

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ
ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ
ІЗ МІКРОЛЕГОВАНИХ БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

Монографія

Дніпро
НТУ «ДП»
2023

УДК 669.017.16

О75

Рекомендовано до видання вченою радою Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» як монографія (протокол № 10 від 19.10.2023).

Рецензенти:

О.І. Бабаченко, доктор технічних наук, директор Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

В.С. Вахрушева, доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів, ДВНЗ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

М.Д. Мельничук, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри матеріалознавства, Луцький національний технічний університет

Автори: А.Є. Щудро, К.А. Зіборов, Д.В. Лаухін, О.В. Бекетов, С.О. Федоряченко, І.М. Мацюк, Л.М. Дадіверіна

О75 **Особливості** формування структури і властивостей зони термічного впливу зварних з'єднань із мікролегованих будівельних сталей : монографія [Електронний ресурс] / А.Є. Щудро, К.А. Зіборов, Д.В. Лаухін, О.В. Бекетов, С.О. Федоряченко, І.М. Мацюк, Л.М. Дадіверіна; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Електрон. текст. дані. – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. – 131 с. – Режим доступу <https://www.nmu.org.ua/ua/> – Назва з екрана.

Розроблено теоретичні засади й запропоновано нові методи виконання науково-практичного завдання, що полягає у встановленні взаємозв'язку між процесом структуроутворення та механічними властивостями листів після раціонального режиму контрольованої прокатки сталей 09Г2С та 10ХСНД та структуроутворенням і механічними властивостями в зоні термічного впливу та основного металу після зварювання за найбільш розповсюдженими при будівництві режимами.

Призначено для наукових співробітників, спеціалістів промисловості, викладачів, аспірантів та здобувачів вищої освіти технічних вищих навчальних закладів.

Лл. 52. Бібліогр.: 102 назв.

УДК 669.017.16

© А.Є. Щудро, К.А. Зіборов, Д.В. Лаухін,
О.В. Бекетов, С.О. Федоряченко, І.М. Мацюк,
Л.М. Дадіверіна, 2023
© НТУ «Дніпровська політехніка», 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	7
1.1 Технології вдосконалення властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей	7
1.1.1 Вимоги, що пред'являються до сталей металоконструкцій	14
1.2 Технологія з'єднання елементів зварних будівельних сталевих конструкцій	16
1.2.1 Зварювання в середовищі захисних газів	16
1.2.2 Автоматичне зварювання під шаром флюсу	20
1.3 Утворення холодних тріщин в зоні термічного впливу при зварюванні	24
1.4 Проблеми зварювання сталей в ділянках зварних швів	27
1.5 Висновки до глави 1	31
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ	33
2.1 Проведення лабораторних дослідів	33
2.1.1 Вимога до охолоджуючих середовищ	36
2.2 Режими зварювання сталі	37
2.3 Механічні випробування зразків	38
2.4 Методи статистичного аналізу	39
2.5 Приготування шліфів	40
2.6 Визначення спектрального складу границь зерен в низьковуглецевих сталях	41
2.7 Растрова електронна мікроскопія	42
2.8 Висновки до глави 2	43
3 СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВНІ МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ МІКРОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ	44
3.1 Попередня обробка масивів експериментальних даних	44
3.2 Аналіз зв'язку між досліджуваними змінними	53

