

<https://doi.org/10.15407/plit2023.04.069>

УДК 669.13: 621.74.045

В.С. Дорошенко, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;

e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID. 0000-0002-0070-5663

Ю.Ю. Ладарева, наук. співроб.; e-mail: Julia-lada@ukr.net;

ORCID 0009-0000-8079-1081

С.І. Клименко, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.;

e-mail: ukrdeplit15@ukr.net; ORCID 0000-0002-2431-451X

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ТОНКОСТІННІ ВИЛИВКИ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

У статті здійснено огляд досліджень щодо виготовлення тонкостінного ВЧ та обґрунтовано перспективність його виробництва за ЛГМ-процесом. Оскільки попит на легковагі метало-вироби триває і навіть зростає, ВЧ та ізотермічно загартований чавун ADI все частіше беруть до уваги. Старі рекомендації щодо мінімальної товщини литої стінки ВЧ застосовувати вже недоцільно, оскільки стали доступними різні технологічні варіанти отримання малих товщин ВЧ залежно від вимог до конструкції та з урахуванням нових результатів досліджень стосовно виплавки та обробки металу, формувальних технологій і можливостей їх впливу на отримання тонкостінних виробів. Розглянуто механізм взаємодії вакуумованої піщаної форми на метал, що заливається, та описано вплив вакууму на рідкотекучість розплаву й запобігання дефектів від утворення карбідів у структурі ВЧ. Оскільки ЛГМ може забезпечити вищу точність виливків, дає змогу запобігти відбіленню чавуну шляхом специфічного впливу вакууму форми, невисокої теплопровідності піску та основної атмосфери в контакт з розплавом металу, то ЛГМ-процес за сукупністю цих факторів має переваги для виробництва тонкостінного ВЧ (ТСВЧ) над іншими ливарними процесами. Показано приклад того, що тонкостінні виливки, виготовлені з ВЧ та ADI, можуть бути легшими і мати кращі механічні властивості, ніж такі самі, виготовлені з алюмінієвого сплаву. Такі чавуни виявляють значний потенціал для заміни деталей з алюмінієвих сплавів у різних сферах застосування, особливо з високими механічними вимогами, а така заміна може принести відчутну економію. Поширення технології ТСВЧ базується також на ґрунтовному вивченні впливу різноманітних технологічних параметрів на якість виливків ВЧ із заданими експлуатаційними характеристиками. Для визначення масиву такої інформації в його кількісному, за різновидами складових процесів, і якісному, за ступенем і характером впливу, складі використано діаграму Ішікави.

Ключові слова: лиття за моделями, що газифікуються; високоміцний чавун, тонкостінні виливки; ізотермічно загартований чавун; діаграма Ішікави.

Обсяг виробництва металів та їх сплавів, враховуючи сучасний попит на матеріали, що містять чавун, сталь, кольорові метали та їх сплави, найближчим часом буде рости [1]. Сьогодні вимоги до якості металевих матеріалів для досягнення

максимальної ефективності виробництва зростають, як і очікування щодо зниження витрат. З погляду окремих металургійних технологій, ливарні цехи є найшвидшим способом виготовлення необхідних деталей. Виливаються все складніші геометричні форми, які неможливо виготовити за допомогою інших технологій для отримання економічно вигідного рішення. Розвиток машинобудування, продукція якого складає близько 38 % вартості виробів світової промисловості, також пов'язаний із виготовленням литих заготовок, підвищенням рівня їхніх характеристик разом зі зниженням металоємності [2].

Метою статті є висвітлити тенденції розвитку процесу отримання тонкостінних металовиробів литтям за моделями (з пінополістиролу, ППС), що газифікуються (ЛГМ), який за точністю виливків близький до лиття за моделями, що витоплюються, а за економічністю порівняний із литтям у сирі піщані форми. У відділі проф. О.Й. Шинського тонкостінне лиття постійно перебуває в полі зору [2] як один із методів заощадження металу та зниження собівартості металовиробів; утім, найкращі перспективи його реалізації має суміщення ЛГМ-процесу та високоміцного чавуну (ВЧ).

