

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО ТА МЕТАЛОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ

О.О. Штофель^{1,2}, В.В. Головка¹, Т.Г. Чижська²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

При аналізі чинників, які визначають механічні властивості зварних швів, необхідно враховувати як розмір окремих складових структури, так і їх морфологію. Показано, що використання методу фрактального аналізу дає можливість числового визначення таких параметрів мікроструктури металу зварних швів, як розмір неметалевих включень, розгалуженість меж зерен, що було неможливим при аналізі металографічних зображень. Отримано результати, які свідчать про необхідність залучення до мультифрактального аналізу показників, що описують морфологічні особливості мікроструктурних складових, розподіл неметалевих включень за розміром, рівень легування твердого розчину. Визначено напрямки досліджень для розвитку мультифрактального аналізу зварних з'єднань. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 6

Ключові слова: метал зварних з'єднань, фрактальний та металографічний аналізи, параметри структури, механічні характеристики

Загальною задачею металографічного аналізу є дослідження структури та дефектів, зокрема, таких як включення, основного металу та наплавленого металу зварного з'єднання. Металографічний аналіз включає дослідження макро- та мікроструктури металів. Останнім часом цей перелік було доповнено методом фрактального аналізу [1]. У роботах [2–5] авторами описана причина використання та застосування методу фрактального аналізу, базуючись на відомих в різних наукових сферах поняттях фракталів. Основною метою використання фракталу у сфері металознавства є встановлення зв'язку в системі «структура–склад–фрактальна/мультифрактальна розмірність–властивості». Із використанням описаних вище підходів у роботі [6] було описано один із етапів пошуку зв'язків між результатами фрактального аналізу з даними еталонної шкали структурних складових в металі зварних швів низьколегованої сталі. Було показано існування зв'язків «фрактальна розмірність–розмір зерна», «фрактальна розмірність–структурні параметри».

У даній роботі описано застосування методу фрактального аналізу до аналізу структури зразків металу зварних швів. За допомогою металографічного дослідження можна встановити параметри, які впливають на якість металу, в тому числі виявити певні дефекти металу, наявність оксидів по межах зерен, «забрудненість» неметалевими включеннями, величину зерен металу, хімічний склад металу швів, присутність мікроскопічних тріщин, пор та інші дефекти структури. Для того, щоб встановити зв'язок між структурним складом ме-

талу та його механічними властивостями, необхідно провести кількісний опис структурного комплексу, тобто, виконати його параметризацію. На сьогоднішній день опис структур в металознавстві базується на їх приближеному уявленні в вигляді геометричних об'єктів певних розмірів. При цьому використовують параметри, що характеризують окремі елементи структури, а не структуру в цілому. Тобто оцінюють розмір зерен структури, блоків, неметалевих включень, але не дають відповіді як сума цих показників впливає на властивості металу.

Металографічний аналіз є одним із методів контролю зварних з'єднань, його зазвичай проводять при кінцевому контролі вже готових зварних з'єднань. Готове з'єднання має повністю задовольняти експлуатаційні вимоги. Сумарна затрата трудомісткості усіх контрольних операцій в середньому займає 30 % від загальної трудомісткості виготовлення зварної металевої конструкції. Дослідникам добре відомо, що неможливо описати вплив структури на механічні властивості сталі тільки на базі визначення геометричних показників структурних зерен. Обов'язково потрібно враховувати як параметри границь зерен, так і неметалевих включень. Поєднати в одному аналізі показники зеренної структури, зеренних границь та неметалевих включень можливо тільки з використанням методів фрактальної параметризації та мультифрактального аналізу металу. Зокрема, роботи з використання фрактального аналізу результатів параметрів неметалевих включень, які містилися в зварних швах, на механічні властивості металу [7], дозволили провести співставлення

значень фрактальної розмірності із показниками руйнування структури металу швів [8].

Схема будови структури металу зварних швів (рис. 1) складається з чотирьох основних зон. Перша зона – основний метал (4), структура якого була сформована в процесі виготовлення листового прокату і не зазнала термічного впливу.