3.3 Побудова математичної моделі впливу параметрів прокатки на комплекс механічних властивостей низьковуглецевих мікролегованих сталей	66
3.4 Висновки до глави 3.....	76
4 ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ У МІЖКРИТИЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ТОВСТИХ ЛИСТІВ ЗІ СТАЛЕЙ 09Г2С ТА 10ХСНД	78
4.1 Технологічна схема виробництва сталі 09Г2С та сталі 10ХСНД	78
4.2 Технологічна схема контрольованої прокатки	79
4.3 Вплив температури та ступеню деформації на формування мікроструктури товстолистого металопрокату	81
4.4 Вдосконалення режимів контрольованої прокатки сталей 09Г2С та 10ХСНД	87
4.5 Вплив режимів контрольованої прокатки на формування структури доевтектоїдного фериту з позиції теорії решіток співпадаючих вузлів	90
4.6 Порівняльний аналіз структури металопрокату після гарячої прокатки та лабораторного експерименту по вдосконаленню режиму контрольованої прокатки	92
4.7 Дослідження впливу параметрів після проведення Лабораторного експерименту по вдосконаленню режиму контрольованої прокатки на механічні властивості низьковуглецевих мікролегованих сталей	95
4.8 Висновки до глави 4	97
5 АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУР ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ТА ОСНОВНОГО МЕТАЛУ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ СТАБІЛЬНИЙ РІВЕНЬ МІЦНІСНИХ ТА ПЛАСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА РАХУНОК ЗБЕРЕЖЕННЯ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ СУБСТРУКРИ ДЕФОРМОВАНОГО ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ	100

5.1 Особливості розпаду аустеніту в зоні зварного шва після автоматичного зварювання під флюсом та механізованого зварювання сталей в суміші захисних газів	100
5.2 Особливості формування структури зони термічного впливу та збереження дислокаційної субструктури основного металу після автоматичного зварювання під флюсом та механізованого зварювання сталей в суміші захисних газів	103
5.3 Дослідження мікротвердості зварних з'єднань	107
5.4 Висновки до глави 5	115
ВИСНОВКИ	117
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА	121

ВСТУП

Підвищення міцнісних характеристик вітчизняної металопродукції, розширення сфери її використання, впровадження ресурсозберігаючих технологічних процесів є стратегічними напрямками наукових досліджень, що сприяють підвищенню конкурентоспроможності вітчизняного металопрокату на внутрішньому та зовнішньому ринках.

З метою підвищення ефективності виробництва металопродукції у будівництві та мостобудуванні актуальним є використання низьковуглецевих мікролегованих сталей 09Г2С та 10ХСНД з підвищеними міцнісними та пластичними властивостями, що дозволяють знизити собівартість як окремих елементів, так і всієї конструкції в цілому.

Однак, в теперішній час використання сталей 09Г2С та 10ХСНД в будівельному виробництві обмежене, що обумовлено невідповідністю їх характеристик основним вимогам, які висуваються до сучасних будівельних сталей, тобто забезпечення механічних властивостей уздовж, поперек та Z-напрямку прокату після зварювання. Ця проблема обумовлена високою анізотропією механічних властивостей сталей 09Г2С та 10ХСНД уздовж, поперек та Z-напрямку прокату, яка виникає за рахунок розвиненої ферито-перлітної смугастості, яка характерна для виробництва цих сталей.

На наш погляд, одним із напрямків вирішення цієї наукової задачі є формування дисперсної кінцевої структури фериту та перліту, яка знижує анізотропію за механічними властивостями товстолистого прокату під час повторного нагріву при різних циклах термічного впливу зварки, за рахунок отримання міцності та пластичності в зоні сфероїдизованого перліту та дуальної ферито-бейнітної структури на рівні основного металу. Таким чином, дослідження, які спрямовані на розширення області застосування та ринків збуту вітчизняного металопрокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей на основі встановлення взаємозалежностей між структурою готового прокату, зоною термічного впливу та механічними властивостями виробів будівельного та мостобудівельного призначення, є актуальними як з наукової так і з економічної точок зору.

ВИСНОВКИ

У монографії зроблено теоретичне узагальнення і запропоновано нове рішення по встановленню взаємозв'язку між механізмами структуроутворення та механічними властивостями листів після раціонального режиму контрольованої прокатки сталей 09Г2С та 10ХСНД та структуроутворенням і механічними властивостями в зоні термічного впливу та основного металу після зварювання за найбільш розповсюдженими при будівництві режимами. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні наукові та практичні висновки:

