
НОВІ ЛИТІ МАТЕРІАЛИ

<https://doi.org/10.15407/plit2023.01.043>

УДК 621.745.55

А. І. Устименко, аспірантка; e-mail: onalina44@gmail.com;
ORCID 0000-0002-5893-6499

І. В. Лук'яненко, канд. техн. наук, доцент; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com;
ORCID 0000-0002-1043-9688, Scopus Author ID: 57224367323, Researcher
ID: J-7294-2017

М. М. Ямшинський, докт. техн. наук, доцент, завідувач кафедри;
e-mail: yamshinskiy@ukr.net; ORCID 0000-0002-2293-2939, Scopus Author ID:
6508061815, ResearcherID: I-4267-2017

І. М. Гурія, канд. техн. наук, доцент; e-mail: guriya@ukr.net;
ORCID 0000-0003-0394-9708, Scopus Author ID: 57387996200, Researcher
ID: AAA-9338-2022

Б. В. Кивгило, аспірант; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com;
ORCID 0000-0001-5890-9020

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім.і Ігоря
Сікорського (Київ, Україна)

НОВІ ЖАРОСТІЙКІ СПЛАВИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СКЛОФОРМ

Скляне виробництво відноситься до галузі промисловості, що виробляє будівельно-технічне, тарне, хімічно-лабораторне та інші види скла. Значну питому вагу в товарообігу займає скляна тара. Ринок склотари залишатиметься перспективним і буде спостерігатися подальше зростання обсягу його споживання. На сьогоднішній день не існує універсальної схеми, що здатна суттєво підвищити робочий ресурс деталей склоформ. Така ситуація створює нові підходи і методи для вирішення проблем із вдосконалення структури матеріалу литих склоформ, здешевлення їх виробництва та підвищення ресурсу експлуатації виробів. Проаналізовано найбільш поширені на сьогоднішній день хімічні склади закордонних та вітчизняних жаростійких чавунів для склоформ. На підставі цього найбільший інтерес представляє чавун, що легують кремнієм з подальшим формуванням необхідної структури в литому стані за допомогою дозування Fe–C–Si модифікованого чавуну мікродозуванням легувальних елементів. Чавуни додатково мікролегували Mo, Cr, Ti, Al та V. Молібден і хром є двома важливими елементами, які відіграють вирішальну роль у подрібненні первинного зерна. Було виявлено, що частина вуглецю використовується для утворення твердого розчину, легovanого молібденом і хромом, що сприяє подрібненню графітових включень. Однак, слід зазначити, що мікролегування титаном та алюмінієм не призводить до подрібнення графітових включень через збільшення феритної складової в структурі. Внаслідок карбідоутворювальної

дії мікролегувальних елементів встановлено зменшення кількості вкраплин графіту. За результатами досліджень встановлено, що термостійкість сплаву є функцією всього комплексу властивостей: механічних, фізичних, фізико-хімічних і технологічних. Для досягнення високих експлуатаційних властивостей формокомплектів, необхідно брати до уваги усі фактори, в тому числі, дотримуватися правил проектування та розроблення технології виготовлення жаростійкого виливка.

Ключові слова: жаростійкий чавун, хімічний склад, термостійкість, форма графіту, структура, термоциклювання

Вступ.

Виробництво скла в Україні є однією із складових частин економіки, яка відіграє важливу роль у формуванні макроекономічних показників держави і відноситься до галузі промисловості, що виробляє будівельно-технічне (віконне скло, скляні блоки), тарне (пляшки, парфумерну скляну тару тощо), хімічно-лабораторне та приладобудівне, господарсько-побутове (посуд, дзеркала тощо), електротехнічне і вакуумне, медичне, оптичне та інші види скла, скловолокно, мистецькі вироби зі скла і кришталю. Значну питому вагу в товарообігу займає скляна тара [1].

Базуючись на стані вітчизняного склотарного виробництва та тенденції росту споживання даної продукції в Україні та в світі, для покривання попиту та підвищення конкурентоспроможності, а також збільшення ринку збуту необхідно зменшувати ціну на продукт, та підвищувати якість продукції. На це можна впливати за допомогою таких чинників, як: зменшення вартості на виробниче устаткування, зменшення вартості шихтових матеріалів, покращення технологій виготовлення та терміну експлуатування технологічного устаткування на виробництві та інше.

Одним із найбільш суттєвих ціноутворювачів кінцевого продукту є металева пресформа для виготовлення склотарної продукції – склоформа.

Варто відзначити, що останнім часом скляна тара набирає популярність у зв'язку з домінуванням тенденції до використання екологічних матеріалів. Це дозволяє стверджувати, що ринок склотари залишатиметься перспективним і буде спостерігатися подальше зростання обсягу його споживання.

Основні виробники скляної тари в Україні представлені підприємствами: ВАТ «Гостомельський склозавод», ВАТ «Рокитнянський склозавод» та ТОВ «Вільно-гірське скло». Підприємства повністю модернізуються і збільшують виробничі потужності, що дає змогу випускати склотару високої якості, різної форми та об'єму. Майже 95 % всієї продукції на ринку України вітчизняного виробництва [2]. Незважаючи на зростаючий попит, виготовлення скляної тари відбувається на оснащені (деталі склоформи), яке виготовлено із закордонних матеріалів. Розроблення сучасних вітчизняних матеріалів, які забезпечують експлуатаційні характеристики на рівні закордонних аналогів є актуальною науково-технічною проблемою ливарного виробництва.

