

ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ШВІВ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

В.В. Головко¹, О.О. Штофель¹, Д.Ю. Короленко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: v_golovko@ukr.net

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Проведено комплекс робіт з встановлення характеру розподілу неметалевих включень в структурі металу низьколегованих зварних швів. В результаті виконання металографічних досліджень встановлено показники об'ємного вмісту включень в структурі, розподіл їх за розмірами. Показана доцільність використання такого додаткового показника як щільність розподілу для більш інформативного опису неметалевих включень при оцінюванні їх впливу на механічні властивості металу швів. Запропоновано використання фрактального аналізу для виявлення особливостей щільності розподілу неметалевих включень в металі швів. Бібліогр. 6, рис. 4.

Ключові слова: зварні шви, мікроструктура, неметалеві включення, щільність розподілу, схильність до крихкого руйнування, фрактальний аналіз

Вступ. Неметалеві включення є невід'ємною частиною структури низьколегованих сталей, тому їх впливу на механічні властивості зварних швів традиційно приділяють велику увагу. Вважається, що неметалеві включення в зварювальній ванні утворюються внаслідок перебігу термодинамічних реакцій або поступають при плавленні основного металу та зварювальних матеріалів. В фундаментальних монографіях з цього питання [1, 2] було показано особливості впливу об'ємного вмісту включень, їх хімічного складу та морфології на формування структури та механічні властивості зварних швів. Проведені дослідження показали, що деякі включення певної морфології можуть сприяти утворенню в металі швів низьколегованих сталей мікроструктурних складових підвищеної в'язкості. Виходячи з цих результатів виникла ідея не розраховувати на утворення потрібних неметалевих включень в металі швів, а забезпечувати їх присутність в металі завдяки інокулюванню до зварювальної ванни контрольованої кількості тугоплавких сполук певного розміру та хімічного складу. Останнім часом з'явилися публікації, в яких досліджується особливості впливу на структуру та механічні властивості металу швів неметалевих включень, які були цілеспрямовано інокулювані до зварювальної ванни [3, 4]. У високотемпературному металевому розплаві відбувається розчинення неметалевих включень, тому, з метою гальмування цього процесу стосовно інокулянтів, їх вводять до «холодної» зони зварювальної ванни. Відповідно змінюються умови розподілу неметалевих включень в металі швів.

Проведені нами дослідження були спрямовані на з'ясування особливостей розподілу неметалевих включень в структурі металу швів низьколегованих сталей, розширенню бази знань щодо впливу певних показників, які описують ці особливості, на механічні властивості металу зварних швів низьколегованих сталей, зокрема, на схильність до крихкого руйнування.

Мета роботи полягала у визначенні можливості врахування щільності розподілу неметалевих включень в металевій матриці при оцінюванні їх впливу на механічні властивості металу зварних швів низьколегованих сталей.

Дослідження виконували стосовно неметалевих включень на базі титану, присутність яких в металі швів забезпечували інокулюванням зварювальної ванни відповідними тугоплавкими сполуками.

Методика проведення досліджень. Дослідження проводили на зразках металу швів, які були виконані за методикою [5] при дуговому зварюванні в середовищі захисного газу (82 % Ar, 18 % CO₂) порошковим дротом діаметром 1,6 мм типу «metal core» на постійному струмі 200 (±5) А, напрузі 30 (±2) В з погонною енергією 21 (±2) кДж/см. Для визначення характеру розподілу неметалевих включень в металі швів до «холодної» частини зварювальної ванни вводили порошковий дріт діаметром 1,6 мм, осердя якого містило суміш з 10 % частинок тугоплавких з'єднань розміром 0,040...0,200 мм та 90 % залізного порошку марки ПЖВ за ДСТУ 9849. В якості інокулянтів були обрані з'єднання на основі титану:

оксид титану (шов TiO_2), карбід титану (шов TiC), нітрид титану (шов TiN). Отримані результати порівнювали з даними зразків металу шва, отриманих при зварюванні порошковим дротом, до складу осердя якого вводили феротитан (шов FeTi).

