УДК 669.13 (03)

В. С. Дорошенко, *д-р техн. наук., ст. наук. співр.,*
e-mail: doro55v@gmail.com
П. Б. Калюжний, *канд. техн. наук., ст. наук. співр.,*
e-mail: kpb.ptima@gmail.com

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

ТОНКОСТІННИЙ ВИЛИВОК З ВИСОКОМІЦНОГО СПЛАВУ ЯК ОДНЕ З ГОЛОВНИХ ЗАВДАНЬ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Сучасна тенденція до зниження металоємності виробів може бути задоволена за рахунок використання просторових виливків тонкостінної оболонкової та/чи комірчастої конструкції. Одержати такі виливки можна застосовуючи лиття за моделями, що газифікуються, за якого ливарна модель взаємодіє з двома плинними середовищами – металом, що заливається та заміщує модель зсередини, і рухомим піщаним середовищем, що оточує модель при формуванні ззовні. Окрім того, отримати тонку стінку в виливках полегшеної маси дозволяє застосування високоміцних сплавів, які можуть бути одержані з використанням методів управління структурою, включаючи ступінчасте охолодження. За рахунок останнього у виробах з чавуну та сталі можна отримати багатофазну структуру з метастабільним залишковим аустенітом, що при навантаженні на виливок зазнає деформаційне мартенситне перетворення, зміцнюючи таким чином сплав. Застосування сухого незв'язного піску при литті за моделями, що газифікуються, дозволяє проводити швидке вибивання з форми гарячого виливка, та використовувати цей пісок в якості середовища для ізотермічної витримки виливка при ступінчастому охолодженні методом ізотермічного гартування. На відміну від сталевих і чавунних виливків, де підвищення механічних властивостей досягається процесами подібними термічній обробці, в алюмінієвих деталях підвищення механічних характеристик можливо при швидкому охолодженні виливка методом абляційного лиття. Суть даного методу полягає у розмиванні водними струменями ливарної форми під час тверднення виливка, при цьому вода, контактуючи з поверхнею виливка, створює умови для інтенсивного охолодження сплаву та, як наслідок, утворення дрібнозернистої структури. В такий спосіб одержують тонкостінні виливки складної конфігурації, при цьому в якості матеріалу використовують як ливарні так і деформівні алюмінієві сплави. Розглянуті в статті технології сприяють розвитку виробництва легковагих тонкостінних виливків із високоміцних сплавів з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: *тонкостінні виливки, високоміцні сплави, ступінчате охолодження, механічні властивості, лиття за моделями, що газифікуються.*

Близько 38 % вартості виробів світової промисловості складає продукція машинобудування [1], розвиток якого пов'язаний з виготовленням литих заготовок, підвищенням рівня їх характеристик разом зі зниженням металоємності, удосконаленням існуючих та створенням нових сплавів чи способів їх обробки для розширення функціональних можливостей. Особливий інтерес становить розробка і виробництво просторових виливків тонкостінної оболонкової [2] чи (та) комірчастої конструкції, що дозволяють знизити металоємність заготовок та підвищити їх ресурсоефективність [3–5].

Для цього найбільш продуктивним є лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), технологічні різновиди якого у вигляді десятків способів, конструкцій оснастки і обладнання протягом кількох десятиліть успішно удосконалюються і патентуються відділом ФХЛП за науковим керівництвом проф. Шинського О. Й., включно з застосуванням новітніх 3D-технологій для виготовлення ливарних разових моделей, ливарної металевої оснастки та контролю якості литва [6–10]. Нижче в ході висвітлення матеріалу статті авторами наведено аргументацію щодо таких перспектив ЛГМ-процесу. Розкриттю потенціалу моделювання габаритних легковагих конструкцій сприяє виняткова легкість обробки застосовуваних для цього пінополістиролу та інших пінополімерів, в тому числі легкоплавких та легкорозчинних. Такі матеріали вибирають для виготовлення разових моделей виливків згідно різних діапазонів автоматизації, серійності і маси металу виливка від десятків чи сотень грамів до кількох тонн.

За технологічною функцією ливарна модель при найбільш поширеному способі ЛГМ формується в контейнері з сухим піском і в поточних дослідженнях, згідно набутого досвіду, нами розглядається як разова фасонна та нерідко великогабаритна оснастка, що взаємодіє з двома текучими середовищами – металом, що заливається та заміщує модель зсередини, і рухомим піщаним середовищем, що оточує модель зовні при формовці. Концепція функціональної взаємодії моделі з двома плинними середовищами дала поштовх проектуванню нових легковагих литих металовиробів, в тому числі за аналогами конструкцій, що спостерігаються в природі, і методами математичного та фізичного моделювання [4, 5, 11].

