

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 669.017:621.771:621.785

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕРНОГРАНИЧНОЇ СТРУКТУРИ У СТАЛЯХ З А, Г І А + Г ФАЗОВИМ СТАНОМ

БОЛЬШАКОВ В. І.¹, *д-р т. н., проф.*,

СУХОМЛИН Г. Д.², *д-р т. н., проф.*,

ДЕРГАЧ Т. О.³, *канд. техн. наук*

¹Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (056) 745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: [0000-0003-0790-6473](https://orcid.org/0000-0003-0790-6473)

²Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (050) 867-30-97, тел. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net

³Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: [0000-0003-0235-5342](https://orcid.org/0000-0003-0235-5342)

Анотація. *Постановка проблеми.* Перспективний напрям підвищення комплексу властивостей металопродукції з полікристалічних матеріалів - це застосування у процесі її виготовлення принципу зернограничного конструювання (ЗГК) (grain boundary engineering). Його сутність полягає в сукупності температурно-деформаційних процесів, що сприяють утворенню структури з максимально можливою кількістю спеціальних границь (СГ) зерен типу $\Sigma 3^n$ у концепції ґраток співпадаючих вузлів (ГСВ). На цей час досягнуто певних практичних результатів, проте розвиток цього напрямку стримується відсутністю наукової методології й надійних методик ідентифікації, кількісної оцінки та визначення енергетичного рівня великокутових гомофазних і гетерофазних границь у сталях з α , γ і $\gamma+\alpha$ фазовими станами. **Мета роботи** – створення нових і вдосконалених методик дослідження для визначення комплексу характеристик спеціальних гомофазних і гетерофазних СГ в низьколегованих і високолегованих сталях. **Висновки.** Розроблено нові та модифіковано існуючі металографічні й електроннодифракційні методи розпізнавання та оцінювання енергетичного рівня спеціальних границь сімейства $\Sigma 3^n$ у сталях з α , γ і $\alpha+\gamma$ фазовими станами. Ідентифіковані СГ зерен у фериті низьколегованих феритно-перлітних сталей і в γ -фазі високолегованих аустенітних і феритно-аустенітних сталей. Вперше знайдено віртуальні міжфазні границі $\alpha-\gamma$ в феритно-перлітних сталях і оцінено їх питому поверхню й енергетичний рівень, а також знайдено низькоенергетичні міжфазні границі $\alpha-\gamma$ у високолегованих феритно-аустенітних сталях. Розроблені методики можуть бути застосовані для фундаментальних досліджень зернограничної структури полікристалічних матеріалів, а також при розробленні інноваційних технологій виготовлення різних видів прокату.

Ключові слова: сталі; прокат; мікроструктура; гомофазні й гетерофазні спеціальні границі; методики досліджень; ґратка співпадаючих вузлів; зернограничне конструювання

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛЯХ С А, Г И А + Г ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, *д-р т. н., проф.*,

СУХОМЛИН Г. Д.², *д-р т. н., проф.*,

ДЕРГАЧ Т. А.³, *канд. техн. наук.*

¹Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. + 38 (056) 745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: [0000-0003-0790-6473](https://orcid.org/0000-0003-0790-6473)

²Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net

³Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. + 38 (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: [0000-0003-0235-5342](https://orcid.org/0000-0003-0235-5342)

Аннотация. *Постановка проблемы.* Перспективным направлением повышения комплекса свойств металлопродукции из поликристаллических материалов является использование при ее изготовлении принципа зернограничного конструирования (ЗГК) (grain boundary engineering). Его сущность состоит в совокупности

температурно-деформационных процессов, способствующих образованию структуры с максимально возможным содержанием специальных границ (СГ) зерен типа Σ^3 в концепции решеток совпадающих узлов (ГСВ). К настоящему времени достигнуты определенные практические результаты, однако развитие этого направления сдерживается отсутствием научной методологии и надежных методик идентификации, количественной оценки и определения энергетического уровня большеугловых гомофазных и гетерофазных границ в сталях с α , γ и $\alpha + \gamma$ фазовыми состояниями. **Цель работы** – создание новых и усовершенствованных методик исследования для определения комплекса характеристик специальных гомофазных и гетерофазных специальных границ в низколегированных и высоколегированных сталях. **Выводы.** Разработаны новые и модифицированы существующие металлографические и электроннодифракционные методы распознавания и оценки энергетического уровня специальных границ семейства Σ^3 в сталях с α , γ и $\alpha + \gamma$ фазовыми состояниями. Идентифицированы СГ зерен в феррите низколегированных феррито-перлитных сталей и в γ -фазе высоколегированных аустенитных и ферритно-аустенитных сталей. Впервые найдены виртуальные межфазные границы α - γ в ферритно-перлитных сталях и оценены их удельная поверхность и энергетический уровень, а также межфазные низкоэнергетические границы α - γ в высоколегированных ферритно-аустенитных сталях. Разработанные методики могут быть использованы при фундаментальных исследованиях зернограничной структуры поликристаллических материалов и при разработке инновационных технологий изготовления различных видов проката.

Ключевые слова: стали; прокат; микроструктура; гомофазные и гетерофазные специальные границы; методики исследований; PCV; зернограничное конструирование

METHODOLOGICAL BASES FOR INVESTIGATION OF THE GRAIN-BOUNDARY STRUCTURE IN STEELS WITH α , γ AND $\alpha + \gamma$ PHASE STATE

BOLSHAKOV V. I.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

SUHOMLIN G. D.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

DERGACH T. O.³, Cand. Sc. (Tech.)

¹Department of Materials and Materials Processing, SIHE «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», St. Chernyshevsky, 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (056) 745-23-72, e-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: [0000-0003-0790-6473](https://orcid.org/0000-0003-0790-6473)

²Department of Materials and Materials Processing, SIHE «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», St. Chernyshevsky, 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net

³Department of Materials and Materials Processing, SIHE «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», St. Chernyshevsky, 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (050-867-30-97), e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: [0000-0003-0235-5342](https://orcid.org/0000-0003-0235-5342)

Abstract. Formulation of the problem. A promising direction of improving the complex of properties of metal products of polycrystalline materials constitutes the use of the grain boundary engineering (GBE) principle in the manufacturing operations of their production. Its essence consists in a combination of temperature-deformation processes that contribute to the formation of a structure with a maximum possible content of special grain boundaries (SGB) of Σ^3 type in the concept of lattices of coincident site lattice (CSL). To date, certain results have been achieved, development of this direction is constrained by the lack of scientific methodology and reliable methods of identification, quantification and determination of the energy level of the large-angle homophase and heterophase boundaries in steels with α , γ and $\alpha + \gamma$ phase states. **This work objective** is creation of new and improved procedures for studying and determining the complex of characteristics of special homophase and heterophase boundaries in low-alloy and high-alloy steels. **Conclusions.** New metallographic and electron diffraction methods for recognizing and estimating the energy level of the special boundaries of the Σ^3 family in steels with α , γ and $\alpha + \gamma$ phase states have been developed and existing methods modified. The SGBs in ferrite of low-alloy ferritic-pearlitic steels and in the γ -phase of high-alloy austenitic and ferritic-austenitic steels were identified. For the first time, the α - γ interphase boundaries were found in ferritic-pearlitic steels and their specific surface and energy spectrum were estimated. The developed methods can be used in fundamental studies of the grain-boundary structure of polycrystalline materials and in development of innovative technologies.