Аналіз умов експлуатації деталей склоформ на виробничій лінії дозволив авторам [1–4] встановити, що основними факторами які впливають на стійкість деталей склоформ, є: температура робочого шару 750–850 °С; знакозмінні напруження в поверхневих шарах, які контактують із скломасою (градієнт температур поверхневого шару впродовж 1 циклу виготовлення (загальна тривалість процесу «скломаса → готовий скловиріб» не перевищує 2–7 с) становить приблизно 50 °С, а градієнт температур за перерізом склоформи – до 650 °С); зміна структури в процесі експлуатації (за життєвий цикл спостерігається коагуляція графітових вкраплин та процеси рекристалізації металевої матриці).

Автори роботи [4] зазначають такі температурні умови роботи склоформ (рис. 1):

- температура робочої поверхні склоформи 750–850 °С;

- температура зовнішньої поверхні склоформи 100–300 °С, що повною мірою відповідає градієнту температур по перетину склоформи 400–650 °С.

За зазначених умов роботи у поверхневих шарах склоформи виникає

температурне навантаження (деформація стиснення здійснюється при максимальній температурі розігрівання формокомплекта, а деформація розтягування – при мінімальній температурі циклу) та силовий удар скломаси. Такий вид навантаження реалізується лише в поверхневих шарах, де знаходиться навантаження в максимальному діапазоні. Залежно від виробника склоформ робочий ресурс деталей склоформ становить 0,3–1 млн. виробів. На сьогоднішній день, на жаль, не існує універсальної схеми, що здатна суттєво змінити робочий ресурс деталей склоформ. Основними напрямками підвищення експлуатаційного ресурсу даних деталей є:

- підбір хімічного та фазового складу матеріалу склоформ;
- підвищення міцності поверхні, що контактує з розплавом скла;
- розроблення нових технологій виготовлення деталей склоформ.

Підвищення вимог до властивостей матеріалу сприяє створенню нових підходів і методів для вирішення проблем із вдосконалення якості матеріалу литих склоформ.

Сучасні світові тенденції та роботи [5, 6] щодо покращання експлуатаційних властивостей деталей склоформ дозволяють зробити висновок, що найкращим матеріалом для виготовлення склоформи є чавун. Аналіз літературних джерел показує велику кількість жаростійких матеріалів різного хімічного складу для виготовлення склоформ. Всі вони являють собою систему Fe–C–X, де X – це легувальні елементи.

Одним із напрямів суттєвого підвищення стійкості даних деталей, на думку авторів [5, 6], є необхідність регулювання хімічного складу чавуну і ступеню його структуризації, який можна забезпечити за рахунок утворення структур у різних частинах вилівка за різними механізмами кристалізації та дифузії окремих хімічних елементів.

Формування такої структури у виливці сприяє особливому комплексу властивостей формокомплекту, таких, як: висока міцність робочого шару; достатня теплопровідність; підвищена стійкість до роботи в умовах циклічних знакозмінних навантажень; висока жаростійкість склоформ.

Особливо важливим моментом під час виготовлення деталей склоформ є контроль складу металу, як хімічного, так і фазового, а також відслідковування стану зміцнюючих структур (перліт, цементит, карбідні включення легувальних елементів тощо), що забезпечує формування у матеріалі вищевказаного комплексу властивостей [7].

В роботі поставлено за мету вдосконалення хімічного складу жаростійких чавунів.

Постановка задачі.

Таким чином на підставі аналізу літератури в роботі поставлено задачу проаналізувати хімічні складі існуючих жаростійких чавунів і запропонувати новий склад чавуну, який задовільняє підприємства скляної промисловості.

Створення конкурентноспроможної продукції можливо двома способами:

- зниження собівартості виробництва готових деталей склоформуального комплексу за рахунок раціоналізації процесів на виробництві литих заготовок, їх подальшого термічного та механічного оброблення;
- створення комплексу необхідних властивостей на рівні закордонних склоформ: термостійкість; жаростійкість; окислостійкість.

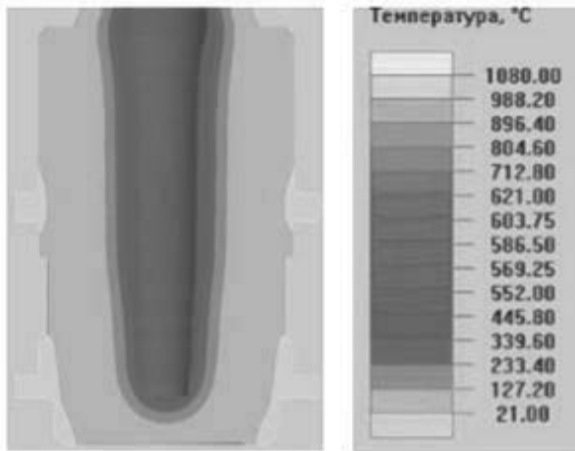


Рис. 1. Градієнт розігріву чорнової склоформи під час експлуатації [4]

