

УДК 621.791.92

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

*І. О. РЯБЦЕВ, А. А. БАБІНЕЦЬ, І. П. ЛЕНТЮГОВ, В. О. ЖДАНОВ,
І. І. РЯБЦЕВ, В. В. ОСИН*

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Створено та удосконалено методики та зразки для комплексної оцінки експлуатаційних властивостей матеріалів для наплавлення деталей та інструментів для оброблення металів тиском. Зокрема, удосконалено методику оцінки зносотривкості наплавленого металу за кімнатних (20°C) та підвищених (600°C) температур, а також його термічної тривкості. Розроблено конструкції зразків та обрано оптимальні режими їх випроб, які імітують реальні умови експлуатації. Встановлено, що з введенням 0,01% мікрододаєтків бору експлуатаційні властивості наплавлених металів 25Х5ФМС та 35В9Х3СФ поліпшуються в 1,2–1,6 раза. Удосконалено склад шихти порошкових дротів ПП-Нп-25Х5ФМС та ПП-Нп-35В9Х3СФ введенням до неї лігатури ФМІ-2, що містить бор.

Ключові слова: *дугове наплавлення, наплавлений метал, модифікування, методика досліджень, зносо- та термічна тривкість.*

Methods and samples have been developed and improved for comprehensive evaluation of the operational properties of materials for hardening parts and tools for pressure metal processing. In particular, the method for assessing the wear resistance of deposited metal at room (20°C) and elevated (600°C) temperatures, as well as the thermal stability of deposited metal, is improved. Designs of samples and optimal test modes, which simulate their real operating conditions, are selected. It is established that the introduction of the boron microadditives in the amount of 0.01% leads to an increase in the service properties of the deposited 25Х5ФМС and 35В9Х3СФ steels in 1.2–1.6 times. According to these results, the composition of the flux-cored ПП-Нп-25Х5ФМС and ПП-Нп-35В9Х3СФ wires was improved due to the addition of FMI-2 ligature containing boron.

Keywords: *arc surfacing, deposited metal, modification, test methods, wear and thermal resistance.*

Вступ. Одними із найважливіших експлуатаційних властивостей інструментів для холодного та гарячого деформування металів та сплавів є зносотривкість за кімнатних і підвищених (до 700°C) температур, а також термічна та механічна втомна довговічність [1, 2]. Зокрема, валки для гарячої деформації металів тиском, ролики МБЛЗ, штампи, прес-форми та інші деталі залежно від умов експлуатації найчастіше потребують ремонту через механічне зношування, термічну або термомеханічну втому, або одночасну дію цих чинників [1–8]. Поліпшити їх експлуатаційні властивості можна, наплавляючи на поверхню шари металу із підвищеною зносо- та термотривкістю [1, 2]. При цьому необхідно порівняльно оцінити експлуатаційні характеристики наплавлених деталей, а отже, обґрунтовано вибрати матеріали для наплавлення.

Сьогодні стандартні методики випробувань багатошарових наплавлених зразків або відсутні, або конструктивно обмежені для використання [9, 10]. Тому

Контактна особа: І. О. РЯБЦЕВ, e-mail: ryabtsev39@gmail.com

слід розробити нові або вдосконалити існуючі методики та зразки, щоб комплексно проаналізувати властивості наплавленого металу. Цьому присвячене це дослідження.

Матеріали для випроб. Для наплавлення використовували порошкові драти (ПД) ПП-Нп-25Х5ФМС та ПП-Нп-35В9Х3СФ. Щоб поліпшити експлуатаційні властивості, у шихту ПД додавали бор у вигляді лігатури ФМІ-2 з таким розрахунком, щоб його вміст в наплавленому металі (сталях 25Х5ФМС і 35В9Х3СФ) не перевищував 0,01%. Таку його кількість обрали, враховуючи результати попередніх досліджень, щоб уникнути появи кристалізаційних тріщин [11].

Як основний метал для наплавлення застосовували пластини зі сталі 40Х, а як еталон – зразки, виготовлені зі сталі 45. Наплавлювали дослідні зразки автоматично під шаром флюсу АН-26П за однакових режимів: струм 220...230 А, напруга 36...37 V, швидкість наплавлення 25 м/х. Щоб уникнути впливу на хімічний склад наплавленого металу перемішування з основним металом, кожен зразок наплавлювали в п'ять шарів (див. таблицю).

