

Характеристики низьколегованого чавуну для формокомплектів у склотарній галузі

Устименко А. І., аспірант, ustymenko@kpi.ua, ORCID 0000-0002-5893-6499

Лук'яненко І. В., кандидат технічних наук, доцент; lukianenkoiv@gmail.com, ORCID 0000-0002-1043-9688

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Умови роботи форм склотарного виробництва характеризуються складними термоциклічними навантаженнями в агресивному робочому середовищі, що спонукає до нових технологічних рішень, які покращать експлуатаційні їх характеристики та економічні показники виробництва. Один із варіантів до покращення властивостей форм полягає в підборі хімічного складу матеріалу з низьким вмістом легувальних елементів та забезпеченні комплексу характеристик жаростійкості.

У роботі наведено підбір хімічного складу низьколегованого чавуну, визначено його температури фазових перетворень, встановлено характеристики жаростійкості та рекомендовано для застосування в якості матеріалу формокомплекту.

Результати диференційно-термічного аналізу відображають, що початок фазових перетворень у дослідному чавуні на 17,7 °C перевищує значення критичної точки зразка із відпрацьованої форми. Визначено зміну питомої маси зразків після 50 год випробувань на окислювостійкість, що знаходиться на високому рівні та становить 0,164 г/(см²·год).

Встановлено, що ростостійкість чавуну має лінійні залежності зі збільшенням впливу циклів, що свідчить про відсутність різких фазових перетворень та як наслідок відсутність динамічних змін в матеріалі під час експлуатації. Визначено, що руйнування зразків дослідного чавуну відбувається на 60-му циклі високих умов випробувань, що відображає позитивні показники тріщиностійкості та наявність стійкої структури дослідного чавуну.

Ключові слова: *формокомплект, агресивне середовище, низьколегований чавун, диференційно-термічний аналіз, окислювостійкість, ростостійкість, тріщиностійкість.*

Значний обсяг виробництва порожнистої склотари в Україні обумовлює необхідність проведення науково-дослідних робіт щодо створення сучасних матеріалів та технологій їх виготовлення, які б застосовувались для виробництва матеріалів формокомплектів та впровадження останніх у виробництво на рівні закордонних аналогів [1, 2, 3].

Скломатеріал здійснює вплив на поверхню форми як агресивне середовище, що підсилюється в умовах високих робочих температур формування. Аналіз досліджень [4, 5, 6, 7, 8, 9] показує, що за циклічних

змін температури в умовах окислювального середовища та контакту з розплавленим склом корозія матеріалів відбувається переважно вздовж меж зерен та в м'яких фазах.

Автори робіт [10, 11] зазначають, що найбільш важливе конструктивне значення має внутрішня конфігурація, що піддається впливу потужного теплового потоку та механічних навантажень, а як наслідок є причиною для комбінації властивостей, а саме – тепло- та жаростійкості, міцності конструкції та високих механічних характеристик.

Внаслідок детального вивчення джерел [6, 11, 12, 13, 14], встановлено, що більшість форм виготовляють саме з графітізованих чавунів завдяки широкому спектру властивостей, а саме: легкість механічного оброблення, низьку чутливість до концентрації напружень, високі показники механічних властивостей, теплопровідності, відносно низької вартості тощо.

Авторами робіт [15, 16] встановлено, що одним із способів захисту матеріалу від корозії є утворення на його поверхні тонких та щільних плівок, для формування яких широкого поширення набуло застосування таких легувальних елементів, як Si, Al, Cr, Ni, Mo.

Жаростійкість як супротив газовій корозії за високих температур поділяють на окалиностійкість, ростостійкість та термостійкість [17, 18], які формують найважливіші властивості для деталей формокомплекту. Оскільки кінетика росту та зміна об'єму переважно є наслідком корозійного процесу (окиснення), який поширюється по всьому виливку, здебільшого вздовж включень графіту та внаслідок фазових перетворень [15]. Опираючись на результати досліджень [15, 19], максимального ефекту виключення фазових перетворень у виливках під час їх експлуатації, можна досягнути шляхом підвищення температури фазових перетворень за межі коливання робочих температур форми за допомогою таких елементів як Si, Al, Ni, Cr, Mn тощо.

Метою роботи є дослідження жаростійкості та температури початку фазових перетворень у низьколеговану чавуні з такими легувальними елементами як Si, Al, Cr, Ni, Mo, V, Ti, Mn та зіставлення показників з характеристиками матеріалу відпрацьованої форми склотарного виробництва для визначення стійкості низьколегованого чавуну до утворення дефектів в умовах подібних до умов експлуатації формокомплекту.