Сучасна тенденція до зниження металоємності виробів може бути задовільнена за рахунок використання просторових виливків тонкостінної конструкції, і ЛГМ має значні переваги над традиційними ливарними процесами, але досі характеризується низькими показниками поширення та комерціалізації [3]. ЛГМ-процес найбільш ефективний для виробництва формотворної оснастки, знарядь для виготовлення прототипів, запчастин, разового чи дрібносерійного ливарного виробництва. Він забезпечує економію 25–30 % енергії і 46 % трудовитрат, знижує використання матеріалів на 7 % і собівартості продукції — на 20–25 % [3]. Порівняно з традиційними процесами утворюється менше твердих відходів, викидів твердих частинок у повітря та парникових газів. При ЛГМ типовий вихід придатного литва складає понад 70 %, а вихід понад 80 % також можливий [3].

Дослідження, замовлене Міністерством економіки США щодо виготовлення тонкостінного високоміцного чавуну (ТСВЧ) (thin-walled ductile iron, TWDI) методом ЛГМ, показало, що навіть на розмір 1 мм литої стінки з ВЧ допуск становив $\pm 0,039$ мм [3, 4]. Це доводить, що ЛГМ дозволяє отримувати литі вироби з нульовою чи мінімальною механічною обробкою та може призвести до значної економії коштів за умови перепроєктування багатьох литих металоконструкцій, що компенсує дещо вищу вартість ЛГМ-процесу порівняно із серійним литтям у форми по сирому чи з холоднотвердноті піщано-смоляної суміші — ХТС (nobake) [3]. Для тонкостінних металоконструкцій рекомендовано застосування ВЧ, оскільки він має сприятливу для цього текучість, питому міцність (на одиницю вартості); також це ще більше набуває значення для його термічно обробленого варіанту (ADI).

Висновки досліджень [4], що тривали кілька років, такі. Оскільки стандарти паливної ефективності (CAFE) зростають у всьому світі, попит на полегшення транспортних засобів не втрачає актуальності. Крім того, вага електромобілів безпосередньо впливає на запас ходу і розмір їхніх акумуляторних батарей. У зменшенні ваги також зацікавлені інші транспортні галузі. У сільському господарстві є стурбованість щодо ущільнення ґрунту. В оборонній та аерокосмічній сферах триває конкуренція як щодо маневреності, так і корисного навантаження.

Оскільки попит на легковагі металовироби триває і навіть зростає, ВЧ та ізотермічно загартований ADI все частіше беруть до уваги. Старі вказівки про уникнення використання ВЧ із товщиною стінки нижче 0,25 дюйма (6,35 мм) більше застосовувати недоцільно [4]; доступні різні технологічні варіанти отримання ВЧ малих товщин залежно від вимог до конструкції, що, зокрема, розглянуто нижче. Як було показано [4], усунути отримання дефектів від утворення карбідів можна як при ливарній технології nobake, так і при ЛГМ. Однак, оскільки ЛГМ може забезпечити вищу точність (tolerances) виливків, цей процес має переваги для виробництва ТСВЧ. Приклад вилитих при ЛГМ зразків товщиною 1–6 мм та довжиною до 150 мм показано на рис. 1 [4].

ЛГМ також дає додаткові можливості зменшення маси литва через здатність консолідувати деталі, чим дозволяє уникати механічної обробки та зварювання. ВЧ та ADI нині використовуються для деталей широкої номенклатури, у тому числі для колінчастих і розподільних валів, тяг, компонентів гальм, насосів, кронштейнів, підйомних важелів, важелів підвіски та інших деталей підвіски тощо. Можливість об'єднання TWDI з ЛГМ означає поширення нових типів консолідованих деталей у майбутньому [4].

За нашими дослідженнями, при виливанні з ВЧ за ЛГМ-процесом у вакуумовані форми тонкостінних деталей спостерігаються такі специфічні явища. Зокрема, зі стінкою товщиною 2–4 мм у кілька разів збільшується площа поверхні тон-



Рис. 1. Виливок із пробами за ЛГМ-процесом перед видаленням покриття

костінних виливків на одиницю кількості металу проти деталей зі стінкою 8–10 мм і вище. При цьому різко зростає вплив поверхневих явищ на процес заповнення форми, зменшується відношення маси моделі (і матеріалу її газифікації) до площі стінок форми, які цю модель оточують. Розплав металу, що заливається у вакуумовану форму, торкаючись стінок форми, миттєво до них присмоктується вакуумом, утворюючи металеву плівку, що герметизує форму. Тому метал наче протікає в металевій гарячій «панчосі» (що наклеюється на стінки порожнини форм із першим його дотиком), а не ковзає по стінці форми. Таким чином, попереду в потоці завжди метал гарячіший, ніж при стінках, він рухається в газовому основному (практично безкисневому) середовищі, що складається здебільшого з летючих продуктів термодеструкції пінополістиролу: вуглеводневих газів і парів, водню та найдрібніших часток вуглецю (коковий чи сажовий залишок).

