

УДК 669.15-194.6 + 669-157.8

- Грабовський В. Я. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vladimirgr45@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0936-6132
- Канюка В. І. завідувач лабораторією «Інструментальні сталі» інституту «УкрНДІспецсталь», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kanyukav@gmail.com
- Лисиця О. В. старший викладач кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ov_li@i.ua, ORCID: 0000-0002-9588-2450
- Єршов А. В. д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ershov@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0878-6434

ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ, ЯК ЗАМІННИКІВ ТЕПЛОСТІЙКИХ ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ, ВИСОКОАЗОТИСТИХ АУСТЕНІТНИХ ХРОМОМАНГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ З ВАНАДІЄМ ТА МОЛІБДЕНОМ

Мета роботи. Дослідження ефективності додаткового (поряд з ванадієм) легування високоазотистих аустенітних хромоманганцевих сталей молібденом для визначення перспектив їх використання замість високотеплостійких серійних штампових сталей мартенситного класу.

Методи дослідження. Металографічний, дюрOMETричний, випробування на розтяг та ударну в'язкість при кімнатній та високих температурах.

Отримані результати. Встановлені особливості дисперсійного твердіння та мікроструктур дослідницьких високоазотистих аустенітних хромоманганцевих сталей, що леговані ванадієм та молібденом. Визначені механічні властивості обраних сталей в залежності від вмісту зміцнювальних легувальних елементів. Виявлені суттєві переваги у високотемпературній (750 та 850 °C) міцності високоазотистих аустенітних хромоманганцевих сталей, легованих ванадієм та молібденом, порівняно з серійною високотеплостійкою штамповою сталлю марки 5ХЗВЗМФС (ДІІ23). Найбільші показники твердості та міцності відповідають дослідницькій сталі 60ХІІГІ6АФ2М2, що дозволяє рекомендувати її, як ефективний замітник штампових сталей, при вимогах підвищеного опору високотемпературному знеміцненню гарячештампового інструменту.

Наукова новизна. Визначена аномальна наявність мінімуму на кривих дисперсійного твердіння високоазотистих аустенітних хромоманганцевих сталей з молібденом та зсув його в бік меншої тривалості старіння при зростанні температури старіння. Виявлено утворення крупних частинок первинних надлишкових фаз при зростанні в сталях вмісту ванадію та молібдену. Встановлені залежності характеристик міцності та пластичності від сумарного легування досліджених аустенітних хромоманганцевих сталей азотом та вуглецем.

Практична цінність. Встановлена ефективність легування молібденом разом з ванадієм високоазотистих аустенітних хромоманганцевих сталей для забезпечення значних (в 1,5...2,5 рази) переваг у високотемпературній міцності порівняно з теплостійкими серійними штамповими сталями. Дослідницька сталь 60ХІІГІ6АФ2М2 може бути найбільш перспективним заміником штампових сталей в умовах високих силових навантажень при температурах експлуатації 750 °C та вище.

Ключові слова: високоазотиста аустенітна сталь, легування молібденом, дисперсійне твердіння, структура, надлишкові фази, високотемпературна міцність, переваги, теплостійка штампова сталь.

Вступ

Доцільність використання аустенітних сталей з дисперсійним твердінням замість високотеплостійких серійних штампових сталей мартенситного класу обумовлена їх більшим опором знеміцненню при температурах експлуатації вище 700 °C. Такі температури відповідають нагріву поверхневих шарів багатьох гарячештампових інструментів, наприклад матриць для гарячого пресування металів [1], що призводить до втрати їх працездатності внаслідок недостатньої високотемпературної міцності. Втрата працездатності

серійних штампових сталей внаслідок знеміцнення в області вказаних температур є принциповою, оскільки обумовлена наявністю в них поліморфного $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення. Серед аустенітних сталей з дисперсійним твердінням економічністю відрізняються високоазотисті аустенітні сталі на хромоманганцевій основі. Однак більшість робіт виконані по створенню та дослідженню вказаних сталей як нержавіючих та конструкційних матеріалів [2, 3 та ін.]. Водночас, вони перспективні для використання замість теплостійких штампових сталей при експлуатації в умовах

підвищеного силового та температурного навантаження. Так, в роботі [4] встановлені переваги у високотемпературній міцності, порівняно з високотеплостійкими штамповими сталями, високоазотистою (0,42 % N) аустенітної хромомарганцевої сталі, що легована ванадієм, з марочним позначенням 20X16Г16АФ. Вважається доцільним додаткове введення в таку сталь зміцнювальних хімічних елементів, здатних забезпечити зростання характеристик високотемпературної міцності і, відповідно, кращу працездатність гарячештampових інструментів.