Для досліджень використовували низьколегований кремнистий чавун (3,3-3,6 % C, 1,75-2,6 % Si, 0,50-0,70 % Mo, 0,10-0,15 % V, 0,3-0,8% Cr, 0,6-1,5 % Al, 0,2-0,5 % Ni, 0,1-0,15 % Ti, до 0,8 % Mn), вибір якого ґрунтувався на попередньо проведених дослідженнях [20].

З метою дослідження структурних і фазових перетворень у процесі нагрівання чавуну було проведено диференційно-термічний аналіз (ДТА) на обладнанні синхронного термічного аналізу (СТА) фірми NETZSCH (Німеччина) марки STA 449 C Jupiter.

Досліджувані зразки піддавалися випробуванню на окалиностійкість відповідно до вимог [13] та ваговим методом за збільшенням маси зразків за стандартною нормативною методикою та дослідженнями [18], за температури 1000 ± 20 °C в печі СНОЛ 1,6.2,5.1/11-И24, а середовище випробування – повітря.

Дослідження ростостійкості та тріщиностійкості матеріалу проводили за однакових умов та на одних зразках, де їх розміри – довжина становить 60 мм, діаметр – 10 мм. Термоцикування проводилося в діапазоні температур $25 \leftrightarrow 1000$ °C із різким охолодженням в проточній воді з температурою 25 ± 3 °C до появи першої тріщини на боковій поверхні зразків або на його торцях тріщин термічної втоми та до повного руйнування зразків.

У процесі дослідження матеріалів формокомплектів було проведено ДТА після нагрівання зразка матеріалу, що вирізали з існуючої відпрацьованої чавунної форми з метою визначити його основні температури фазових перетворень (рис. 1). Відповідно хімічний склад матеріалу з відпрацьованої форми наступний: 3,0-3,6 % C, 2,9 % Si, 0,4 % Mo, 0,1 % Mn. Встановлено, що в даному матеріалі початок фазових перетворень відбувається за температури 701,7 °C до 773,3 °C, а наступні зміни в інтервалі від 827,4 °C до 905,4 °C з вираженим піком при 862,7 °C свідчать про те, що матеріал зазнав структурних змін, які можуть призвести до утворення мікротріщин та інших дефектів. Температурний інтервал від 1161,1 °C до 1222,8 °C з піком в 1200,8 °C вказує на проходження евтектичного перетворення та перехід до рідкої фази розплаву та відповідає точкам E' та C' (1153 °C) системи Fe-C.

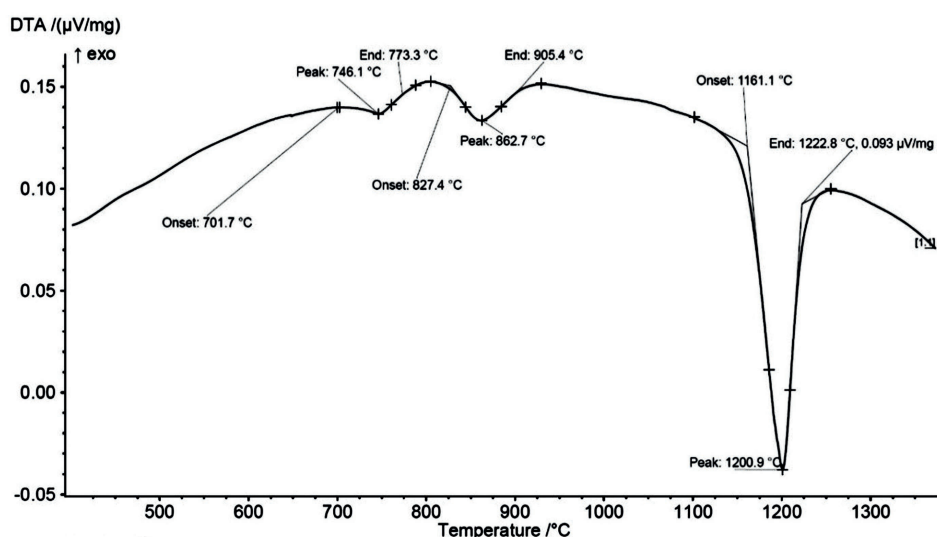


Рис. 1. Диференційно-термічний аналіз матеріалу зразків вирізаних з відпрацьованої форми під час нагрівання зі швидкістю 20 °C/хв

Fig. 1. Differential thermal analysis of the material of samples from the disused mould during heating at a rate of 20 °C/min.

