

18. EN 14595:2005 Tanks for transport of dangerous goods —Service equipment for tanks — Pressure and Vacuum Breather Vent/ URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=88354

19. ISO 17662:2016 Welding — Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including ancillary activities/ URL:<https://i2.saiglobal.com/management/display/index/0/422624//443373246712813cdf82ccb37bf67a4d>

Zaharova I.V., Litvinenko Y.S., Svalyavin V.I.

THE USE OF INTERNATIONAL STANDARDS IN THE WELDING PROCESS FOR THE PRODUCTION OF TANK CONTAINERS

The transportation of goods today, during the period of martial law and blocking of borders, is extremely important and critical for the economy of Ukraine.

More and more often, carriers and owners choose to transport goods in tank containers by road and rail transport.

Gas transportation can be carried out using tank containers; liquid, powdery and granular dangerous goods, in which a pressure higher than 0.07 MPa is periodically generated for their emptying, etc. both on the territory of the country and abroad.

International transportation of various types of cargo is currently very necessary to support the country's economy, develop mechanical engineering, and build partnerships with European countries.

The analysis of transporters and owners of Ukraine makes it possible to conclude that in 2023-2024 there is a tendency to update container-tank fleets and in connection with this there is a need for the production of new products. The basis for high-quality production of tank containers, among other things, is a qualified welding technology that meets the requirements of international standards.

Keywords: *welding, international standards, tank container, quality, welded joints, materials.*

Стаття надійшла 20.03.2024 р.

УДК 669.018.44:[620.178.16+620.193]:669.017

doi.org/10.31498/2522-9990272024303149

Івахненко Є.І., Воденнікова О.С., Парахнєвич Є.М.,
Воденніков С.А., Капустян О.Є.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АБРАЗІВНО-КОРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ

Основні процеси горно-металургійного виробництва пов'язані з термічною обробкою матеріалів. Найпоширеніше застосування в цих технологіях мають обертальні термічні печі (технології прокалювання, спікання, обпалювання, сушіння, агломерації та інші). Надійність роботи обладнання обумовлена стійкістю до руйнування окремих деталей обмеженої номенклатури (порогові упори, безболтові полки, колосники, броні та інші). Литі деталі виготовляються з високолегованих аустенітних і аустеніто-феритних сталей марок типу 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ та 35X23H7CЛ згідно з ДСТУ 8781:2018.

Аналіз експлуатації литих деталей за високих температур (900–1200 °С) в складних умовах абразивно-корозійного зношування показав, що їх руйнування відбувається по місцях

Машинобудування і зварювальне виробництво

розташування в структурі легкоплавких з'єднань нестехіометричного складу, що формуються на межах і в приграничних зонах зерен металевої матриці. В процесі тривалої високотемпературної експлуатації (на протязі більше 10000 годин) вони сприяють формуванню порожнеч і тріщин в структурі металу, які в умовах інтенсивного абразивного зношування (зусилля дії абразиву не більше 20 КПа) приводять до руйнування металу. Встановлено, що процеси руйнування металу починаються в зонах з аустенітною структурою, яка сприяє протіканню дифузійних процесів. Дослідження процесів, які виникають при руйнуванні жаростійких металів, дасть можливість визначити шляхи усунення негативних явищ в металі і дати рекомендації щодо розробки нових термостабільних сплавів.

Аналіз науково-технічної літератури, ДСТУ, AISI, DIN-стандартів показав на недостатність інформації щодо даних по зносостійкості та жаростійкості високотемпературних сплавів. У зв'язку з цим виникла необхідність розробки економнолегованих сплавів зі стійкою структурою, підвищеними фізико-хімічними, механічними та спеціальними властивостями за нормальних і високих температур в умовах інтенсивного зношування.

Встановлено, що при виборі типу металу для умов високотемпературного абразивно-корозійного зношування необхідно віддавати перевагу структурно стабільній феритній основі з високотвердими частками, які відповідають принципу Шарпі.

Ключові слова: жаростійкі сплави, зносостійкість, жаростійкість, корозійна стійкість, абразивне зношування, обертальні печі.

