

PACS numbers: 61.72.S-, 61.82.Bg, 68.37.Yz, 81.20.Ev, 81.70.Jb

Вимоги до граничної відносної концентрації домішок Оксигену та Нітрогену у приповерхневих шарах присадного порошку ЖС32 для мікроплазмового натоплення

О. В. Яровицин, А. В. Микитчик*

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

**ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій
Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України»,
вул. Антоновича, 68,
03150 Київ, Україна*

Для присадного порошку нікелевих жароміцних стопів для мікроплазмового порошкового натоплення фракції 40–160 мкм відносно збільшення вмісту домішок Оксигену і Нітрогену у приповерхневих шарах окремих частинок суттєво впливає на їхній середньоваговий вміст $[O] < 0,050\%$ ваг. і $[N] < 0,005\%$ ваг., що визначається за стандартизованою методикою відновного плавлення в потоці газу-носія. З метою адекватної оцінки якості і зварювально-технологічних властивостей за вихідного контролю цих присадних матеріалів запропоновано на додаток до вищевказаної стандартизованої методики визначення кількісного вмісту домішок Оксигену та Нітрогену використовувати методику рентген-спектрального мікроаналізу. З огляду на якісний характер визначення вмісту даних домішок за рентген-спектральним мікроаналізом, пропонується аналізувати значення коефіцієнтів відносного збільшення вмісту Оксигену та Нітрогену для

Corresponding author: Oleksandr Valentynovych Yarovytsyn
E-mail: yarovytsyn@ukr.net

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

**SE 'International Center of Electron-Beam Technologies
of E. O. Paton Electric Welding Institute', N.A.S. of Ukraine,
68 Antonovych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: O. V. Yarovytsyn and A. V. Mykytchuk, Requirements to Limiting Relative Concentration of Oxygen and Nitrogen Impurity in Subsurface Layers of Filler Powder ZhS32 for Microplasma Surfacing, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 4: 519–540 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.04.0519](https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0519).

окремої типової частинки присадного порошку, що визначаються як відношення середньоарифметичних величин зі статистичних масивів вимірів вмісту зазначених елементів на поверхні та у поперечному перерізі частинок порошку. За розробленою методикою входного контролю на наявність і характер розподілу домішок Оксигену та Нітрогену уточнено відповідний сегмент вимог щодо якості присадного порошку нікелевого жароміцного стопу ЖС32, який широко використовують для серійного ремонту деталей авіаційних газотурбінних двигунів на українських авіа-ремонтних підприємствах.

Ключові слова: важкозварювані жароміцні нікелеві стопи, присадний порошок для мікроплазмового порошкового натоплення, приповерхневий шар дисперсної частинки, методика відновлювального топлення у потоці газу-носія, рентген-спектральний мікроаналіз, вміст домішок Оксигену та Нітрогену, критерії якості.

A complex procedure for evaluation of quality of filler powder of nickel-nickel-based superalloys for microplasma powder surfacing is developed. It assumes investigation of its sample by means of evaluation of weight-average gases contents [O] and [N] using reduction melting of powder sample in a jet of inert gas-carrier and determination of relative concentration of these additives applying X-ray structural (EDX) microanalysis on a surface of disperse particles of powder in comparison with their cross section. As proved experimentally and in calculation way, the internal volumes of disperse particles of filler powder ZhS32 independent on quality have approximately similar gas content (approximately [O] = 0.005–0.010% wt., [N] = 0.0005–0.0015% wt.). As shown, the weight-average gas content of the sample of filler powder is considerably effected (from 0.1 to 6–8 times) by relationship between local concentration of content of oxygen and nitrogen impurity in the subsurface layer of up to 4 μm thickness of separate disperse particle of powder and in its cross section. It is determined that except for corresponding requirements to weight average gases content [O] \leq 0.025% wt. and [N] \leq 0.004% wt. in the subsurface layer of particles of quality filler powder ZhS32 in comparison with their cross section the next relative limiting increase of their content $K_{[\text{O}]} < 9.0$, $K_{[\text{N}]} < 6.0$ is allowed. Further increase of relative concentration of oxygen and nitrogen indicate improper filler powder. First its type (after 4–5 cycles of repeated heating) is characterized with presence of some amount of particles, examination of surface of which using EDX-analysis method shows next relative rise of contents [O] and [N]: $K_{[\text{O}]} = 16.56\text{--}21.21$, $K_{[\text{N}]} = 2.88\text{--}7.41$. Discovery of such type of improper filler powder by means of determination of weight-average gas content is complicated through insignificant increment of general gas content (<20–30%) in comparison with quality one. Second type of improper filler powder ZhS32 is provoked by deviation or irrational selection of gas atomization technology. It is characterized with presence of preferred amount of particles, examination of surface of which using XRSM method indicated the next relative increase of contents [O] and [N]: $K_{[\text{O}]} = 38.17$ and $K_{[\text{N}]} = 15.34$. Such increased concentration of these additives in the subsurface layers has already very significant effect on weight-average gas content and takes it outside the limits of the recommended weight-average values for quality powder ZhS32. In-

crease of contents [O] and [N] over the experimentally determined limiting values (as weight-average for separate particle of filler powder ZhS32 as well as relatively to its subsurface layer) in microplasma surfacing provokes the need of increase of heat input into the product by 25–50% in bead formation at a blade edge. This, first of all, has negative effect on efficiency of its build-up and laboriousness of its further machining. It is also registered that at increased terms of service of blades of aircraft GTE D18-T the additional heat input into the product in 300–500 J/mm amount caused by exceed of content of these additives in filler powder can be the reason of rapid rise of tendency to crack formation in ‘base-deposited metal’ welded joint of ZhS32 type.

Key words: difficult to weld nickel-based superalloys, filler powder for microplasma surfacing, subsurface layer, reduction melting of powder sample in a jet of inert gas-carrier, X-ray structural microanalysis, content of oxygen and nitrogen impurities, quality criteria.

(Отримано 5 травня 2019 р.; остаточн. варіант — 11 лютого 2021 р.)

1. ВСТУП

Більше 10 років в українській авіаційній промисловості процес мікроплазмового порошкового натоплення (МПН) [1–3] застосовується для серійного ремонту робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів з важкозварюваних нікелевих жароміцних стопів (ЖС) з метою періодичного відновлення їх ресурсу. Значний обсяг використання за МПН припадає на присадний порошок ЖС32, виготовлений з відповідного нікелевого ЖС ЖС32-VI (табл. 1) шляхом розпорошення його стопку потоком аргону [4]. Відповідно вміст домішок Оксигену та Нітрогену у такому порошку характеризує досконалість захисту технологічного процесу його розпорошення від взаємодії з атмосферою навколишнього повітря і в подальшому суттєво впливає на зварювально-технологічні властивості дисперсної присадки.

У присадних порошках нікелевих ЖС для МПН граничний вміст Оксигену доцільно обмежувати на рівні 0,025% ваг. [5, 6]. Подаль-

ТАБЛИЦЯ 1. Хімічний склад основних легуючих елементів нікелевого жароміцного стопу ЖС32-VI згідно ТУ 1-92-177-91.

TABLE 1. Chemical composition of the main alloying elements nickel-base superalloy ZhS32-VI according to TU 1-92-177-91.

Стоп	% ваг.											
	C	Cr	Ni	Co	Al	Mo	W	Nb	Ta	Re	Fe	B
ЖС32-VI	0,12– 0,18	4,3– 5,6	осн.	8,0– 10,0	5,6– 6,3	0,8– 1,4	7,8– 9,5	1,4– 1,8	3,5– 4,5	3,5– 4,5	<1,0	<0,02

ше зростання його вмісту викликає необхідність збільшення тепловкладень у виріб на 25–50% у процесі формування натопленого металу. Це, крім збільшення трудомісткості механічної обробки натопленого валика, може негативно відображатися на стабільності якості ремонту робочих лопаток зі стопу ЖС32-ВІ з напрацюванням більше 6–8 тис. год — при додаткових тепловкладеннях у виріб у кількості 300–500 Дж/мм спостерігається збільшення схильності до утворення тріщин у зварному з'єднанні «основний–натоплений метал». Зазначений ефект насамперед пов'язують з підвищенням вмісту домішки Оксигену у присадному порошку нікелевого ЖС [5, 6].