Наступним етапом було проведено ДТА після нагрівання дослідного матеріалу, саме низьколегованого жаростійкого чавуну (рис. 2) та встановлено, що початок фазових перетворень відбувається за температури від 719,4 °C до температури 788,1 °C, що подібна точці Кюрі стану рівноваги хімічно чистого Fe-C сплаву. Температурний інтервал від 820 °C до 910,2 °C з піком за 843,6 °C свідчить про фазові зміни, а температура 1159,9 °C вказує на

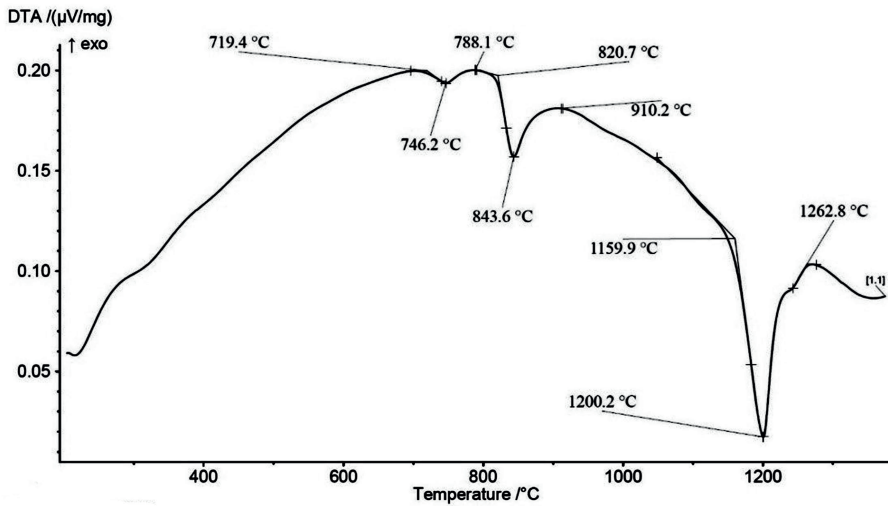


Рис. 2. Диференційно-термічний аналіз дослідного низьколегованого чавуну під час нагрівання зі швидкістю 20 °C/хв

Fig. 2. Differential thermal analysis of experimental low-alloy cast iron during heating at a rate of 20 °C/min.

початок евтектичного перетворення та перехід до рідкої фази розплаву та відповідає точкам E' та C' (1153 °C) системи Fe-C.

Диференційно-термічний аналіз двох сплавів показав, що дослідний матеріал має вищі температури початку фазових перетворень (719,4 °C) ніж матеріал з відпрацьованої форми, що є позитивним показником. Результати показують, що новий дослідний чавун демонструє меншу зміну фазових характеристик і вищі температурні показники порівняно з відпрацьованим матеріалом. Це свідчить про більшу стійкість нового матеріалу та дозволить відтермінувати виникнення деформацій і дефектів, таких як тріщини та оксидні ураження, що виникають через циклічні нагрівання та охолодження.

Після аналізу фазових перетворень і термічної стійкості дослідного матеріалу важливою характеристикою, яку слід враховувати для оцінки його експлуатаційних властивостей, є окалиностійкість. Втрата окалиностійкості призводить до поступового руйнування поверхні форми, утворення дефектів і зниження її довговічності. Висока окалиностійкість забезпечує захист поверхні матеріалу від окиснення та подальшого пошкодження. Зокрема, для формокомплектів, що контактують з розплавленим склом за високих температур, здатність чинити опір утворенню та поширенню окалини є ключовим фактором, який впливає на тривалість їх експлуатації.

Результати досліджень показали збільшення маси зразків під час випробувань на окалиностійкість через 30 год та 50 год випробовування (рис. 3) як дослідного низьколегованого чавуну так і зразків відпрацьованої форми. Однак, зміна маси зразків низьколегованого чавуну нижча в 1,0-1,1 рази порівняно з показниками чавуну з відпрацьованої форми, що свідчить про вищі показники затримки до утворення окалини на поверхні дослідного чавуну та як наслідок стійкість до відповідних дефектів.