Основна атмосфера сприяє графітізації металу (перешкоджає карбідизації), а частки вуглецю — його навуглецюванню; вони можуть служити центрами утворення графітних включень у чавуні, якщо потраплять у метал. Крізь відносно (до маси моделі) велику площу вакуумованих стінок форми посилюється можливість вакуумного всмоктування металу. Вищезгадані фактори сприяють підвищенню здатності ВЧ до заповнення тонких деталей порожнини вакуумованої форми. Причому за хімічним складом ВЧ відносять до евтектичного чи слабко заевтектичного чавуну, що робить його рідкотекучістю найвищою серед інших конструкційних (графітізованих) чавунів при однаковій температурі їх заливання у форму. Приклади вимірів текучості при товщині 1 мм виявили, що вона досягає 227 мм залежно від температури розплаву [4].

Металографічні дослідження мікроструктури виливків із різною товщиною стінок свідчать, що плівка ВЧ, яка при заливанні металу налипає на стінки форми при ЛГМ, на товщину в соті долі міліметра зневуглецюється і втрачає частину магнію під впливом вакууму, але під тиском на стінку форми від присмоктування вакуумом (практично з утратою зазору «метал-форма») отримує прискорене охолодження й металеву структуру з досить здрібненим зерном (кристалітами).

Інокулююче модифікування вихідного чавуну проливанням його крізь спеціальну ливникову чашу з приямком, у який закладено модифікатор, із отриманням на

виході ВЧ, як описано в роботі [4], — такий проточний метод модифікування сприяє утворенню в металі значної кількості зародків майбутніх графітових включень. Це також виявлено при дещо схожому модифікуванні за інмолд-процесом, що належить до процесів модифікування в передкристалізаційний період; зокрема, у відділі В.Б. Бубликова експериментально отримано за інмолд-процесом ВЧ із дрібними включеннями кулястого графіту (точкоподібного при спостереганні на шліфі за допомогою мікроскопа зі стократним збільшенням) у кількості понад 1000 включень на 1 мм^2 . Близьке розташування дрібнодисперсного евтектичного графіту (переохолодження) і велика сумарна площа поверхні цих дрібних графітових включень при перлітному перетворенні сприяють повному розпаду аустеніту й виділенню фериту (іноді до повної відсутності перліту) за рахунок скорочення шляхів дифузії при розпаді карбідів, що є аналогом графітізуючого самовідпалу [5]. Цьому також сприяє те, що, хоч дія вакууму форми на метал при ЛГМ пришвидшує його затвердіння, але в цілому сухий пісок має меншу теплопровідність, що після затвердіння металу і припинення вакуумування сповільнює охолодження виливка порівняно з традиційними піщаними формами.

Публікації про виготовлення литого тонкостінного ВЧ (ТСВЧ, TWDI), а також ізотермічно загартованого ВЧ (TWADI) останніми роками почастішали. Зокрема, в роботі [6] описано, що можна виготовити якісні тонкостінні виливки (керівні важелі, консолі та ротори) з ВЧ із питомою міцністю (відношення міцності до густини) до $87 \text{ МПа}\cdot\text{см}^3/\text{г}$. Крім того, після ізотермічного гартування з отриманням аусферитної матриці в тонкостінних виливках питома міцність зростає до $154 \text{ МПа}\cdot\text{см}^3/\text{г}$. Також показано, що тонкостінні виливки, виготовлені з TWDI та TWADI, можуть бути легшими та мати кращі механічні властивості, ніж такі самі, виготовлені з алюмінієвого сплаву. Вони мають значний потенціал для заміни деталей з алюмінієвих сплавів у різних сферах застосування, особливо з високими механічними вимогами, і така заміна може принести відчутну економію [6]. Зокрема, на рис. 2, а показано приклади випробувань виливків зі сплаву Al та аналоги TWADI і TWADI у вигляді кривої залежності напруження від деформації матеріалу. Зразки було взято з ребра деталі «консоль» (рис. 2, б) [6].