Keywords: steels; tubes; microstructure; homophase and heterophase special boundaries; research methods; CSL; grain boundary engineering

Вступ. Аналіз розвитку науки, промисловості й економіки України показує необхідність застосування фундаментальних наукових досліджень для поліпшення

якісних характеристик, конкурентоспроможності та розширення областей застосування на внутрішньому і зарубіжних ринках продукції вітчизняного виробництва.

Перспективним з огляду на це бачиться прогресивний метод підвищення комплексу властивостей металопродукції з полікристалічних матеріалів, запропонований наприкінці ХХ сторіччя Тадао Ватанабе [1; 2] – принцип зернограничного конструювання (grain boundary engineering). Він являє собою довільну сукупність температурно-деформаційних процесів або окремих технологій, що сприяють утворенню структури з максимально можливою кількістю спеціальних низькоенергетичних границь зерен типу $\Sigma 3^n$ у концепції ґраток співпадаючих вузлів (ГСВ).

Останніми роками цей принцип набуває розвитку в основному в країнах далекого зарубіжжя [3-5]. В Україні розробки з цього напрямку проводяться на кафедрі матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ ПДАБА [6-14]. На разі встановлено взаємозв'язок між режимами температурно-деформаційних обробок, питомою поверхнею спеціальних границь (СГ) зерен сімейства $\Sigma 3^n$ і підвищенням властивостей низьколегованих і високолегованих сталей.

Уперше встановлено: наявність СГ зерен у фериті з об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) кристалічною ґраткою низьколегованих феритно-перлітних сталей [7] і спеціальних міжфазних границь ферит-цементит у перліті [8]; вплив СГ на підвищення пластичності й ударної в'язкості прокату з маловуглецевих сталей (10Г2ФБ, 06Х1) з $\alpha + \gamma$ кристалічною структурою; підвищення стійкості проти міжкристалітної корозії труб із аустенітних хромонікелевих і хромонікельмолібденових сталей з гранецентрованою кубічною (ГЦК) кристалічною ґраткою [9-11], а також підвищення стійкості проти пітінгової корозії й корозійного розтріскування труб з високолегованих феритно-аустенітних (дуплексних і супердуплексних) сталей нового покоління, виготовлених за принципом ЗГК [12-15].

Разом із цим, до цього часу не визначено існування і енергетичний спектр міжфазних границь γ - α і їх вплив на формування структури і властивостей феритно-перлітних

і феритно-аустенітних сталей, існує обмежене уявлення про атомну і кристалічну будову міжзеренних і міжфазних границь у промислових сталях із різними типами кристалічних ґраток та можливість науково обґрунтованого керування їх структурою з метою одержання високих якісних характеристик продукції.

Проведення подальших досліджень у цьому напрямку стримується відсутністю наукової методології й надійних методик ідентифікації, кількісної оцінки та визначення енергетичного рівня спеціальних границь у полікристалічних матеріалах з γ , α і $\gamma+\alpha$ структурами. Отже, актуальним завданням є розроблення і модернізація методів, що відповідають сучасним вимогам дослідження зернограничної структури полікристалічних матеріалів для застосування в фундаментальних дослідженнях і під час розроблення інноваційних технологій виробництва прокату з високим комплексом корозійних, механічних і експлуатаційних властивостей.

Мета роботи – створення нових і вдосконалених методик дослідження і визначення характеристик спеціальних гомофазних і гетерофазних границь (кути і вісі повороту, габітусні площини, величини зворотної щільності співпадаючих вузлів (Σ), спектральний енергетичний склад) у структурі низьколегованих і високолегованих сталей з різним фазовим станом після температурно-деформаційних обробок.

Матеріали і методи дослідження.

Матеріалами дослідження служили:

- гарячекатані труби і прокат із низьколегованих феритно-перлітних сталей 06Х1-У і 10Г2ФБ;

- гаряче- і холоднодеформовані труби з аустенітних хромонікелевої (03Х18Н11) і хромонікельмолібденової (03Х17Н14М3) сталей після гартувань від температур 1050...1200°C;

- гарячепресовані й холоднокатані труби з феритно-аустенітної (дуплексної) сталі нового покоління 02Х22Н5АМ3 (UNS 31803), виготовлені із застосуванням

принципу зернограничного конструювання.

Дослідження структури сталей здійснювали металографічним, електроннодифракційним методами, а також методом дифракції зворотно розсіяних електронів (ДЗРЕ).

Для якісного й кількісного оцінювання, а також визначення питомої поверхневої енергії спеціальних границь застосовано методи: матричних рівнянь, ідентифікації мікродифракційних картин двох сполучених кристалів, подвійних гномостереографічних проєкцій, а також метод ідентифікації та визначення питомої поверхневої енергії (γ_i) міжфазних (α - γ) границь. Останній – на основі визначеної Херрінгом квазістабільності потрійних стиків [16], або на застосуванні співвідношення між γ_i й величинами протилежних їм кутів α_i , що описується рівнянням Юнга:

$$\gamma_1/\sin\alpha_1 = \gamma_2/\sin\alpha_2 = \gamma_3/\sin\alpha_3.$$

1. Розробка електроннодифракційної методики визначення характеристик СГ зерен, заснованої на застосуванні подвійних стереографічних проєкцій

Методика розроблена за результатами численних електроннодифракційних досліджень полікристалічних матеріалів із ГЦК і ОЦК кристалічними ґратками.

Для знаходження типу орієнтаційного зв'язку між двома зернами однієї фази необхідно виконати низку операцій, дотримуючись правил, викладених у [17].

1) На обраній ділянці зображення з однією або декількома границями (ансамблем) зерен фіксують мікродифракційні картини (МДК) для пари кристалів, які розділяє обрана границя. Зазвичай це три МДК: дві – від кристалів А і Б, а третя – спільна (подвійна) МДК – з приграничних околиць обох зерен.

2) Перед фіксацією (фотографуванням) бажано обирати такі випадки, де на електроннограмах присутній хоча б один напрямок із підвищеною щільністю рефлексів, який може виконувати функцію внутрішнього еталону λL та значно прискорювати індексацію $(hkl)_1$ та $(hkl)_2$.

3) В першу чергу індексують МДК та знаходять, осі зон двох кристалів, тобто проіндексованих електроннограм. Потім знаходять ці дві осі на подвійній стереографічній проєкції (СП), заздалегідь побудованій для конкретного, теоретично очікуваного в даному дослідженні номіналу сигми (Σ). При цьому слід мати на увазі, що на стереопроекції осі *не обов'язково* повинні ідеально співпадати (це буває рідко!), бо вони зазвичай дещо розділені невеликим кутом (не більше 6°).