На границі контакту розплавленого металу (2) зварювальної ванни з основним металом вздовж лінії сплавлення у тонкому шарі металу виникає різкий градієнт температур і явище переохолодження, що призводить до виникнення великої кількості центрів кристалізації, внаслідок цього шар має дрібнозеренну будову. Зона основного металу (3), яка зазнала термічного впливу від зварювальної ванни та зварювальної дуги, це зона стовпчастих кристалів. В самому металі шва (1) умови тепловідведення і ступінь переохолодження сталі з часом змінюються. В результаті структура металу шва містить як стовпчасти кристали, так і рівновісні кристали. Метал зварного з'єднання відноситься до матеріалів, які піддаються енергетичному впливу під час виготовлення чи обробки. Наявність зв'язків між елементами у відкритій системі зумовлює формування колективної відповіді на зовнішній вплив зварювальної дуги. В результаті такої реакції в металі формується структура, яка відповідає певній просторовій, часовій або просторово-часовій самоорганізації, що викликає, в свою чергу, зміни властивостей металу в цілому (рис. 2).

Для опису структури металу зварних швів традиційно використовують методи оптичної та електронної металографії. Такі підходи є недостатніми при описі систем зі складною і неоднорідною структурою, якими є структури металу зварних швів в зв'язку з тим, що вони не враховують одну

з найважливіших якостей систем – цілісність. Одним з перспективних шляхів вирішення завдання кількісного опису структур матеріалів є їх параметризація, заснована на використанні теорії фракталів.

Дослідження параметрів структури металу зварного з'єднання методом фрактального аналізу дає можливість отримати певний набір даних стосовно фрактальної розмірності для зони 1, 2, 3 та 4. Ці значення складаються в одне загальне поняття мультифрактала, який, в свою чергу, є неоднорідним фракталом, а отже, кожна із складових мультифрактала має свою певну зваженість.

Для вивчення зв'язку між фрактальними параметрами структури і механічними властивостями металу швів були проведені дослідження на зразках металу швів низьколегованої високоміцної сталі. У процесі експерименту досліджували ударну в'язкість металу при різних температурах (від 20 до –40) на зразках зварних швів, які були отримані при зварюванні стикових з'єднань сталі 09Г2 дротом Св-08ГНМА в середовищі захисного газу М21. В ході експериментів визначали вплив модифікування зварювальної ванни на структури та властивості металу швів. Модифікування зварювальної ванни виконували за методикою, наведеною в роботі [9]. Результати спектрального аналізу металу зварних швів, наведені в табл. 1, свідчать, що за хімічним складом метал швів відповідає категорії міцності сталі К60. Із зварних швів вирізали зразки для металографічного дослідження із зон зварного з'єднання 1–4, які показано на рис. 1. При металографічних дослідженнях визначали параметри неметалевих включень та структурних складових. Результати металографічного аналізу зразків на мікроскопі НЕОРНОТ-32 при збільшеннях $\times 1000$ та $\times 320$ фіксували зі застосуванням цифрової фотокамери (рис. 3).

Для підтвердження стохастичності фрактальних функцій, які описують вплив розмірностей структурних складових при оцінюванні показників механічних властивостей зварних швів, використовували зображення структури при різних збільшеннях.

Фрактальний аналіз структурних складових виконували на основі методики, наведеної

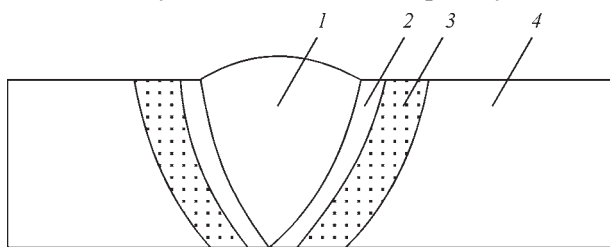


Рис. 1. Схема будови структури металу зварних швів: 1 – зварний шов; 2 – зона сплавлення; 3 – зона термічного впливу (ЗТВ) зварювання; 4 – основний метал