Попередньо встановлено, що загальний середньоваговий газовміст присадного порошку, який традиційно визначається за стандартизованою методикою відновлювального топлення (МВП) проби у потоці газу-носія [7–10], у низці випадків не дозволяє адекватно визначати його якість. На думку авторів даної роботи новим перспективним напрямком формування критеріїв якості спеціалізованих присадних порошків з нікелевих ЖС є аналіз газовмісту домішок Оксигену та Нітрогену у приповерхневих шарах окремих їх частинок.

Метою даної роботи є узагальнення для присадного порошку ЖС32 на основі аналізу наявного масиву вагових проб технологічних вимог до його якості щодо вмісту Оксигену та Нітрогену та класифікація можливих типів їх відхилень; розробка методики оцінки вмісту домішок Оксигену та Нітрогену для приповерхневих шарів окремих його частинок, встановлення відповідних граничних вимог щодо них для якісного порошку і формування уявлень щодо їх можливих відхилень; розрахункова оцінка товщини приповерхневого шару, де концентрація даних домішок збільшена порівняно з внутрішнім об'ємом дисперсних частинок.

2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження проб присадного порошку ЖС32 ґрунтувалися на послідовному застосуванні методу визначення його середньовагового вмісту Оксигену та Нітрогену [7] на базі стандартизованої методики відновного топлення (МВП) у потоці газу-носія [8–10] та методу рентген-спектрального мікроаналізу (РСМА) [11, 12] з візуалізацією місць аналізу за допомогою растрової електронної мікроскопії в зворотньо розсіяних електронах.

Застосована методика визначення середньовагового газовмісту забезпечувала достовірну точність результатів [9]: для Оксигену — від 0,0005 до 0,2% ваг., для Нітрогену — від 0,00005 до 0,8% ваг. Кількісну оцінку середньовагового газовмісту (вагові %) проводили на автоматичних газоаналізаторах фірми Лесо: Оксигену — RO 316, Нітрогену — TN 114. Визначення вмісту Оксигену і Нітрогену ґру-

нтується на нагріві проби-зразка у графітовому тиглі з присутністю каталізаторів в інертному середовищі до температури орієнтовно 2750°C. До цього визначали кількості Оксигену або Нітрогену, розчинених у матриці матеріалу та зв'язаних у оксидні або нітридні включення, температура розкладу яких нижче $\approx 2750^\circ\text{C}$.

Для растрової електронної мікроскопії та РСМА використовували растровий електронний мікроскоп (РЕМ) CamScan 4S. Елементний склад порошку стопу ЖС32 та домішок Оксигену та Нітрогену визначали за допомогою EDX-приставки Link Pentafet та програмного забезпечення INCA-200. Робочі параметри РЕМ: прискорювальна напруга 20 кВ; поглинений струм 4,3 пА. Точність кількісного РСМА складала $\pm 0,1\%$ ваг.

Основний цикл досліджень проводили відповідно до запропонованої авторами фізичної моделі типової сферичної частинки присадного порошку ЖС32 (рис. 1) з урахуванням низки наступних припущень.

Частинки присадного порошку мають сферичну форму зі 100% щільністю. Кожна окрема його частинка порошку має приповерхневий шар $dR = R - R_1 < 2-4$ мкм (див. рис. 1), в якому вагова концентрація Оксигену та Нітрогену ступінчасто збільшена:

$$C_{[O]dR} = K_{[O]} C_{ч[O]}, \quad (1)$$

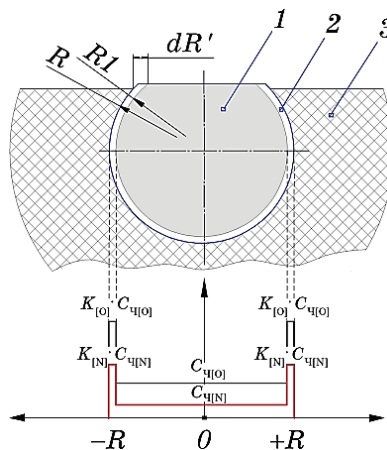


Рис. 1. Фізична модель поперечного перерізу частинки порошку ЖС32 з приповерхневим шаром зі збільшеною концентрацією Оксигену та Нітрогену: 1 — частинка порошку; 2 — приповерхневий шар; 3 — електропровідна пластмаса обойми шліфа.

Fig. 1. Cross-section physical model of the ZhS32 powder particle with increased concentration of oxygen and nitrogen at sub-surface layer: 1—the powder particle; 2—sub-surface layer; 3—Bakelite resin.

$$C_{[N]dR} = K_{[O]} C_{[N]}, \quad (2)$$

де $C_{[O]dR}$ і $C_{[N]dR}$ — середня вагова концентрація Оксигену та Нітрогену у приповерхневому шарі частинки, $C_{[O]}$ і $C_{[N]}$ — середня вагова концентрація Оксигену та Нітрогену у поперечному перетині частинки, $K_{[O]}$ і $K_{[N]}$ — коефіцієнти відносного збільшення концентрації домішок Оксигену та Нітрогену у приповерхневому шарі частинки.

Розподіл вмісту Оксигену і Нітрогену у поперечному перетині частинки порошку оцінювали з кроком $\approx 4\text{--}6$ мкм (рис. 2). Величини коефіцієнтів $K_{[O]}$ і $K_{[N]}$ визначали як відношення середньоарифметичних значень відповідних вимірів шляхом РСМА вмісту Оксигену та Нітрогену на поверхні різних частинок порошку до середньоарифметичних значень їхнього вмісту у поперечному перерізі частинки порошку (рис. 3).

Експериментальні дослідження проводили на пробах порошку ЖС32 з послідовним збільшенням ступеню окисненості/азотованості їхньої поверхні.

На заключному етапі досліджень у програмному середовищі MathCAD V15.0 розрахунковим шляхом проведено визначення найбільш ймовірної величини товщини приповерхневого шару dR зі збільшеною концентрацією домішок Оксигену та Нітрогену, а також оцінено вплив приповерхневого шару з параметрами dR , $K_{[O]}$ і $K_{[N]}$ на збільшення середньовагового вмісту цих домішок у присадному порошку залежно від розміру його частинок D . Використані математичні моделі базуються на відомих формулах з визначення: ваги твердого тіла за щільністю та об'ємом: об'ємів кулі та сфери з товщиною стінки dR .

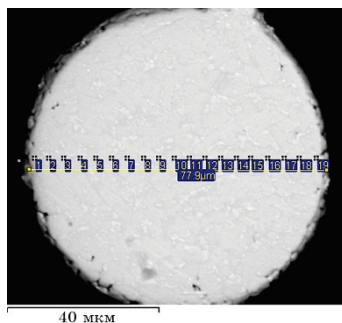


Рис. 2. Схема вимірювання методом РСМА розподілу Оксигену та Нітрогену, а також хімічного складу матеріялу у поперечному перерізі частинки присадного порошку ЖС32.

Fig. 2. Cross-section EDX analysis sequence of oxygen and nitrogen distribution, as well as the elemental composition of the ZhS32 filler powder.