Постановка проблеми. Раціональне використання ресурсів – одна із основних умов стабільного існування та розвитку підприємств у сучасному конкурентному середовищі. Особливо гостро проблема ресурсозбереження проявляється там, де значні витрати матеріалів спричинені інтенсивним зношуванням деталей машин [1]. Зношування в різних його проявах є основною причиною відмови частин машини або машини в цілому [2].

Втрати від абразивного зношування становлять понад 50 % втрат, пов'язаних із зносом взагалі [3–5]. Для роботи в умовах абразивного зношування при високотемпературній дії необхідно застосувати високолеговані сплави (насамперед леговані хромом, кремнієм та нікелем). Вибір сплаву з високим ступенем стійкості до окислення необхідний, але недостатній для забезпечення тривалої експлуатації виробу, оскільки більшість деталей в умовах високих температур руйнуються, працюють з періодичним нагріванням і охолодженням, таким чином вони реагують на зміни температури. Такі деталі виходять з ладу переважно через появу тріщин, викликаних перепадами температури деталі та накопиченням теплових напружень, що перевищують допустимі для даних умов експлуатації. Крім того, продовження роботи термостійких деталей супроводжується зміною розмірів останніх [6].

Тому дослідження жаростійких сплавів в умовах високотемпературного абразивно-корозійного зношування (при температурах 900–1200° С) є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для умов малонавантаженого абразивно-корозійного зношування при дії високих температур доцільне використовувати зносостійкі та жаростійкі сплави зі стабільними і стійкими структурами. Високий рівень властивостей зносокорозійної стійкості сплавів для деталей устаткування спікання матеріалів забезпечується, перш за все, за рахунок оптимальних варіантів легування (хромом, кремнієм та нікелем).

Безпосередньо сплави, які містять вуглець у вільному стані (графіт), в умовах абразивної дії мають низькі показники зносостійкості, враховуючи його мінімальну твердість.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Широке застосування в промисловості знаходять сплави, де вуглець утворює дисперсні хімічні сполуки, що мають значну твердість, порівнянну з твердістю абразивних матеріалів, які використовуються в промисловості [7]. Зростаюча кількість вуглецю в сталі до 1,2 % збільшує міцність сплавів. Подальше підвищення вмісту вуглецю до 4 % призводить до зниження рівня твердості, при цьому сплави, будучи дуже крихкими, не знаходять застосування. Проте, у ряді матеріалів, що наплавляються, граничні концентрації вуглецю можуть досягати до 5,2 % [8]. Тому визначення концентрації вуглецю, що забезпечує оптимальне співвідношення абразивної зносостійкості і тривалої жаростійкості, є актуальним завданням науки і вимагає уточнення.

Хром вводиться в зносостійкі сплави для отримання необхідного рівня властивостей і термічно стійкої структури. З підвищенням вмісту хрому (до 32 %) розчинність вуглецю в матриці сплаву зменшується, що полегшує виділення карбідних фаз і збільшує ступінь стійкості твердого розчину високохромистого фериту.

У дисперсійно-твердіючих сталях, що зношуються при температурах 500–850 °С, вміст хрому рекомендується в межах 18–25 % при співвідношенні аустеніт-ферит 30/70; 50/50; 70/30 %.

Втрати маси металу при високотемпературному зношуванні мінімальні при вмісті 35 % хрому і 0,5–2,5 % вуглецю. Структура такого сплаву складається з легованого хромистого фериту і комплексних карбідів типу $M_{23}C_6$ і M_7C_3 [9]. При зношуванні деталей в умовах високих температур необхідно враховувати вплив чинників, що додатково діють (окислення, насичення продуктами корозії та інші).

Дослідження комбінованого абразивно-корозійного зношування сталей, які вміщують хром [10], показали, що при низькій частоті дії абразивних частинок підвищену стійкість мають сталі з пониженим вмістом хрому (до 14 %), при високій частоті – високохромисті сталі (до 30 %).

