

# ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МЕТОДУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАФА ДЛЯ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІКРОСТРУКТУРИ ФЕРИТО-БЕЙНІТНИХ СТАЛЕЙ

В.В. Головка<sup>1</sup>, О.О. Штофель<sup>1,2</sup>, Д.Ю. Короленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, Україна, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [v\\_golovko@ukr.net](mailto:v_golovko@ukr.net)

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: [o.shtof@gmail.com](mailto:o.shtof@gmail.com)

Високоміцні низьколеговані сталі є перспективним матеріалом для виготовлення зварних металоконструкцій, але їх поширення гальмується через підвищену схильність до утворення дефектів внаслідок зварювання. Тому фундаментальним аспектом розробки технології їх зварювання є розуміння того, як властивості металу змінюються під час процесу зварювання, та виявлення основних мікроструктурних характеристик, які пояснюють ці зміни. Дослідження високоміцних ферито-бейнітних сталей, які стосуються мікроструктурних характеристик і механічних властивостей, спрямовані на визначення загального кута розорієнтації структурних зерен та використовують метод дифракції зворотного розсіювання електронів (EBSD), який може бути реалізовано на електронних мікроскопах, і потребують встановлення спеціального програмного забезпечення. Метод металографічного аналізу із використанням перетворення Гафа, який може бути реалізований на оптичних мікроскопах і не потребує спеціального програмного забезпечення, доцільно розглянути як альтернативу методу EBSD. Бібліогр. 24, рис. 5.

*Ключові слова:* високоміцна низьколегована сталь, зварювання, мікроструктура, металографічний аналіз, межі зерен, розорієнтація структурних зерен, перетворення Гафа

**Вступ.** Останнім часом в промисловості України суттєво зростає обсяг робіт, пов'язаних з використанням високоміцних низьколегованих сталей (ВМНЛ), виготовлених на провідних металургійних підприємствах ЄС, Великої Британії, США та Канади. Виконання робіт з такими матеріалами ставить нові виклики як для заводських інженерів, так і для науковців. Попередні результати показали, що комплекс механічних властивостей сучасних зарубіжних високоміцних сталей може бути значно вищим порівняно з традиційними сталями вітчизняного виробництва. Обмежувальним фактором сталей з вищою міцністю є їхня підвищена схильність до утворення дефектів внаслідок зварювання. Тому фундаментальним аспектом розробки технології їх зварювання є розуміння того, як властивості металу змінюються під час процесу зварювання, та виявлення основних мікроструктурних характеристик, які пояснюють ці зміни.

Загалом відомо, що механічні властивості металевих матеріалів корелюють з мікроструктурними розмірами, найчастіше із середнім розміром зерна, згідно зі співвідношенням Холла-Петча [1, 2]:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{1/2},$$

де  $\sigma_0$  – це напруження тертя в ґратці, необхідне для переміщення окремих дислокацій;  $k$  – константа, що залежить від матеріалу, відома як

нахил кривої Холла-Петча;  $d$  – середній розмір зерна. Співвідношення Холла-Петча застосовується до великого різноманіття матеріалів та їхніх властивостей, таких як твердість, властивості напружено-деформованого стану та границя витривалості [3, 4]. Однак, окрім середнього розміру зерна, для металу зварних швів, для яких характерним є стохастична орієнтація зерен, необхідно враховувати інші специфічні фактори, такі як відмінності в орієнтації пластин фериту в тілі структурних зерен, щоб передбачити властивості матеріалу в загальному випадку.

Відомо, що міцність і в'язкість більшості сталей за низької температури можна покращити шляхом подрібнення зерна під час контрольованого термомеханічного процесу. Численні дослідження показали, що під впливом термічного циклу внаслідок особливостей процесу кристалізації металу може виникати анізотропія структурних і механічних властивостей металу, особливо низькотемпературної в'язкості, що може накладати певні обмеження на вибір технологічних параметрів його обробки [5–7]. Більшість досліджень ВМНЛ стосуються мікроструктурних характеристик і механічних властивостей металу [8, 9], тоді як зв'язок між розміром структурних зерен, їх орієнтацією та в'язкістю руйнування все ще далекий від розуміння через складну ферито-бейніто-мар-

Головка В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>, Штофель О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-0965-6340>,

Короленко Д.Ю. – <https://orcid.org/0009-0008-8582-5904>

© В.В. Головка, О.О. Штофель, Д.Ю. Короленко, 2025

тенситну мікроструктуру та через відсутність макроскопічного чисельного показника, який відзеркалює цей зв'язок.