Відносне збільшення середньовагового вмісту Оксигену $\varepsilon_{[O]}$ та Нітрогену $\varepsilon_{[N]}$ в окремій частинці порошку, обумовлене наявністю на її поверхні шару зі збільшеною у $K_{[O]}$ та $K_{[N]}$ разів концентрацією цих домішок порівняно з поперечним перерізом частинки $C_{ч[O]}$ і $C_{ч[N]}$:

$$\varepsilon_{[O]} = \frac{\frac{4}{3} \pi \frac{(D^3 - D_1^3) K_{[O]} C_{ч[O]}}{8} + \frac{4}{3} \pi \frac{D_1^3}{8} C_{ч[O]}}{\frac{4}{3} \pi \frac{D^3}{8} C_{ч[O]}} = K_{[O]} - \frac{D_1^3}{D^3} (K_{[O]} - 1), \quad (3)$$

$$\varepsilon_{[N]} = \frac{\frac{4}{3} \pi \frac{(D^3 - D_1^3) K_{[N]} C_{ч[N]}}{8} + \frac{4}{3} \pi \frac{D_1^3}{8} C_{ч[N]}}{\frac{4}{3} \pi \frac{D^3}{8} C_{ч[N]}} = K_{[N]} - \frac{D_1^3}{D^3} (K_{[N]} - 1). \quad (4)$$

Попередньо невідома товщина приповерхневого шару зі збільшеною концентрацією Нітрогену і Оксигену $dR = 0,5(D - D_1)$ (див. рис. 1) уточнювалася шляхом оцінки різниці між значеннями відносних збільшень $\Delta\varepsilon_{[O]}$ та $\Delta\varepsilon_{[N]}$ якісного і неякісного порошку. У нашому випадку коли виконували розрахунки порівнювали проби якісного «нового» порошку (індекс «Н») і відповідні проби того ж самого присадного порошку ЖС32 після багаторазового використання (індекс «БВ»):

$$\Delta\varepsilon_{[O]} = \varepsilon_{[O]БВ} - \varepsilon_{[O]Н}, \quad (5)$$

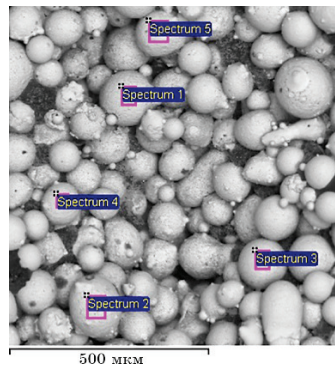


Рис. 3. Схема вимірювання методом РСМА розподілу Оксигену та Нітрогену, а також хімічного складу матеріялу на поверхні частинок присадного порошку ЖС32.

Fig. 3. EDX measurement sequence of oxygen and nitrogen distribution, as well as the elemental composition on the surface of particles of ZhS32 filler powder.

$$\Delta\varepsilon_{[N]} = \varepsilon_{[N]BB} - \varepsilon_{[N]H}. \quad (6)$$

Відповідно відносно збільшення середньовагового вмісту Оксигену та Нітрогену для присадного порошку ЖС32 після його багаторазового використання:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{[O]BB} = a \left[K_{[O]BB} - \frac{(D - 2dR)^3}{D^3} (K_{[O]BB} - 1) \right] + \\ + (1 - a) \left[K_{[O]H} - \frac{(D - 2dR)^3}{D^3} (K_{[O]H} - 1) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{[N]BB} = a \left[K_{[N]BB} - \frac{(D - 2dR)^3}{D^3} (K_{[N]BB} - 1) \right] + \\ + (1 - a) \left[K_{[N]H} - \frac{(D - 2dR)^3}{D^3} (K_{[N]H} - 1) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

де $K_{[O]H}$ і $K_{[N]H}$ — коефіцієнти відносного збільшення концентрації Оксигену та Нітрогену у приповерхневому шарі для «нової» якісної частинки присадного порошку ЖС32, $K_{[O]BB}$ і $K_{[N]BB}$ — коефіцієнти додаткового відносного збільшення концентрації домішок Оксигену та Нітрогену у приповерхневому шарі для частинки порошку після багаторазового використання присадного порошку ЖС32, a — відносна кількість частинок з додатково підвищеним приповерхневим вмістом домішок Оксигену та Нітрогену, обумовленим багаторазовим використанням.

Після певних підстановок і скорочень вирази (5) і (6) перетворені наступним чином:

$$\Delta\varepsilon_{[O]} = a \left[K_{[O]BB} - K_{[O]H} \right] \left[1 - \frac{(D - 2dR)^3}{D^3} \right], \quad (9)$$

$$\Delta\varepsilon_{[N]} = a \left[K_{[N]BB} - K_{[N]H} \right] \left[1 - \frac{(D - 2dR)^3}{D^3} \right]. \quad (10)$$

У математичних залежностях (9) та (10) для присадного порошку ЖС32 достатньо однозначне експериментальне визначення невідомих їхніх складових проводили наступним чином:

– $\Delta\varepsilon_{[O]}$ і $\Delta\varepsilon_{[N]}$ — шляхом оцінки відносної різниці даних загального газовмісту для порошку після багатоциклового повторного використання та «нового» порошку;

– $K_{[O]H}$ і $K_{[O]BB}$, $K_{[N]H}$ і $K_{[N]BB}$ — за даними РСМА для порошку після багатоциклового повторного використання та «нового» порошку;

– D — за даними оцінки гранулометричного складу частинок по-

рошку ($D \approx 80\text{--}100$ мкм);

- a — шляхом статистичної оцінки відносної кількості окиснених частинок у порошку після багатоциклового повторного використання у полі зору оптичного мікроскопа за збільшення $\times 50\text{--}100$ ($a \approx 0,5$).

Це дозволило в рамках прийнятої фізичної моделі (див. рис. 1) на основі відомих експериментальних даних шляхом послідовних розрахунків уточнити найімовірнішу товщину приповерхневого шару dR зі збільшеною концентрацією домішок Оксигену та Нітрогену у присадному порошку ЖС32 для наступних його станів:

- порошок після багатоциклового повторного використання, що характеризується періодичним проходженням частинок через високотемпературну область мікроплазмової дуги [5, 13];

- відхилення у технології виготовлення, пов'язані з недосконалістю захисту процесу розпорошення від навколишнього середовища повітря [5, 6].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати експериментальних досліджень середньовагового вмісту домішок Оксигену та Нітрогену присадного порошку ЖС32, проведених на репрезентативній вибірці проб із різних партій виробництва 2004–2016 рр. (табл. 2), свідчать, що у високоякісній дисперсній присадці вміст Оксигену повинен складати 0,005–0,015% ваг. Схожі результати для серійних присадних порошоків нікелевих жароміцних стопів одержано і у роботах інших авторів [14, 15].

Статистичний аналіз одержаних результатів з середньовагового газовмісту присадного порошку ЖС32 і паралельно проведена технологічна оцінка його якості показали, що в системі її ґрадації доцільно користуватися наступною системою оцінювання:

- високоякісний ($[O] \approx 0,005\text{--}0,015\%$ ваг., $[N] \approx 0,0005\text{--}0,0017\%$ ваг.);

- якісний ($[O] \approx 0,016\text{--}0,025\%$ ваг., $[N] \approx 0,0017\text{--}0,0025\%$ ваг.);

- неякісний «тип 1» ($[O] \approx 0,075\text{--}0,025\%$ ваг., $[N] \approx 0,0010\text{--}0,0030\%$ ваг.) — внаслідок багатоциклового повторного використання;

- неякісний «тип 2» ($[O] > 0,025\%$ ваг., $[N] > 0,0030\%$ ваг.) — внаслідок певних технологічних відхилень у процесі розпорошення.

Відповідні дані табл. 2 свідчать, що окрему пробу неякісного порошку ЖС32 «тип 1» не можна однозначно ідентифікувати визначенням середньовагового вмісту Оксигену та Нітрогену за стандартизованою МВП. Аналіз технологічної відстані, протягом якої відбувається фізико-хімічна взаємодія окремої частинки порошку з навколишнім високотемпературним газовим потоком за багатоциклового використання присадного порошку ($\approx 4\text{--}5$ см, [5, 13]) і за його виготовлення ($\approx 3\text{--}5$ см, [4]), дозволяє припустити наявність

меншої концентрації домішок Оксигену та Нітрогену у приповерхневих шарах неякісного порошку «тип 1» порівняно з «тип 2».

Задачею наступного циклу досліджень було оцінити вміст домі-

ТАБЛИЦЯ 2. Результати оцінки середньовагового газовмісту домішок Оксигену [O] та Нітрогену [N] у контрольних пробах, що відповідали різним партіям присадного порошку ЖСЗ2.

TABLE 2. Measurement results of the average gas content of oxygen [O] and nitrogen [N] impurities in control samples corresponding to different batches of ZhS32 filler powder.