Хімічний склад та твердість використовуваного наплавленого металу

№ зразка	Тип наплавленого металу	Вміст, mass%								Твердість HRC
		C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	B	
1	25Х5ФМС	0,24	0,89	0,62	5,1	–	1,06	0,60	–	46...50
2		0,26	0,86	0,64	5,4	–	0,99	0,54	0,01	49...52
3	35В9Х3СФ	0,35	0,83	0,95	2,5	8,52	–	0,32	–	52...54
4		0,33	0,79	1,08	2,6	8,67	–	0,36	0,01	53...55

Вивчення властивостей наплавленого металу. Для цього використовували лабораторну установку для дослідження термічної та зносотривкості наплавленого металу під час тертя металу об метал за кімнатної або підвищеної (до 600°C) температур. Установка має два приводи і спроектована за блочно-модульним принципом: для того чи іншого виду випробувань до приводів під'єднують відповідні модулі [12] (рис. 1). Зносотривкість матеріалу за кімнатної температури оцінювали методом витирання ямок за схемою контакту “вал–площина” без додаткової подачі мастила в зону тертя. Установка працює так: двигун (1) через редуктор (2) обертає патрон (3) із закріпленим у ньому валом передачі обертання на модуль тертя (4). На валу, який обертається в корпусі модуля тертя, закріплюють змінне сталеве кільце-контртіло (5). На напрямних каретки (6) встановлено супорт зі системою позиціонування із закріпленим у ній зразком (7). Під дією навантаження P зразок притискається до контртіла. Сила тертя, що виникає при цьому, прагне повернути зразок, супорт і пов'язану з ним каретку навколо осі, чому перешкоджає динамометрична пружина (8), деформацію якої фіксує індуктивний давач (9).

Модуль тертя додатково оснастили системою позиціонування зразків щодо кільця-контртіла. Це дало можливість виконувати декілька випробувань на новій ділянці поверхні тертя зразка та новій доріжці тертя контртіла. Удосконалена вимірвальна система контролює та записує у комп'ютер навантаження, силу тертя, швидкість обертання зразка, довжину доріжки тертя. Коефіцієнт тертя розраховували як частку від ділення сили тертя на навантаження, похибка не перевищувала 5%.

Зразки розміром 3×15×25 mm вирізали з наплавленого металу так, щоб досліджувана площа потрапляла у верхні його шари (рис. 2а). Кільце-контртіло Ø 40 mm і заввишки 12 mm виготовляли зі сталі 45 і загартовували на твердість

HRC 48...52. Під час випробувань зразок з певним зусиллям притискається до кільця-контртіла, через що на випробуваній його площині утворюється ямка, а на поверхні контртіла – доріжка (рис. 2b, c). Випробовували в широкому діапазоні навантаження, аж до режиму “на межі заїдання”.

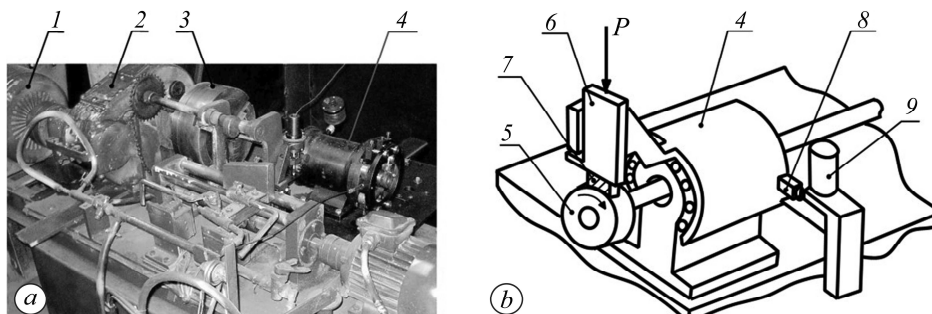


Рис. 1. Зовнішній вигляд установки зі встановленим модулем для випробувань зносотривкості матеріалу за кімнатної температури (a) та схема модуля (b) (позначення див. у тексті).

Fig. 1. External view of the installation with the installed module for material wear resistance tests at room temperature (a) and the diagram of the module (b) (see designations in the text).

Використовуючи результати попередніх експериментів, розробили таку методику випробування зразків: навантаження 30 N, швидкість ковзання 1 m/s, частота обертання кільця-контртіла 30 tur/min; шлях тертя 113 m. Такий режим забезпечував стабілізацію характеристик зношування всіх зразків, не доводячи їх до “межі заїдання”.