1. Попередній статистичний аналіз та побудова функцій відгуку (σ_T , σ_B , δ_5) для сталей 09Г2С та 10ХСНД показали, що розподіл змінних має вигляд близький до нормального. Отже, можливе подальше застосування математичного моделювання без додаткового перетворення вихідних значень. Результати проведеного кореляційного аналізу дозволили встановити, що для обох сталей, прокатаних за технологією контрольованої прокатки значний вплив на механічні властивості оказує не тільки температура кінця деформації в чорновій кліті, а й найбільш вагомо температура початку деформації в чистовій кліті. Виходячи зі знаку коефіцієнта кореляції, можливо припустити, що при зростанні температури початку деформації в чистовій кліті, границя міцності та плинності зростатимуть при стабілізації значень пластичності та в'язкості. Однофакторний дисперсійний аналіз підтвердив дані, отримані за допомогою математичного апарату кореляційного аналізу, а саме показав значний вплив температури початку деформації в чистовій кліті на міцнісні характеристики та стабілізації значень пластичності та в'язкості сталей 09Г2С та 10ХСНД. Багатофакторний дисперсійний та регресійний аналізи показали можливість збільшення значень границі міцності та плинності зі збільшенням температури початку деформації сягає близько 830 – 790°C. Показники відносного видовження отримують стабільні значення при підвищенні

температури початку деформації в указаному діапазоні температур. На основі проведених досліджень необхідно розробити новий режим контрольованої прокатки для будівельних металевих конструкцій відповідального призначення та мостобудівельних конструкцій.

2. Застосування вдосконаленого режиму контрольованої прокатки призводить до підвищення міцнісних та стабілізації пластичних та в'язкісних характеристик металопрокату. Пластичні властивості залишаються на рівні, що задовольняє вимогам діючої у будівельній галузі нормативній документації. Це пояснюється формуванням наддрібних структурних складових у фериті та перліті. Підвищення дисперсності структури металопрокату стає можливим за рахунок створення та збереження не тільки стійкої дислокаційної субструктури аустеніту, але й розвиненої субструктури фериту при аустенітно-феритному перетворенні, де при деформації у міжкритичному інтервалі температур в дрібних зернах доєвтектоїдного фериту формуються додаткові малокутові субзеренні границі.

3. Порівняльний мікроструктурний аналіз показав, що прокат, виготовлений після гарячої прокатки характеризується наявністю практично безперервних смуг перліту у структурі сталей 09Г2С та 10ХСНД, у той час, як мікроструктура прокату, отриманого після проведення лабораторного експерименту по вдосконаленню режиму контрольованої прокатки, характеризується наддрібною структурою фериту з розвиненою дислокаційною субструктурою.

Середній діаметр зерен фериту в структурах сталей 09Г2С та 10ХСНД після проведення експерименту зменшився в 2,5 – 3 рази, в порівнянні зі структурами отриманими після гарячої прокатки, завдяки чому забезпечується підвищення міцнісних властивостей та стабілізація пластичних характеристик у X, Y та Z-напрямку товстолистого прокату для зварних металевих конструкцій будівельного та мостобудівельного призначення. Цілеспрямоване створення й збереження розвиненої структури фериту та запобігання процесам рекристалізації у сталях будівельного та

мостобудівельного призначення, дозволить розробити нові технологічні схеми виробництва товстолистового металопрокату для сучасного будівництва на будь-яких металургійних комбінатах України.

4. Експериментально підтверджено, що використання запропонованого раціонального режиму контрольованої прокатки для сталей 10ХСНД і 09Г2С призводить до зародження нових зерен доевтектоїдного (алотріоморфного) фериту по колишнім великокутовим та дислокаційним субграницям аустеніту.

5. Проаналізовано блокування рекристалізації зерен аустеніту та новоутвореного фериту по дислокаційним малокутовим границям аустеніту сталей 09Г2С та 10ХСНД. Застосування регламентованого охолодження після кінця деформації, забезпечує збереження дислокаційної структури перліту та фериту, що призводить до утворення дисперсної кінцевої субструктури. Така схема деформації дає позитивний результат для товстолистового прокату зі сталей, які не містять кошовних карбідоутворюючих елементів.

