

# РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЗА РОЗМІРАМИ В МЕТАЛІ ЗВАРНИХ ШВІВ

Л.А. Тараборкін, В.В. Головка

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Існує велика кількість досліджень впливу розподілу неметалевих включень в металі зварного шва на його структуру і механічні властивості. Однак, автори цих робіт не дають опису кінетики формування такого розподілу. В роботі наведено результати розробки моделі розподілу в металі зварних швів неметалевих включень за розмірами. Формування розрахункової частини моделі побудовано на базі обробки експериментальних даних щодо розмірів неметалевих включень у металі зварних швів, наплавлених методами зварювання під флюсом і в середовищі захисного газу. Узагальнення і аналіз експериментальних даних показали, що кінцевий розподіл включень за розмірами в металі досліджених швів підкорюється закону гамма-розподілу (ймовірність > 95 %). Авторами запропоновано для опису еволюції розподілу неметалевих включень під час утворення зварного шва застосувати ймовірнісну модель у вигляді гамма-розподілу із залежними від часу параметрами. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 3.

*Ключові слова:* низьколегована сталь, зварювання, метал шва, неметалеві включення, розподіл

Неметалеві включення є невід'ємною складовою структури металу зварних швів. Такі їх характеристики як хімічний склад, розміри, щільність розподілу в твердому розчині справляють суттєвий вплив на механічні властивості металу швів, що визначає актуальність можливості їх прогнозування. У зв'язку з постійно зростаючим обсягом використання низьколегованих високоміцних сталей при виготовленні металоконструкцій багато уваги в останні роки приділяється дослідженню можливостей забезпечення механічних властивостей зварних з'єднань на сталях цього типу на рівні основного металу. Було показано суттєвий вплив на умови формування мікроструктури і механічних властивостей металу швів з боку неметалевих включень [1–4], які впливають на процеси кристалізації, утворення первинної та вторинної мікроструктури, але при цьому паралельно відбувається зміна параметрів їх розміру, щільності розподілу, складу і поверхневих сполук. У металі зварного шва зафіксовано кінцевий результат процесів формування неметалевих включень (розкислення рідкого металу, кристалізація зварювальної ванни, дифузія в твердому розчині), які відбуваються в різних температурних діапазонах. Інтенсивність розвитку кожного з етапів цих процесів впливає на кінцевий розподіл неметалевих включень. Так, наприклад, в роботі [5] показано, що час існування рідкої фази при охолодженні металу справляє суттєвий вплив на розміри включень, тому для прогнозування характеристик включень необхідно враховувати не тільки хімічний склад зварювальної ванни, але і час її існування. Слід зауважити, що незважаючи на велику кількість робіт, в яких відзначено вплив скла-

ду, морфології та розмірів неметалевих включень на структуру і механічні властивості металу швів, питанню впливу щільності розподілу включень залежно від їх розміру приділено недостатньо уваги.

**Стан проблеми.** Розподіл неметалевих включень у металах за розмірами чисельно характеризують за допомогою функції щільності розподілу, яку в загальному випадку визначають, розв'язуючи рівняння Смолуховського [6]. Однак, оскільки процеси укрупнення неметалевих включень є доволі складними в будь-якій металургійній системі, то для такого розв'язання доводиться вводити додаткові припущення щодо умов і характеристик відповідного процесу, які не завжди споряджені необхідними чисельними значеннями параметрів або взагалі не піддаються перевірці. Наприклад, у згаданій роботі [6] список зазначених припущень налічує 19 пунктів. Тому використовують інший, розрахунково-експериментальний підхід, а саме: базуючись на великому масиві накопичених експериментальних даних, намагаються наблизити експериментально спостережені розподіли неметалевих включень за розмірами певними відомими математичними функціями розподілів.

Зокрема, у роботах [7, 8] зазначено, що розподіл неметалевих включень за розмірами для деяких нестационарних металургійних процесів можна вважати постійним експоненціальним розподілом і описати формулою

$$n(r) = n_0 \exp(-r), \quad r_0 < r < r_{\max}, \quad (1)$$

де параметри  $n_0$ ,  $\lambda$  залежать від конкретних умов і обладнання, а включення мають форму сфери з поточним радіусом  $r$ .