У зв'язку з тим, що ВМНЛ сталі мають підвищену схильність до крихкого руйнування, проєктування технології їх зварювання потребує розробки певних механізмів, які пригнічують утворення та зростання тріщин. Хоча мікроскопічні дефекти, такі як початкові зародки тріщин, завжди присутні в металі зварних швів, особливу увагу необхідно приділяти механізмам, які допомагають запобігати їх утворенню та розгалужуванню, зупиняти розвиток або навіть закривати тріщини, які здатні до зростання або вже почали рости. У фундаментальному огляді [10] показано (рис. 1), що для ВМНЛ сталей саме внутрішні межі розділу є відносно слабкою ланкою щодо утворення та росту тріщин. Це пов'язано з тим, що зростання елементарної тріщини відбувається шляхом розшарування та емісії дислокацій на вершині тріщини, тобто шляхом декогезії атомних зв'язків і здатності матеріалу створювати зону пластичної релаксації навколо вершини тріщини, що поширюється. Через меншу когерентність решітки в зонах меж зерен порівняно з їхньою внутрішньою частиною, тріщини у високоміцних сталях часто можуть легше поширюватися вздовж меж зерен, ніж через їхню внутрішню частину.

Пластичне ковзання на міжзеренних границях визначається конкуренцією між трьома мікросиломи на межі розділу: мікросилою, індукованою об'ємом, пов'язаною з об'ємними щільностями; дисипативною мікросилою, пов'язаною з опором ковзанню на межі розділу, та енергетичною мікросилою, пов'язаною з вектором Бюргера мережі, яка має тенденцію протидіяти накопиченню залишкових дефектів на межі розділу. Більша розори-

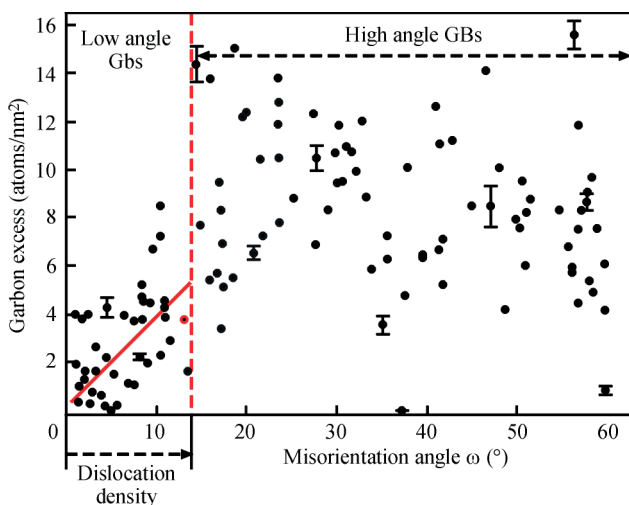


Рис. 1. Удосконалений метод кількісної оцінки вуглецевої сегрегації у фериті [10]

ентація сусідніх зерен затримує нормальне ковзання на межі розділу та знижує швидкість ковзання, збільшуючи швидкість зміцнення. При менших розмірах зерен розвиваються більші градієнти деформації, що призводить до початку ковзання на межі розділу при меншій деформації зсуву.