Металографічні дослідження проводили на поперечних шліфах, вирізаних із зварних з'єднань. Структуру металу швів досліджували на оптичному мікроскопі, вплив розподілу неметалевих включень на особливості руйнування металу визначали за результатами фактографічних зображень, отриманих на скануючому електронному мікроскопі «JSM-35».

Розподіл включень за розмірами і побудову відповідних графіків виконували безпосередньо зі шліфів. По заданій програмі на приладі виконували підрахунок кількості включень у кожному зразку по розмірних групах – від мінімального розміру до максимального.

Щільність розподілу неметалевих включень в структурі металу швів визначали за методикою, наведеною в роботі [6].

Таблиця 1. Хімічний склад металу швів, мас. %

Номер шва	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti
FeTi	0,050	0,290	1,32	0,024	0,014	0,16	2,19	0,27	0,36	0,039	0,019
TiC	0,054	0,263	1,28	0,025	0,011	0,13	2,22	0,26	0,49	0,035	0,009
TiN	0,035	0,317	1,40	0,019	0,009	0,14	2,29	0,26	0,56	0,036	0,011
TiO ₂	0,035	0,405	1,24	0,016	0,021	0,11	1,97	0,27	0,68	0,031	0,017

Таблиця 2. Механічні властивості металу швів

Номер шва	Rm	Re	A	Z	KCV, Дж/см ² при T, °C			
	МПа				20	0	– 20	– 40
FeTi	788	739	11,4	35	60	58	57	52
TiC	716	644	19	63	111	97	85	73
TiN	712	580	5,3	14,7	55	47	40	35
TiO ₂	709	636	19	57	85	72	60	50

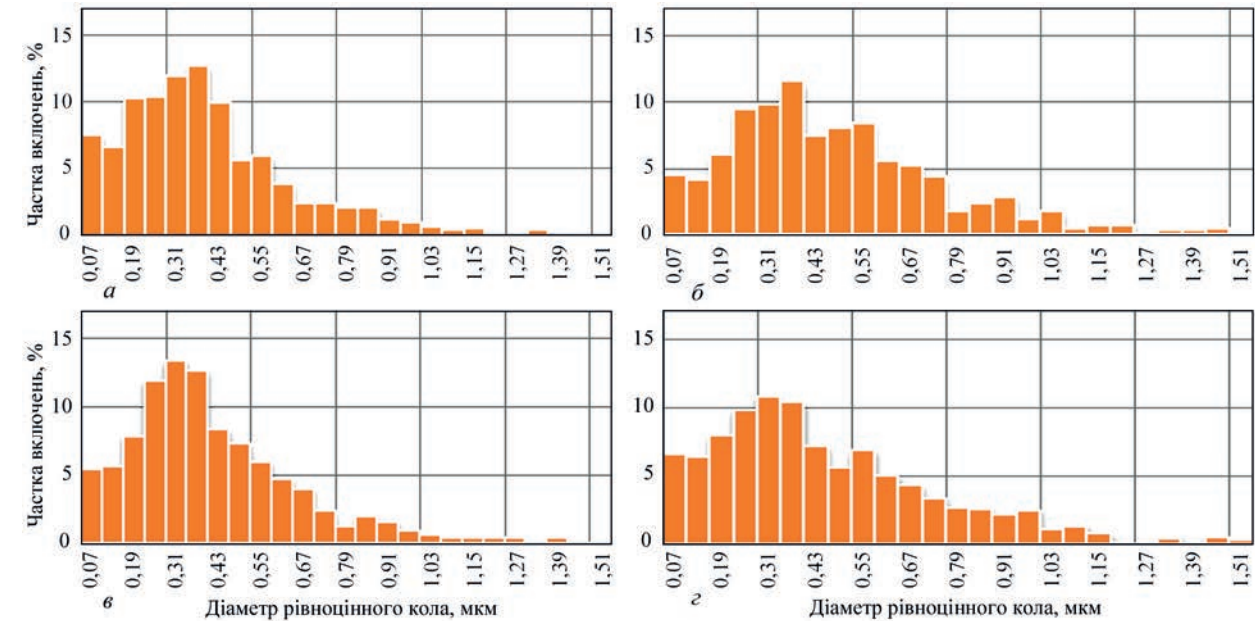


Рис. 1. Гістограми розподілу за розмірами та об'ємна частка (V) неметалевих включень в металі швів: а – FeTi ; б – TiC ; в – TiN ; г – TiO_2 (а, б – $V = 0,62\%$; в – $0,77\%$; г – $0,47\%$)