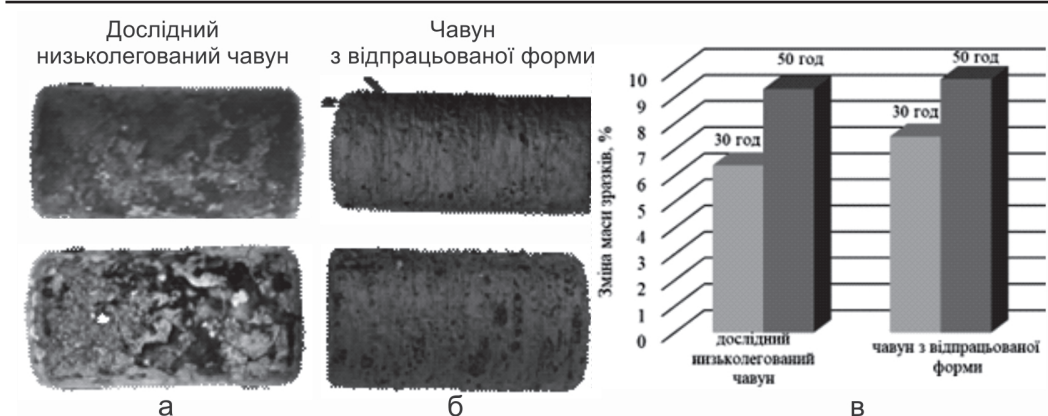


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків з низьколегованого чавуну та зразків з відпрацьованої форми після випробування на окислювостійкість через 30 год (а), 50 год (б) та зміна маси зразків (в).

Fig. 3. Appearance of samples from low-alloy cast iron and samples from the disused mould after the test for scale resistance after 30 h (a), 50 h (b) and mass change of samples (v).

За результатами розрахунків зміни питомої маси зразків за максимальний період випробування, встановлено, що після 50 год цей показник знаходиться на рівні $0,164 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$. Згідно [21] критерій окислювостійкості сірих чавунів знаходиться в діапазоні від $0,1$ до $1 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$, тому можна стверджувати, що окислювостійкість дослідного чавуну знаходиться на високому рівні. Отримані високі показники окислювостійкості згідно з [17, 18] свідчать про здатність матеріалу утворювати захисну оксидну плівку, внаслідок попереднього легування спеціальними активними елементами – Ni, Al, Cr, Ti, Si, Mo, V. Також мінімальні показники зміни питомої маси матеріалу зразків відповідно до [15, 16, 21] пояснюються тим, що наявні захисні оксидні плівки стійкі до впливу навколишнього середовища та міцно зчеплені з основним металом, що і формує позитивні характеристики окислювостійкості матеріалу за високих температур експлуатації форми.

Другою важливою характеристикою є ростостійкість матеріалу, яка визначає його здатність протистояти збільшенню розмірів під час експлуатації в умовах високих температур. Ця характеристика є критично важливою для формокомплектів, що працюють у циклічних температурних режимах, оскільки повторне нагрівання і охолодження може призвести до деформації матеріалу та зміни його геометричних розмірів.

Оцінка ростостійкості дослідного низьколегованого чавуну дозволяє визначити його поведінку в умовах тривалого температурного впливу і термоциклів, що є важливим кроком для підтвердження його придатності до експлуатації в екстремальних умовах виробництва скляної тари.

У результаті дослідження ростостійкості та тріщиностійкості внаслідок впливу циклічного впливу температури встановлено, що після циклічних випробувань нагрівання-охолодження від 10 циклів до 60 циклів на зразках матеріалу утворилася поверхнева сітка розгару (тріщини), що відображено на рис. 4.

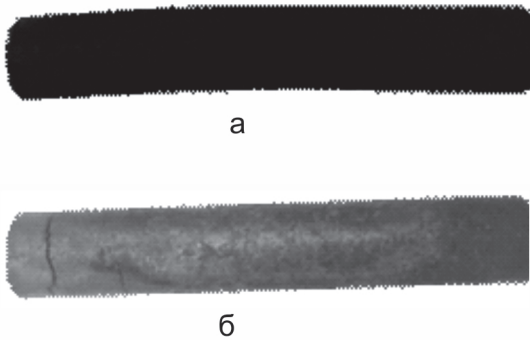


Рис. 4. Зовнішній вигляд зразків після 60 циклів циклічних випробувань: а – чавун відпрацьованої форми, б – дослідний низьколегований чавун.

Fig. 4. Appearance of the samples after 60 cycles of cyclic testing: a - cast iron of the disused mould, b - experimental low-alloy cast iron.

мають наступні залежності: діаметр максимально збільшився на 0,7 мм, а довжина максимально – на 4,1 мм (рис. 5), що у відсотках становить 6,2 % та 6,4 % відповідно.