Мета роботи

В даній роботі досліджена ефективність додаткового (поряд з ванадієм) легування високоазотистих аустенітних хромомарганцевих сталей молібденом для визначення перспектив їх використання, як заміників високотеплостійких серійних штампових сталей мартенситного класу. Позитивна роль молібдену в забезпеченні високотемпературної міцності обумовлена його здатністю знижувати швидкість дифузійних процесів знеміцнення при нагріві та утворювати при старінні зміцнювальну фазу типу Mo_2N .

Матеріал і методика досліджень

Обране легування сталей для проведення досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідницьких сталей

Номер сталі	Масова частка елементів, %					
	C	N	Cr	Mn	V	Mo
1	0,38	0,12	9,0	14,2	1,2	1,2
2	0,44	0,18	9,5	14,5	1,6	1,6
3	0,48	0,22	10,0	15,0	1,8	1,8
4	0,55	0,28	10,5	15,5	2,0	2,0
5	0,61	0,33	11,0	16,0	2,2	2,2

Примітка. Вміст Si в сталях знаходився в межах 0,8...1,1 %.

Вказані значення компонентів обрані для забезпечення сталям структури стабільного аустеніту та зміцнення при старінні дисперсними частинками відповідних карбідних та нітридних фаз. Вміст ванадію і молібдену, по мірі зростання номеру сталі, поступово збільшується від 1,2 до 2,2 % кожного при відповідному збільшенні вмісту вуглецю (0,38...0,61 %) та азоту (0,12...0,33 %). Розрахунки кількісної відповідності вмісту вказаних легувальних елементів виконували з урахуванням стехіометричного складу перш за все сполук зміцнювальних фаз типу VC, VN, Mo_2N та співвідношення атомних мас хімічних елементів, що їх утворюють.

Зливки сталей отримували витопом у відкритій індукційній печі ємністю 50 кг. Для легування азотом використовували азотистий ферохром ФХ600 (з 6 % азоту), який вводили наприкінці плавки. Отримані зливки піддавали куванню на прутки квадратом 35 мм.

Дослідження сталей проводили після зміцнювальної термічної обробки, що полягала в гартуванні від

температури 1200 °C з витримкою 2 години та охолодження в маслі і наступного старіння.

Результати досліджень

Твердість сталей після гартування знаходилася в межах 27...29 HRC. Найбільш ефективний режим старіння визначали за результатами досліджень дисперсійного твердіння сталі №3 при температурах 700...750 °C. З рис. 1 видно, що отримані залежності твердості від часу старіння для усіх температур мають вигляд кривих з мінімумом (наведені довірчі інтервали для значень твердості розраховані при довірчій вірогідності 95%). Зі збільшенням температури старіння мінімум на кривих зсувається в бік меншої тривалості старіння: від 10 годин при 700 °C до 6 годин при 750 °C.

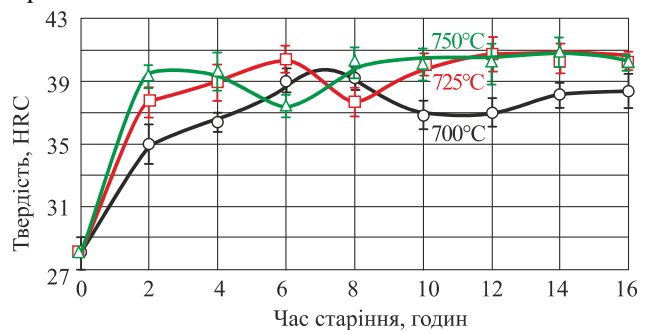


Рисунок 1. Залежності твердості сталі №3 від часу витримки при різних температурах старіння (температури старіння вказані біля кривих)

Вказані особливості дисперсійного твердіння відповідають виконаним раніше дослідженням подібних сталей без молібдену [4] і пояснені виділенням різних типів зміцнювальних фаз при старінні. За отриманими даними обрано наступний режим старіння, що забезпечує не тільки високі, але й стабільні значення твердості сталі: 725 °C, 12 годин.