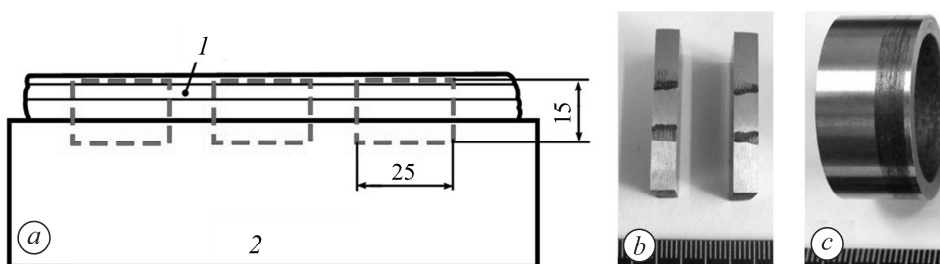


Рис. 2. Схема вирізання зразків із наплавленого металу (a) та зовнішній вигляд зразків (b) і контртіла (c) після випробувань на зносотривкість під час тертя металу об метал при 20°C: 1 – наплавлений метал; 2 – основний.

Fig. 2. Scheme of cutting samples made of deposited metal (a) and an external view of samples (b) and a counter body (c) after wear resistance tests with metal-on-metal friction at 20°C: 1 – deposited metal; 2 – base metal.

Зношування зразка залежить від об’єму витертої ямки, який розраховували за відомого середнього значення її ширини, виміряної інструментальним мікроскопом:

$$V = a \cdot \left[\frac{\pi \cdot R^2}{180} \left(\arcsin \frac{b}{R} \right) - \frac{b}{2} \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}} \right], \quad (1)$$

де R – зовнішній радіус контртіла; a – ширина зразка; b – ширина ямки.

Зношування контртіла визначали за різницею його маси до і після зважування на вагах з похибкою $\leq 0,005$ g. Зносотривкість за підвищеної температури (до

600°C) оцінювали за схемою контакту “вал–площина” під час тертя металу об метал (рис. 3). Під час випробувань газовий різак (1) нагріває зношувальне кільце зі сталі 45 (2), яке обертається в оправці від приводу (5). З протилежного кінця оправку підтискає упор. Зразок (3) закріплений у лещатах, змонтованих на напрямних. За допомогою ексцентрикового кулачка та ланцюгової передачі від приводу лещата зі зразком постійно зворотно-поступально рухаються у вертикальній площині. Навантаження в контактні пари тертя здійснювали за допомогою важільного механізму (4) та знімних вантажів.

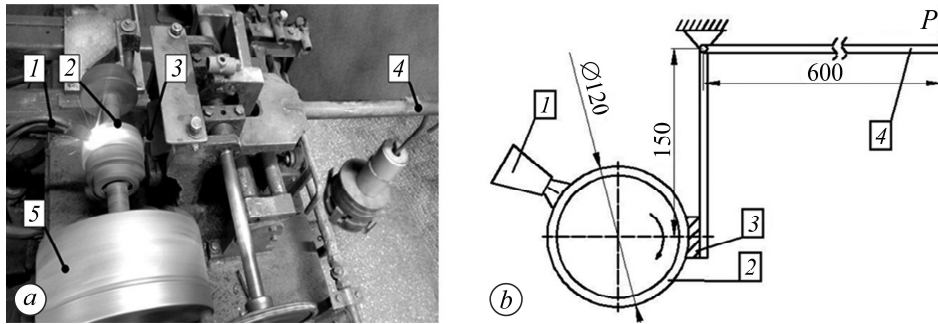


Рис. 3. Зовнішній вигляд установки із модулем випробувань зносотривкості під час тертя металу об метал за підвищених температур (а) та схема випробувань (b) (позначення див. у тексті).

Fig. 3. External view of the installation with the module for wear resistance test during metal-on-metal friction at elevated temperatures (a) and test scheme (b) (see designations in the text).