Аналіз габаритних розмірів зразків дослідного низьколегованого чавуну після випробувань на термоциклування відображає їх аналогічні

Появу перших тріщин на поверхні зразків спостерігали після 41го циклу випробувань, а руйнування зразка – на 60 циклі. Варто відзначити, що на зразках з відпрацьованої форми утворилася значно більша кількість тріщин порівняно з низьколегованим чавуном, а також вони мають більш виражену форму та глибину, що вказує на кращу стійкість структури низьколегованого чавуну до утворення термічних тріщин.

Встановлено, що габаритні розміри зразків чавуну відпрацьованої форми після випробувань

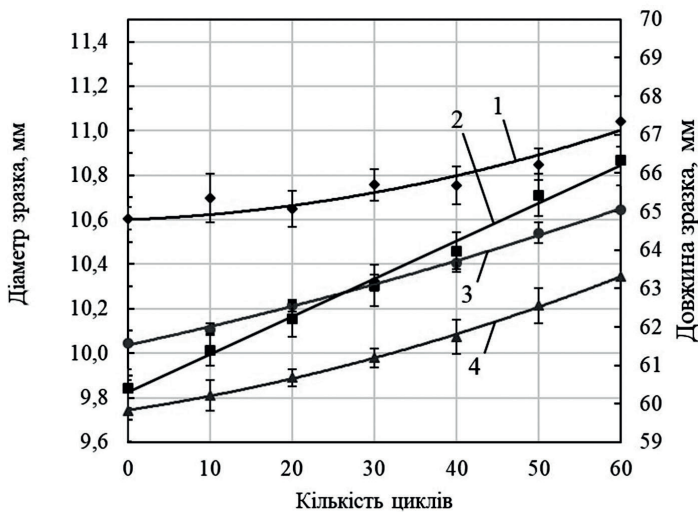


Рис. 5. Зміни розмірів зразків залежно від кількості циклів термоциклування: 1 – зміна діаметру зразка чавуну відпрацьованої форми; 2 – зміна довжини зразка чавуну відпрацьованої форми; 3 – зміна діаметру зразка низьколегованого чавуну; 4 – зміна довжини зразка низьколегованого чавуну.

Fig. 5. Changing the size of the sample depending on the number of thermal cycling cycles: 1 - change in the diameter of the samples from the disused mould; 2 - change in samples from the disused mould; 3 - change in the diameter of the low-alloyed iron sample; 4 - change in the length of the low-alloyed iron sample.

лінійні залежності (рис. 5), однак показники зміни розмірів в 1,1-1,2 рази нижчі за показники зразків відпрацьованої форми.

Лінійні залежності зміни розмірів зразків під час термоцикування вказують про наявність поступових процесів перетворення та виділення графіту без різких руйнувань, що обумовлює стабільність дослідного низьколегованого чавуну в умовах високих температур. Це є ключовим фактором для його застосування у виробництві формокомплектів, оскільки матеріал повинен зберігати свою геометрію та не піддаватися значним деформаціям за тривалих циклах нагрівання і охолодження.

Відповідно до [15] кількість та морфологія графіту значно впливають на поведінку чавуну в умовах високих температур та особливо великий вплив має виділення графіту на ріст чавуну, оскільки проникнення окислювальних газів відбувається вздовж цих виділень графіту.

У результаті металографічного дослідження травлених зразків низьколегованого чавуну визначено перлітно-феритну металеву матрицю (рис. 6 а), яка аналогічна мікроструктурі чавуну формокомплекту (рис. 6 б) та подібна мікроструктурі такої ж продукції світових виробників [14].