Після гартування та обраного старіння усі сталі мали аустенітну структуру (рис. 2). Особливістю мікроструктури найменш легованої сталі №1 (рис. 2a) було практично повна відсутність крупних частинок первинних надлишкових фаз. Характерним для мікроструктури інших сталей була наявність таких частинок, що показано на рис. 2б–г. Переріз найбільш крупних частинок по мірі збільшення вмісту ванадію та молібдену зростав від 2 мкм в сталі № 2 до 10 мкм в сталі № 5. В об'ємі зерен наведених мікроструктур спостерігаються рівномірно розподілені дисперсні частинки вторинних зміцнювальних фаз, що виділилися при старінні.

Механічні властивості дослідних сталей в залежності від легування та температур випробування наведені в табл. 2. Для порівняння наведені також властивості однієї з найбільш теплостійких серійних штампових сталей мартенситного класу марки 5X3B3MFC (ДИ23) після рекомендованої для експлуатації термічної обробки [5]. З даних табл. 2 видно, що за твердістю та характеристиками міцності при кімнатній температурі дослідницькі сталі поступа-

ються серійній штамповій сталі. Таке співвідношення вказаних властивостей при низьких температурах є характерним для аустенітних сталей та сплавів з дисперсійним твердінням порівняно зі сталями, що загартовуються на мартенсит. Однак, враховуючи призначення дослідницьких сталей для гарячештампового

інструмента з температурами експлуатації вище 700 °С, більш важливими є результати випробувань при температурах 750 °С та 850 °С, чому і приділена головна увага.

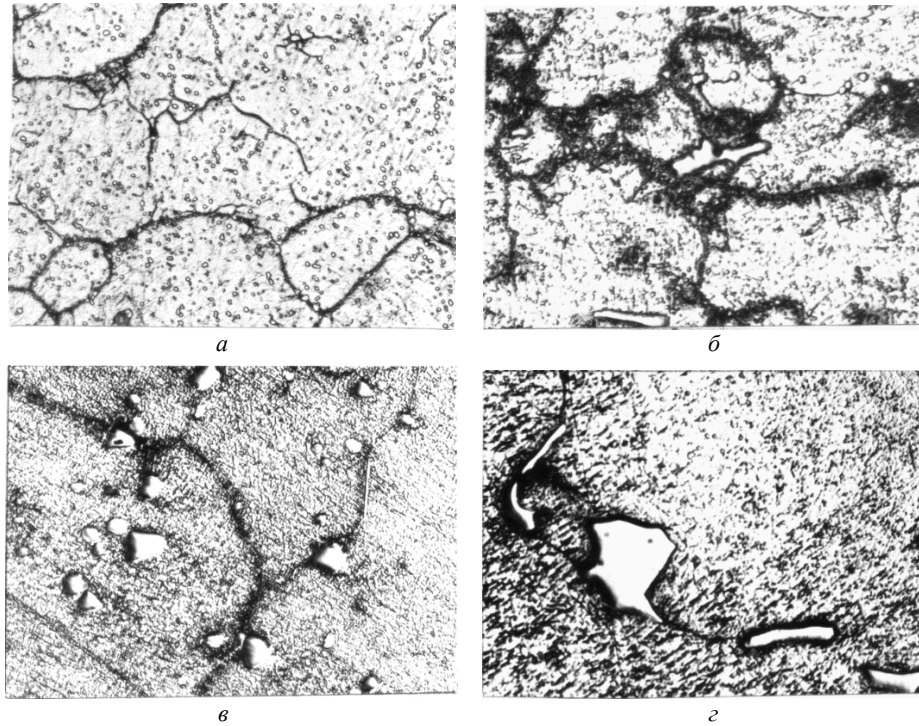


Рисунок 2. Мікроструктура аустенітних сталей після гартування (1200 °С, 2 години, масло) та старіння (725 °С, 20 годин), $\times 1000$: а – № 1; б – № 2; в – № 4; з – № 5