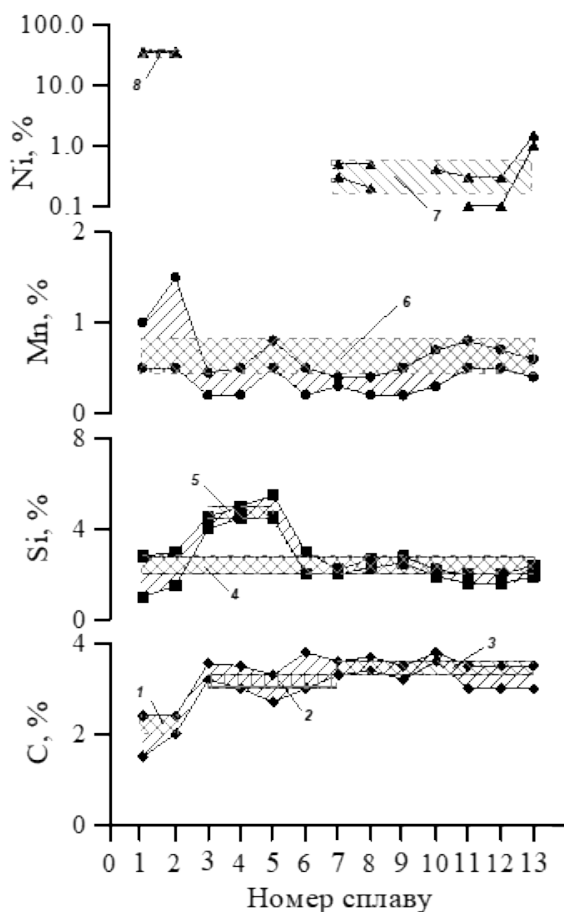


Рис. 2. Розподіл основних легувальних елементів в жаростійких чавунах

Результати дослідження.

Авторами роботи визначено найбільш поширені хімічні склади закордонних та вітчизняних жаростійких чавунів для склоформ та розглянуто основні легувальні елементи та мікродобавки, які входять їх складу. За результатами проведеної роботи визначено три групи сплавів (рис. 2), всередині яких сплави об'єднані близьким хімічним складом за окремими елементами:

група 1 (сплави № 1 та 2, область 8) – сплави з високим вмістом нікелю, які характеризуються аустенітною структурою та діапазоном робочих температур до 1100 °С;

група 2 (сплави № 3, 4 та 5, область 5) – містить у своєму складі 4,5–5,5 % кремнію, який забезпечує жаростійкість сплаву до 700 °С та утворення феритної структури металевої матриці;

група 3 (сплави № 6–13, області 4, 6, 7) – містить легувальні елементи у незначній кількості, які підвищують в комплексі складові властивості жаростійкості та міцність матеріалу.

Для забезпечення відповідної структури кожна з наведених груп

сплавів поділяються за вмістом вуглецю, області 1, 2, 3.

В літературі зустрічається суперечлива інформація стосовно кількості основних легувальних елементів, тому одним із кроків досягнення поставленої мети було визначення їх концентрацій, які б забезпечували утворення стабільних структурних складових у робочому шарі деталей склоформи. Оброблення даних щодо вмісту легувальних елементів сплавів всередині вищевизначених груп дозволило визначити їх концентраційний діапазон (див. рис. 2), дотримання якого забезпечило б необхідну структуру матеріалу і тим самим – високі експлуатаційні властивості.

На підставі вищезазначеного найбільший інтерес представляє чавун легований кремнієм, у якому за допомогою додаткового мікродозування іншими хімічними елементами забезпечується формування необхідної структури в литому стані.

У переважній більшості робіт, що присвячуються легованим чавунам, відзначають негативну дію надмірного вмісту кремнію в розплаві [8]. Це пов'язано із несприятливим впливом на властивості пластичності сплаву. Але ці негативні ефекти не проявляються за вмісту кремнію менше 4,5 %, оскільки у цьому діапазоні переважає феритизувальний вплив кремнію на металеву матрицю чавуну [9].

Автори роботи [10] додатково відзначають, що крім структури металевої матриці суттєвий вплив на експлуатаційні властивості деталей склоформ справляють форма, розміри та розподіл графітових включень, які у свою чергу визначаються процесами первинної графітизації.

На підставі висновків авторів [11], умов експлуатації склоформ, з метою економії легувальних елементів та дослідження впливу легувальних елементів на структуру та властивості чавуну, можна рекомендувати сплави, за основними легувальними елементами, що наведені у наступній таблиці.

Хімічний склад чавунів, що рекомендовано для виготовлення склоформ

Хімічний елемент	Вміст легуючого елементу у чавуні, %		
	220ЖЧН35	310ЖЧС5	350ЖЧСЗЮХМН
C	2,0–2,4	3,0–3,3	3,3–3,6
Si	2,0–2,8	4,5–5,0	2,2–2,6
Mn	0,05–1,0	до 0,5	до 0,5
Ni	34–36	–	0,2–0,5

Вибір хрому, нікелю та алюмінію як додаткових легувальних елементів, відповідно до аналізу літературних джерел [2–7, 12], забезпечує покращення комплексної характеристики чавунів – жаростійкості. Жаростійкість необхідно розглядати як сукупність окремих властивостей матеріалу: тріщиностійкість, ростостійкість і окислювальність.