Кремній застосовують для зносостійких сплавів в широкому інтервалі концентрацій – 0,4–15,0 %. Будучи елементом, який одночасно підвищує міцність, твердість і покращує захисні функції при окисленні металу, кремній обмежено розчиняється в α – і γ – залізі, активно звужує область аустеніту. При концентраціях більше 3% кремнію спостерігається тенденція до виділення інтерметалідних з'єднань, які із-за високої крихкості обмежують застосування матеріалів в промисловості і можуть використовуватися тільки в спеціальних сплавах (феросіліди, сілалі, сендасти).

Кремній утворює нестійкі карбіди і, як правило, концентрується в твердому розчині, дозволяє при легуванні в межах 0,8–2,5 % вирішувати проблеми міцності і зносостійкості металевої матриці [11].

У жаростійких, жароміцних, зносостійких сплавах з комплексами дисперсних карбідів концентрація кремнію складає 1,0–3,0 %. Збагачення кремнієм навколо карбідних зон затрудняє дифузію вуглецю, що перешкоджає коагуляції карбідів, які забезпечують опір зношуванню поверхні металу.

Відома здатність кремнію підсилювати схильність сталей до теплової крихкості [12, 13], в зв'язку з чим його вміст обмежується до 2,7 %. Кремній підсилює перерозподіл карбідної фази при тривалих високотемпературних витримках, де зосередження карбідів поблизу міжзерених зон приводить до втрат сплавами структурної стабільності. У зв'язку з цим питання оптимального вмісту кремнію при сумісному легуванні з вуглецем і хромом вимагає уточнення.

Так безпосередньо вміст нікелю в більшості зносостійких сплавів як українських, так і закордонних виробників знаходиться в межах 0,8–25,0 % (згідно даних ДСТУ, AISI, DIN-стандартів). Збільшення вмісту нікелю стабілізує аустеніт в сплавах, які при високій міцності

Машинобудування і зварювальне виробництво

і пластичності після відповідної термічної обробки, що забезпечує дисперсійне твердіння, можуть рекомендуватися для умов абразивного зношування при температурах 550–850 °С. При температурах більше 850 °С зносостійкість сплавів знижується, що пов'язане з процесами зворотного розчинення дисперсних утворень (карбідів, інтерметалідів) і переходом їх в твердий розчин аустеніту.

Таким чином, при розробці високотемпературних абразивостійких сплавів застосування нікелю вельми перспективно при оптимізації складу багатокомпонентної системи Fe-C-Cr-Si-Ni.

Мета досліджень. Вивчення структурних складових литих сталей типу 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ та 35X23H7CЛ, які традиційно використовуються в промисловості для умов одночасної дії зношування і високих температур (900–1200° С); встановити особливості руйнування структурних складових сталей в процесі експлуатації деталей, які швидко зношуються, визначеної номенклатури.

Основний матеріал дослідження. Високотемпературну абразивну зносостійкість визначали із застосуванням сировини промислової переробки на установці прискорених випробувань ЗП-1 ТЛВ, розробленій в Національному університеті «Запорізька політехніка» [13]. Для металографічного аналізу використовували мікроскоп МІМ-8. При визначенні механічних властивостей матеріалів випробування зразків на розрив під час розтягування проводили на розривній машині типу УРМ-50 з зусиллям 5 тонн. Твердість визначали за Брінеллем згідно з ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 з використанням мікротвердоміра ПМТ-3М.

Одній з основних технологічних операцій при виробництві сировини в горно-металургійній промисловості є термічна обробка при температурах 900–1200°С. Ця технологія передбачає використання барабанних печей спікання, що обертаються, з холодильними пристроями, продуктивністю 150 тонн в годину. В печі сипкий матеріал рухається назустріч гарячому потоку газу, працюючого пальника, термооброблюється (обпалюється, спікається) і охолоджується. Частинки обробленого матеріалу переміщуються по нахилій поверхні за рахунок періодичного зсипання верхнього клину маси при досягненні їм кута скосу ($\alpha=10-15^\circ$). Рухомі шари матеріалу (товщина 200–300 мм) печі, що контактують з стінками деталей, впливають із зусиллям до 20 КПа без ударних навантажень. Даний процес дії частинок матеріалу прийнято розглядати як малонавантажене абразивне зношування.