Поточна точка зору деяких дослідників полягає в тому, що структурні одиниці, які впливають на в'язкість ферито-бейнітних сталей, – це зерна з кутами розорієнтації на межі зерен більше  $15^\circ$ . Це пов'язано з тим, що висококутові межі зерен (ВКМЗ) з кутами розорієнтації меж зерен більше за  $15^\circ$  є ефективними зернами, які сприяють зупинці розвитку тріщини або відхиленню її на великий кут при зустрічі з міжзереною границею у процесі поширення тріщини [11, 12]. Для ОЦК-металів тріщина сколу завжди поширюється вздовж площин сколу  $\{100\}$ . Кути між сусідніми зернами впливатимуть на здатність змінювати напрямок поширення тріщини, що підтверджується характером фасеток руйнування. Наприклад, автори [13, 14] виявили, що структурні блоки з низькими кутами розорієнтації меж зерен менше за  $15^\circ$  (НКМЗ) є одиницями мікроструктури, які контролюють руйнування сколом і підвищення температури переходу від в'язкості до крихкості.

Прямі дослідження впливу розорієнтації меж зерен на транспорт водню, результати яких наведено в [15], показали, що межі зерен є шляхами з високим потоком дислокацій та зв'язаного з ними водню, де величина потоку зазвичай зростає зі збільшенням енергії зв'язку пасток на межі зерен. Моделювання проникнення водню на ранніх стадіях деформації показало (рис. 2), що висококутові межі зерен є швидшими шляхами, ніж низькокутові.

Слід зазначити, що на сьогодні обсягу експериментальних даних недостатньо для встановлення зв'язку між в'язкістю та структурою в різних напрямках голчастих ферито-бейнітних сталей шляхом аналізу кутів площини сколу  $\{100\}$ .

Велика кількість експериментів показує, що тріщини можуть проходити як прямо через структурні зерна, так і через межі зерен. Тому ефективне зерно розміром  $d$  відповідно до виразу Холла-Петча потребує певних уточнень стосовно ферито-бейнітних структур ВМНЛ сталей. За думкою професора Дерєка Раабе з колегами з Дюсельдорфського інституту Макса Планка [16], умови правильного розуміння та кількісної характеристики різних взаємопов'язаних ефектів міжзерених меж та пов'язаних з ними ефектів у високоміцних сталях можуть відкрити нові шляхи до

нанорозмірної інженерії стійких до пошкоджень ВМНЛ сталей.

При металографічних дослідженнях для визначення загального кута розорієнтації структурних зерен у якості критерію для характеристики меж зерен використовують метод дифракції зворотного розсіювання електронів (EBSD) – аналітичний метод, інтегрований зі скануючим електронним мікроскопом. EBSD – потужний метод визначення характеристик мікроструктури, який дозволяє отримати важливу інформацію про орієнтацію зерен, ідентифікацію фаз і локальний розподіл деформацій. Метод відіграє дедалі важливішу роль у вдосконаленні нашого розуміння поведінки матеріалів. Сучасні комп’ютерні програми для EBSD аналізу дозволяють обробляти зображення з високою роздільною здатністю, що дає змогу аналізувати дрібномасштабні мікроструктури та отримувати детальні характеристики меж зерен. Крім того, EBSD дозволяє вимірювати градієнти орієнтації, які необхідні для розуміння механізмів деформації.

Метод EBSD широко використовується для характеристики мікроструктури мартенситних і бейнітних сталей, що дає змогу зрозуміти фазові перетворення та граничні характеристики зерен. Ці можливості є вирішальними для оптимізації механічних властивостей сталей, таких як міцність, в’язкість і пластичність [17–20].

У [21] наведено приклад автоматизованої ідентифікації та кількісного статистичного аналізу мікроструктурних границь бейніту з використанням даних EBSD. Результати вказують на те, що кристалографічні відмінності між різними бейнітними та мартенситними структурами забезпечують теоретичну основу для розуміння відмінностей в механічних властивостях металу та дозволяють проводити високопродуктивний статистичний аналіз цих залежностей. Іншим важливим аспектом EBSD є визначення кутів орієнтації зерен у полікристалічному матеріалі, що визначають орієнтацію кристалів відносно відлікової системи координат. Визначення кутів орієнтації дозволяє отримати точніше співвідношення між мікроструктурними характеристиками металу та його механічними властивостями. Виходячи з [21], EBSD можна ефективно використовувати для виділення ознак і кількісного статистичного аналізу мікроструктурної інформації, а методи машинного навчання можуть стати основою для моделювання зв’язку між мікроструктурою та властивостями металу.