Головка В. В. – <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>

© Л.А. Тараборкін, В.В. Головка, 2021

Формула (1) придатна у випадку таких металургійних процесів виробництва сталі як циркуляційне вакуумування, вакуумне рафінування, безперервне розливання, ковшова обробка. Для цих процесів значення  $\lambda$  знаходяться в діапазоні від 0,44 до 0,75 для радіусів неметалевих включень від 1 до 30 мкм [7].

Відомо, що як самі розміри неметалевих включень, так і щільність їх розподілу за розмірами залежать від тривалості процесів формування включень [8–10].

Процес формування неметалевих включень у зварювальній ванні суттєво відрізняється як за своїми термодинамічними, та і фізико-хімічними характеристиками від відповідних процесів «великої» металургії. Можна відзначити певні спроби щодо чисельного оцінювання тенденцій у зміні щільності неметалевих включень залежно від їхніх розмірів [11], проте загалом на сьогодні в науково-технічній літературі відсутні описи моделей для розрахунку розподілу включень у металі зварних швів за розміром, які б дозволяли виконувати відповідні чисельні прогнози, хоча актуальність можливості таких прогнозів безсумнівна.

**Методика роботи.** Цифрові знімки поверхні нетравлених шліфів були отримані на оптичному мікроскопі NEOPHOT–30 за допомогою цифрової фотокамери високої розподільчої здатності. Далі знімки оброблялися з метою збільшення точності подальшого розпізнавання неметалевих включень за допомогою спеціального програмного забезпечення (був застосований фільтр Гаусса [12]). Розмір кожного знімка складає 2592 на 1944 пікселів. Оброблені знімки піддавалися розпізнаванню за допомогою спеціального програмного забезпечення (пробна версія Media Cybernetics ImagePro, доступна на сайті виробника <http://www.mediacy.com/>). За цією методикою визначали об'ємний вміст ( $V_{\text{вв}}$ ) та розподіл за розмірами неметалевих включень в металі швів.

Розгляд характеру розподілу неметалевих включень було розпочато з моделі (1), знайденої для процесів виробництва сталей. Значення параметра  $n_0$  для умов існування зварювальної ванни можна визначити, виходячи з закону збереження речовини на основі таких міркувань:

Кількість кисню у включенні радіуса  $r$  і густини  $\rho_{\text{inc}}$  дорівнює  $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{inc}} X_o$ , де  $X_o$  – масова частка кисню у включенні. Тоді, відповідно до виразу (1), кількість кисню у включеннях радіуса  $r$  дорівнюватиме

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{inc}} X_o n(r) = \frac{4}{3}\pi \rho_{\text{inc}} X_o n_0 e^{-\lambda r} r^3.$$

Отже, загальна кількість кисню, що міститься у включеннях радіусом від  $r_{\text{min}}$  до  $r_{\text{max}}$  визначається інтегралом

$$\frac{4}{3}\pi \rho_{\text{inc}} X_o n_0 \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr. \quad (2)$$

З іншого боку, позначивши через  $\rho_s$  густину розплавленої сталі, а через  $w_o$  – вміст кисню у включеннях на одиницю маси розплавленого металу, зазначену кількість кисню у включеннях можна оцінити добутком  $\rho_s w_o$ , який, за законом збереження речовини, маємо прирівняти до виразу (2):

$$\frac{4}{3}\pi \rho_{\text{inc}} X_o n_0 \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr = \rho_s w_o.$$

Із останньої рівності отримуємо вираз для параметра  $n_0$ :

$$n_0 = \frac{3\rho_s w_o}{4\pi \rho_{\text{inc}} X_o \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr}. \quad (3)$$

Щоб спростити роботу з виразом (3), наслідуючи роботу [12], можна замінити в ньому  $w_o$  на  $[O\%]$ , тобто загальну кількість кисню в розплавленому металі. Така заміна означає, що подальші результати щодо кількості включень фактично даватимуть верхню межу чисельної оцінки.