В роботі вивчали склади компонентів різних матеріалів: цементного клінкеру, бокситів, спеку глинозему, коксу, агломерату (масова частка елементів складає: 43–50 % Al_2O_3 , 6–9 % Al_2O , 6–8 % Na_2O , 46 % CaO , 8,2–10,1% SiO_2 , 17,4–21,6 % Fe_2O_3 , 1,4–3,1 % MgO , 0,4–0,9 % S, 1,9–3,0 % CO_2 , 3,6–4,4 % H_2O). Як правило, ці матеріали містять комплекс високотвердих частинок. Показано, що мікротвердість частинок знаходиться в межах 9–11 ГПа. Частки мають окатану форму (коефіцієнт форми – $k_f = 8-10$) розміром 0,1–6,0 мм. Лужний модуль матеріалу дорівнює 1,0; вапняний модуль – 2,0; вологемкість складає 13 %, пористість – 20 %. Безперервна дія частинок сировини, що є хімічно агресивним середовищем, підсилює високотемпературну корозію металу деталей в результаті порушення щільності захисної оксидної плівки, а переміщення великих мас абразивних матеріалів протягом тривалого часу (більше 6000 годин) прискорює ці процеси.

При роботі за складних умов, зокрема високотемпературного абразивно-корозійного зношування, литі деталі трубчастих оберտальних печей (порогові упори, броні, безболтові полки, футеровки та інші), виготовлені зі сталей типу 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ та 35X23H7CЛ, мають низький термін служби (від 2 до 6 місяців) і відповідно піддаються значним несправностям (7 %).

Результати металографічних досліджень сталей типу 35X18H24C2Л та 40X24H12CЛ до

Машинобудування і зварювальне виробництво

експлуатації та після експлуатації протягом 4000 годин при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлено на рис. 1–2.

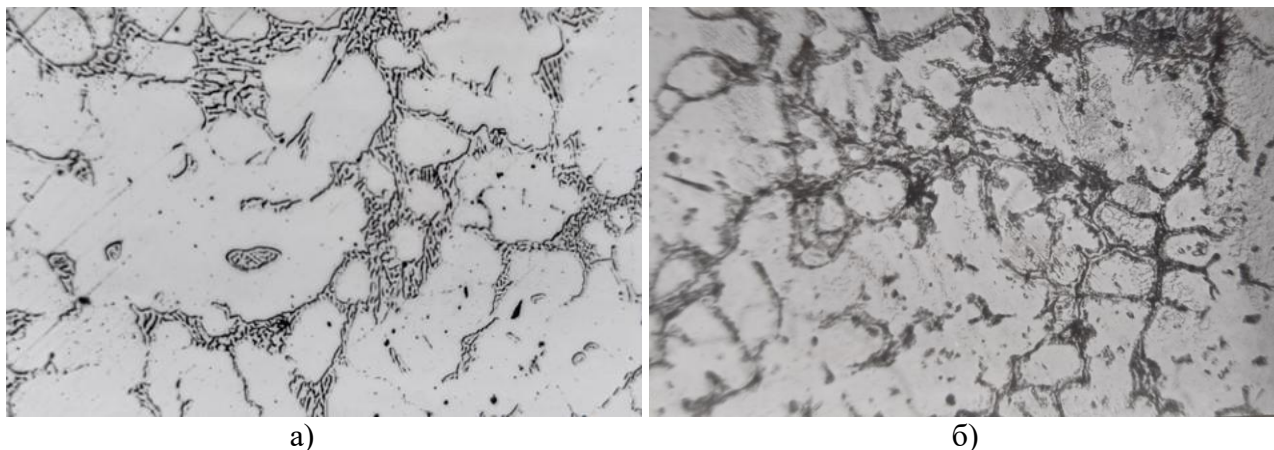


Рисунок 1 – Мікроструктура сталі 35X18H24СЛ, х 500: а) до експлуатації; після експлуатації протягом 4000 годин при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