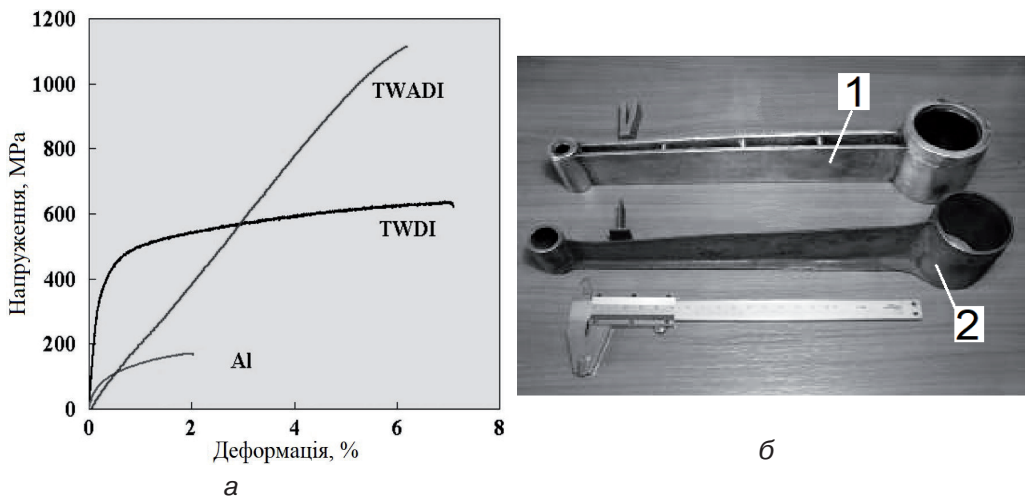


Рис. 2. Крива напруження-деформації (а) зразків, узятих із ребра консолі (б): 1 — деталь з алюмінію масою 580 г; 2 — деталь із TWDI масою 380 г [6]

Поширення технології ТСВЧ, крім формувальних технологій, із яких ЛГМ є найбільш перспективною, базується також на ґрунтовному вивченні впливу різноманітних технологічних параметрів на якість виливків ВЧ із заданими експлуатаційними характеристиками. Для визначення масиву такої інформації в його кількісному (згідно

з джерелами виходу чи точок знімання) і якісному (за чинниками впливу) складі ми використали діаграму Ішікави. За основу взято діаграму з ґрунтовної публікації відділу проф. О.Й. Шинського [7] та внесено до неї низку доповнень (рис. 3).



Рис. 3. Діаграма Ішікави для процесу виробництва виливків із ВЧ

Структура діаграми Ішікави дозволяє встановити основні фактори впливу на ливарний об'єкт, технологічний процес чи кінцевий продукт — литу металеву конструкцію, а також встановити взаємозв'язок між основними чинниками та детермінований вплив другого рівня на основні параметри, а третього рівня — на параметри другого рівня. Структурування рівнів факторів і параметрів, що характеризують властивості литого ВЧ, для аналізу логічного зв'язку між різними факторами й результатом їхнього впливу та виділення найбільш значущих факторів, що впливають на проблематику виготовлення якісного ВЧ, виконано для створення багаторівневої системи комплексного контролю та оперативного управління фізико-хімічними й технологічними ливарними процесами.

Основними гілками, які визначають структуру, механічні та експлуатаційні характеристики литих конструкцій із ВЧ, є такі технологічні процеси: плавка, модифікування й охолодження виливків у формі. Для кожного технологічного процесу встановлено визначальні чинники другого порядку, варіювання якими у встановлених граничних межах зумовлюють задані чинники першого порядку (рис. 3).

Згідно з роботою [7], чинниками другого порядку для реалізації основної гілки діаграми «Хімічний склад чавуну» є основні хімічні елементи C, Si, Mn, P, S, Cr, які

входять до складу вихідного чавуну та зумовлюють його якість. Чинниками третього порядку «Хімічний склад чавуну» є такі: шихтові матеріали, що ідентифікуються за п'ятьма хімічними елементами (C, Si, Mn, P, S, Cr) і вводяться в метал за розрахунком шихти, який регламентує вміст основних компонентів; феросплави та легуючі компоненти, чинник регламентує вміст легуючих компонентів (Si, Mn, Cr, Mg, Ni, Cu, Mo, Al, Sn, Ca та ін.), що дозволяє управляти структуроутворенням і формуванням кулястої форми графіту, а також металевою матрицею чавуну (феритна, перлітна, бейнітна, ферито-перлітна, перліто-феритна); а дозування компонентів є операцією, яка регламентує масу кожного з компонентів шихти і легуючих елементів.