Зворотно-поступальний рух зразка вибрали, щоб зберегти сталість питомого тиску у місці контакту кільце-зразок. За відсутності руху під час зношування на поверхні зразка утворюватиметься ямка, а отже, зростатиме площа контакту тертя і змінюватиметься питомий тиск. До основних параметрів випробувань відносять: питомий тиск на дослідний зразок, температура його нагрівання, швидкість відносного переміщення елементів, що труться (швидкість тертя), властивості матеріалу і температура кільця-контртіла. Виготовляли зразки наплавленням окремими валиками на торець пластин розмірами 15×25×200 mm, які обробляли на фрезерних верстатах, щоб досягти розміру 10×17×40 mm, при цьому зношувальна поверхня мала розміри 10×17 mm і прошліфована до 7–8 класу шорсткості. Зносотривкість визначали за втратою маси зразка до і після випробування, середнє значення якої розраховували за результатами випробувань п’яти зразків одного типу.

Залежно від умов експлуатації навантаження на важільний механізм, за допомогою якого створювали тиск на зразок, можна змінювати вантажами різної маси. Співвідношення плечей важільного механізму за вантажу 20 kg забезпечує притискання зразка до зношувального кільця зусиллям 800 N.

Питомий тиск у місці контакту під час дотику циліндричної поверхні нагрітого кільця з площиною зразка визначали за формулою

$$P_{\text{спец}} = 0,798 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{D \cdot \left(\frac{1-\mu^2}{E_1} + \frac{1-\mu^2}{E_2} \right)}}, \quad (2)$$

де $\rho = P/l$, P – зусилля притискання; l – ширина зразка (10 mm); D – діаметр кільця (120 mm).

Вважаючи значення коефіцієнта Пуассона та модулів пружності для нагрітої сталі та випробуваного зразка рівними, відповідно, $\mu = 0,3$; $E_1 = 25000$ МПа; $E_2 = 20000$ МПа, отримали значення питомого тиску 100 МПа. Швидкість тертя в експериментах становила 20...22 м/мін, що відповідає найуживанішим режимам експлуатації інструментів гарячого деформування металів.

Для визначення температури нагріву поверхні дослідного зразка під час налаштування режиму випробувань застосовували контрольний зразок, у який впаювали три термопари на різній відстані від досліджуваної поверхні: 0,5; 2 та 3 мм. Термопари під'єднували до потенціометра і вимірювали температуру в цих точках: на відстанях від поверхні 0,5; 2 і 3 мм вона становила 550; 230 і 190°C, відповідно. За трьома точками будували криву, екстраполювали її на вісь ординат і отримали температуру на поверхні зразка $\approx 650^\circ\text{C}$. Виявили, що саме до таких температур найчастіше нагріваються під час експлуатації поверхневі шари валків для гарячої деформації металів тиском [1]. В експериментах, маючи строго визначену витрату природного газу і кисню в газовому різачку, температуру кільця-контртіла підтримували сталюю в межах 650...700°C, що періодично контролювали оптичним пірометром.

Для оцінки термічної тривкості наплавленого металу використовували відповідний модуль дослідної установки (рис. 4а) та методику, за якою ретельно моніторили циклічне нагрівання–охолодження наплавленої поверхні зразків до появи на ній першої тріщини або сітки тріщин розпапу (рис. 4б). Зразок (2) розміром 40×40×40 мм встановлювали в оправці наплавленою поверхнею до газокисневого різачка (1). Охолоджували його струменем води (3). Привід зворотно-поступального руху (4) забезпечує циклічне переміщення зразка від зони нагріву до зони охолодження. Маючи задані витрати природного газу і кисню, а також час витримки, температуру на поверхні зразка у плямі $\varnothing 20$ мм, можна підтримувати на рівні 630...650°C. Під час охолодження вона не перевищує 80°C, що контролювали оптичним пірометром.

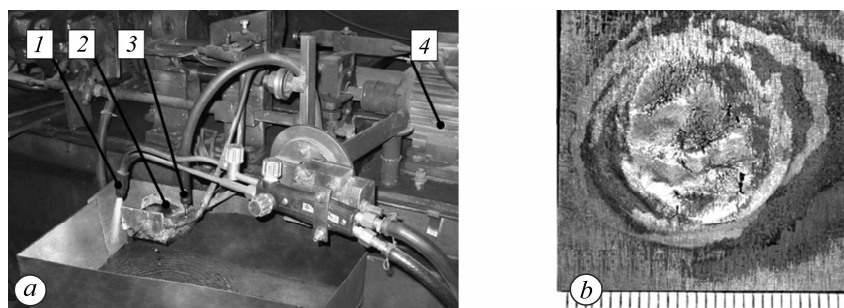


Рис. 4. Блок установки для дослідження термотривкості наплавлених зразків (а) та їх поверхня (б) після випробувань (позначення див. у тексті).