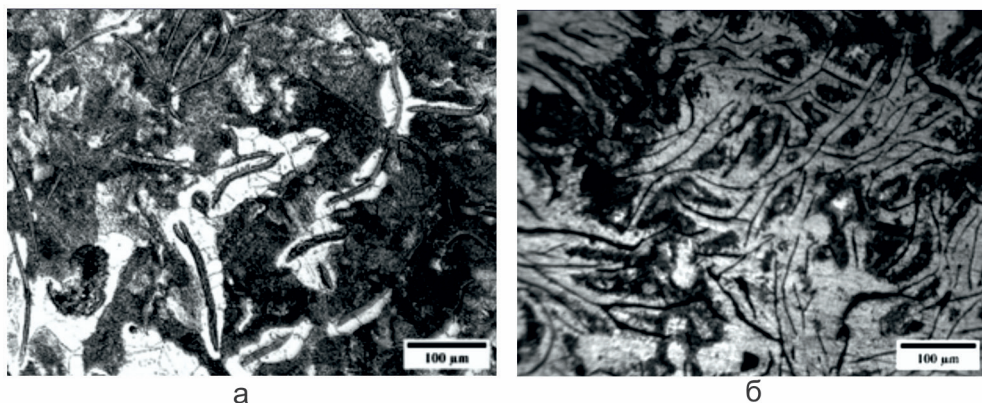


Рис. 6. Металева матриця зразків дослідного низьколегованого чавуну (а) та чавуну відпрацьованої форми (б).

Fig. 6. Metal matrix of samples of experimental low-alloy cast iron (a) and cast iron of the disused mould (b).

Встановлені мікромеханічні характеристики матриці зразків низьколегованого чавуну знаходяться в межах від 302 до 364 HV. За значеннями твердості за Брінеллем матеріал має стабільні показники за перерізом від 220 до 238 НВ та в 1,1-1,2 рази кращі за показники відпрацьованої форми. Підвищені значення мікротвердості та твердості в низьколегованому чавуні зумовлено дією легувальних елементів, які сприяють подрібненню розмірів зерен та гальмують їх ріст, а саме Cr та V [15, 19], а також елементів, які стабілізують наявні та можуть утворювати власні карбіди – Ti, V, Cr та Mo.

Результати досліджень свідчать про те, що дослідний чавун має низьку ростостійкість і здатний витримувати циклічні температурні навантаження, зберігаючи при цьому свої механічні та геометричні властивості. Відсутність різких фазових змін та лінійність росту розмірів матеріалу під впливом термоцикування, підвищена твердість та зносостійкість металевої матриці

формують твердження, що дослідний чавун стабільніший в режимах високих температур експлуатації порівняно з відпрацьованою формою.

Висновки

1. Запропонований хімічний склад дослідного низьколегованого чавуну забезпечує покращені температурні характеристики і жаростійкість матеріалу. Легувальні елементи, такі як Si, Al, Cr, Ni, Mo, V, Ti мають вплив на підвищення температур фазових перетворень, забезпечуючи стабільність структури матеріалу під час роботи в умовах високих температур.

2. Температури початку фазових перетворень у дослідному чавуні вищі, ніж у чавуну відпрацьованої форми. Початок фазових перетворень у дослідному чавуні відбувається при температурі 719,4 °С, що на 17,7 °С перевищує температуру фазових перетворень відпрацьованого матеріалу. Це свідчить більшу стійкість дослідного чавуну до високотемпературних навантажень.

3. Окалиностійкість дослідного чавуну демонструє високий рівень опору до утворення окалини. Збільшення маси зразків через 50 годин випробувань становило 0,164 г/(см²·год), що відповідає високим стандартам окалиностійкості.

4. Збільшення розмірів зразків за термоцикування відбувається лінійно, без динамічних змін чи деформацій. Приріст діаметра зразків становив 6,06 %, а приріст довжини – 5,53 % після 60 циклів. Лінійне зростання розмірів свідчить про стабільність матеріалу та відсутність різких руйнівних структурних змін в умовах високих температур, що подібні до умов експлуатації форми.

5. Тріщиностійкість матеріалу підтверджується випробуваннями: перші тріщини з'являються лише після 41-го циклу, а повне руйнування зразків відбувається на 60-му циклі термоцикування. Це свідчить про високий рівень стійкості матеріалу до термічної втоми у циклічних термічних умовах.

6. Підвищені значення твердості дослідного матеріалу від 220 до 238 НВ обумовлює підвищену стійкість до деформацій та руйнування в умовах високих температур експлуатації.

7. Комплекс досліджених та порівняльних характеристик дослідного чавуну з матеріалом відпрацьованої форми надає можливість рекомендувати дослідний чавун як матеріал для деталей формокомплектів з нижчими показниками дефектів за визначеними ознаками.

Література

1. Державний комітет статистики України, 2022, URL: <https://ukrstat.gov.ua>.
2. Асоціація Підприємств Складної Промисловості "Скло України", 2021, URL: <https://www.sklo.kiev.ua>.
3. Розробка і виробництво горілчаних пляшок. Де купити скляні пляшки для алкогольної продукції, основні виробники пляшок, 2022, URL: <https://koloro.ua/blog/issledovaniya/razrabotka-i-proizvodstvo-vodochnyh-butyllok.-gde-kupit-steklyannye-butylki-dlya-alkogolnoj-produkcii-osnovnye-proizvoditeli-butyllok.html>.