Слід зазначити, що метод EBSD може бути реалізовано на електронному мікроскопі та він потребує встановлення спеціальної програми з обробки

діаграм Кікучі. Як альтернатива може розглядатися метод, який базований на перетвореннях Гафа, що дозволяє виявляти кутові орієнтації кристалографічних площин мікроструктури. Програма з обрахунку перетворень Гафа є у відкритому доступі, у аналізу в цьому випадку піддаються зображення металографічних структур, отриманих на оптичних мікроскопах. Такий підхід може бути використано для визначення не тільки загальної картини розподілу кутів орієнтації зерен або кристалів у структурі металу, але й на міжзеренних границях, які є одним з найвірогідніших осередків зародження крихкого руйнування. Саме на цих межах визначається можливість переходу тріщини з одного зерна до іншого або зміна напрямку її руху. За цією методикою комп’ютерна програма [22, 23] виділяє на зображенні мікроструктури кожен пластину фериту, визначає її площу та координати центру площини, проводить через центр максимальну діагональ, будує перпендикуляр до цієї діагоналі й визначає кут його перетину з визначеною віссю (наприклад ось абсцис). Таким чином, кожна пластина фериту на зображенні описується двома параметрами –  $\rho$  та  $\theta$  ( $\rho$  – відстань від початку координат до прямої, а  $\theta$  – кут між прямою, перпендикулярною до заданої, та додатним напрямком осі абсцис). Але такий підхід, з урахуванням щільності розподілу пластин фериту в зернах структурних складових низьколегованих сталей, потребує обробки та аналізу великого обсягу інформації. Сучасні методи комп’ютерного аналізу із залученням ШІ дозволяють вирішити дану проблему.

Спроба використання перетворення Гафа для металографічних досліджень мікроструктури металу зварних швів ВМНЛ сталі була описана в [24]. Автори реалізували візуальний метод аналізу орієнтації і розорієнтації мікроструктурних складових із використанням мови програмування Python. За допомогою ШІ було знайдено положення головного вектора орієнтації кожного структурного зерна (рис. 3) на базі методу, заснованого на аналізі головних компонент (PCA – Principal Component Analysis), що дозволяє визначити основний напрямок орієнтації зерна.

На базі даного аналізу були отримані статистичні дані кутів розорієнтації зерен (рис. 4), що дають змогу проаналізувати досліджувану зону на наявність такого критичного параметра, як відносна щільність розподілу НКГЗ у мікроструктурі металу.

Допустимі межі розорієнтації зерен у металевих структурах залежать від конкретного матеріалу, умов його експлуатації і технології виготовлення.