Fig. 4. The installation unit for heat resistance testing of deposited samples (a) and their surface (b) after tests (see designation in the text).

Такі режими термоцикування обирали, щоб уникнути перегріву металу, а отже, впливу фазових перетворень на термічну тривкість, а розміри зразка – враховуючи вплив масштабного чинника під час визначення термічної втоми. Вибираючи ширину зразка, враховували умову збереження одновісного напруженого стану у всіх його точках.

Існуючу методику випробувань [12] удосконалювали так. На першому етапі зразки термоцикували до моменту появи розвиненої сітки тріщин в околі 20 мм, видимому неозброєним оком. На другому їх випробували до 200 cycles, далі розрізали та за допомогою оптичної мікроскопії заміряли середню глибину розпов-

сходження тріщин. Виявили, що після більше 200 cycles термічні тріщини не розповсюджуються, їхня глибина не перевищує 0,5 mm і не збільшується, зростає тільки розкриття їх країв. Таким чином, термічну тривкість наплавлених зразків порівнювали за двома показниками – кількістю циклів до появи першої тріщини та середньою глибиною тріщин під час досягнення 200 cycles нагрівання–охолодження.

В усіх дослідженнях як еталон використовували зразки зі сталі 45, які загартовували на твердість HRC 48...52. Службові характеристики наплавленого металу порівнювали з відповідними зразків-еталонів, які приймали рівними умовній одиниці.

Оцінка ефективності розроблених методик під час дослідження впливу модифікування бором на властивості наплавленого металу. Вивчали властивості двох ПД для наплавлення ПП-Нп-25Х5ФМС та ПП-Нп-35В9Х3ГСФ, у шихту яких вводили мікрододатки бору у вигляді лігатури ФХБ-2 (рис. 5). Наплавлений метал 35В9Х3СФ без бору менше зношується за кімнатної та підвищеної (600°C) температур, ніж метал 25Х5ФМС, що можна пояснити вищим вмістом вуглецю. Водночас за високої концентрації вуглецю та вольфраму термічна тривкість металу знижується. Це пояснюють тим, що вольфрам, як і вуглець, підвищує твердість наплавленого металу і знижує його пластичність через утворення власних карбідів. За вмісту вуглецю понад 0,3% у металі з'являється надлишок карбідних фаз за межами зерен. Навуглецювання поверхні також значно пришвидшує процес утворення та розповсюдження тріщин, адже зменшується в'язкість сталі та її здатність релаксувати напруження [11, 13]. З введенням 0,01% бору експлуатаційні властивості наплавленого металу обох типів поліпшуються. При цьому метал 35В9Х3СФ зносотривкіший, ніж 25Х5ФМС. Термотривкість металу 35В9Х3СФ з бором практично досягає таких же значень, як і металу 25Х5ФМС без нього.

Такий позитивний вплив бору, очевидно, можна пояснити подрібненням мікроструктури наплавленого металу та коагуляцією бору, вуглецю і вольфраму у виділення складних карбоборидів сферичної форми, які достатньо рівномірно розташовані у матриці металу [11, 13], що призводить до підвищення його в'язкості.

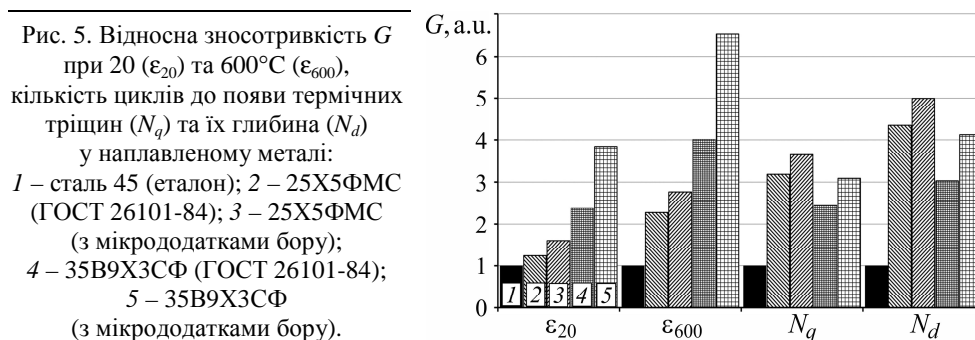


Fig. 5. Relative wear resistance G at 20 (ϵ_{20}) and 600°C (ϵ_{600}), the number of cycles before the appearance of thermal cracks (N_q) and their depth (N_d) in the deposited metal:
 1 – steel 45 (reference metal); 2 – 25Х5ФМС (ГОСТ 26101-84); 3 – 25Х5ФМС (with microadditives of boron); 4 – 35В9Х3СФ (ГОСТ 26101-84);
 5 – 35В9Х3СФ (with microadditives of boron).