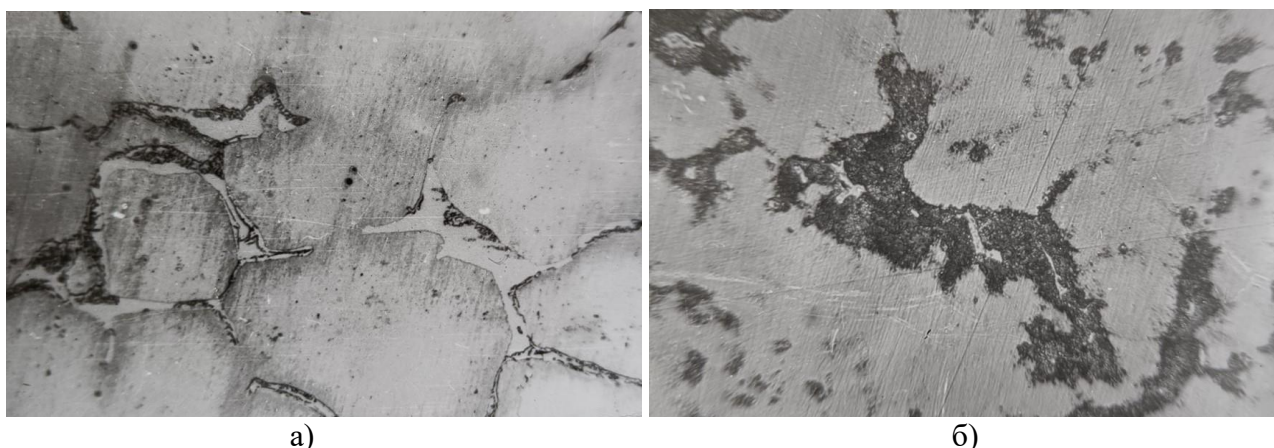


Рисунок 2 – Мікроструктура сталі 40X24H12СЛ, х 500: а) до експлуатації; б) після експлуатації протягом 4000 годин при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналіз механічних і спеціальних властивостей сталей, які відпрацювали номінальний термін служби (таблиця 1), показав, що значення межі міцності на розтягування, показники твердості після випробувань за нормальних (при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) і високих температур (при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) відповідали вимогам ДСТУ 9781:2018. Проте при експлуатації деталей властивості металу значно знижувалися, що пов'язане з необоротними перетвореннями, які відбуваються в структурі металу. Жаростійкість ($h_{\text{ум}}$) сталей змінювалася в широких межах від $2,5$ до $7,2 \cdot 10^{-6}$ м. При цьому структурні перетворення супроводжувалися виділенням з'єднань, що швидко окислюються, та кількість яких збільшувалася в структурі при тривалій роботі деталей.

Металографічним та петрографічним аналізами сталей встановлено виділення по межах грубозернистої (60–120 мкм) аустенітної матриці легкоплавкої фази. Ця фаза характеризується металевою складовою з розподіленими в ній дисперсними метастабільними карбідами (субкарбідами) типу $[(\text{Me}_x\text{C}_y) (\text{Me}_x\text{O}_y)]$.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 1 – Механічні та спеціальні властивості сталей вживаних для відповідальних деталей обертальних печей

Марка сталі	Структура	Механічні та спеціальні властивості сталей				
		Межа міцності на розтягування, σ_b , МПа при температурі		Твердість при $t=20\text{ }^\circ\text{C}$, НВ, МПа	Жаростійкість (показник корозії), $h_{ум}$, 10^{-6} м	Втрати маси металу при $t=1000\text{ }^\circ\text{C}$, G, $\text{г/м}^2\cdot\text{год}$
		20 $^\circ\text{C}$	1000 $^\circ\text{C}$			
35X18H24C2Л	A+K	$\frac{538-541}{376-398}$	129–138	$\frac{1610-1630}{1350-1400}$	4,6–7,2	1,53–2,11
40X24H12CЛ	A+Ф+K	$\frac{490-503}{401-426}$	115–126	$\frac{1740-1760}{1500-1570}$	3,5–4,1	1,09–1,45
35X23H7CЛ	Ф+A+K	$\frac{540-548}{432-445}$	121–135	$\frac{1750-1780}{1620-1640}$	2,5–3,2	0,81–0,98

Примітка: Чисельник – значення параметрів до експлуатації; знаменник – значення параметрів після експлуатації; А – аустеніт, Ф – ферит, К – карбід.