Крім цього, інтеграл у знаменнику дробу з виразу (3) можна підрахувати точно, оскільки за [13]

$$\int x^3 e^{ax} dx = e^{ax} \left( \frac{x^3}{a} - \frac{3x^2}{a^2} + \frac{6x}{a^3} - \frac{6}{a^4} \right),$$

звідки випливає, що

$$\begin{aligned} \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 e^{-\lambda r} dr &= \frac{1}{\lambda} \left[ \exp(-\lambda r_{\text{max}}) r_{\text{max}}^3 - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) r_{\text{min}}^3 \right] - \\ &- \frac{3}{\lambda^2} \left[ \exp(-\lambda r_{\text{max}}) r_{\text{max}}^2 - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) r_{\text{min}}^2 \right] + \\ &+ \frac{6}{\lambda^3} \left[ \exp(-\lambda r_{\text{max}}) r_{\text{max}} - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) r_{\text{min}} \right] - \\ &- \frac{6}{\lambda^4} \left[ \exp(-\lambda r_{\text{max}}) - \exp(-\lambda r_{\text{min}}) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Зважаючи на те, що значення найменшого та найбільшого радіусів включень відрізняються щонайменше на порядок, для отримання простої наближеної чисельної оцінки можна додатково замінити у виразі (3) скінченний інтеграл на нескінченний на інтервалі (від 0 до  $\infty$ ), тоді, відповідно до [13]:

$$\int_0^{\infty} r^3 e^{-\lambda r} dr = \frac{6}{\lambda^4}$$

і, отже,

$$n_0 = \frac{1}{8\pi} \frac{\rho_s [O\%]}{\rho_{inc} X_o} \lambda^4. \quad (5)$$

Відносна похибка обчислення за формулою (5) становить менше 2,4 % порівняно з обчисленням за точною квадратурою (4).

**Отримані результати.** З метою перевірки придатності моделювання розподілу за формулою (1) були виконані експериментальні дослідження, в яких визначали характеристики неметалевих включень у металі швів, які відрізнялися як часом існування рідкого металу зварювальної ванни в залежності від погонної енергії процесу, так і його хімічним складом. Дослідженню підлягали зразки наплавленого металу, які були отримані при зварюванні під флюсом стикових з'єднань низьколегованої сталі 10ХСНД товщиною 14 мм з погонною енергією 36 кДж/см (шви НН-1, НН-2, НН-3), а також в середовищі захисного газу з погонною енергією 21 кДж/см (шви НН-4, НН-5). Параметри режиму зварювання відповідали вимогам стандартів ISO 14171 (зварювання під флюсом) і ISO 26304 (зварювання в середовищі захисного газу). Хімічний склад металу швів і вміст у них неметалевих включень ( $V_{нмв}$ ) наведено в табл. 1. Інші особливості методики експериментальних досліджень викладено в роботі [13].

Проведене нами експериментальне дослідження розподілу неметалевих включень у ме-

талі зварних швів, виконаних методами зварювання під флюсом і порошковим дротом (рис. 1) показало, що експериментальні розподіли не є експоненціальними з надійною ймовірністю щонайменше 95 % за критеріями Пірсона та Колмогорова-Смірнова.

Аналітичний аналіз показав, що наявні експериментальні дані можливо описати функцією гамма-розподілу з заданою надійною ймовірністю.

Для аналізу розподілу неметалевих включень використовували функцію щільності ймовірності гамма-розподілу, яка має вигляд [13]

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right)}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad (6)$$

$$\alpha, \beta > 0; 0 < x < \infty,$$

де  $\Gamma(\alpha)$  – гамма-функція; параметри  $\alpha$  і  $\beta$  називають параметрами форми та масштабу відповідно.

Цей розподіл характерний тим, що багато які інші розподіли є його частинними випадками. Зокрема, як видно з формул (6) та (1), за умови, що параметр форми  $\alpha = 1$ , гамма-розподіл перетворюється в експоненціальний розподіл, причому в разі збільшення значення параметра форми поведінка розподілу якісно змінюється (рис. 2).

