різких і глибоких тіней (особливо рухомих);
- забезпечити достатній для відмінності деталей контраст освітлюваних поверхонь;
- не створювати небезпечних і шкідливих виробничих факторів: шум, теплові випромінювання, небезпека ураження струмом, пожаро- і вибухонебезпечність світильників ;

- має бути надійним і простим в експлуатації, економічним і естетичним.

Залежно від джерела світла виробниче освітлення може бути природним і штучним.

Природне освітлення підрозділяється на: бічне - здійснюване через світлові отвори в зовнішніх стінах, та верхнє - здійснюване через ліхтарі і світлові отвори в дахах і перекриттях, комбіноване - поєднання верхнього і бічного освітлення.

Штучне освітлення передбачається у всіх виробничих і побутових приміщеннях, де недостатньо природного світла, а також для освітлення приміщень в темний період доби.

#### 8.4. Заходи з пожежної безпеки

е) горюча речовина і окислювач, за певних умов утворюють (вибухонебезпечне) середовище. Залежно від агрегатного стану та ступеня подрібненості речовин, горюче середовище може утворюватися твердими речовинами, легко займистими, горючими рідинами, горючим пилом та горючими газами за наявності окислювача. Процес горіння призводить до пожежі.

Пожежа - неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується в часі та просторі. Для ліквідації пожежі у початковій стадії їх розвитку силами персоналу об'єктів застосовуються первинні засоби пожежогасіння.

До них відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар ( покривало з негорючого з теплоізоляційного полотна, ящики з піском, бочки з водою, пожежні відра, совкові лопати, ломи, сокири тощо), системи автоматичного пожежогасіння.

1. Клас пожежі А.

2. Категорія приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою –Д.

3. Первинні засоби пожежогасіння:переносні порошкові вогнегасники(1шт. 10л) або автоматичні системи сигналізації. Автоматичні пожежні сповіщувачі реагують на фактори, що супроводжують пожежу:підвищення температури, дим,полум'я.

Своєчасне виявлення ознак займання та виклик пожежних підрозділів дає змогу швидко локалізувати осередки пожежі та вжити заходи щодо її ліквідації,а отже,створює можливість суттєво зменшити обсяги заподіяної шкоди. Найшвидшим та найнадійнішим засобом сповідування про виникнення пожежі вважаються установки електричної пожежної сигналізації (ЕПС). Залежно від схеми з'єднання розрізняють променеві (радіальні) та кільцеві установки ЕПС. В установках ЕПС можуть

обладнуватися адресовані та не адресовані пожежні сповіщувачі. Неадресованим вважається автоматичний сповіщувач, який реагує на фактори, що супроводжують пожежу в місці його встановлення та формує сигнал про виникнення пожежі в захищеному приміщенні без зазначеного свого номера (адреси). Адресований сповіщувач постійно або періодично активно формує сигнал про стан пожежонебезпечності у захищеному приміщенні та про власну працездатність із зазначенням свого номера (адреси). Адресовані пожежні сповіщувачі можуть використовуватися в установках ЕПС як променевого, так і кільцевого типу. Кількість приміщень, обладнаних одним шлейфом з адресованими сповіщувачами, обмежується лише технічними можливостями приймально-контрольних приладів. В одному приміщенні слід встановлювати не менше двох не адресованих або один адресований пожежний сповіщувач.

Одним з основних елементів установок ЕПС є пожежні сповіщувачі. Розрізняють сповіщувачі ручної та автоматичної дії. Ручні пожежні сповіщувачі приводяться в дію натисканням на кнопку. Вони, як правило, використовуються для подачі сигналу про пожежу з території підприємства. У середині будівлі вони можуть застосовуватися як додатковий технічний засіб автоматичної пожежної сигналізації. Учні пожежні сповіщувачі обладнують на стінах і конструкціях на висоті 1,5м від підлоги(землі) у легкодоступних місцях.

Автоматичні пожежні сповіщувачі реагують на фактори, що супроводжують пожежу: підвищення температури, дим, полум'я. Вони підрозділяються на:

- теплові автоматичні пожежні сповіщувачі ДТЛ, ІТМ, ПОСТ-1;2, МДП-028, ІП 105-2/1
- димові автоматичні пожежні сповіщувачі ІДФ-М, ДП-1, ІДП-2
- світлові автоматичні пожежні сповіщувачі СІ-1, ДПД, АП.

Застосування набувають комбіновані сповіщувачі (КІ), які контролюють відразу кілька показників, наприклад, температура та дим, а також

ультразвукові сповіщувачі (ДУЗ-4), які реагують на зміну характеристик ультразвукового поля в захищуваному приміщенні. Завдяки високій чутливості ультразвукові сповіщувачі (датчики) можуть поєднувати пожежні та охоронні функції.