Мікротвердість фаз марки 40X24H12CЛ визначалась згідно з загальноприйнятою методикою відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007. Аналіз даних таблиці 2 показує, що мікротвердість субкарбідів значно нижче за відомі з'єднання типу $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ та $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ (значення Н μ 13,0 та 18,5 ГПа відповідно).

Таблиця 2 – Мікротвердість фаз сталі марки 40X24H12CЛ

Зона вимірювання	Мікротвердість, Н μ , МПа
Зерно аустеніту	$\frac{3390-2760}{3050}$
Межа зерна	$\frac{3780-3390}{3680}$
Прикордонна фаза	$\frac{4820-3390}{4010}$
Прикордонна фаза, що містить дисперсні з'єднання карбідів і оксидів	$\frac{6360-4260}{5510}$

Примітка: Чисельник – максимальні і мінімальні значення; знаменник – середні значення.

Разом з субкарбідами у складі сумішей виявлена присутність з'єднань нестехіометричного складу (субоксида):

– монооксид кремнію (SiO), якому відповідають оптичні константи становлять $N_o = 2,15$, $N_e = 2,06$;

– монооксид алюмінію (Al_2O), якому відповідають оптичні константи становлять $N_o = 2,19$, $N_e = 2,13$, що істотно відрізняються від відомих з'єднань типу SiO_2 ($N_o = 1,53$, $N_e = 1,55$) і Al_2O_3 ($N_o = 1,76$, $N_e = 1,78$). Визначення оптичних констант N_o , N_e здійснювали з використанням стандартних імерсійних рідин згідно з табличними даними. Характерною особливістю цих фаз є відсутність в їх складі включень кристалічного окислу алюмінію Al_2O_3 – звичайного продукту реакцій розкислювання. Наявність же нижчих оксидів в структурі металу свідчить про відновлювальне середовище внаслідок надлишку розкислювача, що вводиться.

Ці з'єднання помітно знижують міцність і пластичність сталей (див. таблицю 1). Крім того, низька температура плавлення досліджених фаз сприяє інтенсивному окисленню металу

Машинобудування і зварювальне виробництво

і, як наслідок, абразивному зношуванню деталей при високих температурах.

Аналогічні особливості виявляються і у сталей типу 35X18H24C2Л та 35X23H7СЛ.

При нагріві металу до 1000 °С субкарбіди (кремнію, хрому, алюмінію та інші), що знаходяться у складі приграничної фази, стають газоподібними і поверхнево-активними. Частина з'єднань розчиняється в металі, а частина – піддається сублімації. У місцях руйнування з'єднань з'являються шпори, знеуглецьовані зони і тріщини, що виникають під впливом термонапружень. Руйнування і сублімація з'єднань змінюється окислювальними процесами з формуванням з'єднань вищих валентностей. При цьому стінки шпор, що утворилися, і знеуглецьовані зони також починають інтенсивно окислюватися. Поверхня металу і внутрішні ділянки перетворюються на суцільні оксидні плівки, які швидко віддаляються інтенсивним потоком абразивних частинок великої твердості.

ВИСНОВКИ

1. При дослідженні жаростійких сплавів (на прикладі сталей типу 35X18H24C2Л, 40X24H12СЛ та 35X23H7СЛ) в умовах високотемпературного абразивно-корозійного зношування (при температурах 900–1200°С) визначено їх оптимальні показники: жаростійкість (глибинний показник корозії) $h_{ум} \leq 4,0 \cdot 10^{-6} м$; порівняльна зносостійкість $\varepsilon \geq 1,0$ при $t=1000$ °С; межа міцності на розтягування $\sigma_B \geq 400$ МПа при $t=20$ °С; межа міцності на розтягування $\sigma_B \geq 100$ МПа при $t=1000$ °С; твердість при $2000 \leq HB \leq 3700$ при $t=20$ °С і після витримки протягом 100 годин (при $t=1000$ °С) $1800 \leq HB \leq 4300$ МПа.