Таблиця 2 – Механічні властивості сталей

Номер сталі	Температура випробувань 20 °С						Температура випробувань 750 °С						Температура випробувань 850 °С					
	HRC	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²		
1	39	850	1140	8	14	16	450	500	22	54	97	310	360	28	55	154		
2	40	945	1200	10	16	15	470	540	20	51	66	320	380	27	59	114		
3	41	960	1220	8	11	14	480	540	19	53	53	330	380	29	60	88		
4	43	990	1250	5	8	11	500	580	19	48	23	320	390	23	59	46		
5	44	1020	1250	4	9	12	510	610	17	45	19	340	410	22	55	30		
ДИ23	46	1560	1400	10	35	25	320	410	20	72	94	135	180	67	90	-		

З даних табл. 2 видно, що по мірі збільшення легування (номеру) сталей відбувається зростання їх характеристик високотемпературної міцності. Важливо, що за цими значеннями усі дослідницькі сталі суттєво переважають серійну штампову сталь. Навіть найменш легована сталь №1 при температурі випробування 750 °С має $\sigma_{0.2}$ на 130 МПа, а σ_B на 90 МПа вищі ніж сталь ДИ23. Найбільші переваги має сталь № 5: за значеннями $\sigma_{0.2}$ та σ_B при температурі 750 °С вона в 1,5 рази, а при температурі 850 °С в 2,5 рази відповідно переважає серійну високотемпературну штампову сталь. Водночас, більш леговані сталі мають менші характеристики пластичності, чому сприяє утворення в їх

структурі крупних частинок первинних надлишкових фаз (рис. 2), які слугують концентраторами напружень і сприяють зародженню тріщин. Наявність таких фаз, як показано, зокрема, в роботах [6, 7] може призводити до передчасного руйнування матриць з жароміцних сплавів для гарячого пресування металів при термоциклічному силовому навантаженні.

За даними табл. 2 на рис. 3 наведені залежності механічних властивостей досліджених сталей від сумарного вмісту в них азоту та вуглецю. Видно, що твердість та високотемпературна міцність лінійно зростають (рис. 3а, б), що відповідає ролі вказаних елементів у дисперсійному твердінні сталей. Зменшення характеристики пластичності відбувається з

відхиленням від прямолінійної залежності. Особливо чутливою до зміни легування є ударна в'язкість, значення якої важливе для оцінки тріщиностійкості при циклічному нагріванні (розпалостійкості). Отримані залежності разом з даними табл. 2 дозволяють обрати легування сталі для виготовлення гарячештапкових інструментів в залежності від умов експлуатації і, відповідно, сполучення характеристик міцності та пластичності. Так, у випадку підвищених динамічних навантажень та перепадів температур кращу працездатність за вимогами тріщиностійкості будуть мати сталі № 1, або № 2 (типу 40X9Г14АФМ). Якщо ж головною вимогою до інструменту є опір високотемпературній пластичній деформації, то найбільшій переваги буде мати сталь № 5 з марочним позначенням 60X11Г16АФ2М2.