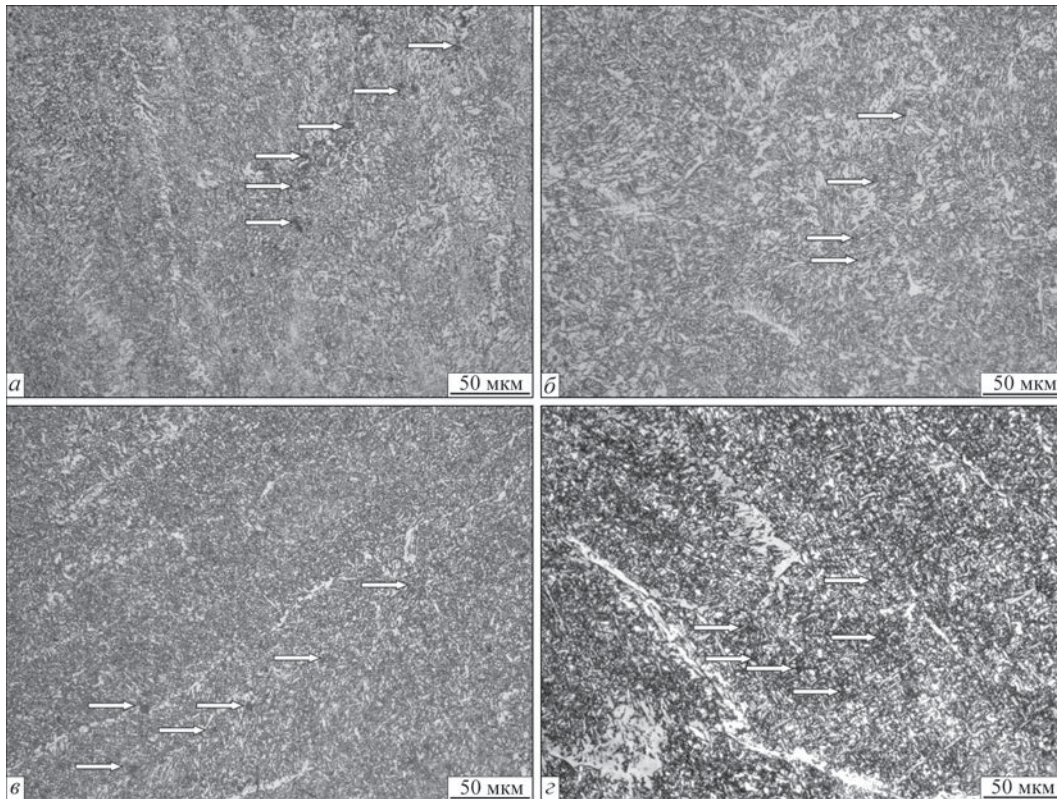


Рис. 2. Зразки мікроструктури металу швів: а – FeTi; б – TiC; в – TiN; з – TiO₂ (стрілками позначено типове розташування неметалевих включень)

нітних зерен чітко проглядаються частинки фаз дисперсних розмірів карбідного типу.

У металі швів зразків TiC формується бейнітно-мартенситна структура, яка містить переважно верхній бейніт (близько 60 %), нижній бейніт близько 25 % і мартенсит (до 10 %) при незначній фрагментації структури. В об'ємі зерен бейнітної структури спостерігаються частинки фазових виділень дисперсних розмірів карбідного типу при відносно однорідному їх розподілі. Для внутрішніх мікрооб'ємів структури характерна порівняно невисока щільність розподілу неметалевих включень.