№	Характеристики контрольної проби	[O], % ваг.	[N], % ваг.	Партія/рік поставки	Технологічне заклучення щодо якості присадки
1	Фракція 160–250 мкм — «новий»	0,0092	0,00058	2004 р. (Шр)	Якісна
2	Фракція 160–250 мкм — після 5 циклів використання	0,0143	0,00083	2004 р. (Шр)	Неякісна
3	Фракція 40–63 мкм — «новий»	0,0146	0,0011	2008 р. (ІЕЗ)	Якісна
4	Фракція 40–63 мкм — після 3-х циклів використання	0,0187	0,0020	2008 р. (ІЕЗ)	Неякісна
5	Фракція 63–163 мкм — «новий»	0,0106	0,00168	2008 р. (ІЕЗ)	Якісна
6	Фракція 63–163 мкм — після 4 циклів використання	0,0157	0,00224	2008 р. (ІЕЗ)	Неякісна
7	Фракція 63–160 мкм — «новий»	0,0124	0,00040	2015 р. (МС2)	Якісна
8	Фракція 63–160 мкм — після 4 циклів використання	0,0164	0,00110	2015 р. (МС2)	Неякісна
9	Фракція 63–160 мкм — «новий»	0,0239	0,0020	2015 р. (ЛРЗ)	Якісна
10	Фракція 63–160 мкм — після 4 циклів використання	0,0271	0,0029	2015 р. (ЛРЗ)	Неякісна
11	Фракція 63–160 мкм — «новий»	0,0055	0,0010	2016 р. (МС3)	Якісна
12	Фракція 63–160 мкм — після 5 циклів використання	0,0750	0,0022	2016 р. (МС3)	Неякісна
13	Фракція 63–160 мкм — «новий»	0,0320	0,0037	2015 р. (ЛРЗ1)	Неякісна
14	Фракція 63–160 мкм — «новий»	0,0380	0,0040	2015 р. (МС1)	Неякісна

Примітка: проби № 1 і 2, 3 і 4, ..., 11 і 12 — з однієї партії, зокрема за датою виготовлення; проби № 3–6 — з іншої партії.

шок Оксигену і Нітрогену у поперечному перерізі частинки присадного порошку ЖС32 у відповідних пробах з різних типових партій: якісний порошок, неякісний порошок «тип 1», неякісний порошок «тип 2». Приклад експериментальних даних кількісного визначення методом РСМА хімічного складу основних легуючих елементів та домішок Оксигену і Нітрогену, що відповідає рис. 2, наведено в табл. 3.

Приклади діаграм статистичного розподілу результатів вимірювань методом РСМА вмісту Оксигену та Нітрогену у поперечному перерізі типових проб присадного порошку наведено на рис. 4, а узагальнення цих експериментальних даних шляхом визначення середніх значень та їх порівняння з результатами визначення середньовагового газовмісту O і N — в табл. 4.

Таким чином, на основі отриманих за методикою РСМА експериментальних даних у поперечному перерізі типових проб присадного порошку ЖС32 правомірно стверджувати, що в середині об'ємів окремих його частинок вміст Оксигену та Нітрогену не залежить від якості порошку і є приблизно однаковим — відповідно $[O] = 0,2100\%$ ваг. і $[N] = 0,05425\%$ ваг., а на загальний середньоваговий вміст цих домішок суттєвий вплив має вміст відповідних хімічних елементів в

ТАБЛИЦЯ 3. Приклад результатів вимірювань хімічного складу у поперечному перерізі частинки присадного порошку ЖС32 за методикою РСМА, % ваг.

TABLE 3. Results of JhS32 particle cross-sectional EDX analysis, % wt.

Спектр	N	O	Al	Si	P	S	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	Ta	W	Re	Разом
1	0	0,05	6,75	0,78	0,07	0	4,74	9,27	57,85	1,47	1,25	2,4	10,24	5,13	100
2	0	0	6,31	0	0	0	5,31	8,98	59,41	1,86	1,46	4,35	8,85	3,43	100
3	0	0,4	5,45	0,46	0	0,06	4,99	9,21	61,16	0,51	0,86	2,79	9,34	4,77	100
4	0	0,02	5	0	0	0	4,95	9,34	60,03	0,81	0,94	3,01	9,76	5,77	100
5	0	0	4,87	0	0	0,15	4,68	9,84	61,86	0,53	0,7	2,18	9,89	5,29	100
6	0	0,27	5,02	0	0,24	0	4,46	9,52	60,55	1	0,52	2,52	9,96	5,95	100
7	0,53	0,12	5,59	0,72	0,1	0	4,88	8,89	60,43	2,09	1,76	3,09	7,87	3,92	100
8	0	0,23	5,51	0	0	0,07	4,54	9,89	62,17	1	0,43	2,14	9,09	4,94	100
9	0	0	4,79	0	0,11	0	4,51	9,52	62,08	0,85	0,6	2,41	9,36	5,73	100
10	0	0,04	4,87	0,83	0,12	0	4,8	9,91	62,63	0,82	1,19	1,04	8,27	5,53	100
11	0,21	0,87	5,49	1,22	0	0	4,95	8,88	61,35	1,66	1,41	2,8	7,81	4,17	100
12	0	0,08	5,37	0	0	0,24	4,82	9,55	60,68	2,4	0,67	3,68	10,27	2,26	100
13	0	0,01	4,99	0,79	0,39	0	5,45	8,46	58,45	3,33	1,55	4,99	5,54	5,97	100
14	0,01	0,28	4,79	0	0,26	0,19	5,03	10,03	61,07	0,59	0,26	2,7	9,14	5,73	100
15	0	0	4,92	0	0,12	0	4,62	9,92	61,99	0,85	1,37	2,45	8,53	5,26	100
16	0	0,48	5,53	0	0	0	4,78	9,23	61,56	2,3	1,37	4,29	8,66	1,83	100
17	0	1,16	4,88	0,06	0,24	0	4,61	9,49	61,4	1,38	1,03	2,54	9,31	3,97	100
18	0	0,23	4,96	0	0	0,04	5,27	8,73	62,93	1,99	1,12	3,37	8,32	3,12	100
19	0	0,23	4,33	0	0,07	0	5,06	10,26	63,92	1,1	0,95	1,48	8,27	4,33	100

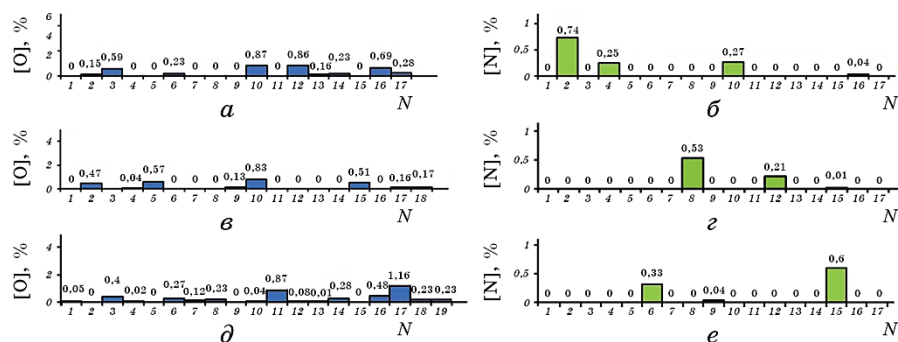


Рис. 4. Статистика розподілу вимірів вмісту Оксигену [O] та Нітрогену [N] у поперечному перерізі частинки порошку ЖС32 за методикою РСМА: *а, б* — для порошку партії МС2, «новий»; *в, г* — для порошку партії МС2, після багатократного повторного використання; *д, е* — для порошку партії МС1, «новий». Примітка: *N* — кількість проведених вимірювань.

Fig. 4. EDX measurements distribution statistics of the oxygen [O] and nitrogen [N] content in the cross-section of the ZhS32 particle: *a, б*—new MC2 powder; *в, г*—recycled MC2 powder; *д, е*—new MC1 powder. Note: *N*—the number of measurements.

приповерхневих шарах дисперсних частинок.

Тобто наведені в табл. 3, 4 і на рис. 4 експериментальні дані підтвердили правомірність застосування запропонованої фізичної моделі зі ступінчастим збільшенням концентрації домішки Оксигену і Ніт-

ТАБЛИЦЯ 4. Порівняння результатів вимірювання вмісту Оксигену та Нітрогену у присадному порошку нікелевого жароміцного ступу ЖС32 різних партій за методикою МВП (середньоваговий вміст) та за методикою РСМА (у поперечному перетині частинки порошку).

TABLE 4. Comparison measurements of the oxygen and nitrogen content in the different batches of ZhS32 filler powder by the reduction melting method (weight average content) and EDX (cross-section of the powder).