Дислокаційні субграниці аустеніту виступають новими центрами зародження фериту, які зазнають деформацію та в свою чергу насичується дислокаційними субграницями за рахунок реалізації безперервної деформації за запропонованим режимом, які відповідають за стабілізацію міцнісних та в'язкісних властивостей товстолистового прокату будівельного та мостобудівельного призначення. Зерна доевтектоїдного фериту, які виділяються по границям колишніх аустенітних зерен та дислокаційних субграницях блокують рекристалізацію в деформованому аустеніті.

6. Розглянуто вплив наддрібної ферито-перлітної структури отриманої після лабораторного експерименту по вдосконаленню режиму контрольованої прокатки на формування зон термічного впливу, які забезпечують стабілізацію міцнісних та в'язкісних властивостей за рахунок формування дислокаційної субструктури аустеніту та фериту.

7. Експериментально показано, що після лабораторного експерименту по вдосконаленню режиму контрольованої прокатки та подальшого зварювання сталей 09Г2С та 10ХСНД в середовищі захисних газів та автоматичного зварювання під флюсом руйнування зразків відбувається по основному металу, розташованому на відстані мінімум 18,5 мм від центру зварного шва і супроводжується значними пластичними деформаціями.

В зоні термічного впливу після зварювання в $Ar+CO_2$ та автоматичного зварювання під флюсом сталей будівельного та мостобудівельного призначення, виявлені найбільш небезпечні зони зі сфероїдизованим перлітом та ферито-бейнітною структурами, які знижують працездатність всієї конструкції в цілому.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Use and Application of High-performance Steels for Steel Structures. By J. Raoul. Zürich: IABSE, 2005. 152 p.
2. Theoretical foundations of engineering. Tasks and problems: collective monograph / Boiko T., Boiko P., – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2021. 485 p. Available at : DOI-10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.III.
3. Thermomechanical Processing of Steels Pello Uranga 1, 2, * and JoséMaría Rodríguez-Ibabe 1,21CEIT-Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Materials and Manufacturing Division, M. Lardizabal 15, 20018 Donostia-San Sebastián, Basque Country, Spain 2Mechanical and Materials Engineering Department, Universidad de Navarra-Tecnun, M. Lardizabal 13,20018 Donostia-San Sebastián, Basque Country, Spain
4. Aarne Pohjonen Numerical Modelling of Thermo-Mechanical Processes in Steels - An Overview and Recent Progress July 2023 Materials Science Forum 1093(5) DOI:10.4028/p-jI0HPT
5. Gorkunov E.S. New technologies for metallurgical and machine-building industry Metals - Open Access Metallurgy Journal January 2002
6. Qiu S.-T. Technology analysis of producing grain oriented silicon steel by thin slab casting and rolling process Metals - Open Access Metallurgy Journal September 2008
7. Говорун Т.П., Гапонова О.П., Марченко С.В. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях) : навч. посіб. Суми : СумДУ. 163 с.
8. Luiz Henrique Soares Barbosa Fatigue crack growth rates on the weld metal of high heat input submerged arc welding . International Journal of Fatigue Volume 119, February 2019, Pages 43-51
9. Lee H.K. *et al.* Fracture resistance of a steel weld joint under fatigue loading Eng Fract Mech (2000)