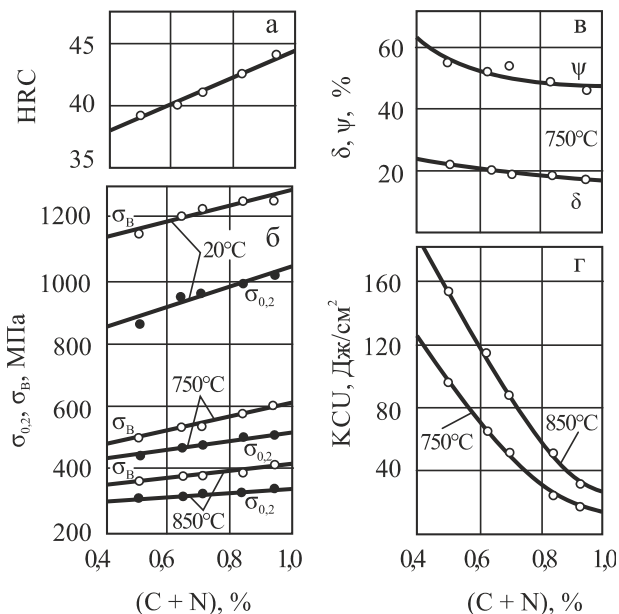


Рисунок 3. Залежність механічних властивостей сталей, легованих V та Mo від сумарного вмісту C і N: а – твердість; б – границя міцності та текучості; в – відносне видовження та звуження; г – ударна в'язкість

Висновки

За результатами виконаних досліджень встановлена ефективність легування молібденом разом з ванадієм для забезпечення переваг у високотемпературній міцності досліджених сталей порівняно з теплостійкими серійними штамповими сталями. Найбільші

показники досягнуті для сталі №5 типу 60X11Г16АФ2М2 з 0,33 % азоту. Порівняно з високотеплостійкими штамповими сталями її значення $\sigma_{0,2}$ та σ_B при температурі 750 °С (510 МПа та 610 МПа відповідно) в 1,5 рази, а при температурі 850 °С (340 МПа та 410 МПа відповідно) в 2,5 рази більші. Це свідчить, що сталь 60X11Г16АФ2М2 може бути перспективним замінником серійних високотеплостійких штампових сталей в умовах високих навантажень при температурах експлуатації вище 700 °С. Досліджені сталі з меншим рівнем легування (типу 40X9Г14АФМ з 0,12 % азоту) більш придатні для роботи в умовах експлуатації інструментів з підвищеними вимогами до тріщиностійкості.

Список літератури

1. Грабовський, В. Я. Структурні перетворення матриць при гарячому пресуванні титанових та сталевих профілів [Текст] / В. Я. Грабовський // *Металознавство та обробка металів.* – 2000. – № 3. – С. 17–21.
2. Приданцев, М. В. Высокопрочные аустенитные стали [Текст] / М. В. Приданцев, Н. П. Талов, Ф. Л. Левин. – М.: *Металлургия*, 1969. – 247 с.
3. Свяжин, А. Г. Стали легированные азотом [Текст] / Свяжин А. Г, Капуткина Л. М. // *Черная металлургия.* – 2005. – № 10. – С. 36–46.
4. Грабовський, В. Я. Особливості дисперсійного твердіння аустенітних хромомарганцевих сталей з карбідно-нітридним зміцненням [Текст] / В. Я. Грабовський, В. І. Канюка // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2001. – №1. – С. 19–22.
5. Канюка, В. І. Справочник по инструментальным сталям [Текст] / В. І. Канюка, В. Н. Терехов, А. Н. Мороз. – Харьков: *Металлика*, 2008. – 224 с.
6. Грабовський, В. Я. Дослідження працездатності пресових матриць з ливарного нікельового ступу ЖС6К при гарячому пресуванні жароміцних матеріалів [Текст] / Грабовський В. Я., Беліков С. Б., Трикоз Г. Г. // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2002. – № 2. – С. 37–40.
7. Грабовський, В. Я. Випробування матриць з жароміцного сплаву ХН60ВМЮТ (ЕП539) при гарячому пресуванні нержавіючих сталей [Текст] / Грабовський В. Я. // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2003. – № 1. – С. 35–38.

Одержано 17.07.2023

PROSPECTS FOR USE AS SUBSTITUTES OF HEAT-RESISTANT DIE STEELS, HIGH-NITROGEN AUSTENITIC CHROMIUM-MANGANESE STEELS WITH VANADIUM AND MOLYBDENUM

- Hrabovskyi V. Ph. D., Associate Professor of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: vladimirgr45@ukr.net*, ORCID: 0000-0003-0936-6132
- Kaniuka V. Head of the Tool Steels laboratory at State enterprise “UkrNDIspetsstal”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: kanyukav@gmail.com*
- Lysytsia O. Senior lecturer of the Department of Physical Materials Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: ov_li@i.ua*, ORCID: 0000-0002-9588-2450
- Yershov A. Dr. Sc., Professor of the Department of Physics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: ershov@zntu.edu.ua*, ORCID: 0000-0003-0878-6434

Purpose. To study the effectiveness of additional (along with vanadium) alloying of high-nitrogen austenitic chromium-manganese steels with molybdenum to determine the prospects for their use instead of high-temperature resistant serial martensitic stamped steels.