Аналіз поведінки функцій щільності ймовірності експоненціального та гамма-розподілу, а також

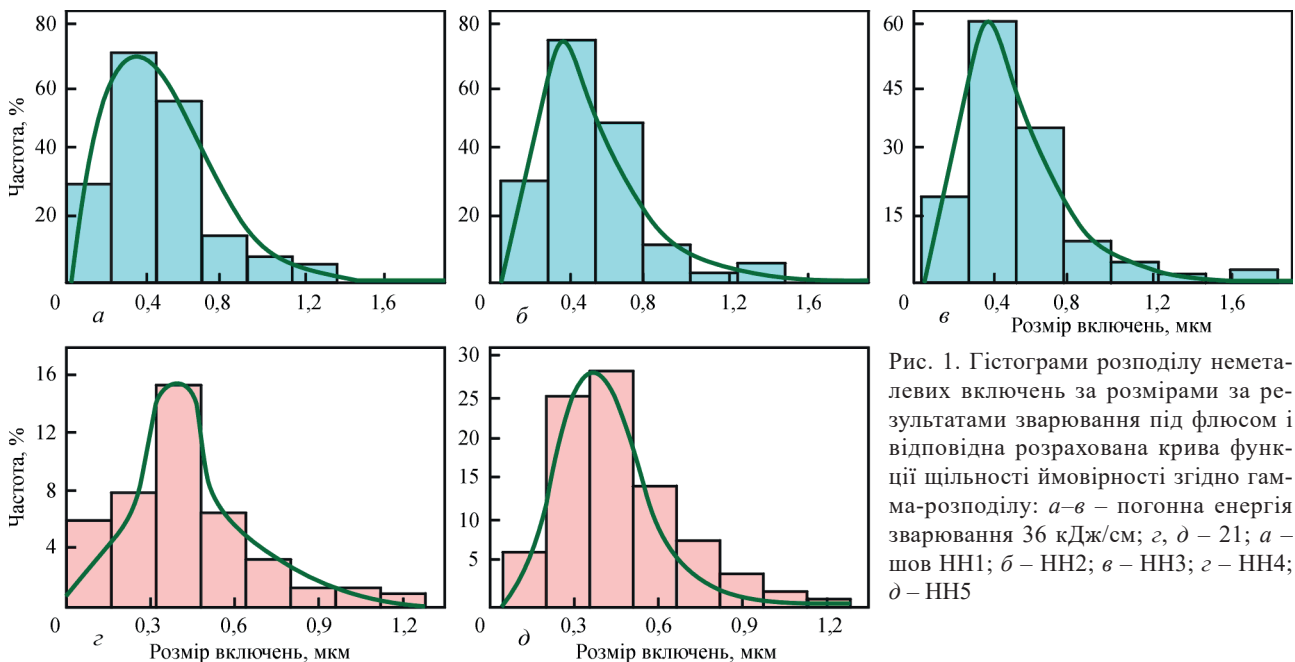


Рис. 1. Гістограми розподілу неметалевих включень за розмірами за результатами зварювання під флюсом і відповідна розрахована крива функції щільності ймовірності згідно гамма-розподілу: а–в – погонна енергія зварювання 36 кДж/см; з, д – 21; а – шов НН1; б – НН2; в – НН3; з – НН4; д – НН5

Таблиця 1. Хімічний склад та вміст неметалевих включень в металі швів

Номер шва	Масова частка (%) в металі шва												$V_{нмв}, \%$
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	O	
НН1	0,034	0,212	1,51	0,023	0,021	0,41	3,74	0,44	0,12	0,022	0,009	0,078	0,62
НН2	0,038	0,417	1,57	0,025	0,022	0,33	3,50	0,52	0,13	0,034	0,044	0,070	0,58
НН3	0,034	0,321	1,38	0,023	0,015	0,39	3,83	0,51	0,12	0,020	0,005	0,067	0,55
НН4	0,050	0,290	1,32	0,024	0,014	0,16	2,19	0,27	0,36	0,039	0,019	0,061	0,47
НН5	0,049	0,298	1,39	0,023	0,015	0,15	2,26	0,25	0,44	0,039	0,008	0,072	0,58

Таблиця 2. Експериментальні значення параметрів форми та масштабу для зварювання під флюсом