10. Cappel J, Weinberg M, Flender R 2004 The metallurgy of roller-bearing steels. *Steel Grips*. 2 261-268.
11. Denkena B, Meyer R, Breidenstein B 2007 Development of combined manufacturing technologies for high-strength structure components *Adv. Mater. Res.* 22 67–75.
12. Gurmeet Singh A review on effect of heat treatment on the properties of mild steel *Mechatronics Engineering*, Chandigarh University, Mohali, India Received 12 July 2020, Accepted 30 July 2020, Available online 10 September 2020, Version of Record 28 February 2021.
13. Zhao M.C. *et al.* The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel *Mater Sci Eng A* (2002)
14. Tither G., Morrow J.W. Strong, tough molybdenum steels for the Arctic. *Metals Eng. quart.* 1975. Vol. 15. №. 8. P. 42 – 52.
15. Woodhead J.H. , Webster D. Precipitation reactions in a vanadium – bearing mild steel. *Metals Eng. quart.*, 1969. Vol. 207. №. 6. P. 854 – 857.
16. Z. Xiong The contribution of intragranular acicular ferrite microstructural constituent on impact toughness and impeding crack initiation and propagation in the heat-affected zone (HAZ) of low-carbon steels *Mater Sci Eng A* (2015)
17. Lander H.N. &, Mihelich J.L. Production experiences with Mo-Nb line pipe steels *Metal Science and Heat Treatment* volume 19, pages573–584.
18. Gulyaev A.P. Shigarev A.S. Effect of thermomechanical treatment on fine structure *Metal Science and Heat Treatment* April 1963
19. · Gorni Antonio Accelerated Cooling of Steel Plates: The Time Has Come September 2008 *Journal of ASTM International* 5(8) DOI:10.1520/JAI101777
20. Komissarov A.A., Sokolov P.Yu., Tikhonov S.M. Production of Low-Carbon Steel Sheet for Oil-Industry Pipe Steel in *Translation* volume 48, pages748–753 (2018).

21. Mazur V.L. Influence of Pulling Modes and Temperature of Coiling Cold-Rolled Strips September 2020 Steel in Translation 50(9):618-628 DOI:10.3103/S0967091220090090/
22. Ikumapaya O.M. , Akinlabi E.T., Onu b P., Abolusoro O.P. Rolling operation in metal forming: Process and principles – A brief study Received 14 December 2019, Accepted 14 February 2020, Available online 29 February 2020, Version of Record 15 June 2020.
23. Tobias Lehnert Economic and Ecologic Aspects of Using Modern Steels in Steel Construction. January 2013 DOI:10.1007/978-3-642-36691-8_68 In book: Design, Fabrication and Economy of Metal Structures (pp.449-454)
24. Santha Rao D., Ramanaiah N. Process parameters optimization for producing AA6061/TiB2 composites by friction stir processing. *Journal of Mechanical Engineering - Strojnícky časopis*. 2017. Vol. 67, №1, P. 101 - 118.
25. Yusof F., Jamaluddin M.F. Welding Defect Comprehensive Materials Processing, 2014.
26. Nisarg Shete. A Review Paper on Rotary Friction Welding International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIIME 2017)
27. Grigorenko G.M. & Kostin V.A. Criteria for evaluating the weldability of steels a E.O. Paton Electric Welding Institute , Kiev , Ukraine Published online: 23 Jul 2013.
28. David S.A. and DebRoy T. Current Issues and Problems in Welding Published By: American Association for the Advancement of Science Science New Series, Vol. 257, No. 5069 (Jul. 24, 1992), pp. 497-502
29. Rath Anita Sørensen, Thulstrup Ane Marie. Risk of lung cancer according to mild steel and stainless steel welding Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, Vol. 33, No. 5 (October 2007), pp. 379-386
30. Pavlov N.V. Influence of Protective Gas Content on Quality of Welded Joint While Welding With Impulse Supply of Electrode Wire September

2015 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 91(1)
DOI:10.1088/1757-899X/91/1/012012

31. Спеціальні способи зварювання URL: http://elib.lutsk-ntu.com.ua/book/tf/m_ta_pfkм/2013/13-38/page16.html (дата звернення: 15.06.2020).

32. Hubert E.H. (1932) Manual of Electric Arc Welding. McGraw-Hill. 163 p.

33. William A. Bowditch (2023) Modern Welding Thirteenth Edition, Revised, Lab Workbook. Goodheart-Willcox. 452 p.

34. Folkhard, E. (1988) Welding Metallurgy of Heat Resisting Steels. Welding Metallurgy of Stainless Steels. Springer, Vienna. 226-228 p.

35. Naishadh P. Patel, Jay J. Vora, Vishvesh J. Badheka, Gautam H. Upadhyay (2021) Review on the use of activated flux in arc and beam welding processes. MaterialsToday: Proceedings, Volume 43, Part 2. 916-920 p.