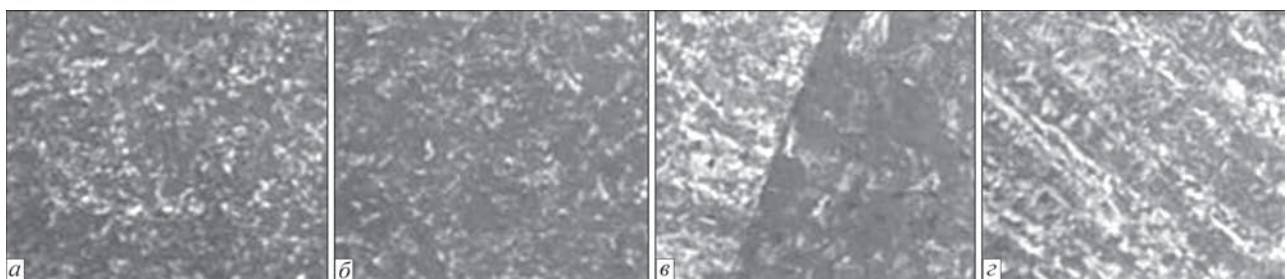


Рис. 2. Схема структури зварного з'єднання низьколегованої сталі: а – основного металу; б – зони перегріву; в – на лінії сплавлення; г – металу шва

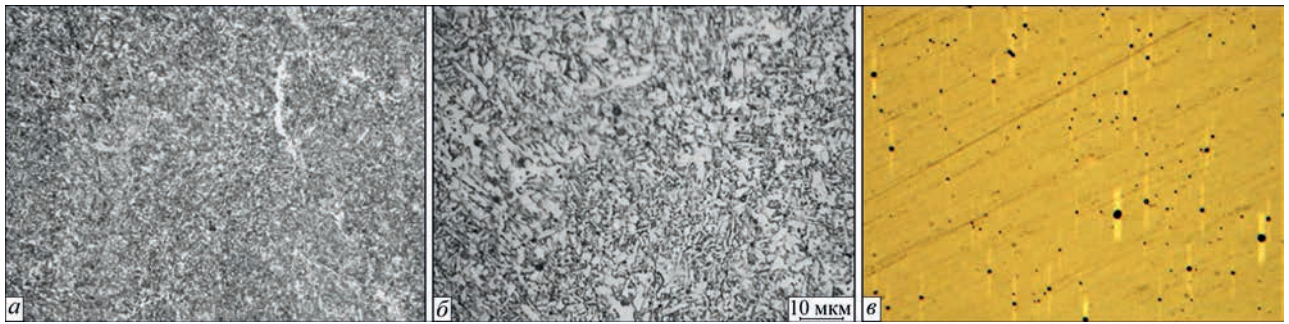


Рис. 3. Типові мікроструктури зварних швів: а – ×320; б – ×1000; в – неметалеві включення, ×1000

Таблиця 1. Хімічний склад металу досліджених швів (наплавлений метал), мас. %

Номер шва	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Модифікатор
W1	0,054	0,263	1,28	0,025	0,011	0,13	2,22	0,26	0,035	0,009	TiC
W2	0,035	0,317	1,40	0,019	0,009	0,14	2,29	0,26	0,036	0,011	TiN
W3	0,066	0,270	0,92	0,016	0,024	0,14	1,72	0,23	0,021	0,005	SiC
W4	0,035	0,405	1,24	0,016	0,021	0,11	1,97	0,27	0,031	0,027	TiO ₂
W5	0,034	0,324	1,12	0,017	0,023	0,12	2,15	0,29	0,032	0,025	Al ₂ O ₃

в роботі [10]. В якості бази даних використовували результати числової обробки зображень, які були отримані при металографічному аналізі зразків на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ-32. Визначали фрактальний показник неметалевих включень в металі швів на зображеннях зі збільшенням ×1000 ($D_{вкл}$), а також розгалуженість границь зерен при збільшенні ×320 (D_{320}) та ×1000 (D_{1000}). Крім того, в табл. 2 наведено результати визначення співвідношення $D_{1000}/D_{вкл}$ як приклад мультифрактального аналізу. Результати фрактального аналізу та ударної в'язкості металу зварних швів при випробуванні в діапазоні температур від 20 до -40 °С наведені в табл. 2.