Вид автоматичного пожежного сповіщувача вибирають з урахуванням призначення захищуваних приміщень, пожежної характеристики матеріалів, що в них розташовуються, первинних ознак пожежі та умов експлуатації. Для адміністративних, побутових і громадських приміщень та споруд, залежно від їх призначення, рекомендуються димові, теплові або світлові пожежні сповіщувачі.

Для ліквідації загорянь адміністративні, побутові і громадські приміщення та споруд на кожному поверсі повинні мати не менше двох переносних (порошкових, водопінних або водяних) вогнегасників з масою заряду вогнегасної речовини 5 кг і більше. Крім того, слід передбачати по одному вуглекислому вогнегаснику з величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг і більше:

- на 20 м<sup>2</sup> площі підлоги в таких приміщеннях: офісні приміщення з ПЕОМ, комори, електрощитові, вентиляційні камери та інші технічні приміщення;
- на 50 м<sup>2</sup> площі підлоги приміщень архівів, машзалів, бібліотек, музеїв.

Додатково вищевказані приміщення можуть оснащуватися аерозольними водопінними вогнегасниками з масою заряду вогнегасної речовини 400 г і більше. Коли від пожежі захищаються приміщення з ЕОМ, телефонні станції, музеї, архіви тощо, слід враховувати специфіку вогнегасних речовин у вогнегасників, які призводять під час гасіння до псування обладнання. Ці приміщення рекомендуються оснащувати вуглекислотними вогнегасниками з урахуванням гранично допустимою концентрації вогнегасної речовини.

Для гасіння пожежі у адміністративних приміщеннях можуть застосовуватися спринклерні та дренчерні установки, модульні установки,

у яких використовуються вогнегасні порошки ( САМ 3 та інші.), а також стаціонарні блоки вуглекислотного пожежогасіння (ПО-73).

є) Заходи із забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях.

Надзвичайна ситуація (НС) – порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, спричинено аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, великою пожежею, застосуванням засобів ураженням, що призвели або можуть призвести до людських матеріальних втрат.

Класифікація НС :

- НС техногенного характеру;
- НС екологічного характеру;
- НС природного характеру;
- НС соціально-політичного характеру;
- НС військового характеру;

В дипломній роботі розглядається НС техногенного характеру – пожежа.

Пожежа – поза регламентній процес знищення або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають чинники, небезпечні для живих істот і довкілля.

При виникненні пожежі необхідно:

- повідомити міську пожежну охорону( зателефонувати 101);
- припинити усі роботи;
- приступити до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння, які є на робочому місці (вогнегасник);
- негайно повідомити керівнику лабораторії;
- при необхідності відключити електроенергію;
- вивести з приміщення всіх людей (евакуація);

Висновки з розділу « Охорона праці» та підрозділу « Заходи з цивільної оборони».

а) для виключення ураження електричним струмом електрообладнання має відповідати ГОСТ 12.2.007.0-75 «Вироби електротехнічні. Загальні вимоги безпеки», ГОСТ 12.2.003-91 « Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки» та ПУЄ- 207. Експлуатація електрообладнання та електроустановок має проводитися відповідно «правила технічної експлуатації електроустановок» (ПУЄ), «Правила технічної експлуатації електроустановок» ( ПУЄ), «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачем» та « Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем».

б) для виключення негативного впливу світлового потоку мікроскопа передбачено: використання світофільтрів (зелених, жовтих, синіх), обираються індивідуально

в) для виключення хімічних опіків передбачено:

- під час роботи використовувати гумові рукавиці ГОСТ 20010-93 « Перчатки резиновые технические. Технические условия», окуляри « Очки защитные» ГОСТ Р 12.4.013 -97, респіратор ГОСТ 12.4.028 -78 ССБТ. Респіратори ШБ-1 «Лепесток». Технические условия (с Изменением 1,2), спеціальний одяг ГОСТ 12.4.011-89 «Средства защиты работающих» ;

г) Для створення нормальних умов праці, необхідно забезпечити не тільки комфортні метеорологічні умови, але і необхідну чистоту повітря: установка спліт-системи, системи водяного опалення, які повинні забезпечувати норми, які встановленні у ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общесанитарно - гигиенические требования к воздуху раб очей зоны» та ДНС 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми параметрів мікроклімату».

д) для створення сприятливих умов роботи, що виключають швидке стомлення очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків та сприяють підвищенню продуктивності праці та якості продукції, виробниче освітлення повинне створювати на робочій поверхні

освітленість, відповідну характеру зорової роботи, не нижче встановлених норм.