36. Lebedev B.F., Zagrebenyuk S.D., Svetsinskij V.G., Rimskij S.T., Ginzburg G.M. (1985) Vertical welding of 10KhSND steel with forced weld formation in argon-base gaseous mixtures. Automatic Welding, UK. 58-61 p.

37. Williams Tim, Nanstad Randy (2019) Low-Alloy Steels. Structural Alloys for Nuclear Energy Applications. 411-483 p.

38. Siddharth Choudhary, Rohit Shandley, Aditya Kumar (2018) Optimization of agglomerated fluxes in submerged arc welding. MaterialsToday: Proceedings, Volume 5, Issue 2, Part 1. 5049-5057 p.

39. John R. Walker, W. Richard Polanin (2009) Arc Welding 8th Edition. Goodheart-Willcox. 190 p.

40. GAN SHENG WU (2000) Automatic submerged arc welding Paperback. China Press. 374 p.

41. Weman Klas (2012) Welding Processes Handbook, Second Edition. Woodhead Publishing Limited. 270 p.

42. Howard B. Cary (1995) Arc Welding Automation. CRC Press. 544 p.

43. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 4 «Дослідження флюсів для зварювання та наплавлення» з дисципліни «Матеріали для наплавлення та напилення» для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання / упоряд. М. І. Андрущенко, О. Є. Капустян. Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. 18 с.
44. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. посібник. Миколаїв : НУК, 2004. 225 с.
45. Larry Jeffus (2020) Welding: Principles and Applications (MindTap Course List) 9th Edition. Cengage Learning. 960 p.
46. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Roor A.V., Bashchenko L.P., Lipatova U.I. (2015) New carbon-fluorine additives for welding fluxes. Steel in Translation 45. 251–253 p.
47. Eric J. Mittemeijer (2022) Fundamentals of Materials Science. Springer Nature Switzerland AG. 737 p.
48. ДСТУ EN ISO 14174:2015 "Зварювальні матеріали. Флюси для дугового зварювання під флюсом. Класифікація". Дата введення 2016-01-01.
49. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: навч. посіб. для практичних робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018 181 с.
50. Kah P., Martikainen J., (2012) Current Trends in Welding Processes and Materials: Improve in Effectiveness. Advanced Materials Science, 30. 189-200 p.
51. Davies Louise (1981) Introduction to welding fluxes for mild and low alloy steels. Welding Inst..16 p.
52. Стахов С. В. Дослідження властивостей наплавленого металу при автоматичному зварюванні низьколегованої сталі під агломерованим флюсом. Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. Дніпродзержинськ, 2011. Вип. С.

64-69. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2011_2_13 (дата звернення: 12.05.2019).

53. Yurioka N. TMCP steels and their welding. *Welding World*. 1995. №6. P.375–390.

54. Pokhodnya I. K., Shvachko V. I. (1996) Cold cracks in welded joints of structural steels. *Materials Science*, volume 32. 45–55 p.

55. Herold, Thomas, Böllinghaus, Horst (2005) *Hot Cracking Phenomena in Welds*. Springer. 404 p.

56. Lawrence E. Murr (2015) *Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance*. Springer. 1166 p.

57. Khoshnaw Fuad (2023) *Welding of Metallic Materials. Methods, Metallurgy, and Performance*. 608 p.

58. Походня І. К., Швачко В. І. Природа водневої крихкості конструкційних сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2001. №2. С.87-96.

59. Pokhodnya I.K., Shvachko V.I. (1996) Cold cracks in welded joints of structural steels. *Materials Science*, Volume 32. 45–55 p.

60. Hrivňák Ivan (1985) A review of the metallurgy of heat treatment of welded joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 20, Issue 3. 223-237 p.

61. Zhili Feng (2005) *Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion*. Woodhead Publishing Limited. 350 p.

62. Zhang H.-J., Li T., Wang J.-Q, Li D.-T. (2017) Weldability and welding technology of ultrahigh strength steel for protection-vehicle. *Journal of Iron and Steel Research* 29(4). 323-328 p.