З наведених в табл. 2 даних перш за все треба звернути увагу на близькість показників D_{320} і D_{1000} (різниця менше 10 %), що свідчить про стохастичність фрактальної залежності і можливість її використання для оцінювання структури металу зварних швів в цілому.

Для візуалізації можливості використання окремих показників фрактальної розмірності (у вигляді відносних одиниць) для оцінювання механічних властивостей металу за результатами випробувань на ударний вигин були побудовані графіки взаємозв'язку між ударною в'язкістю і фрактальною розмірністю включень (рис. 4) та залежність між ударною в'язкістю і фрактальною

Таблиця 2. Результати механічних випробувань металу швів досліджуваних зразків та результати, отримані методом фрактального аналізу

Номер шва	$D_{вкл}$	D_{320}	$\frac{D_{1000}}{D_{вкл}}$	D_{1000}	$KCV, Дж/см^2$ при $T, ^\circ C$			
					20	0	-20	-40
W1	0,928	1,902	0,488	1,877	112	93	85	73
W2	0,91	1,938	0,469	1,939	55	47	40	33
W3	0,907	1,941	0,467	1,932	85	72	65	61
W4	0,920	1,907	0,483	1,815	85	72	60	50
W5	0,919	1,897	0,485	1,825	82	58	50	36

розмірністю меж зерен в мікроструктурі металу швів (рис. 5).

Обговорення отриманих результатів. Використання методу фрактального аналізу дає можливість числового визначення таких параметрів мікроструктури металу зварних швів як розмір неметалевих включень, розгалуженість меж зерен, що було неможливим при аналізі металографічних зображень (рис. 3).

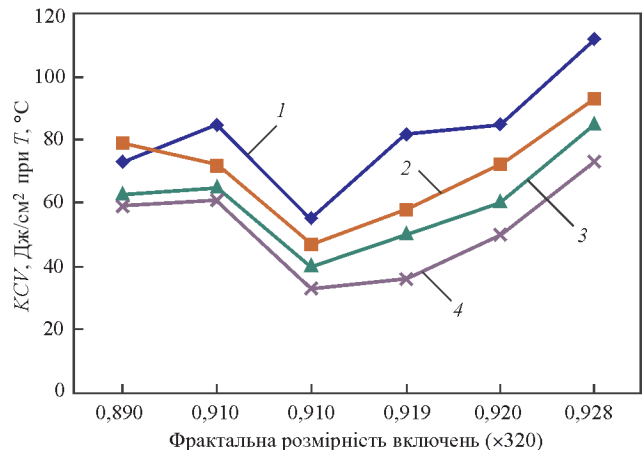


Рис. 4. Взаємозалежність між ударною в'язкістю та фрактальною розмірністю розмірів включень в металі швів при температурі: 1 – 20; 2 – 0; 3 – -20; 4 – -40 °С

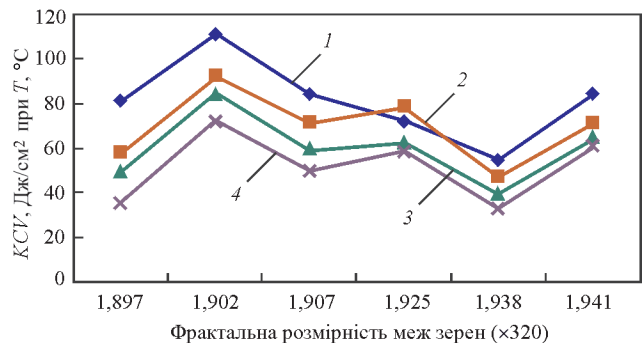


Рис. 5. Взаємозалежність між ударною в'язкістю та фрактальною розмірністю меж зерен в мікроструктурі металу швів при температурі: 1 – 20; 2 – 0; 3 – -20; 4 – -40 °С