2. Встановлено, що при виборі металу для умов високотемпературного абразивно-корозійного зношування необхідно віддавати перевагу структурностабільній феритній основі з високо твердими частками, які відповідають принципу Шарпі.

Список використаних джерел

1. Брыков М.Н. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: научное издание / М.Н. Брыков, В.Г. Ефременко, А.В. Ефременко. – Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 364 с.
2. Hesse O. Investigation on friction surface of high-carbon low-alloyed steel after abrasive wear / O. Hesse, Y. Kalinin, I. Petryshynets, M. Kunert, V. Efremenko, M. Andrushchenko, M. Osipov, M. Brykov // Problems of Tribology, 2019. – No 24(3/93). – pp. 22–28. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-22-28>
3. Natarajan K.A. Corrosive and erosive wear in magnetic taconite grinding / K.A. Natarajan, S.C. Reimer, I. Iwasaki // AIMMPE Transm. – 1984. – V.276. – pp.10–44.
4. Radziszewski P. Exploring Total Media Wear / P. Radziszewski // Minerals Engineering. – 2002. – V. 15 – pp. 1073–1087.
5. Rajagopal V. The properties and performance of cast iron grinding media / V. Rajagopal, I. Iwasaki // Miner. Process. Extr. metal. Rev. – 1992. – V. 11. – pp. 75–106.
6. Yamshinskij M. Heat-resistance of heat-resistant Cr-Al steels for work under extreme conditions / M. Yamshinskij // International Scientific and Practical Conference «WORLD SCIENCE». Proceedings of the IInd International Scientific and Practical Conference «Science and Education - Our Future» (November 22–23, 2015, Ajman, UAE). 2015. – No 4(4). –Vol.1. –pp. 55–57.
7. Мазур В.І. Сплави на основі заліза: підручник / В.І. Мазур, В.З. Куцова, М.А. Ковзель, О.А. Носко. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. – 500 с.
8. Ямшинський М.М. Термостійкість жаростійких сталей для роботи в екстремальних

Машинобудування і зварювальне виробництво

умовах / М.М. Ямишинський, Г.Є. Федоров, К.С. Радченко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2015. – № 3. – С. 33–37.

9. Андрущенко М.І. Спроможність до само зміцненню поверхні тертя в процесі абразивного зношування і зносостійкість сталей в залежності від вмісту вуглецю і хрому / М.І. Андрущенко, Р.А. Куліковський, М.Ю. Осипов, А.В. Холод, А.Е. Капустян // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – №1. – С. 92–99.

10. Barker K. Synergistic abrasive-corrosive wear of chromium containing still / K. Barker, A. Ball // Brit. Corrosion, 1989. – No 3. – pp. 222–228.

11. Верховлюк А.М. Технології одержання металів і сплавів для ливарного виробництва: навчальний посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко // за ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. – Київ: Видавничий дім «Вініченко», 2016. – 224 с.

12. Куцова В.З. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями: підручник / В.З. Куцова, М.А. Ковзель, О.А. Носко. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.

13. Більченко О.В. Леговані сталі: навч. посіб. / О.В. Більченко, О.І. Дудка, В.Г. Хижняк, С.М. Чернега. – Київ: Кондор, 2009. – 98 с.

14. Федьков В.О. Лабораторна установка для прискорених випробувань зносостійких сплавів при високих та низьких температурах: заводська лабораторія / В.О. Федьков, Є.І. Івахненко. 1992. – Т.58.– №12. – С. 55–56.

Ivakhnenko E.I., Vodennikova O.S., Parahnevich E.M., Vodennikov S.A., Kapustian O.Ye.

RESEARCH OF HEAT-RESISTANT ALLOYS IN CONDITIONS OF HIGH-TEMPERATURE ABRASIVE-CORROSIVE WEAR

The main processes of mining and metallurgical production are related to heat treatment of materials. The most common application in these technologies are rotary thermal furnaces (calcining, sintering, firing, drying, agglomeration and other technologies). The reliability of the equipment is determined by the resistance to destruction of individual parts of a limited range (threshold stops, boltless shelves, grates, armor, and others). The cast parts are made of highly alloyed austenitic and austenitic-ferritic steels of the 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ and 35X23H7CЛ brands in accordance with DSTU 8781:2018.