63. Magudeeswaran G., Balasubramanian V., Madhusudhan Raddy G. Cold cracking of flux cored arc welded high strength steel weldments. *Journal of Materials Science & Technology*. 2009. № 4. P. 516–526.

64. Cwiek J. Hydrogen degradation of high strength weldable steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007. №20. P. 223–226.
65. Leggatt R.H. (2008) Residual stresses in welded structures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85(3). 144-151 p.
66. Milenin O.S., Velikoivanenko O.A., Rozyuka G.P., Pivtorak N.I. (2023) A numerical method of multiscale modeling of the stress-strain state of large-sized structures in site welding. *The Paton Welding Journal*, Volume 4. 21-27 p.
67. Ueda Y., Yuan M. G. The characteristics of the source of welding residual stress (inherent strain) and its application to measurement and prediction. *Transactions of JWRI*. 1991. Vol. 20, № 2. P. 119–127.
68. Satoh K., Toyoda. Evaluation of LBZ: HAZ fracture toughness testing and utilization of toughness data to structural integrity. *Welding Journal*. 1975. Vol.55. P. 385–392.
69. Костін В. А. Закономірності структуроутворення зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей, отриманих дуговим зварюванням : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01. Київ, 2014. 400 с.
70. Komizo Y., Fukado Y. CTOD properties and M-A constituent in the HAZ of C-Mn microalloyed steel. *Journal of the Japan Welding Society*. 1988. №1. P. 41–46.
71. Glover A. G., McGrath J. T., Tinkler M. J. and other. The influence of cooling rate and composition on weld metals microstructures in a C\Mn and a HSLA steel. *Welding Journal*. 1977. №9. P.267–273.
72. Andrews E.E. (2018) *Investigation of Special Steels*. Forgotten Books. 75 p.
73. Griffin Ivan H. (1985) *Pipe Welding Techniques* 4th Edition. Cengage Learning. 158 p.
74. Richard Liew J.Y., Ming-Xiang Xiong, Bing-Lin Lai (2021) *Design of Steel-Concrete Composite Structures Using High-Strength Materials*

(Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering) 1st Edition. Woodhead Publishing. 254 p.

75. Shackelford J.F., Introduction to materials science for engineers, 1985.
76. Клименко Ф. Є., Барабаш В. М., Стороженко Л. І. Металеві конструкції. Львів : Світ, 2002. 311 с.
77. Tyurin A.V., Akhmerov A.Yu. (2020) Theory of probability and mathematical statistics. LAP LAMBERT Academic Publishing. 148 p.
78. zlateva Ganka, Martinova Zlatanka (2008) Microstructure of Metals and Alloys: An Atlas of Transmission Electron Microscopy Images 1st Edition. CRC Press. 188 p.
79. George L. Kehl (1943) The Principles of Metallographic Laboratory Practice. McGraw-Hill Book. 453 p.
80. Щудро А.Є., Сухомлин Г.Д., Щудро Р.Є. Удосконалення методики визначення спектрального складу границь зерен у низьковуглецевих сталях. Металознавство та термічна обробка металів. Дніпропетровськ, 2015. № 2(69). С. 30–35.
81. Joseph Goldstein, Dale E. Newbury, David C. Joy, Charles E. Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer, J.R. Michael (2003) Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, 3rd Edition. Springer. 708 p.
82. Joseph I. Goldstein, Dale E. Newbury, Joseph R. Michael, Nicholas W.M. Ritchie, John Henry J. Scott, David C. Joy (2018) Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, 4th Edition. Springer. 573 p.
83. Engel, L., & Klingele, H. (2001). An Atlas of Metal Damage: Surface Examination by Scanning Electron Microscope (2nd Ed.). Herne, Flender Service. 217 p.
84. Dally, J.W. (2008) Statistical Analysis of Experimental Data. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics. Springer Handbooks. Springer, Boston, MA. 259-280 p.
85. ISO 5479:1997 "Statistical interpretation of data — Tests for departure from the normal distribution".