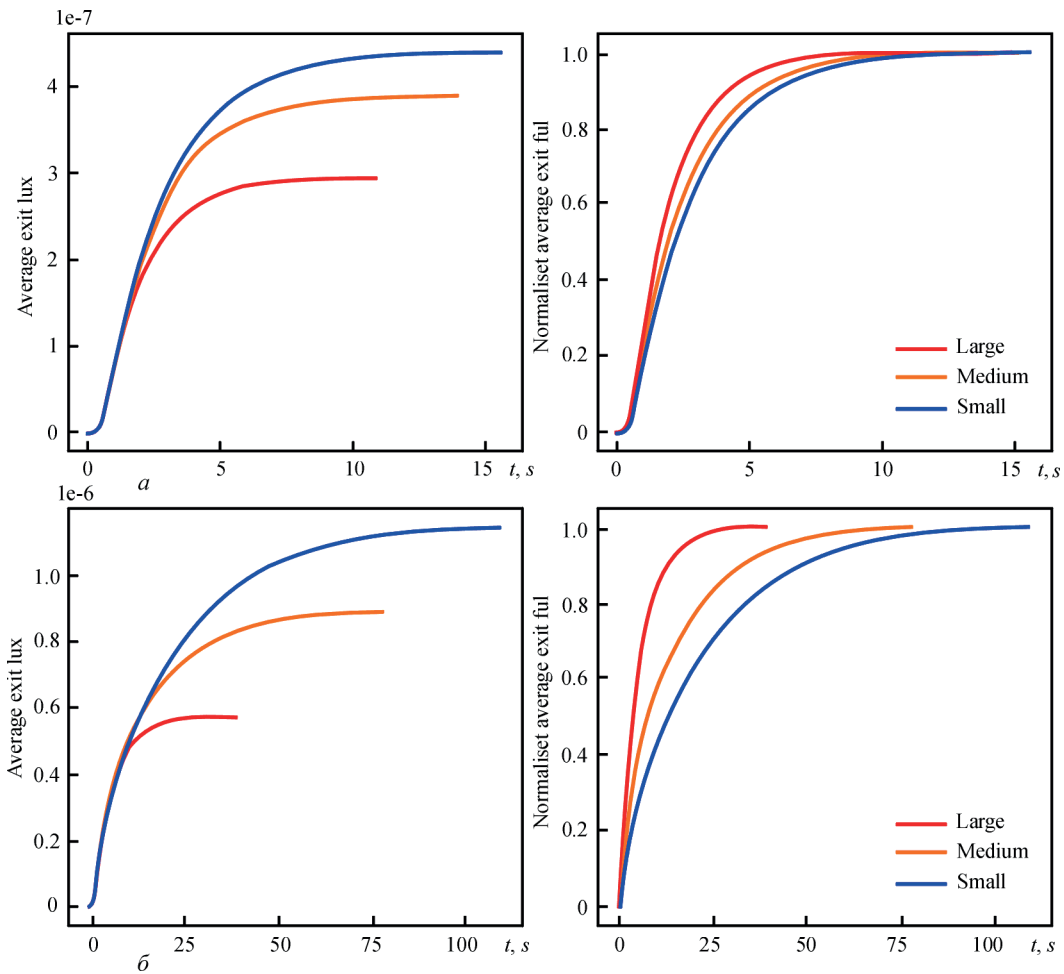


Рис. 2. Криві середнього та нормалізованого вихідного потоку через низькокутові (а) та висококутові (б) межі зерен [15]

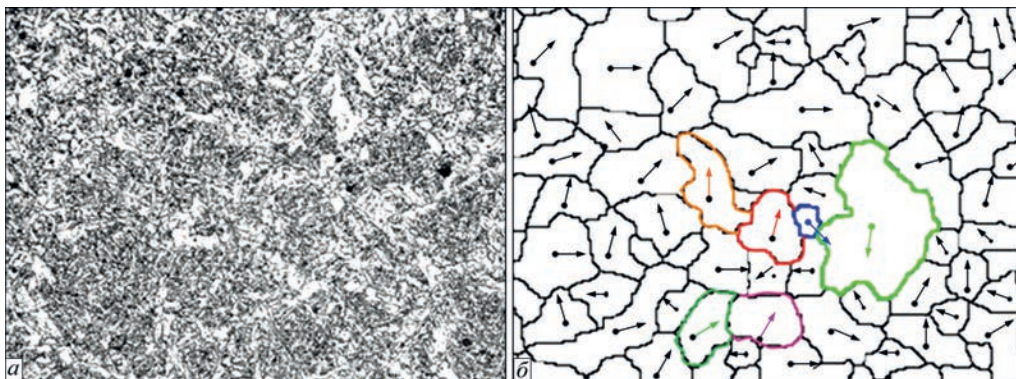


Рис. 3. Мікроструктура основного металу зварного шва сталі 09Г2С (Х200) (а). Результати визначення основного напрямку орієнтації структурних зерен та приклади розорієнтації головного вектора двох сусідніх зерен на кут не більше 15° (б)

Як видно з наведених на рис. 4 даних, близько 20 % меж між сусідніми структурними зернами характеризуються кутом розорієнтації не більше за 35°. Такі межі зерен гальмують поширення тріщин вздовж меж зерен і сприяють транскристалітному руйнуванню. На рис. 5 наведено зображення фрактограм зруйнованого при випробуванні на ударний вигін зразка металу зварного шва при температурі -20 °С, які були отримані на електронному мікроскопі Jeol JSM35CF (Jeol, Японія). Як видно з цих зображень, характер розвитку тріщин свідчить саме про такий розвиток процесу руйну-