№*	Партія порошку	МВП		РСМА	
		[O]	[N]	[O]	[N]
		% wag.			
7	МС2, «новий», партія 2015 р.	0,0124	0,00040	0,2235	0,07222
8	МС2, після багатократного повторного використання, партія 2015 р.	0,0164	0,00110	0,2388	0,03947
14	МС1, «новий», партія 2015 р.	0,0380	0,0040	0,1694	0,05105
	Усереднені значення			0,2100	0,05425

* — номер партії згідно позицій табл. 2.

рогену (див. рис. 1).

Подальший цикл експериментальних досліджень полягав у аналізі за методикою РСМА поверхні окремих дисперсних частинок (див. рис. 3) у типових пробах присадного порошку ЖС32, що характеризувалися послідовним збільшенням ступеню окисненості/азотованості їхньої поверхні: новий порошок нормальної якості, «новий» порошок після багаторазового використання (неякісний «тип 1»), порошок погіршеної якості (неякісний «тип 2»).

З метою уточнення максимально можливих величин критично високих значень вмісту домішок у приповерхневих шарах також додатково аналізувалося поверхня штучно окисненого на повітрі порошку ЖС32 (за $T = 500^{\circ}\text{C}$ протягом 0,5 год) та поверхня валика стопу ЖС32, нагрітого способом МПН із використанням аргонного захисного середовища.

Аналіз експериментальних даних рис. 5, 6 і табл. 5–7 показує, що якісний присадний порошок ЖС32 за даними РСМА характеризується наступним середнім вмістом Оксигену та Нітрогену у приповерхневих шарах окремої частинки: $[\text{O}] = 0,615\text{--}1,843\%$ ваг. і

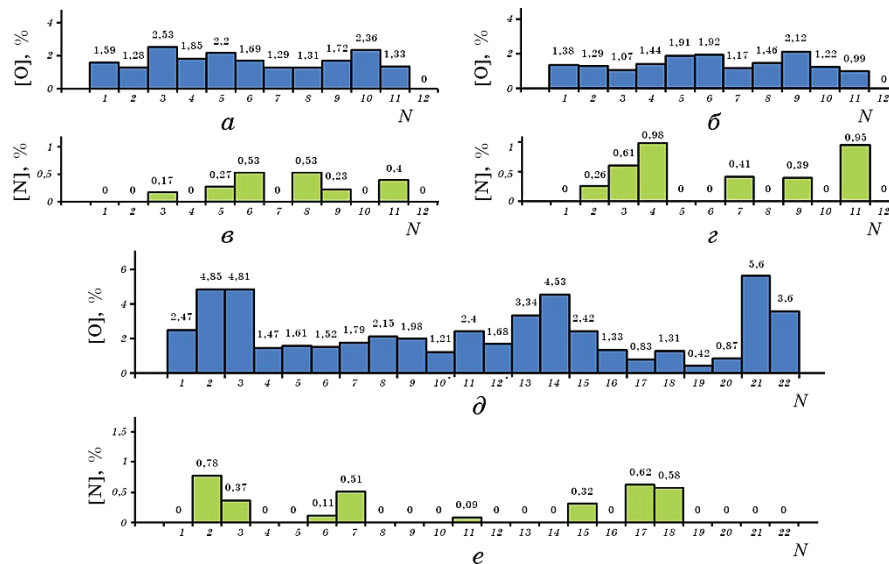


Рис. 5. Приклад статистики розподілу вимірів за методикою РСМА вмісту Оксигену [O] і Нітрогену [N] (% ваг.) на поверхні частинок присадного порошку ЖС32 для партії МС3-2015: а–в — якісний «новий»; д, е — після 4–5 циклів його повторного використання; N — кількість вимірювань.

Fig. 5. EDX measurements distribution statistics of the oxygen [O] and nitrogen [N] content (% wt.) on the surface of ZhS-32 filler powder particles, MC3-2015 batch: а–в—new powder; д, е—after 4–5 usage cycles; N—number of measurements.

$[N] = 0,078\text{--}0,318\%$ ваг. Відповідно у приповерхневих шарах частинок якісного порошку порівняно з їх поперечним перерізом (фактично з матеріалом частинки в середині її об'єму) спостерігається наступне відносне збільшення вмісту Оксигену і Нітрогену: $K_{[O]} = 2,90\text{--}8,77$, $K_{[N]} = 1,42\text{--}5,87$.

Присадний порошок ЖС32 після 4–5 циклів повторного використання (неякісний «тип 1») за даними РСМА характеризується наступним середнім вмістом домішок Оксигену і Нітрогену відповідно $[O] = 1,967\text{--}3,678\%$ ваг. і $[N] = 0,169\text{--}0,402\%$ ваг. Окремі окиснені частинки у складі такого неякісного порошку ідентифікуються підвищеним вмістом $[O] = 2,4\text{--}6,6\%$ ваг. і $[N] \leq 0,9\%$ ваг., що обумов-

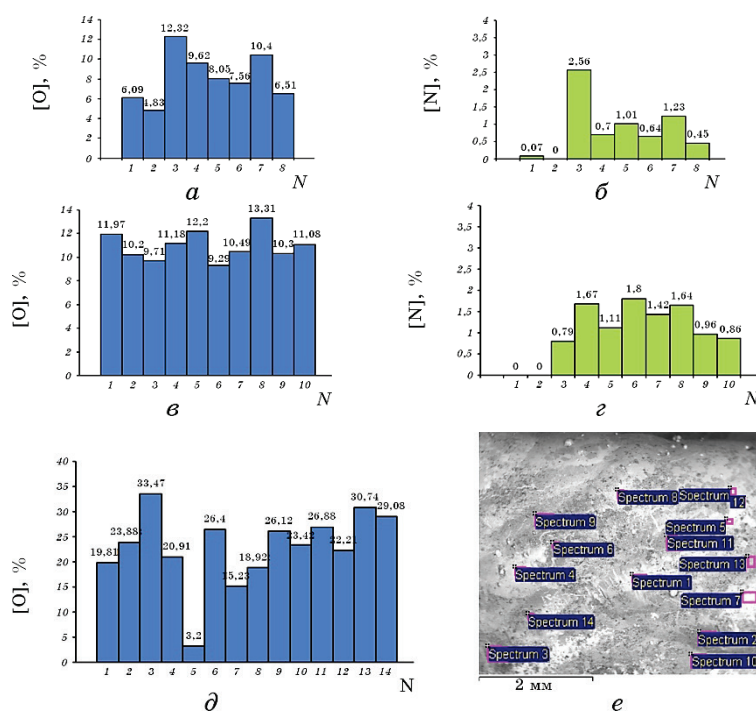


Рис. 6. Приклад статистики розподілу вимірів за методикою РСМА вмісту Оксигену $[O]$ і Нітрогену $[N]$ (% ваг.) на поверхні частинок для неякісного присадного порошку ЖС32: *а, б* — партії MC1-2015, «тип 2»; *в, г* — партії ІЕЗ-2008 після окиснення за температури 550°C протягом 0,5 год; *д, е* — поверхні нагрітого у захисному середовищі аргону валика зі стопу ЖС32; *N* — кількість вимірювань.

Fig. 6. EDX measurements distribution statistics of oxygen $[O]$ and nitrogen $[N]$ content (% wt.) on the ZhS32 powder particle surface for low-quality filler batches: *a, б*—MC1-2015, ‘type 2’; *в, г*—IEZ-2008 after oxidation at 550°C for 0.5 h.; *д, е*—bead ZhS32 surface deposited in the argon protective environment; *N*—number of measurements.

лює зростання середнього значення коефіцієнтів відносного збільшення вмісту Оксигену і Нітрогену у приповерхневих шарах таких частинок до $K_{[O]} = 16,56\text{--}21,21$ (в середньому — 18,28) та $K_{[N]} = 2,88\text{--}7,41$ (в середньому — 5,08). Присадний порошок ЖС32, що мав у процесі його виробництва технологічні відхилення, пов'язані з полегшенням доступу повітря у зону розпорошення, за даними РСМА характеризується середнім вмістом домішок Оксигену та Нітрогену, відповідно $[O] = 8,017\%$ ваг. і $[N] = 0,833\%$ ваг. та зростанням середнього значення відповідних коефіцієнтів $K_{[O]} = 38,17$ і $K_{[N]} = 15,35$.