Вибір широкого спектра легувальних елементів пов'язаний з наданням матеріалу виробу комплексу властивостей: термо-, жаро- і окислювальності. Однак така сукупність елементів певним чином впливає на температурний режим охолодження виливка склоформи і, як наслідок, зміну умов кристалізації окремих його шарів.

У зв'язку з цим створення певного швидкісного режиму охолодження виливка не гарантує формування необхідної структури.

Модифікування чавуну – у вигляді процесів передсфероїдизувальної інокуляції, глобуляризації графітових включень, а також вторинної інокуляції – має суттєвий вплив на утворення шаруватої градієнтної структури у литому стані. Однак важливим етапом при цьому є вибір і точне дозування добавок, які вводять у чавун. Вони забезпечують синтез окремих фаз, які розвивають дифузійну активність різних атомів (глобуляризатори) або попереджують ефект переохолодження чавуну (графітизатори).

Все це викликано недостатньою та суперечливою інформацією щодо підвищення термо-, окислювально- і жаростійкості чавунів для деталей відповідального призначення, що працюють при знакозмінних циклічних теплових навантаженнях в умовах агресивних середовищ і абразивного зношування. В першу чергу це пояснюється різноманітністю підходів до створення необхідної структури лиття: від дозування розплаву чавуну багатокomпонентними лігатурами до встановлення термочасових режимів охолодження виливків. Відомо, що найбільш вивченим способом регулювання теплофізичних і механічних властивостей майбутніх чавунних деталей є управління формою, дисперсністю і кількістю графітової фази у виливку, що підтверджується дослідженнями авторів [7, 12].

Найпоширенішими способами управління високовуглецевою фазою у чавунних виливках є:

- легування карбідоутворювальними і / або графітизувальними елементами;
- модифікування розплаву чавуну елементами, що зменшують (або збільшують) поверхневий натяг на межі «графіт – розплав».

У процесі експлуатації у склоформі виникають значні термічні напруження внаслідок чергування різких нагрівів і охолоджень. Крім знакозмінних термічних напружень у матеріалі форми можуть відбуватися складні структурні зміни, хімічні процеси. Основними причинами виходу з ладу склоформ при впливі циклічних температурних перепадів є ріст та інтенсивне окислення деталей, адгезійне і втомне зношування робочих поверхонь, вигорання вуглецю.

Легування розплаву чавуну карбідоутворювальними та окислювальними елементами, які здатні як підвищити міцність виробу та знизити ріст чавуну (за рахунок утворення у металевій матриці дрібних включень складнолегованих карбідів), так і створити складну оксидну плівку з подвійних оксидів шпінельної структури з малим параметром решітки (наприклад, FeCr_2O_4 , FeAl_2O_4 , NiFe_2O_4 , NiCr_2O_4) [13].

Найбільшу популярність як карбідоутворювальні елементи отримали Cr, Ti і Mo, а Si, Al, Ni, Cr, Cu – як елементи, що уповільнюють процеси окислення та використовуються, як правило, в комплексі.

Основним показником, який визначає стійкість склоформ до вигорання, є мікроструктура чавуну на глибині 5 мм, яка відповідає зоні робочого шару форми після механічного оброблення [8–10]. У цій зоні важливою є дрібнозерниста структура чавуну, яка перешкоджає вигорання вуглецю і покращує здатність склоформи до полірування.

Встановлено, що формування диференційованої структури у литому стані із гетерогенною будовою за перерізом виливка та гомогенною – в межах певного шару можливе за наявності регулювання ключових чинників формування хімічного і фазового складів виливка, а саме:

- легування чавуну кремнієм, з'єднання якого із залізом забезпечують підвищення міцності і твердості фериту, а також високий ступінь графітизації чавуну; при цьому найбільший ефект досягається шляхом легування чавуну 4,5–5 % Si;

- мікролегування чавуну алюмінієм в кількості більше 0,1% призводить до підвищеної пористості заготовок; низький вміст Cr, Ni, Mn дозволяє усунути карбідоутворення у виливках за умови збереження окалиностійкості деталі.

За результатами металографічного дослідження сплаву марки 220ЖЧН35 легованого нікелем, мікролегованого молібденом та титаном встановлено утворення аустенітної структури металеві матриці із вкраплинами пластинчастого графіту (рис. 3, а) без вибілення із дрібнодисперсними вкраплинами карбідів тугоплавких елементів і встановлено морфологію графітових вкраплин за ГОСТ 3443-87:

форма графіту – ПГФ2 (пластинчаста завихрена);

довжина включень графіту – ПГд45 (мкм);

розподіл вкраплин графіту – ПГр6 (сітчасте);

кількість вкраплин графіту – ПГ6 (%).

обумовлено обробленням розплаву інокулятором SB5.

Сплав марки 310ЖЧС5 (рис. 3, б) отримали легуванням кремнієм, мікролегуванням молібденом та ванадієм. Металографічним аналізом встановлено, що структура сплаву складається із вкраплин графіту пластинчастої форми у ферито-перлітній металевій матриці. Для запобігання утворення вибілення у виливку розплав додатково обробляли інокулятором. Встановлено морфологію графітових вкраплин:

форма графіту – ПГФ4 (гніздоподібна);

довжина включень графіту – ПГд25 (мкм);

розподіл вкраплин графіту – ПГр6 (сітчасте);

кількість вкраплин графіту – ПГ4 (%).