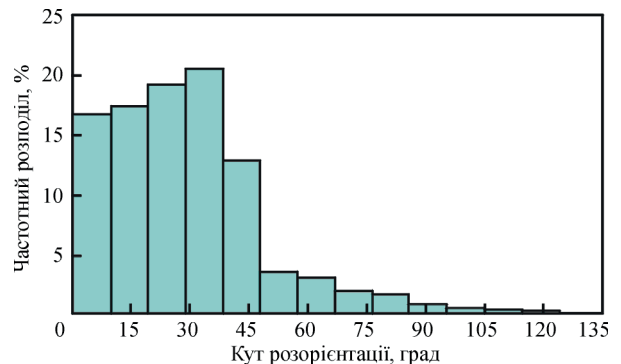


Рис. 4. Розподіл кута розорієнтації на межі двох сусідніх зерен в структурі металу шва

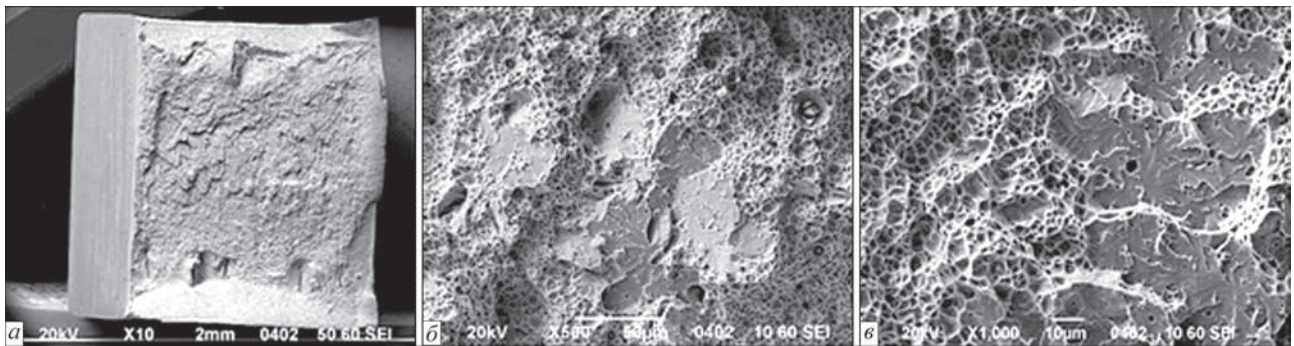


Рис. 5. Фрактографії зламу зразку металу шва сталі 09Г2С після випробування на ударний вигин за температури  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

вання – близько третини тріщин у цьому випадку мають трансзеренний характер.

Незважаючи на збіг визначення кутів розорієнтації на міжзеренних межах мікроструктури з результатами фрактального аналізу, таких даних недостатньо для встановлення критичного рівня щільності НКМЗ у мікроструктурі металу як «критерію крихкості». Такі висновки можливо буде зробити тільки після накопичення суттєвої бази експериментальних даних, їх статистичної обробки та ретельного аналізу. Саме це має бути завданням майбутніх досліджень, результати яких нададуть можливість не тільки розширити нашу базу знань щодо механізмів формування мікроструктури металу, але й підвищити рівень механічних властивостей зварних з'єднань ВМНЛ сталей.

## Висновки

Обмежувальним фактором поширення сучасних високоміцних низьколегованих сталей є їхня схильність до утворення дефектів внаслідок зварювання, що виникають у процесі зварювання. Тому фундаментальним аспектом розробки технології їх зварювання є розуміння того, як властивості металу змінюються під час процесу зварювання, та виявлення основних мікроструктурних характеристик, які пояснюють ці зміни.

При визначенні впливу структурних параметрів на властивості металу зварних швів необхідно враховувати такі специфічні фактори, як відмінності в орієнтації виділень фериту в тілі структурних зерен.

Метод металографічного аналізу із використанням перетворення Гафа, який може бути реалізовано на оптичних мікроскопах, не потребує спеціальної програми, з одного боку, і дозволяє визначити орієнтацію пластин фериту в тілі структурних зерен і, відповідно, кута розорієнтації на межі двох контактуючих зерен, з іншого, доцільно розглянути як альтернативу методу EBSD.