4) Якщо осі зон двох кристалів співпадають (або майже співпадають), наносять полюси площин на велике коло (або на два майже співпадаючих кола), на яких розташовані полюси площин із такими індексами, як на МДК; контролюють азимутальні кути між рефlekсами обох зон та зіставляють їх із тими кутами, які можна знайти і виміряти між відповідними полюсами на подвійній стереопроекції.

5) Якщо така відповідність між МДК і стереопроекцією існує, це свідчить, що границя має параметри, відповідні тим, за якими побудована подвійна стереопроекція.

6) Шляхом спільного аналізу зображення границі та відповідних МДК знаходять на СП напрямок, перпендикулярний габітусній площині границі, керуючись правилами аналізу слідів [18].

7) Якщо відповідність між електроннографічним матеріалом і подвійною стереопроекцією відсутня, слід розглянути таку можливість для інших варіантів подвійних СП. Як правило, їх кількість невелика; наприклад, у мартенситних структурах це $\Sigma 3$, $\Sigma 11$, $\Sigma 33$, а в ГЦК структурах до них слід додати $\Sigma 9$, $\Sigma 27$, $\Sigma 81$ і 243.

Результати операцій по п. 6 найбільш важливі для такого дифракційного аналізу, оскільки інші методи не здатні визначити всі необхідні параметри спеціальної границі, зокрема, четвертого (кута нахилу θ) і п'ятого (індексів конкретної площини залягання). Поруч з орієнтаційним співвідношенням (вісь $[uvw]$) і кут повороту α) – це перші три параметри, які визначають атомну будову елементарної комірки ґраток

співпадаючих вузлів (ГСВ), четвертий (індекси (pqr) нормалі) і п'ятий (кут нахилу β) параметри визначають ретикулярну щільність співпадаючих вузлів у площині СГ. Сукупність усіх п'яти параметрів і визначає її атомну будову, фізико-хімічні та інші властивості границі.

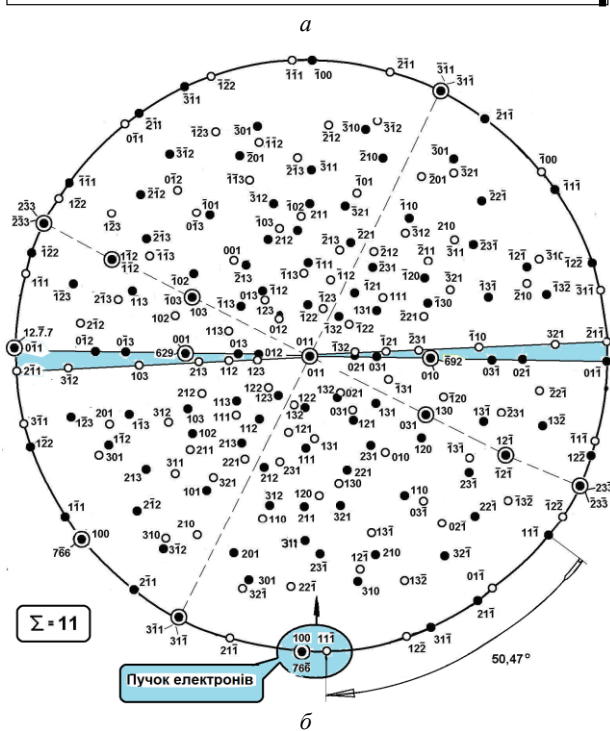
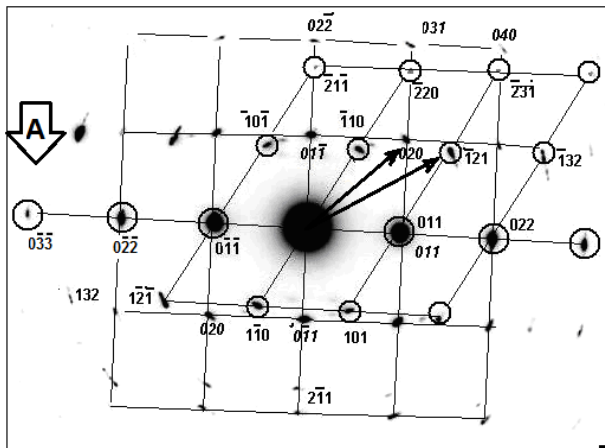


Рис. 1. Спеціальна границя $\Sigma=11$ ($[011]$, $50,47^\circ$):
 а – електронограма з віссю зони $[100]_1 \parallel [111]_2$;
 б – подвійна стереографічна проекція кристалів, сполучених СГ $\Sigma 11$.

Полюси кристалів: ● – першого; ○ – другого.

На рисунку 1 наведено приклад застосування такої методичної схеми для визначення СГ. У випадку, що розглядається, на МДК (рис. 1а) зафіксовано дві системи рефлексів від двох бейнітних рейок у структурі швидко охолодженої

низьковуглецевої сталі 06X1-У з осями зон $[100]_1 \parallel [111]_2$. Теоретична дифракційна умова, за якою обидві осі повинні бути спільно розташовані антипаралельно пучку електронів, виконується, що видно на подвійній стереопроекції для $\Sigma 11$ (перші дві спроби знайти відповідність з $\Sigma 3$ чи з $\Sigma 9$ не дали позитивних результатів), а також видно, що вони розділені кутом, який приблизно дорівнює $4 \pm 0,5^\circ$ (рис. 1б, область, помічена написом «Пучок електронів»). Додаткові (важливі!) відомості можна отримати, якщо застосувати метод матриць повороту для ґраток співпадаючих вузлів, запропонований у праці Боллмана, Грімера і Уоррінгтона [19].

У цій методиці вони виконують роль інструменту, за яким можна легко переходити (якщо матриця вже знайдена) від індексів векторів одного зерна до індексів векторів другого за рівнянням 1:

$$[uvw]_1 \times \mathbf{R}_{1-2} = [uvw]_2, \quad (1)$$

де $[uvw]_1$ і $[uvw]_2$ – міллерівські індекси векторів першого і другого кристалів відповідно;

\mathbf{R}_{1-2} – матриця переходу від векторного простору кристалу 1 до векторного простору кристалу 2.

$$\mathbf{R}_{1-2} = \mathbf{R}_{\Sigma 11} = \begin{pmatrix} 7 & 6 & -6 \\ -6 & 9 & 2 \\ 6 & 2 & 9 \end{pmatrix}$$

Наступним кроком за рівнянням (1) можна отримати (наприклад, у програмі MathCAD):

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 7 & 6 & -6 \\ -6 & 9 & 2 \\ 6 & 2 & 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & 6 & -6 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Перша з наведених матриць – вектор-рядок $[100]_1$; друга – матриця повороту для $\Sigma 11$ (матриці \mathbf{R}_Σ від $\Sigma=3$ до $\Sigma=49$ наведені в [19]); між ними – знак скалярного множення; третя матриця-рядок, це результат, тобто вектор $[766]_2$, який жорстко відповідає (рівновеликий і колінеарний) у нашому прикладі (рис. 1б) вектору $[100]_1$.