Сплав марки 350ЖЧС3ЮХМН (рис. 3, в) отримали додаванням алюмінію, хрому, молібдену, нікелю та ванадію на різних етапах процесу плавлення, що призвело до подрібнення мікроструктури та утворення дрібнодисперсних тугоплавких сполук у феритно-перлітній металевій матриці із сітчастим розподілом вкраплин графіту без вибілення. Морфологія графітових вкраплин у чавуні:

форма графіту – ПГФ4 (гніздо-подібна) довжина включень графіту – ПГд45 (мкм)

розподіл вкраплин графіту – ПГр6 (сітчасте)

кількість вкраплин графіту – ПГ6 (%)

Наступним кроком в роботі стало дослідження ростостійкості чавунів за циклічних

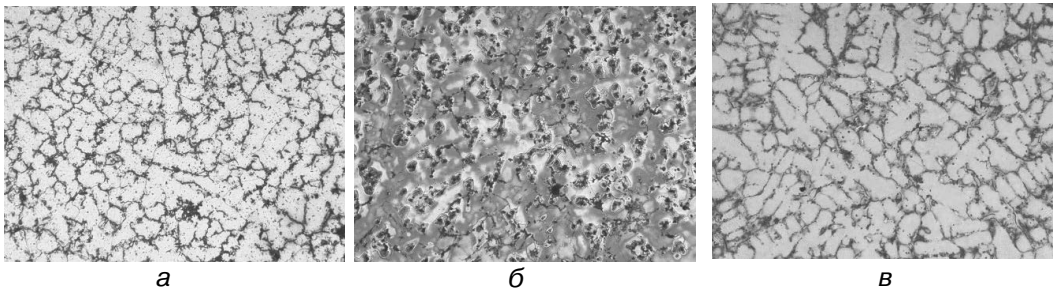


Рис. 3. Мікроструктура чавунів ($\times 100$): а – 220ЖЧН35; б – 310ЖЧС5; в – 350ЖЧС3ЮХМН

нагрівань та охолоджень. В роботі прийнято інтервал термоцикування в діапазоні температур $25 \leftrightarrow 1000$ °C. Для цього зразки довжиною 60 мм і діаметром 10 мм піддавали нагріванню в індукційній печі до 1000 ± 20 °C і різко охолоджували в проточній воді з температурою 25 ± 3 °C. Випробовувань ростостійкості металевих матеріалів полягає у виявленні на зразках першої тріщини і зміни їх форми та розмірів під дією циклічних нагрівань і охолоджень до повного руйнування зразка. Така методика дає можливість оцінювати зміну щільності поверхневих шарів зразка та його структури.

Оскільки для металевих матеріалів найнебезпечнішими є термічні напруження за високих температур, коли метал втрачає свою міцність, а усадка за цих температур повністю переходить у пластичну деформацію, яка сприяє розвитку незворотних структурних змін металу і в подальшому призводить до руйнування виробу та скорочення часу його роботи. Випробовування зразків здійснювали до появи на боковій поверхні або на його торцях тріщин термічної втоми.

Встановлено, що діаметр зразка із чавуну марки 220ЖЧН35 після 60 циклів випробовування збільшився на 0,13 мм, а довжина – на 0,8 мм (рис. 4, а), що у відсотках становить 1,35 та 1,5 відповідно. Зовнішній вигляд зразка на різних етапах випробовування наведено на рис. 5, а.

Встановлено, що діаметр зразка із чавуну марки 310ЖЧС5 після 60 циклів випробовування збільшився на 0,95 мм, а довжина – на 6 мм (рис. 4, б), що у відсотках становить 1,35 та 1,5 відповідно. Зовнішній вигляд зразка на різних етапах випробовування наведено на рис. 5, б.