Спрощення процедури, за рахунок використання інструментів ШІ, визначення кутів орієнтації структурних зерен і кутів розорієнтації на міжзе-

ренних границях суттєво збільшує базу експериментальних даних для встановлення критичного рівня щільності НКМЗ у мікроструктурі металу як «критерію крихкості».

Отримані результати можуть бути використані при розробці технологічних рішень, коли крім розміру структурних зерен приділяється увага формуванню змішаної мікроструктури зі збалансованим розподілом низькокутових і висококутових меж зерен, що дозволить підвищити як міцність, так і в'язкість металу зварних швів.

## Список літератури/References

- Hall, E.O. (1951) The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B*, **64**(9), 747–753. DOI: <http://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303>
- Petch, N.J. (1953) The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel Inst.*, **174**, 25–28.
- Chapetti, M., Miyata, H., Tagawa, T. et al. (2004) Fatigue strength of ultra-fine grained steels. *Mater. Sci. Eng. A*, **381**, 331–336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.04.055>
- Hansen, N. (2004) Hall-Petch relation and boundary strengthening. *Scr. Mater.*, **51**, 801–806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
- Yang, X.L., Xu, Y.B., Tan, X.D., Wu, D. (2014) Influences of crystallography and delamination on anisotropy of Charpy impact toughness in API X100 pipeline steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **607**, 53–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.121>
- Joo, M.S., Suh, D.-W., Bae, J.H., Bhadeshia, H.K.D.H. (2012) Toughness anisotropy in X70 and X80 pipeline steels. *Mater. Sci. Eng. A*, **556**, 601–606. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000371>
- Jabr, H.M.A., Speer, J.G., Matlock, D.K. et al. (2013) Anisotropy of mechanical properties of API X70 spiral welded pipe steels. *Mater. Sci. Forum*, **753**, 538–541. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.753.538>
- Sanchez, N., Petrov, R., Bae, J.H., Kim, K. (2010) Texture dependent mechanical anisotropy of X80 pipeline steel. *Adv. Eng. Mater.*, **12**, 973–980. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201000065>
- Cheng, S., Zhang, X., Zhang, J. et al. (2016) Effect of start cooling temperature on microstructure and properties of X80 pipeline steel. *Mater. Sci. Eng. A*, **666**, 156–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.066>
- Herbig, M., Raabe, D., Li, Y.J. et al. (2014) Atomic-scale quantification of grain boundary segregation in nanocrystalline material. *Physical Review Letters*, **112**, 126103. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.126103>
- Duan, Q., Yan, J., Zhu, G.H., Cai, Q.W. (2013) Effects of grain size and misorientation on anisotropy of X80 pipeline steel. *Hot Working Tech.*, **24**, 107–109. [https://caod.oriprobe.com/articles/41006381/Effects\\_of\\_Grain\\_Size\\_and\\_Misorientation\\_on\\_Anisot.htm](https://caod.oriprobe.com/articles/41006381/Effects_of_Grain_Size_and_Misorientation_on_Anisot.htm)
- Masoumi, M., Silva, C.C., Abreu, H.F.G.D. (2018) Effect of rolling in the recrystallization temperature region associated