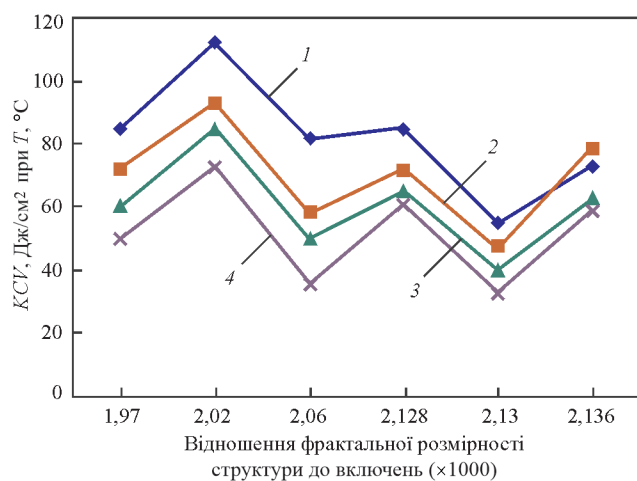


Рис. 6. Взаємозалежність між ударною в'язкістю та відношенням фрактальної розмірності меж зерен та розмірів включень в мікроструктурі металу швів при температурі: 1 – 20; 2 – 0; 3 – –20; 4 – –40 °C

Рівень ударної в'язкості є акумулюючим показником, на який впливають не тільки об'ємна частка неметалевих включень в металі, але також їх розподіл за розміром, рівень однорідності в структурі. При аналізі чинників, які визначають механічні властивості зварних швів, необхідно враховувати як розмір окремих складових структури, так і їх морфологію. Отримані результати показують, що зі збільшенням фрактального розміру неметалевих включень (тобто зі зменшенням розміру включень) підвищується рівень ударної в'язкості металу (рис. 4). Зниження розгалуженості міжзерених границь впливає на зниження цього показника, незважаючи на присутність в структурі досить дрібних включень (рис. 5).

Наведені на рис. 4–6 залежності, а також результати початкового мультифрактального обчислення (рис. 6) дають дуже загальне уявлення щодо впливу як неметалевих включень, так і меж зерен на механічні властивості металу зварних швів. Ці результати свідчать про необхідність залучення до мультифрактального аналізу показників, які описують морфологічні особливості мікроструктурних складових, розподіл неметалевих включень за розміром, рівень легування твердого розчину.

Означені напрямки є основними завданнями для розвитку комп'ютеризації металографічних досліджень на базі мультифрактального аналізу.

Висновок

Показано стохастичний характер фрактального аналізу мікроструктури металу зварних швів. Наведено приклади визначення показників фрактальності розмірів неметалевих включень та меж зерен в структурі металу зварних швів. Встановлено необхідність застосування мультифрактального аналізу для опису впливу параметрів структури на механічні властивості зварних швів. Визначено напрямки досліджень для розвитку мультифрактального аналізу зварних з'єднань.

Список літератури

1. Shtofel, O., Golovko, V., Chyzhska, T. (2021) *Фрактальний та металографічний аналізи як інноватика у забезпеченні якості металевої продукції. Innovative «Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes»*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach, pp. 1013–1018. (ISBN 978-83-957298-6-7)
2. Кіріченко Л.О., Радівілова Т.А. (2019) *Фрактальний аналіз самоподібних і мультифрактальних часових рядів*. Харків, ХНУРЕ.
3. Хакен Г. (1980) *Синергетика*. Москва, Мир.
4. Николіс Г., Пригожин І. (1979) *Самоорганізація в неравновесних системах. От диссипативних структур к упорядоченности через флуктуации*. Москва, Мир.
5. Мандельброт Б. (2009) *Фрактали и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса*. Бенуа Мандельброт. Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».
6. Штофель О.О. (2019) Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу. *Metalozn. obrobka met.*, 91, 3, 40–46.
7. Shtofel, O.O., Chizhskaya, T.G., Kulieznova, S.S. (2020) Metallographic studies of vessel steel samples: ДС, 35Г/40Г and steel 20 by fractal analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 6, 2. ISSN: 2458-925X
8. Штофель О.О., Рабкина М.Д. (2019) Застосування методу фрактального аналізу до вивчення зміни властивостей металу. *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, 58(2). ISSN (Online) 2663-3450, ISSN (Print) 0321-2211
9. Голово В.В., Кузнецов В.Д., Фомічов С.К., Лобода П.І. (2016) *Нанотехнології у зварюванні низьколегованих високоміцних сталей*. Київ, Політехніка.
10. Пояркова Е.В. (2019) *Фрактальный анализ в диагностике структур материалов: методические указания*. Оренбург, Оренбургский гос. ун-т.