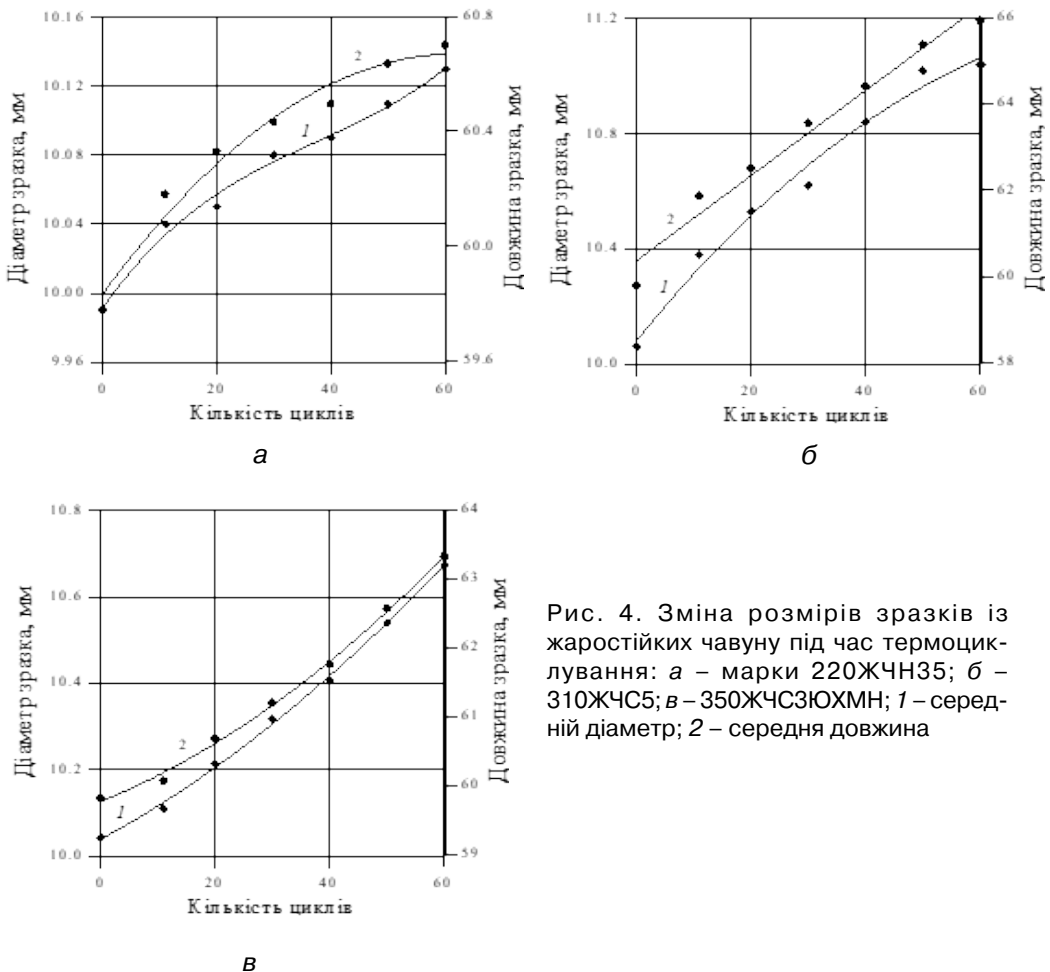


Рис. 4. Зміна розмірів зразків із жаростійких чавуну під час термоцикування: а – марки 220ЖЧН35; б – 310ЖЧС5; в – 350ЖЧС3ЮХМН; 1 – середній діаметр; 2 – середня довжина

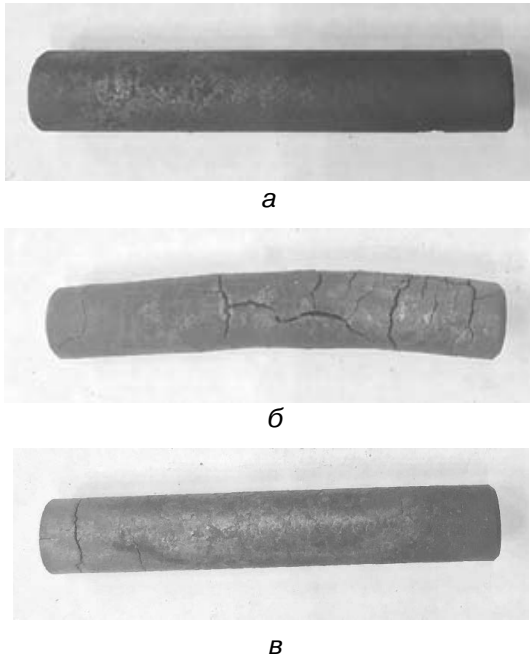


Рис. 5. Зовнішній вигляд зразка із чавуну після 60 циклів термоциклювання: а – марки 220ЖЧН35; б – 310ЖЧС5; в – 350ЖЧС3ЮХМН

не справляє позитивного впливу на подрібнення первинного зерна внаслідок не достатньої його кількості в розплаві.

Відповідно до нормативних документів довжина графітових включень може досягати до 1 мм (див. рис. 3). Таким чином в досліджуваних чавунах їх довжина є дрібнодисперсною. Внаслідок карбідоутворювальної дії мікролегувальних елементів встановлено зменшення кількості краплин графіту. Аналогічний вплив спостерігається і на інших зразках. Підвищення кількості графітових краплин в чавуні 310ЖЧС12Т6 пояснюється зниженим вмістом кремнію у порівнянні з іншими марками чавуну та додатковою кількістю нікелю, який сприяє аустенізації структури.

Однією з головних властивостей жаростійких матеріалів є їх термостійкість. Термостійкість будь-якого матеріалу можна охарактеризувати через термічну втоми. Процес термічної втоми досліджували з використанням зразків діаметром 10 мм та довжиною 60 мм. Дослідженнями зміни структури металу встановлено, що процес руйнування зразків можна розділити на декілька стадій, яким притаманні свої механізми розвитку процесів руйнування.

В роботі використовували жорсткі умови проведення досліджень під час термоцикування з метою отримання першої тріщини за короткий проміжок часу.

Чавун марки 220ЖЧН35 характеризується однорідною і гомогенною аустенітною структурою. Перша тріщина з'явилася на 34 циклі (рис. 5, а), а лінійні розміри збільшилися на 1,5 %. Така поведінка матеріалу зумовлена пластичними властивостями аустеніту.

У чавуні для матеріалів склоформ марки 310ЖЧС5 (рис. 5, б) перша тріщина з'явилася на 15-му циклі, а лінійні розміри збільшились на 10 %. Рекомендований чавун 350ЖЧС3ЮХМН (рис. 5, в) за рахунок вдосконаленої структури витримав 41 цикл до появи першої тріщини. Загальне збільшення розмірів відбулося на 6 %.