86. Rudolf J. Freund, William J. Wilson, Donna L. Mohr (2010) *Statistical Methods*, Third Edition. Elsevier Inc. 796 p.
87. Michael R. O'Brien (2017) *Making Sense of Z-Scores, T-Tests and ANOVA for Excel* Paperback. CreateSpace Independent Publishing Platform. 104 p.
88. Brown, C.E. (1998). *Multivariate Analysis of Variance. Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg. 79-91 p.
89. Jiju Antony (2003) *Design of Experiments for Engineers and Scientists* 1st Edition. Butterworth Heinemann. 152 p.
90. Спосіб виготовлення листів з низьковуглецевої низьколегованої сталі методом безперервної контрольованої прокатки: пат. 133785 Україна: МПК В21В 37/74 (2006.01), В21В 45/02 (2006.01), № u 2018 10697, заявл. 29.10.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл. №8.
91. Cuddy L.J. *Thermomechanical Processing of Austenite*. TMS of AIME. Warrendale (PA). 1982. P. 129–140.
92. Brown E. L., DeArdo A. J., Bucher J. H. *The Microstructure of Hot Rolled High-Strength Low Alloy Steel. The Hot Deformation of Austenite*, 1977. New York. 1977. P. 250–285.
93. Bert Verlinden, Julian Driver, Indradev Samajdar, Roger D. Doherty (2014) *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*. Elsevier Science. 556 p.
94. Jose M Rodriguez-Ibabe, Pello Uranga (2020) *Thermomechanical Processing of Steels*. Mdpi AG. 210 p.
95. Weinberg F. (1959) *Grain boundaries in metals*. Progress in Metal Physics, Volume 8, 105-128 p.
96. Djaic R., Jonas J.J. *Static recrystallization of austenite between intervals of hot working*. Journal of the Iron and steel institute. 1972. Vol. 210, P. 256–261.

97. Щудро А. Є., Лаухін Д. В., Бекетов О. В. та ін. Вплив температурно-деформаційної обробки у міжкритичному інтервалі температур на структуру та властивості товстих листів з низьковуглецевих будівельних сталей. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов.* Дніпро, 2017. Вып. 96. С. 95–102.

98. Shchudro A., Laukhin D., Pozniakov V. Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels. *Key Engineering Materials.* Switzerland, 2020. Vol. 844. P. 146–154. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.146>.

99. Shchudro A., Laukhin D., Beketov O. The elaboration of modernized technology of controlled rolling directed at the formation of high strengthening and viscous qualities in HSLA steel. *Solid State Phenomena.* Switzerland, 2019. Vol. 291. P. 13–19. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.13>.

100. Xiangyang Dong, Yung C. Shin (2019) Predictive modeling of microstructure evolution within multi-phase steels during rolling processes. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 150. 576-583 p.

101. Anthony J. DeArdo, Mingjian Hua and Calixto I. Garcia (2006) BASIC METALLURGY OF MODERN NIOBIUM STEELS. Pittsburgh, Department of Materials Science and Engineering University of Pittsburgh. 51 p.

102. Kostin Valery, Grigorenko G.M., Solomijchuk T.G., Zhukov V.V., Zuber T.A. (2013) MICROSTRUCTURE OF HAZ METAL OF JOINTS OF HIGH-STRENGTH STRUCTURAL STEEL WELDOX 1300. *The Paton Welding Journal* №3. 6-13 p.

Наукове видання

Щудро Анатолій Євгенович
Зіборов Кирило Альбертович
Лаухін Дмитро Вячеславович
Бекетов Олександр Вадимович
Федоряченко Сергій Олександрович
Мацюк Ірина Миколаївна
Дадіверіна Лілія Миколаївна

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ
І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ
ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ МІКРОЛЕГОВАНИХ
БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

Монографія

Видано в редакції авторів

Підписано до видання ____ 2023
Електронний ресурс. Авт. арк 6,9

Підготовлено до видання
У Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка»
Свідоцтво несення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19