Отже, коли знайдено полюс $[766]_2$, можна обчислити точне значення кута $\varphi = 4 \pm 0,5$ за звичайною формулою

косинусів:

$$\cos \varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}}$$

Результати обчислення дали значення $\varphi = 4,26^\circ$.

Таким чином, матричне рівняння (1) показало, що: $[100]_1 \parallel [766]_2$, але за умови, що між кристалами 1 і 2 виконується поворот навколо $[011]$ на кут $50,47^\circ$. Для підтвердження цього необхідно виміряти на МДК (рис. 1а) величину азимутального кута між рефlekсами площин, які належать знайденим зонам, наприклад, $(020)_1$ і $(1|21)_2$ (показано стрілками на рис. 1а), між якими за стереопроекцією має бути кут $16 \pm 0,5^\circ$. Але технічна точність вимірювання буде невисока, тому слід обрати рефлекси $(03|3)_1$ і $(03|3)_2$, де найбільш точно відображається кутове розщеплення між цими рефlekсами, яке теоретично має дорівнювати нулю. Вимірювання, виконане при десятикратному збільшенні зображення МДК, дає значення $\beta = 0,46^\circ$.

Отже, експеримент підтверджує, що між досліджуваними кристалами бейніту справді існує зв'язок, що з високою точністю відповідає спеціальній границі $\Sigma = 11$ ($[011]$, $\beta = 50,47^\circ$). Незначний експериментальний дисбаланс пов'язаний з відносно високою щільністю дислокацій в бейнітних структурах.

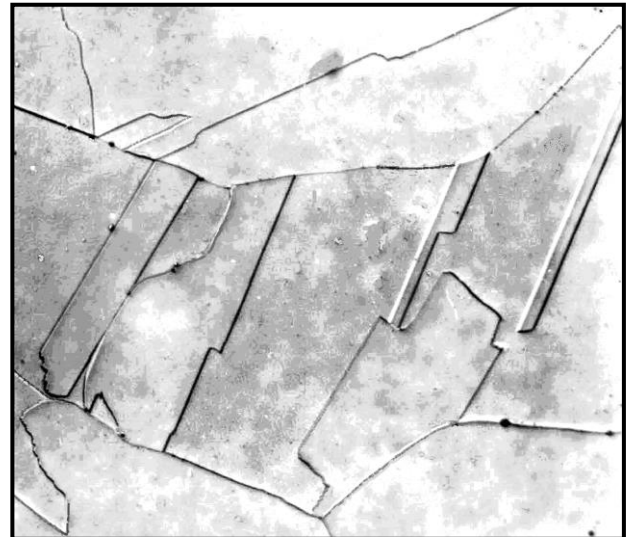
За цією методикою були ідентифіковані СГ $\Sigma 3$, $\Sigma 11$, $\Sigma 33$ та інші також у прокаті зі сталі 10Г2ФБ.

Отже, комплексне застосування методів електронної мікроскопії, мікродифракції, матричного обчислювання, стереографії дає можливість отримувати високоточні, надійні експериментальні результати при визначенні взаємної просторової орієнтації, а відтак і спектрального складу великокутових границь у зразках із різноманітними структурами.

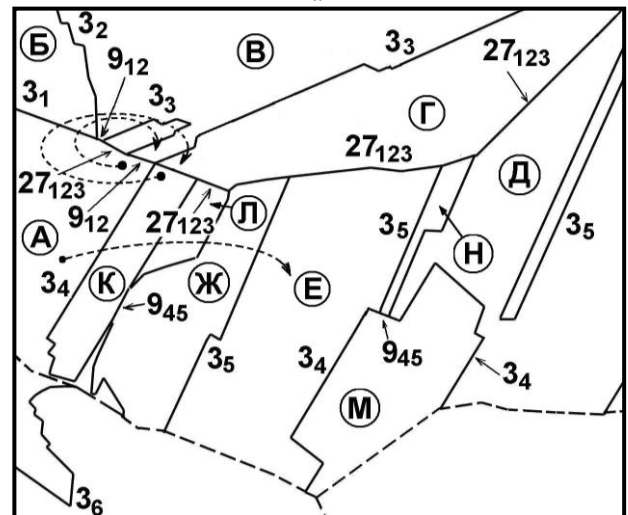
2. Розробка металографічної методики визначення характеристик СГ $\gamma-\gamma$ і $\alpha-\alpha$ у потрібних стиках великокутових границь зерен і міжфазних границь $\alpha-\gamma$

Недолік описаного в підрозділі 1 методу - це його обмежена можливість в отриманні

статистичних даних при дослідженні зернограничних структур і необхідність застосування для його здійснення електронних мікроскопів та відповідного обладнання.



а



б

Рис. 2. Зерногранична структура сталі 03X17H14M3: а – ансамбль СГ $\Sigma 3^n$; б – кристалографічний аналіз

Отже, як альтернативний було розроблено спрощений металографічний метод визначення СГ, який може бути здійснений за допомогою світлової мікроскопії [9]. Він потребує високої якості металографічних шліфів, що досягається їх електрополіруванням для видалення тонкого деформованого шару, який перешкоджає виявленню низькоенергетичних СГ, бо знижує їх травимість. Крім того, необхідний ретельний підбір хімічного складу реактивів і умов травлення, щоб забезпечити

виявлення *всіх* існуючих на поверхні шліфа границь, адже відсутність (невидимість) навіть однієї з них знижує точність і достовірність результатів аналізу всього ансамблю. Звідси випливає необхідність у підвищенні роздільної здатності металографічного мікроскопу і в застосуванні імерсійної рідини.

Раніше для оцінювання границь зерен типу $\Sigma 3^n$ в аустенітних корозійностійких сталях із ГЦК кристалічною ґраткою була розроблена методика, заснована на застосуванні матричних рівнянь, які враховують, що коли дві границі в потрійному стику мають відому матричну структуру, то третю можна визначити з рівняння [6]:

$$1/\Sigma_{1-2} \cdot R_{1-2} \times 1/\Sigma_{2-3} \cdot R_{2-3} \times 1/\Sigma_{3-1} \cdot R_{3-1} = E, \text{ звідки:} \\ \Sigma_{3-1} = \Sigma_{1-2} \times \Sigma_{2-3}.$$

Приклад оцінювання аналогічним методом СГ в ГЦК металах наведено на рисунку 2, де цифри біля СГ показують номінальну зворотну щільність Σ (3, 9, 27), індекси при них – номери границь $\Sigma 3$, з яких вони формуються, а літерами позначені зерна з ідентичною просторовою орієнтацією.

В даній роботі спеціальні границі у фериті низьковуглецевих феритно-перлітних сталей визначали за їх характерними ознаками: наявністю протилежних їм близьких до 180° кутів у потрійних стиках, двійників, груп паралельних фасеток, спеціальних множинних стиків (чотири- і п'ятикратних).

На рисунку 3 наведено приклад визначення і кількісної оцінки колишніх (віртуальних) міжфазних границь в структурі феритно-перлітної сталі 06X1-У.