4. М. М. Племянников, А. П. Яценко, І. В. Пилипенко та Б. Ю. Корнілович, Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018, с. 298.
5. E-moc technology, 2023, URL: <https://www.bottero.com/e-moc-technology>.
6. P. Manns, W. Düll and G. Kleer. Glass in contact with mould materials for container production // Glass Science and Technology: Glastechnische Berichte. – 1995. – vol. 68. – no. 12. – pp. 389-399.
7. Technical Article on Glass Moulds within the Glass Packaging Production Process, 2024, URL: <https://www.aegg.co.uk/blog/news/item/technical-article-on-glass-moulds-within-the-glass-packaging-production-process>.
8. M. P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed ed., 2010: JOHNWILEY & SONS, INC., pp. 1-1025.
9. K. M. Mashloosh. Wear resistance of different types of cast iron used in glass blow mould // Diyala Journal of Engineering Sciences. – 2015. – vol. 08. – no. 03. – pp. 01-11. <https://doi.org/10.24237/djes.2015.08304>
10. Let's Make a Bottle: Understanding the Glass Bottle Formation Process, 2018, URL: <https://www.oberk.com/packaging-crash-course/glass-bottle-formation>.
11. И. Е. Степнов и И. Е. Гладштейн. Конструирование форм для стеклянных изделий // М.: Издательство «Легкая индустрия». – 1974. – С. 208.
12. L. Hollands. The Glass to Metal Interface during Container Forming Processes // The University of Sheffield. – 1998.
13. ДСТУ 8851:2019 Виливки з легованого чавуну зі спеціальними властивостями, 2019.
14. Unitedcastbar, 2024, URL: <https://www.unitedcastbar.com/es/products-materials/unibar-250>.
15. Н. Г. Гиршович. Чугунное литье // М.-Л.: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии. – 1978. – с. 708.
16. J. R. Brown. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook // London: Butterworth-Heinemann. – 2000. – p. 371.
17. М. М. Ямшинський, Г. Є. Федоров та К. С. Радченко. Термостійкість жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах // ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. – 2015. – т. 3. – № 36. – с. 33-37.
18. М. М. Ямшинський, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов та К. С. Радченко. Окалиностійкість хромоалюмінієвих сталей і розрахунок параметричних діаграм // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – т. 1. – № 70. – С. 25-30. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2014.70.33144>
19. Byeong-choon Goo and Choong-hwan Lim. Thermal fatigue of cast iron brake disk materials // Journal of mechanical science and technology. – 2012. – vol. 26. – no. 6. – pp. 1719-1724.
20. А. І. Устименко, І. В. Лук'яненко, М. М. Ямшинський, І. М. Гурія та Б. В. Кивгило. Нові жаростійкі сплави для виготовлення склоформ // Процеси лиття. – 2023. – т. 1. – № 151. – с. 43-53. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.043>.
21. Н. Г. Гиршович. Справочник по чугуному литью // 3-е ред., Л.: Машиностроение. – 1978. – С. 758.