- with a post-heat treatment on the microstructure, crystal orientation, and mechanical properties of API 5L X70 pipeline steel. *J. Mater. Eng. Perfor.*, **27**, 1694–1705. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0651>
13. Deng, C.M., Li, Z.D., Sun, X.J., Yong, Q.L. (2014) Influence mechanism of high angle boundary on propagation of cleavage cracks in low martensite steel. *Mater: Mech. Eng.*, **38**, 20–24.
  14. Shen, J.C., Luo, Z.J., Yang, C.F., Zhang, Y.Q. (2014) «Effective grain size» affecting low temperature toughness in lath structure of HSLA steel. *J. Iron Steel Res. Int.*, **26**(7), 70–76.
  15. Hussein, A., Kim, B., Verbeken, K., Depover, T. (2024) The effect of grain boundary misorientation on hydrogen flux using a phase-field based diffusion and trapping model. *Advanced Engineering Materials*, **26**(22), 2401561. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202401561>
  16. Raabe, D., Herbig, M., Sandlöbes, S. et al. (2014) Grain boundary segregation engineering in metallic alloys: A pathway to the design of interfaces. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **18**, 253–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2014.06.002>
  17. Stojanovic, N., Glisovic, J., Abdullah, O.I. et al. (2022) Particle formation due to brake wear, influence on the people health and measures for their reduction: a review. *Environ Sci. Pollut Res.*, **29**, 9606–9625. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17907-3>
  18. Vincentis, N.S., Roatta, A., Bolmaro, R.E., Signorelli, J.W. (2019) EBSD analysis of orientation gradients developed near grain boundaries. *Materials Research*, **22**(1), e20180412. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0412>
  19. Pauli, L., Heikki, R. (2022) EBSD characterisation of grain size distribution and grain sub-structures for ferritic steel weld metals. *Welding in the World*, **66**, 363–377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01225-w>
  20. Hwang, B., Kim, Y.G., Lee, S. et al. (2005) Effective grain size and Charpy impact properties of high-toughness X70 pipeline steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **36**, 2107–2114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0331-9>
  21. Stojanovic, N., Belhocine, A., Abdullah, O.I., Grujic, I. (2023) The influence of the brake pad construction on noise formation, people's health and reduction measures. *Environ Sci. Pollut Res.*, **30**, 15352–15363. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23291-3>
  22. Li, X.C., Zhao, J.X., Cong, J.H. et al. (2021) Machine learning guided automatic recognition of crystal boundaries in bainitic/martensitic alloy and relationship between boundary types and ductile-to-brittle transition behavior. *J. Mater. Sci. Technol.*, **84**, 49–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.024>
  23. Atiquzzaman, M. (1992) Multiresolution Hough transform—an efficient method of detecting patterns in images. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**(11), 1090–1095. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.166623>
  24. Журавель І.М., Максимович В.М. (2018) Кількісний аналіз орієнтації та видовженості зерен на металографічних зображеннях за допомогою перетворень Хафа. Науковий вісник НЛТУ України, **28**(5), 135–139. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280528>
- Zhuravel, I.M., Maksymovych, V.M. (2018) Quantitative analysis of orientation and elongation of grains on metallographic images using Hough transformations. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, **28**(5), 135–139 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280528>

## USE OF THE HOUGH TRANSFORMATION METHOD FOR THE METALLOGRAPHIC STUDIES OF FERRITIC-BAINITIC STEELS MICROSTRUCTURE

V.V. Holovko<sup>1</sup>, O.O. Shtofel<sup>1,2</sup>, D.Yu. Korolenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [v\\_golovko@ukr.net](mailto:v_golovko@ukr.net)

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [o.shtof@gmail.com](mailto:o.shtof@gmail.com)

High-strength low-alloy steels are a promising material for the manufacture of welded metal structures, but their widespread use is hampered by their increased sensitivity to defects that arise during the welding process. Therefore, a fundamental aspect of developing the technology for welding these steels is understanding how the properties of the metal change during the welding process and identifying the main microstructural characteristics that explain these changes. Research on high-strength ferritic-bainitic steels, which concerns the microstructural characteristics and mechanical properties, is aimed at determining the total angle of structural grains disorientation, using the electron backscatter diffraction (EBSD) method, which can be implemented on electron microscopes, and requires special software installation. The metallographic analysis method using the Hough transformation, which can be implemented on optical microscopes and does not require special software, should be considered as an alternative to the EBSD method. 24 Ref., 5 Fig.

*Keywords: high-strength low-alloy steel, welding, microstructure, metallographic analysis, grain boundaries, structural grains disorientation, Hough transformation*

Отримано 21.02.2025

Отримано у переглянутому вигляді 16.07.2025

Прийнято 12.09.2025

# З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua); [patonpublishinghouse@gmail.com](mailto:patonpublishinghouse@gmail.com)

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

**ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГДНІ**

Передплата доступна

у друкованому

та цифровому форматах!