Підрахунок величини кутів у потрійних стиках здійснювали на збільшених до $5000\times$ зображеннях. Враховували кути, розташовані в стиках зовнішнього периметру перлітних осередків.

Аналізуючи рисунок 3, звертаємо увагу, що переважна більшість стиків містить хоча б один кут, близький до $175\dots 180^\circ$. Ймовірно, це пов'язано з тим, що перлітні колонії утворюються при температурах, які на кілька градусів нижче евтектоїдної реакції аустеніт \rightarrow перліт. Це означає, що

під час формування структури взаємодіяли границі γ - α , α - α і γ - γ . Отже, зерногранична структура (в тім числі й потрійні стики за участю границь γ - α) навколо майбутніх перлітних осередків формувалася під дією сил поверхневого натягнення, коли перлітні колонії ще не утворилися, тому на шліфах периферійні контури перлітних осередків можна розглядати як міжфазні γ - α границі. Звідси стає зрозумілим, чому ці границі мають фасетну будову, характерну для границь $\Sigma 3$ в аустенітних сталях, що підтверджується наявністю фасеток на зовнішніх границях колоній 6-11, 13, 14.

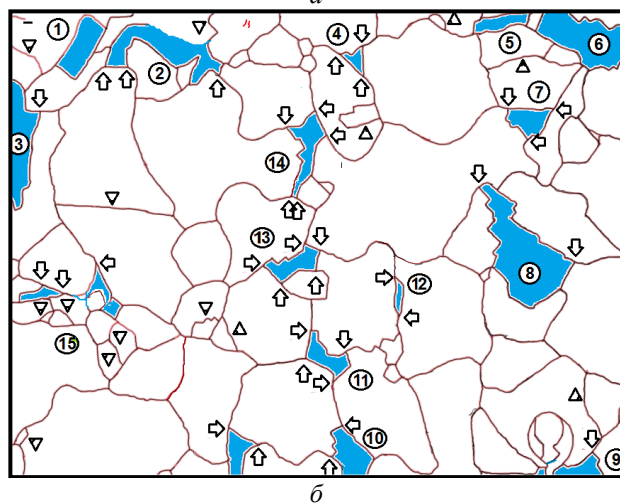
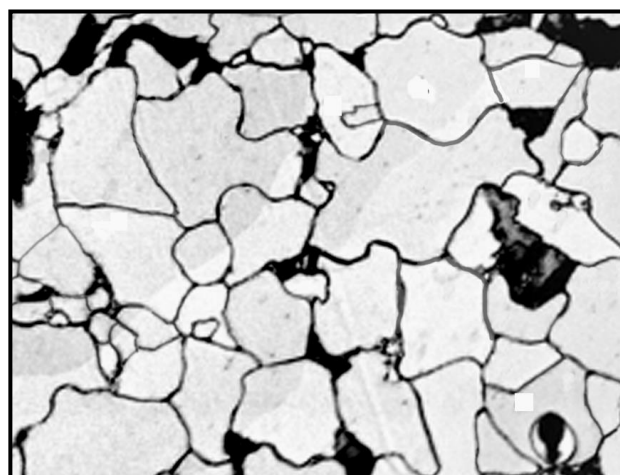


Рис. 3. Аналіз зернограничної структури феритно-перлітної сталі 06X1-У після гарячої прокатки з повільним охолодженням на повітрі:
а – зображення структури на протравленому шліфі, $\times 1250$; б – карта-схема, де перлітні осередки (нодулі) зафарбовані і позначені цифрами від 1 до 15. Позначки: стрілки – потрійні стики, в яких було виміряно значення кутів для статистичної обробки; трикутники – спеціальні низькоенергетичні границі

Таким чином, можна дійти висновку, що

ці границі мають особливу для спеціальних границь зерен атомну будову, подібну до ГСВ. Отже, вони мають значно понижено поверхневу енергію і низьке натягіння в потрійних стиках. Останнє підтверджується аналізом розподілу величин кутів, який наведено на рисунку 4, де на графіку відносної частоти спостерігаються два максимуми: дуже гострий, – в районі кутів $170...180^\circ$, та більш пологий, в районі кутів 90° . Такий розподіл спостерігається на схемі структури (рис. 3б), де стики з кутами $170...180^\circ$ показано стрілками, розташованими біля зовнішніх границь перлітних осередків.

За розробленою методикою визначено рівень енергій міжфазних границь $\alpha\text{-}\gamma$ в феритно-перлітній сталі 06X1-У та встановлено наявність спеціальних міжфазних границь із пониженою питомою поверхневою енергією. На основі відомого співвідношення між γ_i й величинами протилежних їм кутів α_i , що описується рівнянням Юнга: $\gamma_1/\sin\alpha_1 = \gamma_2/\sin\alpha_2 = \gamma_3/\sin\alpha_3$, встановлено, що енергія спеціальних міжфазних $\alpha\text{-}\gamma$ границь у сталі 06X1-У дорівнює $38...73 \text{ ерг/см}^2$, що в $10...20$ разів нижче енергії границь $\alpha\text{-}\alpha$ загального типу (780 ерг/см^2).

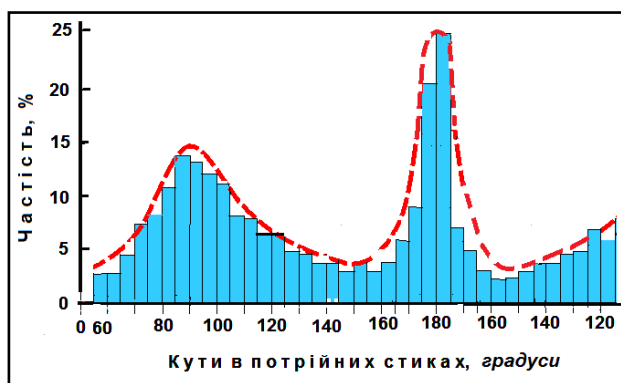


Рис. 4. Розподіл кутів у потрійних стиках феритно-перлітної сталі, що примикають до зовнішніх (міжфазних) границь перлітних колоній

Раніше вважалося, що в матеріалах з ОЦК кристалічною ґраткою та високим значенням енергії дефекту пакування, спеціальні границі не виникають. Із поширенням методів автоматичного аналізу дифракційних зображень з'явилися окремі праці на цю тему. Проте питання про

існування низькоенергетичних границь за концепцією ГСВ та про їх роль у процесах структуроутворення в таких сталях до цього часу залишається відкритим. У працях В. І. Большакова і співавторів [7-9] методами дифракційної та світлової мікроскопії показано, що як у мартенситних, так і в феритно-перлітних сталях такі низькоенергетичні границі існують, їх кількість коливається від 5 до 25 % і піддається регулюванню під час температурно-деформаційних обробок. Для вивчення цих процесів необхідно мати інструмент надійної кількісної оцінки і визначення енергетичного рівня СГ.