У металі шва TiN формується неоднорідна бейнітно-мартенситна структура, яка містить близько 60 % верхнього бейніту, нижній бейніт (близько 20 %) та мартенсит (до 10 %). В зернах бейнітної структури спостерігаються частинки фазових виділень дисперсних розмірів карбідного типу при відносно однорідному розподілі. По межах феритних зерен спостерігається наявність ланцюжків фазових виділень, які є фазами карбонітридного типу TiCN, що повинно призводити до зниження рівня механічних властивостей і помітному зниженню тріщиностійкості зварного шва.

Метал шва TiO₂ характеризується нерівномірною бейнітно-мартенситною структурою при незначній її фрагментації. Бейнітна складова представлена переважно бейнітом верхнім (понад 50 %) і нижнім (близько 30 %). Вміст мартенситу не перевищує 10 %. У тілі бейнітних зерен струк-

тури проглядаються частинки фаз дисперсних розмірів карбідного типу, а також зустрічаються поодинокі фазові виділення типу оксидів титану більших розмірів.

Аналіз результатів дослідження. Вплив складу, вмісту та морфології неметалевих включень на структуру та механічні властивості низьколегованих сталей взагалі і металу зварних швів зокрема традиційно привертає велику увагу [1–3]. Зниження показників механічних властивостей, яке було отримано на зразках металу шва TiN, цілком відповідає опису впливу нітридів, який наведено в позначених монографіях. Звертає на себе увагу різниця в розподілі неметалевих включень в структурі металу досліджених швів. Металографічний аналіз показав, що певна кількість неметалевих включень в металі швів FeTi та TiN розташовані по границям феритних зерен, в той час як для структури швів TiC та TiO₂ характерним є переважний розподіл включень в тілі феритних зерен. Така особливість розподілу включень ілюстрована на рис. 2, де розташування неметалевих включень позначено стрілками.

Для з'ясування яким чином така особливість розподілу включень впливає на механічні властивості металу швів були проведені фрактографічні дослідження зламів зразків, які отримані при визначенні ударної в'язкості металу швів при температурі –40 °С. Результати досліджень показані на рис. 3.