ВИСНОВКИ

Розроблено конструкції зразків, вибрано режими випробувань та удосконалено методики для комплексної порівняльної оцінки експлуатаційних властивос-

тей наплавлених деталей в умовах циклічного термосилового навантаження та під час тертя металу об метал за кімнатної та підвищеної температур. Встановлено, що за вмісту 0,01% бору зносотривкість наплавлених металів 25Х5ФМС та 35В9Х3СФ зростає у 1,2–1,6 раза, а термотривкість – у 1,2–1,3 раза. При цьому найкращі експлуатаційні властивості має метал 35В9Х3СФ з бором.

1. *Ryabtsev I. A., Senchenkov I. K., and Turek E. V.* Surfacing, Materials, Technologies, Mathematical Modeling. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 2015. – 590 p. [in Russian].
2. *Втомна довговічність наплавлених деталей / І. О. Рябцев, В. В. Книш, А. А. Бабінець, С. О. Соловей.* – К.: Інтерсервіс, 2022. – 204 с.
3. *Microstructure and properties of surfacing layers of dies manufactured by bimetal-gradient-layer surfacing technology before and after service / F. Gao, Ji. Zhou, Ju. Zhou, L. Shen, J. Zhang, Y. Tao, and M. Li // Int. J. of Adv. Manufact. Techn.* – 2017. – № 88. – P. 1289–1297. DOI: 10.1007/s00170-016-8679-0
4. *Ahn D.-G.* Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A Review // *Int. J. of Precision Eng. and Manufact.* – 2013. – **14**, № 7. – P. 1271–1283. DOI: 10.1007/s12541-013-0174-z
5. *Structural degradation and damage caused by a system of cracks to the steel of metallurgical equipment / P. V. Yasnii, P. O. Marushchak, I. V. Konovalenko, and R. T. Bishchak // Materials Science.* – 2009. – **45**, № 6. – P. 798–803. DOI: 10.1007/s11003-010-9245-9
6. *Persson A., Hogmark S., and Bergstrom J.* Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels // *Surf. and Coat. Techn.* – 2005. – **191**, № 2–3. – P. 216–227. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.04.053
7. *Jhavar S., Paul C. P., and Jain N. K.* Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review // *Eng. Failure Analysis.* – 2013. – № 34. – P. 519–535. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.09.006
8. *Du Toit M. and Van Niekerk J.* Improving the life of continuous casting rolls through submerged arc cladding with nitrogen-alloyed martensitic stainless steel // *Weld. in the World.* – 2010. – **54**, № 11–12. – P. 342–349. DOI: 10.1007/bf03266748
9. *Krechmar E.* Deposited metal testing methods. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy naplavki. Svoystva i ispytaniya naplavlennogo metalla / Pod red. I. I. Frumina. – Kyiv: IES im. E. O. Patona, 1979. – P. 3–20. [in Russian].
10. *Aleksyuk M. M., Borisenko V. A., and Krashchenko V. P.* Mechanical tests at high temperatures. – Kyiv: Naukova Dumka, 1980. – 208 p. [in Russian].
11. *Influence of microalloying with boron on the structure and properties of deposited metal of the type of tool steel 25Kh5FMS / A. A. Babinets, I. O. Ryabtsev, I. P. Lentuygov, I. L. Bogaichuk // The Paton Weld. J.* – 2022. – № 6. – P. 3–10. DOI: 10.37434/tpwj2022.06.01
12. *Ryabtsev I. I., Thernyak Ya. P., and Osin V. V.* Block-modular installation for testing deposited metal // *Welder.* – 2004. – № 1. – P. 18–20. [in Russian].
13. *Zhukov A. A., Postnova A. D., and Ryabov Y. V.* Features of thermal fatigue failure for die steels 3Kh2V8F and 4Kh5MFS under injection mold operating conditions // *Metal Sci. and Heat Treatment.* – 1994. – № 36. – P. 224–229. DOI: 10.1007/BF01400807

Одержано 07.04.2023