References

1. State Statistics Committee of Ukraine, 2022, URL: <https://ukrstat.gov.ua>. [in Ukrainian].

2. Association of Glass Industry Enterprises "Glass of Ukraine", 2021, URL: <https://www.sklo.kiev.ua>. [in Ukrainian].
3. Development and production of vodka bottles. Where to buy glass bottles for alcoholic beverages, the main bottle manufacturers, 2022, URL: <https://koloro.ua/ua/blog/issledovaniya/razrabotka-i-proizvodstvo-vodochnyh-butyllok.-gde-kupit-steklyannye-butylki-dlya-alkogolnoj-produkcii-osnovnye-proizvoditeli-butyllok.html>. [in Ukrainian].
4. M.M. Plemiannikov, A.P. Yatsenko, I.V. Pylypenko, B.Yu. Kornilovych, *Kyiv: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*, 2018, p. 298[in Ukrainian].
5. E-moc technology, 2023, URL: <https://www.bottero.com/e-moc-technology>. [in English].
6. P. Manns, W. Düll and G. Kleer, *Glass Science and Technology: Glastechnische Berichte*, 1995, vol. 68, no. 12, pp. 389-399. [in English].
7. Technical Article on Glass Moulds within the Glass Packaging Production Process, 2024, URL: <https://www.aegg.co.uk/blog/news/item/technical-article-on-glass-moulds-within-the-glass-packaging-production-process>. [in English].
8. M. P. Groover, *4th ed ed., 2010: JOHN WILEY & SONS, INC.*, pp. 1-1025. [in English].
9. K. M. Mashloosh, *Diyala Journal of Engineering Sciences*, vol. 08, no. 03, p. 01-11. [in English]. <https://doi.org/10.24237/djes.2015.08304>.
10. Let's Make a Bottle: Understanding the Glass Bottle Formation Process, 2018, URL: <https://www.oberk.com/packaging-crash-course/glass-bottle-formation>. [in English].
11. I.Ye. Stepnov, I.Ye. Gladshtein, *Moscow.Consumer goods industry*, 1974, p. 208. [in Russian].
12. L. Hollands, *The University of Sheffield*, 1998. [in English].
13. *DSTU 8851:2019 Alloy iron castings with special properties*, 2019. [in Ukrainian].
14. Unitedcastbar, 2024, URL: <https://www.unitedcastbar.com/es/products-materials/unibar-250>. [in English].
15. N. G. Girshovich, M.-L.: *State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Ferrous and Nonferrous Metallurgy*, 1978, p. 708. [in Russian].
16. J. R. Brown, *London: Butterworth-Heinemann*, 2000, p. 371. [in English].
17. M. M. Yamshinsky, G. E. Fedorov and K. S. Radchenko, *Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy*, 2015, vol. 3, no. 36, pp. 33-37. [in Ukrainian].
18. M. M. Yamshinsky, G. E. Fedorov, E.O. Platonov and K. S. Radchenko, *Bulletin of NTUU 'KPI'. Series of mechanical engineering*, 2014, vol. 1, no. 70, pp. 25-30. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2014.70.33144>.
19. Byeong-choon Goo and Choong-hwan Lim, *Journal of mechanical science and technology*, 2012, vol. 26, no. 6, pp. 1719-1724.
20. A. I. Ustimenko, I.V. Iukianenko, M. M. Yamshinsky, I. M. Guria and B. V. Kyvgilo, *Casting processes*, 2023, vol. 1, no. 151, pp. 43-53. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.043>
21. N. G. Girshovich, *3rd ed., L.: Mashinostroenie*, 1978, p. 758. [in Russian].
22. M. Cao, K. P. Baxevanakis and V. V. Silberschmidt, *Metals*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 473. <https://doi.org/10.3390/met13030473>

Одержано 05.11.24

Characteristics of heat-resistant low-alloy cast iron for molds in the glass container industry

A. I. Ustymenko, PhD student, ustymenko@kpi.ua, ORCID 0000-0002-5893-6499

I. V. Lukianenko, PhD, Associate Professor, lukianenkoiv@gmail.com, ORCID 0000-0002-1043-9688

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Summary

The growth of national production of glass packaging products requires the use of new materials and technologies to create conversion conditions for the production of moulds and their introduction into production to replace similar imported products.

The main problem faced by glass packaging manufacturers when operating moulding systems is their low service life and failure due to cyclic exposure to high temperatures. The operating environment of a moulding set is caused by the aggressive action of glass material with high adhesive properties, which, in long-term contact, causes defects on the surface of the moulds in the form of oxidised areas and cracks.

The high moulding speed and temperature of the aggressive working environment prompts the correction of mould properties, specifically the selection of a chemical composition of a material with a low content of alloying elements, which will improve the performance characteristics of moulds and economic indicators of production.

The paper presents the preparation of the chemical composition of low-alloy cast iron, determines its critical points of phase transformation, establishes its heat resistance characteristics, and recommends it for use as a moulding material.

The results of the differential thermal analysis show that the onset of phase transformations in the experimental cast iron is 17.7 °C higher than the critical point of the sample from the disused mould. The change in the specific mass of the samples after 50 hours of scale resistance tests was determined, which is at a high level and amounts to 0.164 g/(cm²·h).

It has been identified that the growth resistance of cast iron has linear dependencies with increasing influence of cycles, which indicates the absence of sharp phase transformations and, as a result, the absence of dynamic changes in the material during operation. It was identified that the destruction of the experimental cast iron samples occurs at the 60-th cycle of high test conditions, which demonstrates positive crack resistance and the presence of a stable structure of the experimental cast iron.

Keywords: moulding set, aggressive environments, low-alloy cast iron, differential thermal analysis, scale resistance, growth resistance, crack resistance, self-passivation film.