Для виявлення та підрахунку кількості СГ в двомірному перетині (шліфі) під світловим мікроскопом необхідно враховувати, що СГ мають деякі добре виражені морфологічні ознаки, за якими можливо відрізнити їх від границь загального типу.

По-перше, це наявність фасеток, які роблять лінію границі зигзагоподібною, це вказує на чутливість границі до орієнтації відносно різних площин ґратки співпадаючих вузлів, що і є ознакою спеціальних границь.

По-друге, згідно з рівнянням Херринга [16], великі кути, протилежні границям, вказують на знижене натягіння останніх. Так, якщо в потрійному стикі є кут, близький до 180° , то протилежна йому границя має низьку енергію, що також дає підставу вважати її спеціальною.

По-третє, якщо границя входить до складу четверного стикі, це може бути, з великою ймовірністю, що вона спеціальна.

Четверте, якщо декілька з цих ознак або всі разом притаманні одній границі, вона надійно може бути віднесена до спеціальних.

На рисунку 3б СГ з такими ознаками позначені стрілками-трикутниками. Наприклад, вище перлітної колонії № 9 є границя, у якій протилежні кути в обох стиках дорівнюють $\approx 180^\circ$, тому така границя ідентифікується як спеціальна.

Цим методом було встановлено, що відносна кількість СГ $\alpha\text{-}\alpha$ після гарячої

деформації та прискореного охолодження сталі містить 8,3 %, а після гарячої прокатки і повільного охолодження на повітрі – кількість СГ зростає до 21,3 % (рис. 2). Це означає, що під час повільного охолодження частково або повністю в сталі пройшла рекристалізація, тож якщо врахувати сюди і ті границі, які виникають між феритом і аустенітом (рис. 3а), то загальна кількість спеціальних (міжзеренних і міжфазних) границь зростає до 35,2 %.

Отже, гаряча деформація з наступним уповільненим охолодженням у даному випадку виступає як складова частина технологічної операції, що здійснюється як компонент зернограничного конструювання, оскільки викликає збільшення кількості СГ у структурі сталі.

Ця методика вирізняється простотою і дає змогу отримувати кількісні значення зворотної величини співпадаючих вузлів (Σ) та атомної будови великокутових гомофазних і гетерофазних границь без застосування дифракційних методів аналізу кристалографічних даних.

3. Розробка методики ідентифікації та визначення питомої поверхневої енергії (γ) міжфазних (α - γ) границь у двофазних (α + γ) сталях

Для корозійностійких феритно-аустенітних (дуплексних і супердуплексних) сталей нового покоління, які належать до класу сталей, що були розроблені найпізніше і тому менше вивчені, велике значення має не лише їх хімічний склад, а й структурний стан, зокрема, структура гомофазних і гетерофазних границь, від яких певною мірою залежать їх механічні і корозійні властивості. У раніше виконаних роботах ми показали [12, 13, 15], що підвищення кількості СГ в аустенітній складовій дуплексних сталей сприяє підвищенню корозійної стійкості виробів, зокрема труб. Оскільки в феритно-аустенітних сталях відбуваються фазові $\gamma \leftrightarrow \delta$ перетворення під час нагрівань до температур вище 1050...1200 °С, які можуть впливати на їх енергетичний стан і корозійну стійкість, становить науковий і

практичний інтерес оцінка енергетичного рівня міжфазних границь (α - γ), тим більше, що такі відомості в літературі відсутні.

Було розроблено методику ідентифікації міжфазних границь у високолегованій двофазній феритно-аустенітній сталі 02X22H5AM3. Структура труб, виготовлених шляхом інтенсивної деформації й наступного подвійного відпалу з подальшим гартуванням від температур 1 200 + 1 050 °С, визначена методом дифракції зворотно розсіяних електронів (ДЗРЕ), представлена витягнутими у напрямку деформації фазами α і γ , що чергуються між собою. Метод ДЗРЕ дав також відомості про кристалографічний характер структури (рис. 5). Досліджуючи її, виходили з того, що морфологічні особливості міжфазних границь можуть дати інформацію про їх питому поверхневу енергію.

На рисунку 5 наведено орієнтаційну карту, на якій однакові кристалографічні напрямки (вісі зон) в різних зернах зафарбовані однаковим кольором. Отже, чітко видно подробиці взаємодії в потрійних і множинних стиках. Літерами А і Ф позначені аустенітні й феритні прошарки, між якими розташовані міжфазні (гетерофазні) α - γ границі.

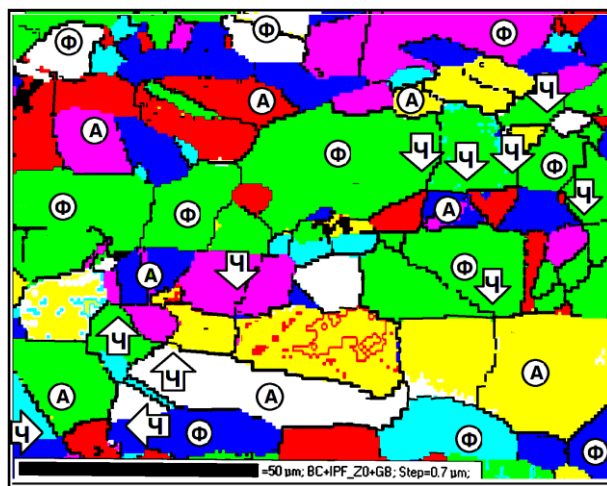


Рис. 5. Орієнтаційна карта дуплексної сталі 02X22H5AM3. Позначення: А – аустеніт; Ф – ферит; Ч – четвєрні стики

Помітно, що в аустенітній фазі зерна більш дрібні, ніж у фериті, через велику кількість у них спеціальних границь, які

стримують ріст зерен при температурних обробках.

Чітка орієнтація міжфазних границь у напрямку прокатки показує, що міжфазні границі мають більшу поверхневу енергію та натягіння, ніж α - α та γ - γ границі. Звертає на себе увагу підвищена кількість четверних стиків безпосередньо за участю міжфазних границь (показані стрілками з літерою Ч (четверні)). Це свідчить, що міжфазні границі характеризуються впорядкованою структурою та можуть бути віднесені до низькоенергетичних, тому вони не вносять у метал далекодіючих напружень. Крім того, вважається доведеним, що четверні стики теоретично обов'язково включають у себе дві-чотири спеціальні границі, тому підвищена кількість таких стиків має сприяти зниженню енергетичного рівня міжзеренних і міжфазних границь в цілому та підвищенню корозійної стійкості металопродукції, якій притаманна така структура.

Отже, із застосуванням методу четверних стиків уперше встановлено:

- наявність спеціальних міжфазних границь α - γ у високолегованих феритно-аустенітних сталях;

- збільшення після їх подвійного нагріву та гартування, що супроводжується фазовою перекристалізацією – кількості четверних стиків, утворених за участю міжфазних поверхонь, отже, й збільшення кількості низькоенергетичних границь зерен;

- утворення структури з підвищеним вмістом низькоенергетичних типів дефектів сприяє дисипації поверхневої енергії та підвищенню корозійної стійкості металопродукції.