е) При виникненні пожежі необхідно:

- повідомити міську пожежну охорону( зателефонувати 101);
- припинити усі роботи;
- приступити до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння, які є на робочому місці (вогнегасник);
- негайно повідомити керівнику лабораторії;
- при необхідності відключити електроенергію;
- вивести з приміщення всіх людей (евакуація);

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ольшанецкий В.Е. О миграции межзеренных границ общего типа / В.Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.–2006. – №1. –С.9-15.
2. Ольшанецкий В.Е. Потенциальные и реальные движущие силы миграции границ для плоских и объемных моделей зеренной структуры // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез. докл. Всесоюзн. научн.- техн. конф. 10-14 октября 1989 г. – Запорожье, 1989. – С.26-27.
3. Бурке Дж., Тарнбалл Д. Рекристаллизация и рост зерен // Успехи физики металлов. – М.: Металлургиздат, 1956. – вып.1. – С.368-456.
4. Мартин Дж., Доэрти Р. Стабильность микроструктуры металлических систем. – М.: Атомиздат, 1978. – 280 с.
5. Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. – М.: Металлургиздат, 1960. – 322 с.
6. Plateau T. Statique experimental et thevrique des liquides, Ghent, 1873.
7. Desch C.H. – T. Inst. Met., 1919, 22, p.241.
8. Hull F.C., Houk W.T. – T. Metals, 1953, 5, p.565.
9. Hillert M. – Acta Met., 1965, 13, p.227.
10. Gladman T.- Proc. Roy, Soc., 1966, A294, p.298.
11. Zener C. – Phys. Rev., 1946, 69, p.128.
12. Александров Л.Н. К теории роста перлита // Известия вузов. Черная металлургия. – 1960. – № 8. – С. 110-114.
13. Ольшанецкий В.Е. О Продольном росте колониальных структур в металлических сплавах // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий: Тез. докл. II Всесоюзн. научн.- техн. конф. 7-9 сентября 1983 г. – Запорожье, 1983. – С.45-48.
14. Ольшанецкий В.Е. О росте колоний столбчатых зерен в слабогетерогенных сплавах в присутствии частиц избыточной фазы / В.Е. Ольшанецкий, Ю.И. Спицына // Проблемы современного материаловедения: сб. трудов междунар. конф. – Дн-вск, 1997. – С. 68-69.
15. Olshanzky V. Longitudinal growth of lamellar (columnar) grain colonies under the action of moving and counter moving forces of different thermodynamic nature / V.Olshanzky, Spitzina Y. // Евтектика IV: наук. і праці міжнар. конф. – Дн-вськ, 1997. – С.34.

16. Ольшанецкий В.Е. О продольном росте колоний пластинчатых зерен в присутствии дисперсных частиц избыточной фазы. 1. Случай распространения рекристаллизационного фронта / В.Е. Ольшанецкий, Ю.И. Спицына // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1997. – № 1-2. – С.7-10.

17. Ольшанецкий В.Е. Ориентированный рост однофазных колониальных структур в присутствии подвижных пограничных включений второй фазы / Ю.И. Спицына, В.Е. Ольшанецкий // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: сб. науч. трудов VIII науч.-техн. конф. – Запорожье, 1997. – С.7-11.

18. Ольшанецкий В. Про формування орієнтованих стовпчастих структур в металевих системах з дисперсними частинками фази виділення / В. Ольшанецкий, Ю. Спицина // Конструкційні та функціональні матеріали: матеріали Другої Міжнародної Конференції. – Львів, 1997. – С.40-41.

19. Спицына Ю.И. Термодинамические движущие и противодвижущие силы фронта роста однофазных колоний в слабогетерогенных металлических сплавах / Ю.И. Спицына, В.Е. Ольшанецкий // Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів: зб. наук. праць IX Міжнар. наук.-техн. конф. – Запоріжжя, ЗНТУ, 2003. – С.125-128.

20. Ольшанецкий В.Е. О продольном росте колоний пластинчатых зерен в присутствии дисперсных частиц избыточной фазы. 3. Случай комбинированной рекристаллизации / В.Е. Ольшанецкий, Ю.И. Спицына // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 2. – С.5-9.

21. Любов Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений / Б.Я.Любов. – М.: Металлургия, 1969. – 264с.

22. Ольшанецкий В.Е. Об ориентированном росте однофазных и двухфазных структур колониального типа / В.Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.–2002. – №1. –С.14-22.

23. Ольшанецкий В.Е. О кинетике ориентированного роста двухфазных пластинчатых колоний. Сборник трудов 5-го Собрания металлословов России. – Краснодар: Кубан. гос. технол.ун-т, 2001. 397с.

24. Ольшанецкий В.Е. О кинетике параллельного кооперативного роста двухфазных пластинчатых структур / В.Е. Ольшанецкий // Металловедение и термическая обработка металлов. – М: Машиностроение.– 2003. – №3. –С.3-5.

25. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці [Текст]: підруч. / В. Ц. Жидецький. — 3-тє вид., перероб. і доп. — [Львів : Укр. акад. друкарства](#), 2006.

26. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Державний нормативний акт про охорону праці — Затверджено: Наказ Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4. Дата введення 20.02.1998 р.