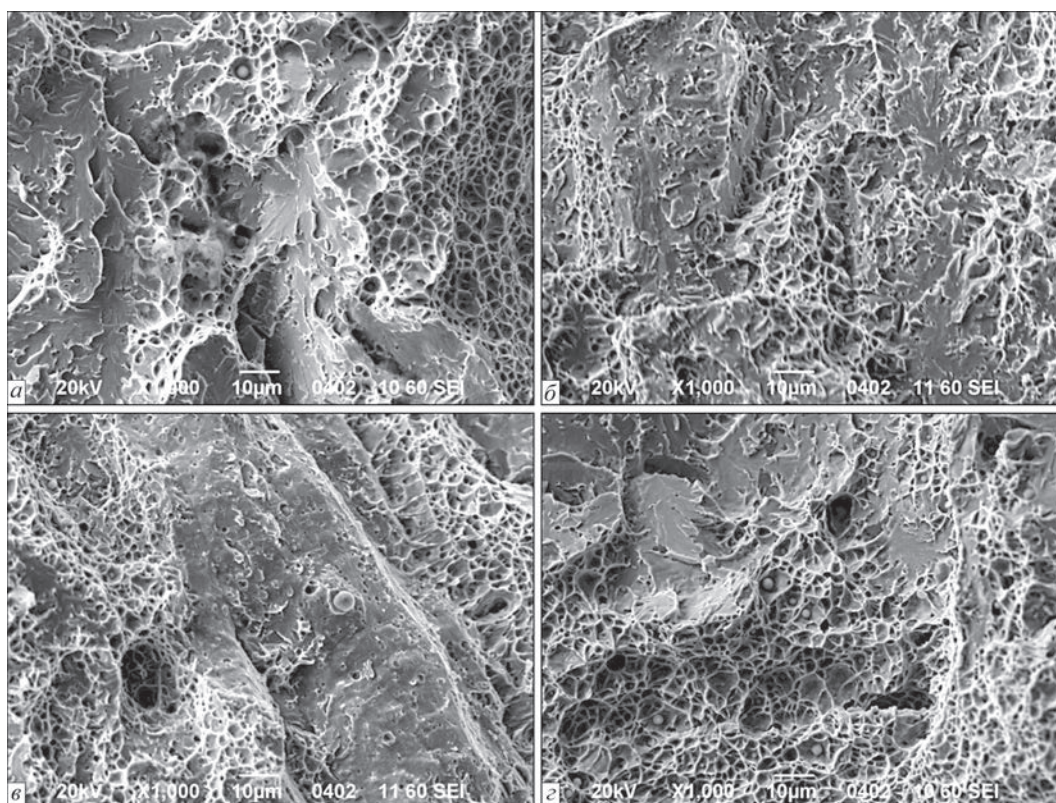


Рис. 3. Фрактографії зламів зразків: *a* – FeTi; *б* – TiC; *в* – TiN; *г* – TiO₂

З наведених даних видно, що дисперсні неметалеві включення, які розташовані на границях феритних зерен, слугують джерелами зародження тріщин типу крихкого сколу, як це видно на рис. 3, *a*, *в*. В тих випадках, коли більшість включень розташована в тілі феритних зерен (рис. 3, *б*, *г*), дисперсні включення не є центрами зародження крихких тріщин.

Визначення характеру розподілу неметалевих включень. Відповідно до сучасних уявлень, вплив неметалевих включень на схильність металу до крихкого руйнування пов'язано з ініційованими навколо них полями напруження. Однофазні включення, коефіцієнт термічного розширення яких нижче ніж у металевої матриці, сприяють формуванню більш високого рівня напружень порівняно з включеннями, що складаються з декількох шарів різних за складом. В тому разі, коли включення розташовані в металевій матриці на відстані одне від одного, яке перевищує радіус дії індукованого включенням напружень, їх вплив на схильність металу до крихкого руйнування менший порівняно з ситуацією, коли включення розташовані значно ближче. Виходячи з цих уявлень, відстань між включеннями є однією з важливих характеристик розподілу неметалевих включень в металі швів.

Методи комп'ютерної обробки оптичних зображень полірованої поверхні шліфів досліджених швів дають можливість отримати цифрову інформацію як до загального вмісту неметале-

вих включень в металі, так і до розподілу їх за розмірами (див. рис. 1). Ці дані дають уявлення про узагальнені характеристики включень, але не дозволяють виявити особливості їх розподілу в структурі металу швів. Інформація щодо загального вмісту неметалевих включень та характером їх розподілу за розміром не дають підстав для виявлення факторів, які зумовлюють різницю показників в'язкості та пластичності металу досліджених швів. Для вирішення цієї проблеми доцільно залучення методів фрактального аналізу неметалевих включень.

В роботі [6] було запропоновано спосіб фрактального аналізу структурних складових металу, який дозволяє визначити особливості щільності (відстані між сусідніми включеннями) розподілу неметалевих включень. Вплив включення на схильність до виникнення сколу в оточуючій металевій матриці залежить від рівня напружень, які виникають на міжфазній границі і від відстані до сусідніх включень. Виходячи з наведених міркувань були виконані роботи з фрактального аналізу зразків металу швів з метою визначення характеру їх розподілу відповідно до відстані до найближчих сусідніх включень. Результати досліджень наведено на рис. 4.

Як видно з наведених даних найвищу щільність розподілу включень мають шви FeTi та TiN. Саме ці шви характеризуються структурою, в якій відзначена підвищена присутність включень на границях феритних зерен (рис. 2) і це супрово-

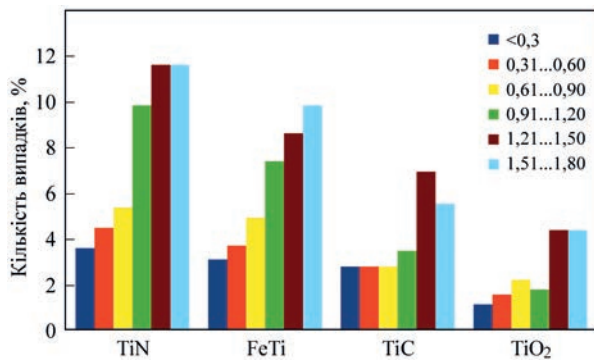


Рис. 4. Результати фрактального аналізу щільності розподілу неметалевих включень в метали швів (наведено відносна кількість випадків відстані між двома сусідніми включеннями (мкм) в означеному розмірному діапазоні відстані (мкм))

джується зниженням показників в'язкості і пластичності (табл. 2). При цьому слід відзначити, що більш висока щільність розподілу включень в металі шва TiN супроводжується і більш низьким рівнем показників в'язкості та пластичності.