Код виміру	НН1-1	НН1-2	НН1-3	НН1-4	НН1-5
Параметр форми	3,52979	2,90481	3,00837	2,81644	2,66076
Параметр масштабу, $10^{-6}$ м	7,40262	6,53177	6,51605	5,73114	4,94883
Код виміру	НН2-1	НН2-2	НН2-3	НН2-4	НН2-5
Параметр форми	2,99376	3,25676	3,19255	3,41001	2,68183
Параметр масштабу, $10^{-6}$ м	5,39726	5,99253	6,24691	6,57369	4,99286
Код виміру	НН3-1	НН3-2	НН3-3	НН3-4	НН3-5
Параметр форми	2,65562	3,30154	3,63677	3,4343	3,17487
Параметр масштабу, $10^{-6}$ м	5,12298	6,35464	6,36239	6,75384	5,51374
Код виміру	НН4-1	НН4-2	НН4-3	НН4-4	НН4-5
Параметр форми	3,94454	2,88799	2,74705	3,44743	2,33062
Параметр масштабу, $10^{-6}$ м	8,89796	5,50171	6,3869	7,40532	4,2632
Код виміру	НН5-1	НН5-2	НН5-3	НН5-4	НН5-5
Параметр форми	2,60281	4,14994	3,6945	3,54269	3,40696
Параметр масштабу, $10^{-6}$ м	548739,	8,26347	7,54531	7,70252	7,81811

*Примітка.* параметр форми та масштабу розраховували за формулами (7) і (13), відповідно.

фізичної картини укрупнення неметалевих включень за рахунок коагуляції приводить до поданого далі модельного опису розподілу неметалевих включень у металі зварного шва.

На початку процесу укрупнення неметалевих включень їх розподіл за розмірами підкоряється експоненціальному закону, оскільки переважна їх частка має маленькі радіуси, близькі до критичного.

У процесі укрупнення за рахунок коагуляції відносна кількість включень малих радіусів зменшується, а великих – збільшується, що призводить до зміни форми функції розподілу з монотонно спадаючої, що відповідає експоненціальному розподілу за розмірами, на одномодальну (з максимумом), що відповідає гамма-розподілу.

Таким чином, на момент початку процесу (змінна часу  $t = 0$ ) параметр форми  $\alpha = 1$ , а в кінці процесу, відповідно до наших експериментально-розрахункових даних, набуває значення з діапазону 2,33...4,15 (табл. 2).

Позначаючи кінцеве значення параметра форми через  $\alpha_k$  і вважаючи параметр форми лінійною функцією від часу  $a(t)$ , отримуємо таку залежність параметра форми від часу:

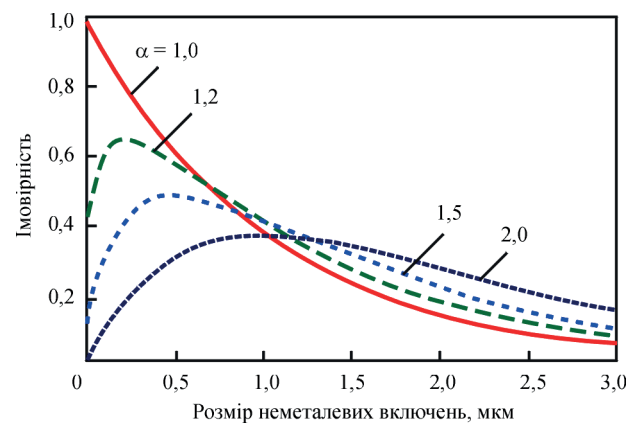


Рис. 2. Змінення поведінки функції щільності ймовірності гамма-розподілу залежно від значення параметра форми  $\alpha$

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_k - 1}{t_k} t + 1, \quad (7)$$

де  $t_k$  – кінцеве значення часу.

Отже, для подальших оціночних розрахунків для аналізу розподілу неметалевих включень за розміром при зварюванні під флюсом можна задати значення  $\alpha_k = 3$ , що приблизно є середньою точкою інтервалу змінення параметра форми в цьому випадку.

Тривалість процесу за заданих умов зварювання прийемо  $t_k = 3,5$  с, що впливає з результатів моделювання росту неметалевих включень в металі зварної ванни.