Запропонована методика застосування четверних стиків для оцінювання енергетичного стану полікристалічних двофазних матеріалів може бути додатковим інструментом визначення залежності

структури від технологічних структуротвірних процесів і дає змогу прогнозувати рівень їх корозійної стійкості.

Наведені у роботі розробки дають змогу: визначати з високою точністю (не гірше, ніж $0,1^\circ$) як початкову, так і остаточну ідентифікацію відповідності орієнтаційного міжкристалітного співвідношення по мікродифракційних картинах – конкретному значенню параметру Σ , як по осі, так і по куту повороту навколо неї; визначати за двома відомими сумами Σ_1 і Σ_2 характеристику – Σ_3 третьої границі в потрібному стику; визначати енергію міжфазних α - γ границь у феритно-перлітних сталях; оцінювати за наявністю четверних стиків енергетичний стан міжфазних границь, а також наявність міжфазних α - γ границь у феритно-аустенітних (дуплексних і супердуплексних) сталях та визначати їх здатність опору корозії.

Висновки. 1. Розроблено нові та модифіковано існуючі металографічні й електроннодифракційні методики розпізнавання й оцінювання енергетичного рівня спеціальних гомофазних і гетерофазних границь у сталях з α , γ і $\alpha+\gamma$ фазовими станами.

2. Ідентифіковано спеціальні границі зерен у фериті високолегованих феритно-перлітних сталей і в γ -фазі високолегованих аустенітних і феритно-аустенітних сталей.

3. Уперше знайдено міжфазні границі α - γ в трубах і прокаті з високолегованих феритно-перлітних і високолегованих феритно-аустенітних сталей та оцінено їх питому поверхню й енергетичний рівень.

4. Розроблені методики можуть бути застосовані під час фундаментальних досліджень зернограничної структури полікристалічних матеріалів і розробленні інноваційних технологій виготовлення різних видів прокату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Watanabe T. An approach to grain-boundary design for strong and ductile polycrystals / Tadao Watanabe // Res Mechanica. – 1984. – Vol. 11, iss. 1. – P. 47–84.
2. Watanabe T. The potential for grain boundary design in materials development / Tadao Watanabe // Materials Forum. – 1988. – Vol. 11. – P. 284–303.

3. Effect of deformation and thermomechanical processing on grain boundary character distribution of alloy 825 tubes / Qing Zhao, Shuang Xia, Bangxin Zhou, Qin Bai, Cheng Su, Baoshun Wang, Zhigang Cai // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2015. – Vol. 51(12). – P. 1465–1471.
4. Evolution of grain boundary character distributions in alloy 825 tubes during high temperature annealing: Is grain boundary engineering achieved through recrystallization or grain growth? / Qin Bai, Qing Zhao, Shuang Xia, Baoshun Wang, Bangxin Zhou, Cheng Su // *Materials Characterization*. – 2017. – Vol. 123. – P. 178–188.
5. Optimization of grain boundary character distribution for Intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin induced grain boundary engineering / Shimada M., Kokawa H., Wang Z. J., Sato Y. S., Karibe I. // *Acta Materialia*. – 2002. – Vol. 50, iss. 9. – P. 2331–2341.
6. Сухомлин Г. Д. Специальные границы зерен в металлах и сплавах промышленной чистоты / Г. Д. Сухомлин, В. И. Большаков // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение* : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры ; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2000. – Вып. 10 : Стародубовские чтения 2000. – С. 140–147.
7. Специальные границы и множественные стыки в доэвтектоидном феррите низкоуглеродистых сталей / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов, Т. А. Дергач, В. И. Куксенко // *Theoretical foundations of civil engineering : proc. polish-ukrainian-lithuanian transactions (conference), Warsaw, May, 2007* / ed. by W. Szczesniak. – Warsaw, 2007. – Vol. 15. – P. 73–81.
8. Большаков В. И. Кристаллографические связи цементит-аустенит-феррит при диффузионном распаде аустенита / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, В. И. Сухомлин // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – Дніпро, 2016. – № 5. – С. 79–87.
9. Большаков В. И. Металлографическое определение кристаллографической структуры и матриц поворота решеток специальных границ в ГЦК поликристаллах / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин // *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры ; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 26 : Стародубовские чтения, ч. 1. – С. 174–180.
10. Сухомлин Г. Д. Применение зернограничного конструирования стали для получения труб с высоким комплексом свойств / Г. Д. Сухомлин, Т. А. Дергач // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 6. – С. 50–53.
11. Большаков В. И. Применение зернограничного конструирования для создания высокого комплекса свойств в трубах из коррозионностойких аустенитных сталей / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Т. А. Дергач // *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов* : сб. докл. IX Междунар. науч.-техн. конгресса термистов и металловедов / общ. ред. И. М. Неклюдова, В. М. Шулаева. – Харьков, 2008. – С. 165–170.
12. Применение зернограничного конструирования для повышения коррозионной стойкости труб из ферритно-аустенитных сталей / В. И. Большаков, Т. А. Дергач, Г. Д. Сухомлин, С. А. Панченко // *Коррозия: материалы, защита*. – 2014. – № 7. – С. 20–26.
13. Дергач Т. А. Новые представления о влиянии зернограничной структуры на коррозионные свойства труб из ферритно-аустенитных сталей / Т. А. Дергач, Г. Д. Сухомлин, С. А. Панченко // *Перспективні напрямки світової науки : зб. ст. XXVIII міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. «Інноваційний потенціал світової науки – XXI сторіччя» (Запоріжжя, 08-13 жовтня 2014 р.) / Південноукр. гуманітар. альянс Громад. об'ня «Громадянська дія»*. – Запоріжжя, 2014. – Т. 2 : Природничі та точні науки. – С. 50–54.
14. Сухомлин Г. Д. Поверхностная энергия межфазных $\gamma \rightarrow \alpha$ границ при диффузионном превращении аустенита / Г. Д. Сухомлин // *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 67 : Стародубовские чтения. – С. 7–11.
15. Большаков В. И. Научные и технологические методы повышения коррозионной стойкости труб из дуплексных сталей : монография / В. И. Большаков, С. А. Панченко, Т. А. Дергач. – Днепропетровск : Литограф, 2016 – 135 с.
16. Herring C. Some theorems on the free energies of crystal surfaces / Conyers Herring // *Physical Review*. – 1951. – Vol. 82, iss. 1. – P. 87–93.
17. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении / Л. М. Утевский. – Москва : *Металлургия*. 1973. – 584 с.
18. Эндриус К. Электронограммы и их интерпретация / Эндриус К., Дайсон Д., Киоун С. ; пер. с англ. М. П. Усикова ; под ред. Л. М. Утевского. – Москва : Мир, 1971. – 256 с.
19. Гример Г. Решётки совпадающих узлов и полные решётки наложений в кубических кристаллах / Г. Гример, У. Боллман, Д. Уоррингтон // *Атомная структура межзёренных границ* / ред. пер. А. Н. Орлова. – Москва, 1978. – С. 25–54.