Присадний порошок ЖС32, що пройшов штучне окиснення за 500°C протягом 0,5 год і через це не є якісним, за даними РСМА характеризується наступним середнім вмістом Оксигену та Нітрогену у приповерхневих шарах окремої частинки $[O] = 10,83\%$ ваг. і $[N] = 1,04\%$ ваг. (див. рис. 6, табл. 7) та подальшим зростанням серед-

ТАБЛИЦЯ 5. Порівняння результатів вимірювання вмісту Оксигену та Нітрогену в якісному присадному порошку нікелевого жароміцного сплаву ЖС32 різних партій за методикою МВП (середньоваговий вміст) та за методикою РСМА (на поверхні дисперсних частинок).

TABLE 5. Comparison measurements of the oxygen and nitrogen content in the ZhS32 filler powder of different batches by the reduction melting method (weight average content) and EDX (surface of the powder).

№*	Партія порошку	МВП		РСМА		На основі даних РСМА	
		[O], % ваг.	[N], % ваг.	[O], % ваг.	[N], % ваг.	$K_{[O]}$	$K_{[N]}$
7	МС2-2016, ра- фінований пе- рестоп вихідної заготовки	0,0164	0,0011	0,98728	0,0775	4,701	1,429
				1,3758	0,1350	6,552	2,489
11	МС3-2016 ви- хідна заготовка — ливарні літ- ники	0,0055	0,0010	1,4731	0,1775	7,015	3,372
				1,4518	0,3000	6,913	5,530
5	ІЕЗ-2008	0,0106	0,0017	1,0044	0,0892	4,783	1,645
—	МС4-2016	—	—	0,6375	0,1275	3,036	2,350
				0,61455	0,3184	2,926	5,867
9	ЛРЗ-2015	0,0239	0,0020	0,6375	0,1223	3,036	2,255
				1,8425	0,2750	8,773	5,069
				Усереднені дані		5,305	3,323

* — номер партії згідно позицій табл. 2.

нього значення відповідних коефіцієнтів до $K_{[O]} = 51,55$ і $K_{[N]} = 19,11$. Максимальні вміст Оксигену $[O] = 17,86\text{--}22,88\%$ ваг., Нітрогену $[N] = 1,57\text{--}2,77\%$ ваг. та середні значення відповідних коефіцієнтів $K_{[O]} = 96,74$ і $K_{[N]} = 39,99$ спостерігаються на поверхні валика стопу ЖС32, нагрітого з захистом в атмосфері аргону (див. рис. 6).

ТАБЛИЦЯ 6. Порівняння результатів вимірювання вмісту Оксигену та Нітрогену в неякісному («тип 1») присадному порошку нікелевого жароміцного стопу ЖС32 різних партій за методикою МВП (середньоваговий вміст) та за методикою РСМА (на поверхні частинки порошку).

TABLE 6. Comparison measurements of the oxygen and nitrogen content in the low quality ('type 1') JhS32 filler powder of different batches by the reduction melting method (weight average content) and EDX (surface of the powder).

№*	Партія порошку після повторного використання	МВП		РСМА		На основі даних РСМА	
		[O], % ваг.	[N], % ваг.	[O], % ваг.	[N], % ваг.	$K_{[O]}$	$K_{[N]}$
6	ІЕЗ-2008БВ	0,0157	0,0022	3,348	0,2339	15,943	3,341
9	ЛРЗ-2015БВ	0,0271	0,0029	3,678	0,4020	17,514	7,410
2	ІПр-2004БВ	0,0143	0,0008	2,516	0,1691	11,978	3,117
				1,966	0,1482	9,360	2,731
12	МСЗ-2016БВ	0,0075	0,0022	2,324	0,1536	11,064	2,830
Усереднені дані						13,172	3,886
Усереднені значення на основі статистичної вибірки даних РСМА [O] > 2,4%							
6	100% окиснених частинок (за ІЕЗ-2008)	—	—	3,910	0,2538	18,619	4,673
9	100% окиснених частинок (за ЛРЗ-2015)	—	—	3,678	0,4020	17,514	7,410
2	100% окиснених частинок (за ІПр-2004)	—	—	3,728	0,2657	17,523	4,898
2	100% окислених частинок (за ІПр-2004)	—	—	3,477	0,3000	16,556	5,530
12	100% окиснених частинок (за МСЗ-2016)	—	—	4,455	0,1561	21,210	2,876
Усереднені дані						18,284	5,077

* — номер партії згідно позицій табл. 2.

Співставлення значень даних щодо вмісту домішок Оксигену і Нітрогену, визначених за методиками МВП і РСМА, свідчить про якісний характер експериментальних даних РСМА. Але, не зважаючи на якісний характер проведених вимірювань, експерименти за методикою РСМА чітко ідентифікували всі рівні послідовного збільшення концентрації Оксигену та Нітрогену у типових станах присадного порошку ЖС32 та інших змодельованих випадках: високої якості — якісний — неякісний «тип 1» — неякісний «тип 2» — штучно окиснений на повітрі за температури 500°C — поверхня натопленого валика. Це дозволило шляхом математичного моделювання в рамках прийнятої фізичної моделі окремої дисперсної частинки (див. рис. 1) для розглянутих у даній роботі типових станів присадного порошку ЖС32 сформулювати уявлення про товщину приповерхневого шару зі збільшеною концентрацією цих домішок.

Встановлено, що товщину приповерхневого шару зі збільшеною концентрацією Нітрогену для неякісного порошку «тип 2» можна визначити як $dR = 3-4$ мкм (рис. 7, а). Товщина приповерхневого шару зі збільшеною концентрацією Оксигену характеризується (рис. 7, б, в): для неякісного порошку «тип 1» — переважно як

ТАБЛИЦЯ 7. Порівняння результатів вимірювання вмісту Оксигену та Нітрогену в неякісному присадному порошку нікелевого жароміцного стопу ЖС32 різних партій за методикою МВП (середньоваговий вміст) та за методикою РСМА (на поверхні частинки порошку або на поверхні натопленого валика).

TABLE 7. Comparison measurements of the oxygen and nitrogen content in the low quality JhS-32 filler powder of different batches and by the reduction melting method (weight average content) and EDX (on the surface of the powder particles or on the surface of the weld bead).

№*	Партія порошку	МВП		Метод РСМА		На основі даних РСМА	
		[O], % ваг.	[N], % ваг.	[O], % ваг.	[N], % ваг.	$K_{[O]}$	$K_{[N]}$
1	МС1-2015	0,0380	0,0040	8,017	0,8325	38,170	15,346
2	ІЕЗ-2008 окиснений	—	—	10,976	1,025	52,267	18,894
3	ІЕЗ-2008 окиснений	—	—	10,675	1,048	50,833	19,318
4	Натоплений валик	0,0015—	0,00043—	22,876	2,769	108,935	51,034
5	Натоплений валик	0,0019	0,00050	17,756	1,570	84,552	28,941

* — номер партії згідно позицій табл. 2.

$dR < 1,5$ мкм, для неякісного порошку «тип 2» — $dR = 1,5–2,0$ мкм.

Відомо, що через високу ринкову вартість спеціалізованих присадних порошків ($\approx 200–500$ американських доларів/кг) за кордоном відмічається систематичний інтерес до більш раціонального їх використання за 3D-технологіями натоплення [16–18]. Співставлення отриманих в даній роботі даних з оцінки товщини приповерхневого шару зі збільшеною концентрацією домішок $dR \leq 4$ мкм з відомими даними щодо глибини різання матеріалу у разі шліфування (5–50 мкм) та полірування (до 0,1 мкм) за один прохід [19]