Analysis of the operation of cast parts at high temperatures (900–1200 °C) in complex conditions of abrasive and corrosive wear showed that their destruction occurs at locations in the structure of low-melting compounds of non-stoichiometric composition, which are formed at the boundaries and in the border zones of the grains of the metal matrix. In the process of long-term high-temperature operation (for more than 10000 hours), they contribute to the formation of voids and cracks in the metal structure, which in conditions of intensive abrasive wear (abrasive action force no more than 20 KPa) lead to the destruction of the metal. It has been established that the processes of metal destruction begin in zones with an austenite structure, which facilitates diffusion processes. The study of the processes that occur during the destruction of heat-resistant metals will make it possible to determine ways to eliminate negative phenomena in the metal and give recommendations for the development of new heat-stable alloys.

The analysis of scientific and technical literature, DSTU, AISI, DIN standards showed insufficient information on data on wear resistance and heat resistance of high-temperature alloys. In this connection, there was a need to develop economically alloyed alloys with stable structure,

increased physico-chemical, mechanical and special properties at normal and high temperatures under conditions of intensive wear.

It has been established that when choosing the type of metal for conditions of high-temperature abrasive-corrosive wear, it is necessary to give preference to a structurally stable ferrite base with highly hard particles that comply with the Charpy principle.

Key words: *heat-resistant alloys, wear resistance, heat resistance, corrosion resistance, abrasive wear, rotary furnace.*

Стаття надійшла 25.04.2024 р.

УДК 621.762.02:669.295

doi.org/10.31498/2522-9990272024303158

Джуган О. А., Ольшанецький В. Ю., Капустян О.Є., Буліш С.О.

МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НЕСФЕРИЧНИХ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Аддитивні технології є перспективним напрямком у розвитку таких галузей промисловості як високоточне машинобудування та авіадвигунобудування. Водночас висока собівартість процесу 3D-друку та відсутність альтернативної (сферичному порошку) сировини перешкоджає широкому розповсюдженню зазначених технологій. У даній роботі показано принципову можливість використання більш дешевих порошкових матеріалів на основі титану, що за хімічним складом відповідає марці сплаву VT1-0, з несферичною формою частинок, що отримують за технологією гідрування-дегідрування і призначених для виготовлення об'ємних виробів різними методами адитивних технологій. Методом профілювання насипаних і закріплених із підкладкою порошкових шарів мінімальної товщини із застосуванням різних фракцій показано, що оптимальна зовнішня поверхня отримується за умови використання порошкового матеріалу, в якому частинки мають форму багатогранників, умовно прийнятих за об'єкти, які за формою наближаються до частинок, у вигляді гексаєдрів та їхніх різновидів. Використання таких порошоків має забезпечити більш щільну та однорідну структуру у порівнянні з порошками сферичної форми. Розглянуто можливість застосування різних джерел енергії та способів для пошарового нарощування матеріалу при формуванні виробів – автоматичне електронно-променеве наплавлення та ручне аргонодугове наплавлення. Визначено оптимальні режими процесів покрокового сплавлення тонких шарів порошкових матеріалів. Описано перевагу запропонованих порошоків порівняно із порошками сферичної форми, що переважно застосовуються на сьогоднішній день. Проведено металографічні дослідження зразків, отриманих з несферичних порошоків, що показало високий рівень адгезії шарів без видимих несучільностей.

Ключові слова: *адитивні технології; титан; порошок; частинка; форма; фракція; поверхня; шар; компактування; сплавлення; структура; властивості.*

Постановка проблеми. Застосування адитивних технологій є перспективним напрямком у розвитку різних галузей промисловості (особливо таких як високоточне машинобудування та авіадвигунобудування), що дає змогу одержувати готові вироби, а також виготовляти необхідне в промисловості технологічно складне оснащення. Найважливішим завданням при цьому є заміна наявних дорогих імпорتنних порошкових матеріалів дешевшими аналогами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ці технології дають змогу об'єднати в собі головні переваги таких методів отримання виробів, як порошкова металургія, ливарне