Діаграму [7] ми доповнили операціями відбору проб та контролю за ними хімічного складу вихідного чавуну, оскільки якість їх відбору, підготовки й аналізу результатів контролю дають підстави для рішення про придатність вихідного чавуну до подальшого модифікування і впливають на кінцеві властивості литого ВЧ і рівень браку металопродукції. Зокрема, новий спосіб відбору проб із печі чи ковша за допомогою вакуумування за патентом України 131912.

Чинниками третього порядку для реалізації основної гілки діаграми «Модифікування графітизуюче» ідентифіковано так: модифікатори для графітизації ідентифікуються за типом модифікатора (на основі FeSi, FeSiBa тощо); витрата — питомою масою модифікатора в ковші (проміжному реакторі); фракційний склад — середнім розміром гранул 0,5–10,0 мм; термочасові параметри — типом модифікування (ковшове, всередині форми).

До чинників третього порядку в основній гілці діаграми «Модифікування сфероїдизуюче» [7] ми додали чинник — спосіб вводу модифікатора у ківш, оскільки, крім поширеного сендвіч-процесу, відоме введення модифікатора у ківш в автоклаві, важких лігатур практично без виділення газів [8], а також відомі нові способи такого введення для невеликих ковшів ємністю до 300–400 кг чавуну (пат. України 139557 та 131906), у тому числі із застосуванням вакуумування розміщеного в ковші модифікатора. Серед розробок сфероїдизуючого модифікування у ливарній формі (в передкристалізаційний період) у відділі В.Б. Бубликова розроблено конструкції камер-реакторів інмолд-процесу, що зменшують витрати модифікатора. Специфіку варіантів таких камер для ЛГМ-процесу описано в роботах відділу проф. О.Й. Шинського.

На рис. 3 також показано операції контролю температури як вихідного чавуну, так і готового ВЧ. Крім того, перед заливанням отриманого ВЧ у ливарні форми варто контролювати його хімічний склад, а також слід вилити проби згідно з ДСТУ 3925-99 для визначення механічних властивостей, що є стандартним способом ідентифікації ВЧ у виливках.

Водночас для з'ясування, чи придатний ВЧ для заливання форм, нерідко виконують експрес-контроль на нестандартних пробах типу клинової проби, що позначено на діаграмі. Оскільки клинова проба доволі приблизно характеризує якість чавуну (за візуально визначеним ступенем відбілу на зломі проби), відоме застосування на деяких заводах прутків (стрижнів) із розмірами в перерізі $\sim 10 \times 10$ чи $\varnothing 10$, що вилиті з ВЧ у піщану форму і випробовуються деформуванням при згинанні. ВЧ властиве значно більше відносно видовження, ніж у сірого чавуну, яким, по суті, є вихідний чавун, тому ступінь деформації проби при згинанні без руйнування відповідатиме такому видовженню ВЧ, марка якого має бути в ковші перед його розливанням у форми. Якщо проба при випробуванні тріснула, не зігнувшись на певний кут чи відстань, то вигідніше вилити метал із ковша в піч, підігріти й провести повторне модифікування металу, ніж розливати сумнівної якості метал у форми з ризиком отримати брак литва. До таких експрес-методів контролю ВЧ у ковші перед заливанням ливарних форм чи ВЧ, що модифікований у ливарній формі, належить метод термоаналізу (ТА), позначений на діаграмі.

Також створено нескладний спосіб експрес-випробовування на згинання V-подібної проби (із певним кутом для відповідної марки металу), яку можна згинати в лещатах чи навіть не відділяючи її від виливка після інмолд-процесу (пат. України

131910). Способи контролю з відповідними приладами в цеху важливі тому, що без їх освоєння, документування та систематизації результатів гальмується поширення лиття ВЧ у вітчизняних цехах, а Україна посідає чи не останнє місце в Європі за часткою (%) випуску ВЧ у своїй литій металопродукції. Плавильник, який відповідає за брак виливків «з вини металу», не буде заливати метал у форми, не маючи результатів контролю про задовільну якість цього металу.