Тоді з рівняння (7) впливає таке рівняння для опису залежності параметра форми від часу:

$$\alpha(t) = \frac{4}{7} t + 1. \quad (8)$$

Оскільки ядром утворених неметалевих включень є зародки тугоплавких оксидів хімічного складу  $Al_2O_3$ , користуємось надалі значеннями: густина сталі  $\rho_s = 7,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; густина неметалевого включення (дорівнює густині глинозему)  $\rho_{ins} = 3,97 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $X_0 = 47,1$  % загальна кількість кисню в розплавленому металі  $[O\%] = 0,055$ .

Тоді вираз (5) набуває вигляду

$$n_0 = \frac{1}{8 \cdot 3,1415926} \cdot \frac{7,15 \cdot 10^3 \cdot 0,02}{3,97 \cdot 10^3 \cdot 47,1} \lambda^4 = 0,83677 \cdot 10^{-4} \lambda^4. \quad (9)$$

Очевидно, що величина, обернена до  $\lambda$  у виразі (1), є в точності параметром масштабу, так що  $\beta = 1/\lambda$  у введених позначеннях і рівняння (1) перепишемо у вигляді

$$n(r) = n_0 \exp\left(-\frac{r}{\beta}\right) = n_0 \beta \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{r}{\beta}\right) = n_0 \beta f(x; 1, \beta), \quad (10)$$

звідки впливає для заданих значень параметрів:

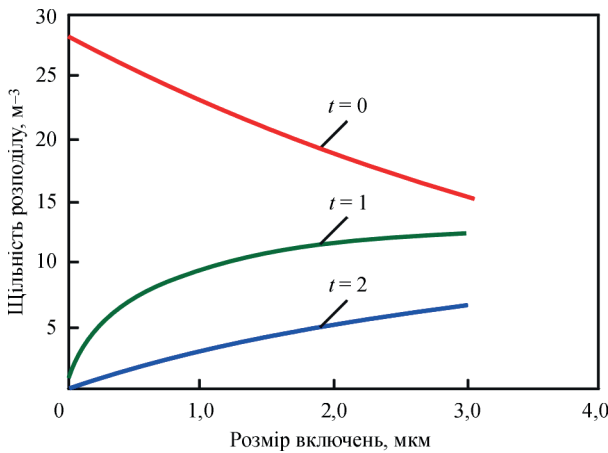


Рис. 3. Зміння розподілу неметалевих включень у часі  $t$  за умови відсутності утворення нових зародків включень під час процесу

$$n(r) = 0,30428 \cdot 10^{-4} \lambda^3 f(x; 1, \lambda^{-1}) = 0,83677 \cdot 10^{-4} \beta^{-3} f(x; 1, \beta) \quad (11)$$

Залежність (11) описує початковий розподіл неметалевих включень за розміром при зварюванні під флюсом. Залежність від часу шуканого розподілу природно подати у вигляді:

$$n(r, t) = 0,83677 \cdot 10^{-4} \beta^{-3} f(x; \alpha(t), \beta(t)), \quad (12)$$

де параметр масштабу також вважатимемо лінійною функцією від часу з кінцевими значеннями, що відповідають значенням параметра форми з табл. 1:

$$\beta(t) = \beta_0 + \frac{\beta_k - \beta_0}{t_k} t. \quad (13)$$

Одержані формули дозволяють скористатись інструментом електронних таблиць для розрахунку розподілу неметалевих включень за розмірами в дискретному об'ємі металу залежно від часу (рис. 3). Відображені на графіку результати відповідають даним роботи [11].

Розглядаючи реальний процес, необхідно, як зазначено в роботі [9], враховувати утворення зародків неметалевих включень за певної температури залежно від швидкості їхнього утворення та часу перебування в заданому температурному діапазоні. Таким чином, оцінку щільності розподілу неметалевих включень отримуємо як суму добутків зазначених швидкостей на відповідні значення змінної часу.

Підсумковий результат подано на рис. 3. Видно, що гамма-розподіл дозволяє об'єктивно описувати функцію щільності ймовірності розподілу неметалевих включень за розмірами незалежно від часу перебування рідкого металу в зварювальній ванні і хімічного складу розплавленого металу.

### Висновки

1. Встановлено, що обробка експериментальних даних щодо розмірів неметалевих включень

у металі зварних швів, наплавлених методами зварювання під флюсом і в середовищі захисного газу, показала, що кінцевий розподіл за розмірами досліджених включень підкоряється закону гамма-розподілу (ймовірність > 95 %).