References

1. Shtofel, O., Golovko, V., Chyzhska, T. (2021) *Fractal and metallographic analyses as an innovation in ensuring the quality of metal products. Innovative «Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes»*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach, 1013–1018. (ISBN 978-83-957298-6-7).
2. Kirichenko, L.O., Radivilova, T.A. (2019) *Fractal analysis of self-similar and multifractal hour series*. Kharkiv, KhNURE [in Ukrainian].
3. Haken, G. (1980) *Synergetics*. Moscow, Mir [in Russian].
4. Nikolis, G., Prigozhin, I. (1979) *Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuation*. Moscow, Mir [in Russian].
5. Mandelbrot, B. (2009) *Fractals and chaos. Mandelbrot set and other wonders*. Benoit Mandelbrot. Izhevsk, RDC “Regular and chaotic dynamics [in Russian].
6. Shtofel, O.O. (2019) Application of fractal analysis method to study the metal structure. *Metalozn. Obrobka Met.*, 91(3), 40–46 [in Ukrainian].
7. Shtofel, O.O., Chizhskaya, T.G., Kulieznova, S.S. (2020) Metallographic studies of vessel steel samples: DS, 35G/40G and steel 20 by fractal analysis. *J. of Multidisciplinary Engineering Sci. Studies (JMESS)*, 6, 2. ISSN: 2458-925X
8. Shtofel, O.O., Rabkina, L.M. (2019) Application of fractal analysis method to study the change of metal properties. *Visnyk KPI, Seriya Pryladobuduvanniya*, 58(2) [in Ukrainian]. ISSN (Online) 2663-3450, ISSN (Print) 0321-2211
9. Holovko, V.V., Kuznetsov, V.D., Fomichov, S.K., Loboda, P.I. (2016) *Nanotechnologies in welding of low-alloy high-strength steels*. Kyiv, Politekhnikha [in Ukrainian].
10. Poyarkova, E.V. (2019) *Fractal analysis in diagnostics of the structures of materials: Procedural recommendations*. Orenburg, Orenb. State University [in Russian].

APPLICATION OF FRACTAL AND METALLOGRAPHIC ANALYSES FOR EVALUATION OF QUALITY OF WELDS METAL

O.O. Shtofel^{1,2}, V.V. Holovko¹, T.G. Chyzhska²¹E.O. Paton Electric Welding Institute. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150 Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua²NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohi Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine.

When analyzing the factors that determine the mechanical properties of welds, it is necessary to take into account both the size of individual components of the structure and their morphology. It is shown that the use of the method of fractal analysis makes it possible to numerically determine such parameters of weld metal microstructure, as the size of non-metallic inclusions, and branching of grain boundaries, which was impossible at analysis of metallographic images. The results are obtained, which indicate the need to include in the multifractal analysis the characteristics that describe the morphological features of microstructural components, the distribution of non-metallic inclusions by size, and the level of doping of the solid solution. Research directions for the development of multifractal analysis of welded joints have been identified. 10 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: metal of welded joints, fractal and metallographic analyses, structural parameters, mechanical characteristics

Надійшла до редакції 30.03.2021



МІЖНАРОДНА ВИСТАВКА-ЯРМАРКА SCHWEISSEN & SCHNEIDEN ВІДБУДЕТЬСЯ 11–15 ВЕРЕСНЯ 2023

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN не відбудеться у 2021 р. Нова дата проведення провідної міжнародної виставки для з'єднання, різання та нанесення покриттів перенесена на 11-15 вересня 2023 р. Компанії та особи, які приймають рішення з усього світу, зустрінуться у Messe Essen, щоб обмінятися інформацією про останні інновації, послуги та результати досліджень у цій важливій галузі економіки. Спочатку запланована дата на вересень цього року ярмарка була неможливою з огляду на поточні рамкові умови. Це тому, що учасникам та організаторам провідної виставки у світі, яка нещодавно залучила близько 50000 відвідувачів, потрібні надійність планування та час на виконання.