У розділ плавки чавуну ми ввели чинник «частка сталевого брухту в шихті», оскільки нерідко його частка вносить урозплав спадкоємні властивості й хімічні елементи, що не входять до сфери контролю приладів певного цеху, а науглецювання металу в печі можна вважати окремим технологічним процесом.

Серед чинників ізотермічного гартування ВЧ, головним чином при ЛГМ, на підставі патентів України 123731, 131581, 133701, 131968, на діаграмі вказано способи гартування гарячого виливка, що в аустенітному стані видалений із ливарної вакуумованої форми з сухого піску, у т. ч. загартовується в псевдозрідженому піску, контролюється приладом за рівнем феромагнітних властивостей металу (з урахуванням того, що аустеніт немагнітний) та отримує різного рівня твердість для самозаточування виготовленої деталі при зношуванні в процесі експлуатації (на прикладі леміша плуга). Останні роботи щодо регулювання твердості виливків опублікували науковці відділу проф. О.Й. Шинського в 2022 році.

Таким чином, у статті здійснено огляд досліджень щодо виготовлення тонкостінного ВЧ і обґрунтовано перспективність його виробництва за ЛГМ-процесом. Оскільки попит на легковагі металовироби триває і навіть зростає, ВЧ та ізотермічно загартований ADI все частіше беруться до уваги. Старі рекомендації щодо мінімальної товщини литої стінки ВЧ застосовувати вже недоцільно, оскільки стали доступними різні технологічні варіанти отримання малих товщин ВЧ залежно від вимог до конструкції та з огляду на нові результати досліджень щодо виплавки та обробки металу, формувальних технологій та можливостей їх впливу на отримання тонкостінних виробів. Розглянуто механізм взаємодії вакуумованої піщаної форми на метал, що заливається, та описано вплив вакууму на рідкотекучість розплаву і запобігання дефектів від утворення карбідів у структурі ВЧ. Оскільки ЛГМ може забезпечити вищу точність виливків, здатне запобігати відбіленню чавуну через специфічний вплив вакууму форми, невисокої теплопровідності піску та основної атмосфери в контакт з розплавом металу, то ЛГМ-процес за сукупністю цих факторів має переваги для виробництва ТСВЧ над іншими ливарними процесами. Показано приклад того, що тонкостінні виливки, виготовлені з TWDI та TWADI, можуть бути легшими та мати кращі механічні властивості, ніж такі самі, виготовлені з алюмінієвого сплаву. Такі чавуни мають значний потенціал для заміни деталей з алюмінієвих сплавів у різних сферах застосування, особливо тих, які мають високі механічні вимоги, а така заміна може принести істотну економію. Поширення технології ТСВЧ базується також на ґрунтовному вивченні впливу різноманітних технологічних параметрів на якість виливків ВЧ із заданими експлуатаційними характеристиками. Для визначення масиву такої інформації в його кількісному за різновидами складових процесів і якісному складі за ступенем і характером впливу використано діаграму Ішікави.

Список літератури

- 1 Saternus M., Socha L. Modern Trends in Foundry. Metals. 2023. No. 13(7): 1236. <https://doi.org/10.3390/met13071236>.
- 2 Дорошенко В.С., Калужный П.Б. Тонкостінний виливок з високоміцного сплаву як одне з головних завдань ливарного виробництва. *Процеси лиття*. 2020. № 3. С. 47–55. doi.org/10.15407/plit2020.03.047
- 3 S. Jordan and M. Debruin. How a foundry can diversify into lost foam casting at negligible cost. *Modern Casting*. 2022. August. P. 29–33.

- 4 S. Jordan, M. Debruin, E. Cilkilic, A. Luo. Thin-Walled Ductile Iron. *Casting source*. 2021. Sept/Oct. P. 34–39.
- 5 Александров Н.Н., Черепов А.А., Андреев В.В., Ковалевич Е.В. Производство крупногабаритных отливок из чугуна. Москва: НИИ Эинформнергомаш, 1987. 44 с.
- 6 Fraś, E., Górny, M., Lopez, H. Thin wall ductile iron castings as substitutes for aluminium alloy castings. *Archives of Metallurgy & Materials*. Jun 2014 Vol. 59. Issue 2. P. 459–465.
- 7 Shinsky, O., Shalevska, I., Kaliuzhnyi, P., Shinsky, V., Lysenko, T., Shevchuk, T., Sliusarev, V., Pohreback, I., Kolomiitsev, S. (2018). Principles of construction and identification of a multilevel system for monitoring parameters of technological cycle of casting. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (95)), 43–56. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141303>.
- 8 Дорошенко В.С. Экологичный процесс получения высокопрочного чугуна с применением медно-магниевого лигатур в литейном цехе. *Экология предприятия*. 2015. № 8. С. 16–20.