2. Показано, що для опису еволюції розподілу неметалевих включень під час утворення зварного шва доцільно застосувати ймовірнісну модель у вигляді гамма-розподілу із залежними від часу параметрами.

3. На початку процесу розподіл неметалевих включень у запропонованій моделі є експоненціальним, у зв'язку з тим, що значення параметра форми дорівнює одиниці. Значення параметрів форми й масштабу, обчислені за експериментальними даними, становлять 2,6...3,9 та 4200...8900, відповідно, незалежно від виду зварювання.

### Список літератури/References

- Oh, Y.J., Lee, S.Y., Byun, J.S. et al. (2000) Non-metallic inclusions and acicular ferrite in low carbon steel. *Materials Transactions, JIM*, 41, 12, 1663–1669.
- Quintana, M.A., McLane, J., Babu, S.S., David, S.A. (2001) Inclusion Formation in Self-Shielded Flux Cored Arc Welds. *Welding J.*, 4, 98–105.
- Babu, S.S. (2004) The mechanism of acicular ferrite in weld deposits. *Current opinion in solid state and materials science*, 8, 267–278.
- Lee, T.K., Kim, H.J., Kang, B.Y., Hwang, S.K. (2000) Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds. *ISIJ International*, 40, 12, 1260–1268.
- Zhang, J., Lee, H.G. (2004) Numerical modeling of nucleation and growth of inclusions in molten steel based on mean processing parameters. *Ibid*, 44, 10, 1629–1638.
- Kwon, Y.-J., Zhang, J., Lee, H.-G. (2008) A CFD-based Nucleation-growth-removal Model for Inclusion Behavior in a Gas-agitated Ladle during Molten Steel Deoxidation. *Ibid*, 48, 7, 891–900.
- Njzawa, H., Kato, Y., Sorimachi, K., Nakanishi, T. (1999) Agglomeration and Flotation of Alumina Clusters in Molten Steel. *Ibid*, 39, 5, 426–434.
- Zinngrebe, E., Van Hoek, C., Visser, H. et al. (2012) Inclusion Population Evolution in Ti-alloyed Al-killed Steel during Secondary Steelmaking Process. *Ibid*, 52, 1, 52–61.
- Hong, T., Debroy, T., Babu, S.S., David, S.A. (2000) Modeling of Inclusion Growth and Dissolution in the Weld Pool. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 20B, 2, 161–169.
- Zhang, L., Thomas, B.G. (2003) Inclusion nucleation, growth, and mixing during steel deoxidation. *UIUC, Continuous Casting Report № 200206*, 1–19.
- Zhang, B.W., Li, B.W. (2007) Growth Kinetics of Single Inclusion Particle in Molten Melts. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 20, 2, 129–138.
- Lucas J. van Vliet, Ian T. Young, Piet, W. (1998) Verbeek Recursive Gaussian Derivative Filters. *Fac. of Appl. Phys., Delft Univ. of Technol.* DOI: 10.1109/ICPR.1998.711192 Conference: Pattern Recognition. *Proceedings. Fourteenth International Conference on, Vol. 1*.
- Градштейн И.С., Рыжик И.М. (1971) *Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений*. Москва, Наука.
- Gradshteyn, I.S., Ryzhik, I.M. (1971) *Tables of integrals, sums, series and products*. Moscow, Nauka [in Russian].
- Головко В.В., Походня И.К. (2013) Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла швов высокопрочных низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*, 6, 3–11.
- Golovko, V.V., Pokhodnya, I.K. (2013) Effect of non-metallic inclusions on formation of structure of the weld metal in high-strength low-alloy steels. *The Paton Welding J.*, 6, 2-10.