Отже, основним механізмом термічної втоми литого матеріалу є міжзеренне ковзання, а також зародження, дифузія та коагуляція точкових дефектів. Загальна термостійкість, значною мірою залежить від сил міжатомних зв'язків в кристалевій ґратці. Внаслідок збільшення кількості циклів виникають великі пори на межі

Встановлено, що діаметр зразка із чавуну марки 350ЖЧС3ЮХМН після 60 циклів випробовування збільшився на 0,55 мм, а довжина – на 3,6 мм (рис. 6, в), що у відсотках становить 6,25 та 5,95 відповідно. Зовнішній вигляд зразка на різних етапах випробовування наведено на рис. 5, в.

Чавун марки 310ЖЧС5 додатково мікролегували Мо, Cr та V. Встановлено, що молібден і хром є карбідоутворювальними елементами і сприяють подрібненню первинного зерна. Встановлено, що частина вуглецю витрачається на утворення твердого розчину, легованого молібденом і хромом, що спричиняє подрібненню графітових включень.

В чавунах марок 220ЖЧН35, 350ЖЧС3ЮХМН мікролегування титаном та алюмінієм не сприяє подрібненню графітових включень через збільшення феритної складової в структурі. Титан відноситься також до карбідоутворювальних елементів, але

дотикання декількох зерен, тобто в місцях виходу дислокацій на міжфазну поверхню поділу. Після збільшення розмірів пор понад 10...15 мкм стає можливим відривання зерен одного від другого з утворенням клиноподібних пор, які збільшуючись у розмірах, стають додатковими концентраторами напружень. Це явище вказує на те, що в матеріалі закінчився запас пластичності в окремих макроскопічних об'ємах. На цьому етапі крупні пори утворюють суцільну тріщину. Повне руйнування зразка відбувається внаслідок злиття дрібних тріщин в одну велику тріщину, яка поширюється через весь зразок, або внаслідок втрати зразком механічної міцності. У деяких зразках спостерігається декілька зон руйнування, залежно від утворених меж концентрацій деформацій.

Висновки та перспективи дослідження.

Термостійкість сплаву є функцією всього комплексу властивостей: механічних, фізичних, фізико-хімічних і технологічних. Для досягнення високої термостійкості чавунів необхідно брати до уваги усі фактори, в тому числі дотримуватися правил проектування та розроблення технології виготовлення жаростійкого виливка.

За результатами досліджень найкращий комплекс властивостей виявлено у чавуну марки 220ЖЧН35. Зважаючи на високу вартість нікелю даний чавун можна замінити чавуном марки 350ЖЧС3ЮХМН, що дозволить підвищити якість литої металопродукції за економного використання енергоресурсів і матеріалів на виробництво.

Список літератури

- 1 Леушин И. О., Леушин И. О., Чистяков Д. Г. Теплофизические параметры эксплуатации деталей чугуновых стеклоформ. *Литейное производство*. 2013. № 1 (13). С. 50–52.
- 2 Леушин И. О., Леушин И. О., Чистяков Д. Г. Влияние структурообразования и фазового состава чугуновых отливок стеклоформ на эксплуатационные свойства готовых изделий // Изв. вузов. *Черная металлургия*. 2013. № 5. С. 19–23.
- 3 Попов В. М., Коган Б. Л. Термостойкость чугунов с различной формой графита. *Литейное производство*. 1991. № 2. С. 34.
- 4 Леушин И. О., Д. Г. Чистяков Д. Г., Марфенин С. Н. Повышение эксплуатационной стойкости деталей чугуновых стеклоформ путем совершенствования технологии их изготовления и контроля. Труды Нижегородского государственного университета им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 1 (103). С. 212–224.
- 5 Александров М. В. Разработка химических составов и технологии получения низколегированных термостойких чугунов для деталей стеклоформ : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.04. *Литейное производство*. Нижний Новгород, 2013. 18 с.
- 6 Леушин И. О., Чистяков Д. Г., Володин В. А. Влияние структуры чугуна на образование эксплуатационных дефектов стеклоформирующей оснастки. Наука и Образование МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. №11. С. 111–123.
- 7 Loper C. R. Jr., Fang K. Structure of Spheroidal Graphite in Cast Iron. American Foundry Society [Schaumburg]. 2008. №. 08-066 (05). P. 1–10.
- 8 Тодоров П. П. Структура и свойства ковкого чугуна . М.: Машиностроение, 1974. 159 с.
- 9 Александров М. В., Чистяков Д. Г. Повышение эффективности модифицирования чугуна для отливок стеклоформ интенсификацией процесса графитообразования *Литейщик России*. 2013. № 5. С. 19–21.
- 10 Александров М. В. Влияние химсостава и микроструктуры чугуновых отливок на термостойкость деталей стеклоформ. *Литейное производство*. 2012. № 8. С.15–19.

- 11 Тополянский П. А. Увеличение срока службы формокомплектов в условиях стеклотарных заводов. Стекланная тара. 2009. № 3. С. 14–18.
- 12 Naydek V. L., V. L. Naydek, V. P. Garvilyuk, I. G. Neizhko On the Theories of Graphite Formation in Iron // Key Engineering Materials. 2011. Vol. 457. P. 48–51.
- 13 Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. Москва: Metallurgy, 1976. 288 с.