Надійшла 21.07.2023

References:

- 1 Saternus M., Socha L. Modern Trends in Foundry. *Metals*. 2023. No. 13(7): 1236. <https://doi.org/10.3390/met13071236>.
- 2 Doroshenko V.S., Kaliuzhnyi P.B. Thin-wall casting from high-strength alloy as one of the main tasks of foundry production. *Casting Processes*. 2020. № 3. P. 47–55. doi.org/10.15407/plit2020.03.047 [in Ukrainian].
- 3 S. Jordan and M. Debruin. How a foundry can diversify into lost foam casting at negligible cost. *Modern Casting*. 2022. August. P. 29–33.
- 4 S. Jordan, M. Debruin, E. Cilkilic, A. Luo. Thin-Walled Ductile Iron. *Casting source*. 2021. Sept/Oct. P. 34–39.
- 5 Aleksandrov N.N., Cherepov A.A., Andreev V.V., Kovalevich E.V. Production of large-sized cast iron castings. Moskva: NII Einformnergomash, 1987. 44 p. [in Russian].
- 6 Fraś, E., Górny, M., Lopez, H. Thin wall ductile iron castings as substitutes for aluminium alloy castings. *Archives of Metallurgy & Materials*. Jun 2014 Vol. 59. Issue 2. P. 459–465.
- 7 Shinsky, O., Shalevska, I., Kaliuzhnyi, P., Shinsky, V., Lysenko, T., Shevchuk, T., Sliusarev, V., Pohreback, I., Kolomiitsev, S. (2018). Principles of construction and identification of a multi-level system for monitoring parameters of technological cycle of casting. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (95)), 43–56. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141303>.
- 8 Doroshenko V.S. Ecological process of producing high-strength cast iron using copper-magnesium ligatures in a foundry. *Ecology of the enterprise*. 2015. № 8. P. 16–20. [in Russian].

Received 21.07.2023

V.S. Doroshenko, Dr. Sci. (Engin.), Leading Research Scientist;

e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

Yu.Yu. Ladareva, Research Scientist; e-mail: Julia-lada@ukr.ne;

ORCID 0009-0000-8079-1081

S.I. Klymenko, PhD (Engin.), Senior Scientist; e-mail: ukrdeplit15@ukr.net;

ORCID 0000-0002-2431-451X

Physico-Techological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

THIN-WALL CASTINGS FROM DUCTILE IRON ACCORDING TO GASIFIED PATTERN

The article provides an overview of research on the production of thin-walled ductile iron (TWDI) and argues for the prospects of its production by the Lost Foam Casting (LFC) process. As the demand for lightweight metal products continues and even increases, DI and isothermally hardened ADI are increasingly being considered. The old recommendations regarding the minimum thickness of the DI cast wall are no longer appropriate, since various technological options for obtaining small DI thicknesses have become available depending on the design requirements and in view of new research results on metal smelting and processing, forming technologies and their potential influence on the production of thin-walled products. The mechanism of interaction of the vacuumed sand mold on the metal being poured is considered, and the effect of vacuum on the fluidity of the melt and the prevention of defects from the formation of carbides in the DI structure is described. Since LFC process can provide higher accuracy (tolerances) of castings, has the ability to prevent cast iron bleaching due to the specific influence of mold vacuum, low thermal conductivity of sand and the main atmosphere in contact with molten metal, the LFC process, based on the combination of these factors, has advantages for the production of microwave ovens over other foundry processes. An example is shown that thin-walled castings made from TWDI and TWADI can be lighter and have better mechanical properties than those made from aluminum alloy. Such cast irons have significant potential to replace aluminum alloy parts in various applications, especially those with high mechanical requirements, and such replacement can bring significant savings. The spread of microwave technology is also based on a thorough study of the influence of various technological parameters on the quality of DI castings with given operational characteristics. The Ishikawa diagram was used to determine the array of such information in its quantitative by types of constituent processes and qualitative composition by degree and nature of influence.

Keywords: Lost Foam Casting; ductile iron, thin-walled castings; austempered ductile iron; Ishikawa diagram.