REFERENCES

1. Watanabe T. *An approach to grain-boundary design for strong and ductile polycrystals*. *Res Mechanica*. 1984, vol. 11, iss. 1, pp. 47–84.
2. Watanabe T. *The potential for grain boundary design in materials development*. *Materials Forum*. 1988, vol. 11, pp. 284–303.
3. Qing Zhao, Shuang Xia, Bangxin Zhou, Qin Bai, Cheng Su, Baoshun Wang and Zhigang Cai. *Effect of deformation and thermomechanical processing on grain boundary character distribution of alloy 825 tubes*. *Acta Metallurgica Sinica*. 2015, vol. 51(12), pp. 1465–1471.
4. Qin Bai, Qing Zhao, Shuang Xia, Baoshun Wang, Bangxin Zhou and Cheng Su. *Evolution of grain boundary character distributions in alloy 825 tubes during high temperature annealing: Is grain boundary engineering achieved through recrystallization or grain growth?* *Materials Characterization*. 2017, vol. 123, pp. 178–188.

5. Shimada M., Kokawa H., Wang Z. J., Sato Y. S. and Karibe I. *Optimization of grain boundary character distribution for Intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin induced grain boundary engineering*. *Acta Materialia*. 2002, vol. 50, iss. 9, pp. 2331–2341.
6. Suxomlin G.D. and Bol'shakov V.I. *Special'nye granicy zeren v metallax i splavax promyshlennoj chistoty* [Special grain boundaries in metals and alloys of industrial purity]. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering]. Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury [Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2000, iss. 10, pp. 140–147. (in Russian).
7. Bol'shakov V.I., Suxomlin G.D., Lauxin D.V., Beketov A.V., Dergach T.A. and Kuksenko V.I. *Special'nye granicy i mnozhestvennye styki v doevtektoidnom ferrite nizkouglerodistykh stalej* [Special boundaries and multiple joints in the pre-eutectoid ferrite of low-carbon steels]. *Theoretical foundations of civil engineering*. Warsaw, 2007, vol. 15, pp. 73–81. (in Russian).
8. Bol'shakov V.I., Suxomlin G.D. and Suxomlin V.I. *Kristallograficheskie svyazi cementit-austenit-ferrit pri diffuzionnom raspade austenita* [Crystallographic bonds of cementite-austenite-ferrite during the diffusion decay of austenite]. *Visnyk Prydniprov's'koi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipro, 2016, no. 5, pp. 79–87. (in Russian).
9. Bol'shakov V.I. and Suxomlin G.D. *Metallograficheskoe opredelenie kristallograficheskoy struktury i matric povorota reshetok special'nykh granic v GCK polikrystalax* [Metallographic determination of the crystallographic structure and lattices rotation matrices of special boundaries in fcc polycrystals]. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering]. Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury [Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2004, iss. 26, ch. 1, pp. 174–180. (in Russian).
10. Suxomlin G.D. and Dergach T.A. *Primenenie zernogranichnogo konstruirovaniya stali dlya polucheniya trub s vysokim kompleksom svoystv* [Application of steel grain-boundary design for the pipes production with a high properties complex]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgy and mining industry]. 2008, no. 6, pp. 50–53. (in Russian).
11. Bol'shakov V.I., Suxomlin G.D. and Dergach T.A. *Primenenie zernogranichnogo konstruirovaniya dlya sozdaniya vysokogo kompleksa svoystv v trubax iz korrozionnostojkix austenitnykh stalej* [Application of grain-boundary design to create a high properties complex in pipes made of corrosion-resistant austenitic steels]. *Oborudovanie i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov* [Equipment and technologies for heat treatment of metals and alloys]. Kharkiv, 2008, pp. 165–170.
12. Bol'shakov V.I., Dergach T.A., Suxomlin G.D. and Panchenko S.A. *Primenenie zernogranichnogo konstruirovaniya dlya povysheniya korrozionnoj stojkosti trub iz ferritno-austenitnykh stalej* [Application of grain-boundary design to improve the corrosion resistance of pipes made of ferrite-austenitic steels]. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: Materials, Protection]. 2014, no. 7, pp. 20–26. (in Russian).
13. Dergach T.A., Suxomlin G.D. and Panchenko S.A. *Novye predstavleniya o vliyanii zernogranichnoy struktury na korrozionnye svoystva trub iz ferritno-austenitnykh stalej* [New ideas about the influence of the grain boundary structure on the corrosion properties of pipes made of ferrite-austenitic steels]. *Perspektyvni napriamki svitovoi nauky: zb. statei XXVIII mizhnar. nauk.-prakt. internet-konf. «Innovaciyni potentsial svitovoi nauky – XXI storichchia»* [Prospective directions of world science: Collection of articles of the XXVIII International Scientific-Practical Internet Conference «Innovative Potential of World Science - XXI Century»]. Pivdenoukr. humanitar. alians Gromad. ob-nia «Gromadianska diia» [The South Ukrainian Alliance of the Community. "Civic Action"]. Zaporizhia, 2014, vol. 2, pp. 50–54. (in Russian).
14. Suxomlin G.D. *Poverxnostnaia energiya mezhfaznykh $\gamma \rightarrow \alpha$ granic pri difuzionnom prevrashhenii austenita* [The surface energy of $\gamma \rightarrow \alpha$ interphase boundaries in the austenite diffusion transformation]. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering]. Pridnepr. gos. akad. str-va i arkhitektury [Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2013, iss. 67, pp. 7–11. (in Russian).
15. Bol'shakov V.I., Panchenko S.A. and Dergach T.A. *Nauchnye i tekhnologicheskie metody povysheniya korrozionnoj stojkosti trub iz dupleksnykh stalej* [Scientific and technological methods of increasing of pipes corrosion resistance made of duplex steels]. Dnepropetrovsk: Litograf, 2016, 135 p. (in Russian).
16. Herring C. *Some theorems on the free energies of crystal surfaces*. *Physical Review*. 1951, vol. 82, pp. 87–93.
17. Utevs'kiy L.M. *Difrakcionnaya elektronnyaya mikroskopiya v metallovedenii* [Diffraction electron microscopy in metallurgy]. Moskva: Metallurgiya, 1973, 584 p. (in Russian).
18. Endryus K., Dajson D. and Kioun S. *Elektronogrammy i ix interpretatsiya* [Electron diffraction patterns and their interpretation]. Moskva: Mir, 1971, 256 p. (in Russian).
19. Grimer G., Bollman U. and Uorrington D. *Reshyotki sovpadayushhix uzlov i polnye reshyotki nalozhenij v kubicheskix kristalax* [Coincident nodes lattices and complete lattices of overlap in cubic crystals]. *Atomnaya struktura mezhyzorenykh granic* [Atomic structure of intercellular boundaries]. Moskva: Mir, 1978, pp. 25–54. (in Russian).

Рецензент: Башев В. Ф. д-р фіз.-мат. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 13.03.2017 р. Прийнята до друку: 27.03.2017 р.