«SCHWEISSEN & SCHNEIDEN збирає відвідувачів з більш ніж 120 країн», – говорить Олівер Курт, керуючий директор Messe Essen. «З огляду на поточні обмеження на поїздки, ми не зможемо задовольнити вимоги провідної світової виставки-ярмарки в цьому році. До цього додається проблема часу – кілька місяців для наших експонентів, які представляють складне високотехнологічне обладнання на детально розроблених стендах торгової ярмарки.

Цю оцінку також поділяє Конрад Мор, директор підрозділу ринку, кластер Центральної Європи в Air Liquide: «Зазвичай ми починаємо планувати та координувати свою участь у виставці більш ніж за рік наперед і вкладаємо багато зусиль у презентацію своєї продукції та послуги для широкої аудиторії. Ці зусилля винагороджуються зустрічами під час проведення SCHWEISSEN & SCHNEIDEN з національними та міжнародними керівними органами, яких ми зустрічаємо там лише в такій кількості та якості. Проведення ярмарку цього року неминуче було б пов'язано із значними обмеженнями, які ми також накладаємо на себе як на групу, щоб зупинити пандемію. Нова дата забезпечує нас і галузь безпекою та підтримує якісні обіцянки SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Я впевнений, що і те, і інше позитивно позначиться на виставці та галузевих зустрічах».

Промисловість чекає SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Про важливість провідної виставки у світі свідчить той факт, що багато компаній розробляють свої іннова-

ції після циклу SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Тому нова дата події 2023 р. є важливим сигналом для галузі. Доктор-інж. Роланд Бокінг, керуючий директор Німецького зварювального товариства, каже: «Компанії, постачальники послуг та дослідницькі установи потребують SCHWEISSEN & SCHNEIDEN для презентації своєї продукції та послуг особам, що приймають рішення в галузі. Це тим більше вірно після викликів, пов'язаних з пандемією. Ми з нетерпінням чекаємо нової дати і тим часом пропонуємо більше можливостей для спілкування».

Саміт SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Хоча провідна виставка-ярмарок не може відбутися у своєму звичному міжнародному вигляді цього вересня, принаймні національна галузь може сподіватися на захоплюючу програму. Саміт SCHWEISSEN & SCHNEIDEN запланований як захід присутності в Messe Essen, запропонує три професійні зустрічі в період з 14 по 17 вересня 2021 р. Це DVS CONGRESS та Grosse Schweißtechnische Tagung, а також DVS CAMPUS. Одночасно чотири комітети DVS зберуться на свої засідання в Messe Essen. Програму конференції завершить супровідна виставка.

Підготовка до 2023 р. в самому розпалі. Тим часом попередні плани щодо SCHWEISSEN & SCHNEIDEN продовжуються безперервно. Зовсім недавно провідна виставка у світі вразила галузь: у 2017 р. 1030 експонентів з 41 країни представили свої новітні технології з'єднання, різання та нанесення покриттів. 94 відсотки із загальної кількості 50000 відвідувачів із 120 країн вже заявили, що також відвідають майбутню виставку.

«Немає сумнівів, що ми воліли б встановлювати ділові контакти та будувати відносини в SCHWEISSEN & SCHNEIDEN цього року, а не в 2023 р. Однак ця нова дата надає галузі розумну перспективу і дозволяє нам розпочати планування ярмарку», – каже Йохан Франссон, керуючий директор у Європі, ESAB Europe GmbH, підсумовуючи очікування наступної ярмарки SCHWEISSEN & SCHNEIDEN.

www.schweissen-schneiden.