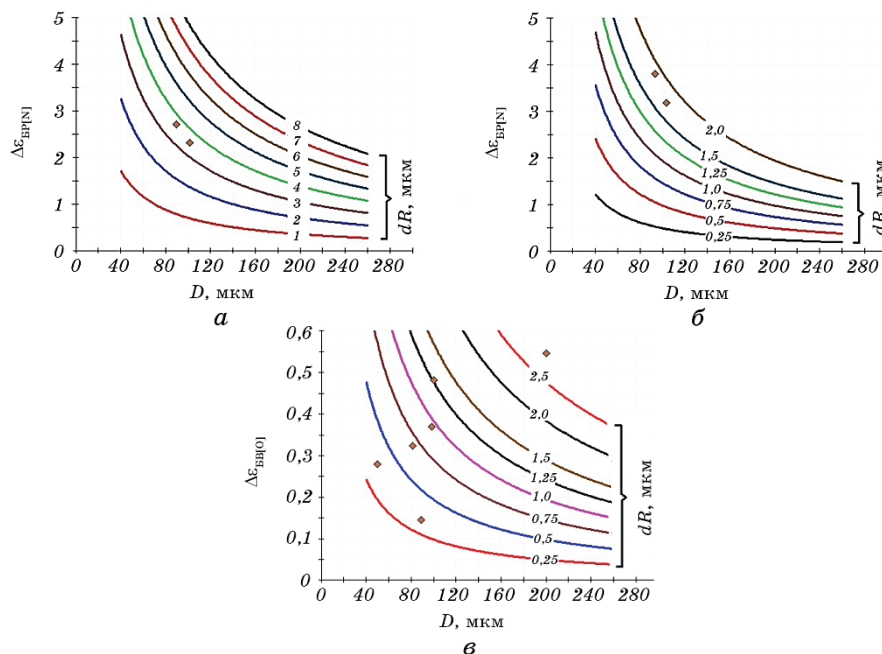


Рис. 7. Моделювання відносного збільшення середньовагового газовмісту в партіях неякісного присадного порошку ЖС32 залежно від середнього діаметра частинки D та товщини приповерхневого шару dR зі збільшеною концентрацією Оксигену або Нітрогену: *a* — $\Delta\epsilon_{BV[N]}$ для Нітрогену, неякісний «тип 2», $K_{[N]H} = 3,32$ і $K_{[N]BV} = 15,35$; *б* — $\Delta\epsilon_{BV[O]}$ для Оксигену, неякісний «тип 2», $K_{[O]H} = 5,30$ і $K_{[O]BV} = 38,17$; *в* — $\Delta\epsilon_{BV[O]}$ для Оксигену, неякісний «тип 1», $K_{[O]H} = 5,30$ і $K_{[O]BV} = 18,28$. \blacklozenge — експериментальні дані.

Fig. 7. Modelling of the relative increase of weight average gas content of the ZhS32 low-quality filler powder as function of the average diameter of the particle D and the thickness of the sub-surface layer dR with increased concentration of oxygen or nitrogen: *a* — $\Delta\epsilon_{BV[N]}$ for nitrogen, low-quality 'type 2', $K_{[N]H} = 3.32$ and $K_{[N]BV} = 15.35$; *b* — $\Delta\epsilon_{BV[O]}$ for oxygen, low-quality 'type 2', $K_{[O]H} = 5.30$ and $K_{[O]BV} = 38.17$; *v* — $\Delta\epsilon_{BV[O]}$ for oxygen, low-quality 'type 1', $K_{[O]H} = 5.30$ and $K_{[O]BV} = 18.17$. \blacklozenge — experimental data.

свідчать про принципову можливість відновлення зварювально-технологічних властивостей неякісного присадного порошку типу ЖС32 механічною обробкою.

Для найімовірніших товщин приповерхневого шару зі збільшеною концентрацією домішок Оксигену $dR = 1,5$ мкм та Нітрогену $dR = 3$ мкм на рис. 8 проаналізовано вплив експериментально встановлених діапазонів коефіцієнтів відносного збільшення їхньої концентрації $K_{[O]}$ і $K_{[N]}$ на загальний середньоваговий газовміст присадного порошку ЖС32, що визначається за стандартизованою МВП.

Показано, що в системі градації якості присадного порошку ЖС32 (якісний — неякісний «тип 1» — неякісний «тип 2») наявність такого приповерхневого шару збільшуватиме загальний середньоваговий газовміст Оксигену і Нітрогену за значень $K_{[O]} = 3-40$ і $K_{[N]} = 1,4-20$ — від 0,1–0,3 до 6–8 разів відповідно. Таким чином, на

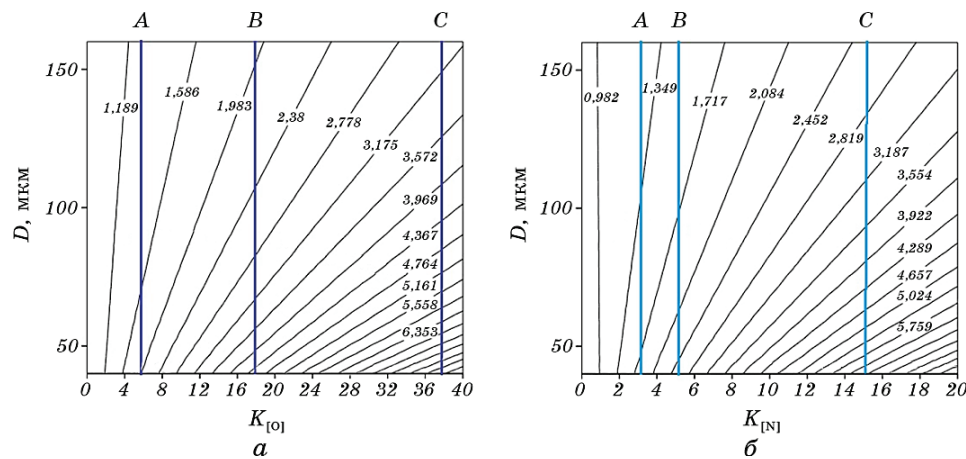


Рис. 8. Моделювання відносного впливу на середньоваговий вміст домішок Оксигену та Нітрогену для частинки присадного порошку ЖС32 середнім діаметром D залежно від значень коефіцієнту відносного збільшення концентрацій $K_{[O]}$ і $K_{[N]}$ в її приповерхневому шарі товщиною dR : a — для Оксигену з $dR = 1,5$ мкм; b — для Нітрогену з $dR = 3,0$ мкм. Усереднені значення $K_{[O]}$ і $K_{[N]}$ наведено для типових станів порошку: A — якісного нового; B — після багаторазового використання, неякісний «тип 1»; C — для неякісного порошку «тип 2».

Fig. 8. Modelling of the relative effect on the average weight content of oxygen and nitrogen impurities for the particles of filler powder ZhS32 with an average diameter D depending on the values of the coefficient of relative increase of concentrations $K_{[O]}$ and $K_{[N]}$ in its sub-surface layer dR : a —for oxygen with $dR = 1.5$ μm ; b —for nitrogen with $dR = 3.0$ μm . The averaged values of $K_{[O]}$ and $K_{[N]}$ given for typical powder states: A —qualitative ‘new’; B —after repeated use, low-quality ‘type 1’; C —low-quality powder ‘type 2’.

основі експериментальних даних та математичних розрахунків встановлено, що незалежно від якості присадного порошку нікелевого жароміцного стопу ЖС32, діапазони середньовагового газовмісту у внутрішніх об'ємах його дисперсних частинок складають: $[O] \approx 0,005\text{--}0,010\%$ ваг., $[N] \approx 0,0005\text{--}0,0015\%$ ваг.

4. ВИСНОВКИ

1. Показано, що наявність на поверхні окремої частинки шару товщиною до 4 мкм з підвищеною концентрацією домішок Оксигену та Нітрогену суттєво впливає на результати оцінки їх загального середньовагового вмісту у відповідних пробах присадного порошку фракцією 40–160 мкм, що визначають за методикою МВП: для Оксигену — збільшення від 0,1–0,3 до 6–8 разів за значень $K_{[O]} = 3\text{--}40$; для Нітрогену — збільшення від 0,1–0,3 до 6–8 разів за значень $K_{[N]} = 1,4\text{--}20$.

2. З метою адекватної оцінки якості присадного порошку нікелевих ЖС для МПН запропоновано стандартизовану методику МВП визначення середньовагового вмісту домішок Оксигену і Нітрогену за вхідного контролю доповнювати дослідженнями за методикою РСМА, що дозволяє оцінити відносне збільшення їх вмісту у приповерхневих шарах окремих частинок.

3. Запропоновано застосовувати наступний алгоритм дослідження проби присадного порошку нікелевого ЖС за її вхідного контролю на вміст домішок Оксигену та Нітрогену:

- кількісна оцінка середньовагового газовмісту за методикою МВП у потоці газу-носія;

- якісні оцінки газовмісту на базі 20–25 вимірювань за методикою РСМА у поперечному перерізі дисперсної частинки порошку та на поверхні окремих частинок;

- кількісне визначення і аналіз значень коефіцієнтів відносного збільшення вмісту домішок $K_{[O]}$ і $K_{[N]}$ у приповерхневих шарах окремої типової частинки присадного порошку.