Надійшла 30.01.2023

Referencrs

- 1 Leushin I.O. (2013). Thermophysical parameters of operation of parts of cast-iron glass-forms. Foundry, 1(13), 50–52 [in Russssian].
- 2 Leushin I.O. (2013). Influence of structure formation and phase composition of cast iron castings of glass forms on the operational properties of finished products. Ferrous metallurgy, 5, 19–23 [in Russssian].
- 3 Popov V.M. (1991). Thermal stability of cast irons with different forms of graphite. Foundry, 2, 34 [in Russssian].
- 4 Leushin I.O., Alekseeva R. E. (2014). Improving the operational stability of parts of cast-iron glass molds by improving the technology of their manufacture and control. Proceedings of the Nizhny Novgorod State University. 1(103), 212–224 [in Russssian].
- 5 Aleksandrov M.V. (2013). Development of chemical compositions and technologies for obtaining low-alloyed heat-resistant cast iron for glass-form parts: author. dis. on the science. steps of cand. tech. Sciences: spec. 05.16.04 "Foundry" [in Russssian].
- 6 Leushin I. O., Bauman N. E. (2015). Influence of the structure of cast iron on the formation of operational defects in glass-forming equipment. Science and Education MSTU im. 11, 111–123 [in Russssian].
- 7 Loper C. R. Jr. (2008). Structure of Spheroidal Graphite in Cast Iron. American Foundry Society, 08-066 (05), P. 1–10.
- 8 Todorov P. P. (1974). Structure and properties of malleable cast iron. Moscow: Mechanical Engineering, 159 [in Russssian].
- 9 Aleksandrov M. V. (2013). Improving the efficiency of modifying cast iron for castings of glass forms by intensifying the process of graphite formation. Foundry of Russia, 5, pp.19–21 [in Russssian].
- 10 Aleksandrov M. V. (2012). Influence of the chemical composition and microstructure of cast iron castings on the heat resistance of glass mold parts. Foundry, 8, pp. 15–19 [in Russssian].
- 11 Topoljanskij P.A. (2009). Increased service life of mold sets in the conditions of glass container factories. Glass container, 3, 14–18 [in Russssian].
- 12 Naydek V. L. (2011). On the Theories of Graphite Formation in Iron. Key Engineering Materials, Vol. 457, 48–51.
- 13 Bobro Ju.G. (1976). Alloyed cast iron. Moscow: Metallurgy 288 с. [in Russssian].

Received 30.01.2023

A. Ustymenko, graduate student, e-mail: onalina44@gmail.com;

ORCID 0000-0002-5893-6499

I. Lukianenko, PhD (Engin.), Associate Professor; email: lukianenkoiv@gmail.com;

ORCID 0000-0002-1043-9688, Researcher ID: J-7294-2017

M. Yamshinskij, Dr. Sci. (Engin.), Docent, Department Chair; email: yamshinskiy@ukr.net;

ORCID 0000-0002-2293-2939, Scopus Author ID: 6508061815, Researcher ID: I-4267-2017,

I. Guria, PhD (Engin.), Technical Sciences, Associate Professor; email: guriya@ukr.net;

ORCID 0000-0003-0394-9708, Scopus Author ID: 57387996200, Researcher ID:

AAA-9338-2022

B. Kyvhylo, Graduate Student; email: kyvhylo.bohdan@gmail.com;

ORCID 0000-0001-5890-9020

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

NEW HEAT-RESISTANT ALLOYS FOR THE MANUFACTURE OF GLASS MOLDS

Glass production refers to the branch of industry that produces construction and technical, container, chemical and laboratory and other types of glass. A significant specific weight in the turnover of goods is occupied by glass containers. The glass container market will remain promising and further growth in its consumption will be observed. To date, unfortunately, there is no universal scheme capable of significantly increasing the working life of glass mold parts. This situation creates new approaches and methods for solving the problems of improving the structure of the material of cast glass molds, reducing the cost of their production and increasing the service life of products. The most common chemical compositions of foreign and domestic heat-resistant cast irons for glass molds are analyzed today. Based on this, the greatest interest is cast iron alloyed with silicon with the subsequent formation of the necessary structure in the cast state using Fe–C–Si dosage of modified cast iron with microdosing of alloying elements. Cast irons were additionally microalloyed with Mo, Cr, Ti, Al and V. It was established that molybdenum and chromium contribute to the grinding of the primary grain. It was established that part of the carbon is spent on the formation of a solid solution doped with molybdenum and chromium, which causes the grinding of graphite inclusions. Microalloying with titanium and aluminum does not contribute to the grinding of graphite inclusions due to an increase in the ferrite component in the structure. As a result of the carbide-forming action of microalloying elements, a decrease in the number of graphite inclusions was established. According to the research results, it was established that the heat resistance of the alloy is a function of the entire complex of properties: mechanical, physical, physico-chemical and technological. In order to achieve high performance properties of mold sets, it is necessary to take into account all factors, including following the rules of design and development of heat-resistant casting manufacturing technology.

Keywords: heat-resistant cast iron, chemical composition, heat resistance, graphite form, structure, thermal cycling.