В металі швів TiC та TiO₂ кількість випадків з підвищеною щільністю розподілу включень помітно менша, що може слугувати поясненням більш високого рівня відповідних показників.

Отримані результати свідчать, що поєднання таких двох факторів, як присутність неметалевих включень на границях зерен і підвищена щільність їх розподілу призводить до зниження показників в'язкості та пластичності металу зварних швів ВМНЛ сталей.

Висновки

Проведено комплекс робіт з встановлення характеру розподілу неметалевих включень в структурі

металу низьколегованих зварних швів. В результаті виконання металографічних досліджень встановлено показники об'ємного вмісту включень в структурі, розподіл їх за розмірами. Показана доцільність використання такого додаткового показника як щільність розподілу включень при оцінюванні їх впливу на механічні властивості металу швів. Запропоновано використання фрактального аналізу для виявлення особливостей впливу неметалевих включень на механічні показники металу швів ВМНЛ сталей з врахуванням щільності розподілу включень.

Список літератури/References

1. Liu, S., Olson, D.L. (1987) The influence of inclusion chemical composition on weld metal microstructure. *Journal of Materials Engineering*, **9**, 237–251.
2. Lienert, T.J., Babu, S.S., Siewert, T.A. (2011) *Solid-State Transformations in Weldments*. In the ASM Handbook®. Welding Fundamentals and Processes, V.L. Acoff (ed.), 6A, ASM International®, Materials Park, 133–135.
3. Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R.W.K. (2006) *Steels: Microstructure and Properties*. 3rd edition: Elsevier Ltd.
4. Kang, Y. et al. (2014) Influence of Ti on nonmetallic inclusion formation and acicular ferrite nucleation in high strength low alloy steel weld metals. *Metals and Materials International*, **20**(1), 119–127.
5. Holovko, V.V., Yermolenko, D.Yu., Stepanyuk, S.M. et al. (2020) Influence of introduction of refractory particles into welding pool on structure and properties of weld metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 1–7.
6. Штофель О., Короленко Д. Головко В. (2023) Комп'ютеризація процесу обрахунку параметрів неметалічних включень в металі. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. Stockholm, Sweden*, 423–434. DOI: 10.46299/ISG.2023.1.7

Shtofel, O., Korolenko, D., Holovko, V. (2023) Computerization of calculation process of nonmetallic inclusion parameters in metal. In: *Proc. of the VII Int. Sci. and Pract. Conf. Stockholm, Sweden*, 423–434. DOI: 10.46299/ISG.2023.1.7

INFLUENCE OF THE NATURE OF DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELD METAL OF LOW-ALLOY STEELS

V.V. Holovko¹, O.O. Shtofel¹, D.Yu. Korolenko²

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

E-mail: v_golovko@ukr.net

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine

A complex of works was carried out on establishing the nature of distribution of non-metallic inclusions in the structure of metal of low-alloy welds. As a result of metallographic examinations, the values of the volume content of inclusions in the structure and their distribution by sizes were established. The rationality of using such an additional indicator as the distribution density for a more informative description of non-metallic inclusions when evaluating their influence on the mechanical properties of weld metal was shown. The use of fractal analysis to reveal the features of the distribution density of non-metallic inclusions in the weld metal was proposed. 6 Ref., 4 Fig.

Keywords: welds, microstructure, non-metallic inclusions, distribution density, tendency to brittle fracture, fractal analysis

Надійшла до редакції 06.03.2023



VII Міжнародна конференція
«Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи
діагностування і прогнозування»

Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя

18–20 жовтня 2023 р.

<https://dmdp.tntu.edu.ua/>