4. Розроблену методику застосовано для уточнення вимог до якості присадного порошку стопу ЖС32 у діапазоні середньовагового вмісту $[O] \leq 0,025\%$ ваг. і $[N] \leq 0,004\%$ ваг. Встановлено, що якісний порошок ЖС32 повинен мати наступні обмеження за коефіцієнтами відносного збільшення вмісту домішок у приповерхневих шарах окремих частинок $K_{[O]} < 9$ і $K_{[N]} < 6$.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Г. П. Калашников, Н. В. Андрейченко, О. С. Белозерцев, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9: 221 (2005).

2. K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. V. Yarovitsyn, A. A. Nakonechny, G. F. Nastenka, V. E. Zamkovo, O. S. Belozertsev, and N. V. Andrejchenko, *The Paton Welding J.*, **8**: 21 (2010).
3. P. D. Zhemanyuk, I. A. Petrik, and S. L. Chigilejchik, *The Paton Welding J.*, **8**: 39 (2015).
4. Ю. Ф. Терновой, С. А. Баглюк, С. С. Кудиевский, *Теоретические основы распыления металлических расплавов* (Запорожье: Запорожская государственная инженерная академия: 2008).
5. K. A. Yushchenko and A. V. Yarovitsyn, *The Paton Welding J.*, **6–7**: 115 (2014).
6. K. A. Yushchenko, O. V. Yarovitsyn, H. D. Khruschov, I. A. Petryk, and S. L. Chyhileychik, *Proc. of Symp. '9th Int. Conf. of Young Scientist on Welding and Related Technologies' (23–26 May, 2017)* (Kyiv: PWI N.A.S. of Ukraine: 2017), p. 257.
7. А. М. Вассерман, Л. Л. Куни, Ю. Н. Суровой, *Определение газов в металлах* (Москва: Наука: 1976).
8. *ДСТУ ISO 4491-4:2016 (ISO 4491-4:2013, IDT)* Порошки металеві. Методи визначення вмісту кисню відновлюванням. Частина 4. Загальний вміст кисню під час визначання методом відновного екстрагування.
9. *ГОСТ 17745-90* Сталь и сплавы. Методы определения газов.
10. *ASTME E1019-11*. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques (2011).
11. Дж. Гоулстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Д. Джой, Ч. Фиори, Э. Лифшин, *Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Книга 1* (Ред. В. И. Петров) (Москва: Мир: 1984).
12. *Количественный электронно-зондовый микроанализ* (Ред. В. Скотт, Г. Лав) (Москва: Мир: 1986).
13. K. A. Yushchenko, A. V. Yarovitsyn, D. B. Yakovchuk, A. A. Fomakin, and V. E. Mazurak, *The Paton Welding J.*, **9**: 30 (2013).
14. А. Г. Евгенов, С. В. Неруш, С. А. Василенко, *Труды ВИАМ*, № 5 (2014).
15. С. В. Неруш, А. С. Ермолаев, А. М. Рогалев, С. А. Василенко, *Труды ВИАМ*, № 8 (2016).
16. P. A. Carroll, P. Brown, G. Ng, Scudamore, A. J. Pinkerton, W. Syed, H. Sezer, L. Li, and J. Allen, *Proc. of Meeting 'RTO-MP-AVT-139'* (Neuilly-sur-Seine, France: RTO: 2006), Paper 18.
17. M. Renderos, F. Griffit, A. Lamikiz, A. Njrrregaray, and N. Sainter, *Physics Procedia*, **83**: 769 (2016).
18. V. Petroic and R. Niñerola, *Aircr. Eng. Aerosp. Tech.*, **87**, Iss. 2: 147 (2015).
19. Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов, *Восстановление деталей машин: Справочник* (Ред. В. П. Иванов) (Москва: Машиностроение: 2003).

REFERENCES

1. G. I. Peychev, V. E. Zamkovoy, G. P. Kalashnikov, N. V. Andrejchenko, and O. S. Belozertsev, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 9: 221(2005) (in Russian).

2. K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. V. Yarovitsyn, A. A. Nakonechny, G. F. Nastenko, V. E. Zamkovo, O. S. Belozertsev, and N. V. Andrejchenko, *The Paton Welding J.*, **8**: 21 (2010).
3. P. D. Zhemanyuk, I. A. Petrik, and S. L. Chigilejchik, *The Paton Welding J.*, **8**: 39 (2015).
4. Yu. F. Ternovoj, S. A. Baglyuk, and S. S. Kudievsky, *Teoreticheskie Osnovy Raspyleniya Metallicheskih Rasplavov* [Theoretical Principles of Metallic Melt Spraying] (Zaporozhie: Zaporozh. GIA: 2008) (in Russian).
5. K. A. Yushchenko and A. V. Yarovitsyn, *The Paton Welding J.*, **6–7**: 115 (2014).
6. K. A. Yushchenko, O. V. Yarovytsyn, H. D. Khruschov, I. A. Petryk, and S. L. Chyhileychik, *Proc. of Symp. '9th Int. Conf. of Young Scientist on Welding and Related Technologies' (23–26 May, 2017)* (Kyiv: PWI N.A.S. of Ukraine: 2017), p. 257.
7. A. M. Vasserman, L. L. Kunin, and Yu. N. Surovoy, *Opreделение Gazov v Metallakh* [Test Methods for Gas Determination in Metals] (Moscow: Nauka: 1976) (in Russian).
8. *DSTU ISO 4491-4:2016 (ISO 4491-4:2013, IDT)* Poroshky Metalevi. Metody Vyznachennya Vmistu Kysnyu Vidnovliuvannyam. Chastyna 4. Zahalnyy Vmist Kysnyu pid Chas Vyznachannya Metodom Vidnovnoho Ekstrahuvannya [Metallic Powders. Determination of Oxygen Content by Reduction Methods. Part 4: Total Oxygen by Reduction-Extraction] (in Ukrainian).
9. *GOST 17745-90*. Stali i Splavy. Metody Opredeleniya Gazov [Steels and Alloys. Gas Determination Methods] (in Russian).
10. *ASTME E1019-11*. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques (2011).
11. J. Goldstein, D. Newbury, P. Echlin, D. Joy, Ch. Fiori, and E. Lifshin, *Rastrovaya Elektronnaya Mikroskopiya i Rentgenovskiy Mikroanaliz: Kniga 1* (Ed. V. I. Petrov) [Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis] (Moscow: Mir: 1984) (in Russian).
12. *Kolichestvennyy Elektronno-Zondovyy Mikroanaliz* [Quantitative X-Ray Microanalysis] (Ed. V. Skott and G. Lav) (Moscow: Mir: 1986) (in Russian).
13. K. A. Yushchenko, A. V. Yarovitsyn, D. B. Yakovchuk, A. A. Fomakin, and V. E. Mazurak, *The Paton Welding J.*, **9**: 30 (2013).
14. A. G. Evgenov, S. V. Nerush, and S. A. Vasilenko, *Trudy VIAM*, No. 5: (2014) (in Russian).
15. S. V. Nerush, A. S. Ermolaev, A. M. Rogalev, and S. A. Vasilenko, *Trudy VIAM*, No. 8 (2016) (in Russian).
16. P. A. Carroll, P. Brown, G. Ng, Scudamore, A. J. Pinkerton, W. Syed, H. Sezer, L. Li, and J. Allen, *Proc. of Meeting 'RTO-MP-AVT-139'* (Neuilly-sur-Seine, France: RTO: 2006), Paper 18.
17. M. Renderos, F. Griffit, A. Lamikiz, A. Njrregaray, and N. Sainter, *Physics Procedia*, **83**: 769 (2016).
18. V. Petroic and R. Niherola, *Aircr. Eng. Aerosp. Tech.*, **87**, Iss. 2: 147 (2015).
19. F. I. Panteleenko, V. P. Lyalyakin, V. P. Ivanov, and V. M. Konstantinov, *Vosstanovlenie Detaley Mashin: Spravochnik* [Recondition of Machine Parts: Reference Book] (Ed. V. P. Ivanov) (Moscow: Mashinostroenie: 2003) (in Russian).