## CALCULATED-EXPERIMENTAL MODEL OF DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN THE METAL OF WELDS BY SIZES

L.A. Taraborkin, V.V. Golovko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

There is a large number of investigations on the impact of distribution of non-metallic inclusions in the weld metal on its structure and mechanical properties. However, the authors of these works do not describe the kinetics of forming such a distribution. The results of the development of a distribution model in the weld metal of non-metallic inclusions by sizes are presented. Formation of the calculation part of the model is based on the processing of experimental data on the sizes of non-metallic inclusions in the metal of welds, deposited by the methods of submerged welding in the medium of shielding gas. Generalization and analysis of experimental data showed that the final distribution of inclusions in the metal of the studied welds is submitted to the law of gamma distribution (probability is > 95%). To describe the evolution of the distribution of non-metallic inclusions during weld formation, the authors proposed to apply a probabilistic model in the form of gamma-distribution with time-dependent parameters. 14 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

*Key words: low-alloy steel, welding, weld metal, non-metallic inclusions, distribution*

Надійшла до редакції 12.10.2021

**Розроблено в ІЕЗ**

### Обладнання для лазерного зварювання в вакуумі

Обладнання призначено для отримання зварних з'єднань низьколегованих і легуваних сталей, титанових, нікелевих, мідних та інших сплавів, а також алюмінієвих, магнієвих і берилієвих сплавів. Відмінною особливістю обладнання є можливість зварювання з подачею однієї або двох присадних дротів, що підігріваються. Потужність лазерного випромінювання 0,2...5 кВт (при необхідності може бути збільшена). Розміри вакуумної камери, кількість ступенів свободи та робочий хід приводів маніпулятора в вакуумній камері виготовляються залежно від габаритів і форми поверхні зварюваних деталей.

Лазерне зварювання в вакуумі (LWV) дає результати, порівняні з результатами електронно-променевого зварювання (EBW) при аналогічній потужності променя.

#### Переваги LWV у порівнянні з EBW:

- в 100...1000 разів менша глибина вакууму
- набагато менші габарити зварювальних головок, простіше вакуумне обладнання та менший час вакуумування
- менша собівартість 1 м зварного шва та витрати на обслуговування обладнання



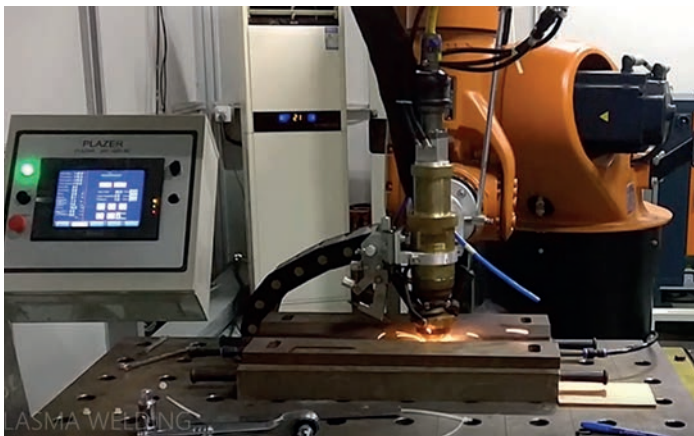
3 4 1 2

1 – вакуумна камера; 2 – вакуумний пост; 3 – комплект лазерного обладнання з системою охолодження; 4 – мобільна система управління



### Установка для швидкісного гібридного лазерно-плазмового зварювання

Обладнання призначене для отримання зварних з'єднань низьколегованих і легуваних сталей, титанових, нікелевих, мідних та інших сплавів, а також з алюмінієвих і магнієвих сплавів без та з подачею присадного дроту. Швидкість гібридного лазерно-плазмового зварювання вища на 30...60 % у порівнянні з лазерним зварюванням і в 2...3 рази у порівнянні з плазмовим зварюванням для однієї і тієї ж товщини зварюваних деталей.



Технічні характеристики	
Потужність, кВт:	
- лазерне випромінювання	0,2...5,0
- плазмової дуги	0,2...10,0
Робочий струм плазмової дуги, А	
- прямої полярності	10...320
- різнополярний асиметричний	10...320
Робоча напруга плазмової дуги, В:	
- прямої полярності	12...28
- зворотної полярності	24...36
Витрати газів, л/хв:	
- плазмоутворюючого (Ar)	1,0...10,0
- захисного (Ar; Ar + CO <sub>2</sub> )	0,4...4,0
Тиск робочих газів на вході в систему газопідготовки, бар	2...4
Швидкість подачі присадного дроту, м/год	0...420
Діаметри присадного дроту, мм	0,8...1,6