Research methods. Metallographic, durometric, tensile and impact strength tests at room and high temperatures..

Results. The peculiarities of dispersion hardening and microstructures of the investigated high-nitrogen austenitic chromium-manganese steels alloyed with vanadium and molybdenum were determined. The mechanical properties of the selected steels were determined depending on the content of strengthening alloying elements. Significant advantages in the high-temperature (750 and 850 °C) strength of high-nitrogen austenitic chromium-manganese steels alloyed with vanadium and molybdenum were found compared to the serial high-temperature stamping steel 5X3B3MΦC (ДІІ23). The highest hardness and strength values correspond to the research steel 60X11Г16АΦ2М2, which allows us to recommend it as an effective substitute for die steels when required to provide increased resistance to high-temperature dehardening of hot-die tools.

Scientific novelty. An abnormal presence of a minimum on the dispersion hardening curves of high-nitrogen austenitic chromium-manganese steels with molybdenum and its shift towards a shorter aging duration with increasing aging temperature have been determined. The formation of large particles of primary excess phases with increasing vanadium and molybdenum content in steels was revealed. The dependence of strength and ductility characteristics on the total alloying of the studied austenitic chromium-manganese steels with nitrogen and carbon was established.

Practical value. The effectiveness of molybdenum alloying along with vanadium in high-nitrogen austenitic chromium-manganese steels has been established to provide significant (1.5...2.5 times) advantages in high-temperature strength compared to heat-resistant commercial stamped steels.. The research steel 60X11Г16АΦ2М2 may be the most promising substitute for die steels under high force loads at operating temperatures of 750 °C and above.

Key words: high-nitrogen austenitic steel, molybdenum alloying, dispersion hardening, structure, excess phases, high-temperature strength, advantages, heat-resistant die steel.

References

1. Hrabovskyi V. Ya. (2000). Strukturni peretvorennya matryts pry hariachomu presuvanni tytanovykh ta stalevykh profiliv [Structural transformations of dies during hot pressing of titanium and steel profiles]. *Metal Science and Treatment of Metals*, 3, 17–21.
2. Pridantsev M. V., Talov N. P., Levin F. L. (1969). *Visokoprochnie austenitnie stali* [High-strength austenitic steels]. Moscow, Russia: Metallurgy, 247.
3. Svyazhin A. G., Kaputkina L. M. (2005). *Stali legirovannye azotom* [Nitrogen alloyed steels]. *Ferrous metallurgy*, 10, 36–46.
4. Hrabovskyi V. Ya., Kaniuka V. Y. (2001). Osoblyvosti dyspersiynoho tverdinnia austenitnykh khromomarhantsevykh stalei z karbidno-nitrydnykh zmitsnenniam [Features of dispersion hardening of austenitic chromium-manganese steels with carbide-nitride hardening]. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 1, 19–22.
5. Kanyuka V. I., Terehov V. N., Moroz A. N. (2008). *Spravochnik po instrumentalnyim stalyam* [Tool steels reference]. Kharkiv, Ukraine: Metallic, 224.
6. Hrabovskyi V. Ya., Bielikov S. B., Trykoz H. H. (2002). *Doslidzhennia pratsezdatsnosti presovykh matryts z lyvarnoho nikelovoho stopu ZhS6K pry hariachomu presuvanni zharomitsnykh materialiv* [Investigation of pressing dies performance from foundry nickel foot ZhS6K during hot pressing of heat-resistant materials]. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2, 37–40.
7. Hrabovskyi V. Ya. (2003). *Vyprobuvannya matryts z zharomitsnoho splavu KhN60VMYuT (EP539) pry hariachomu presuvanni nerzhaviuchykh stalei* [Testing of dies made of heat-resistant alloy KhN60VMYuT (EP539) for hot pressing of stainless steels]. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 1, 35–38.