При цьому дослідники прагнули відповісти на питання «як твердотільні конструкції (моделей та виливків) можуть оптимально заповнити певний об'єм простору (ливарного контейнера) з найменшими витратами ресурсів?». По суті, в живій чи неживій природі відібрано еволюцією саме такі «підкоряючі» простір конструкції, що часто за своєю будовою відображають фрактальну, а не евклідову геометрію, відповідають співвідношенням золотої пропорції та, нерідко мають поверхні, що визначені в математиці як мінімальні (за площею) [4, 5, 11].

Програми 3D-технологічних пристроїв сьогодні також, головним чином, за еволюційними алгоритмами (аналогічно закономірностям з такої дисципліни, як біоніка) конструюють, візуалізуючи на моніторах, виливки здебільшого тонкостінної та комірчастої структури з оптимальною кривизною оболонок за критерієм «мінімальна маса – максимальна міцність», що знижує металоємність виробів та прийнятне для моделювання для способу ЛГМ. При цьому для живлення металом тонких периферійних стінок виливка нескладно залучити різнофасонні ливникові системи (сприятливих щодо гідравліки конструкцій у вигляді разових моделей з легких газонаповнених полімерів), а для засмоктування у такі стінки металу – вакуум форми та (чи) надмірний тиск на метал [12, 13].

Таким чином, ЛГМ-процес дозволяє отримати конструкцію виливка згідно функції ливарної моделі як взаємодії її з двома плинними середовищами в поєднанні з експлуатаційними призначеннями виливка, що сприяє створенню легковагих виливків оболонкової, каркасної чи стільникової будови за аналогами конструкцій з органічної чи неорганічної природи і способами математичного та фізичного моделювання. Нами запатентовано більше десятка конструкцій та способів збирання таких моделей для ЛГМ [3–5]. Також отримати в литих виробах полегшеної маси тонку стінку дозволить застосування високоміцних сплавів [14], до яких сьогодні, замість створення нових, частіше застосовують управління структурою і, відповідно, властивостями сплавів, що вже існують, в тому числі з оптимізацією литих конструкцій за допомогою методів термоаналізу [15].

Ґрунтуючись на науково-технологічних дослідженнях і низці запатентованих способів науковою школою проф. О. Й. Шинського, нами в ряді робіт досліджено вплив регульованої зміни швидкості охолодження виливків на їх структуру аж до застосування режимів термообробки в процесах лиття для створення мікроструктури, що відповідає підвищеним властивостям металу [16, 17]. В результаті чого

останніми роками нами запропоновано ряд способів виробництва виливків зі сталей та графітизованих чавунів для отримання двофазних чи багатофазних мікро- і макронеоднорідних структур методами ступінчастого охолодження (СО) з литого аустенітного стану (ізотермічне гартування тощо), що значно підвищує механічні і службові властивості виливків, економить легуючі елементи та енерговитрати, а також, за потреби, одночасно дозволяє покращити оброблюваність різанням [18].

Сьогодні в світі виливки з чавуну складають близько 70 % від загальної маси литва, а зі сталі – 10 %. Тому найбільш актуальним є удосконалення саме цього сегменту ливарного виробництва. Крім важливої теми способів зміцнення металу та поліпшення інших його експлуатаційних властивостей за рахунок відповідного структуроутворення, до чого не спадає увага дослідників матеріалознавців і чому присвячено сотні публікацій за останні десятки років, особливо цікавим і перспективним є напрям щодо утворення в виробах з чавуну та сталі багатофазної структури з метастабільним залишковим аустенітом, що зазнає при навантаженні на виливок динамічне деформаційне мартенситне перетворення і являється механізмом зміцнення і адаптації матеріалу до зовнішніх впливів. Ці дослідження і їх впровадження у виробництво описали, зокрема, такі вітчизняні вчені, як Л. С. Малинов, Л. О. Гогаєв, С. М. Волощенко, І. Г. Неіжко та ін. Огляд робіт і рисунки схем тріп-ефекту з утворенням мартенситу деформації наведено в недавній статті [19].

Сплави, що утворюють мартенсит деформації, можна віднести до адаптивних матеріалів, що мимовільно реагують на зовнішні механічні дії зі зміною власної структури і характеристик. На прикладі з дисертації д-ра техн. наук С. М. Волощенка, при загартуванні виливків з високоміцного чавуну з ізотермічної витримкою протягом 1, 2 і 3 годин отримано в структурі виливків, відповідно, 35, 31 і 27 % залишкового аустеніту, а пластична деформація виливка приводила до розпаду приблизно 1/5 від початкової кількості залишкового аустеніту з формуванням мартенситу, що зміцнює деформований шар металу. При цьому видно, що тривалість ізотермічної витримки застосована для регулювання кількості залишкового аустеніту в розмірі, достатньому для утворення мартенситу деформації, що забезпечує тріп-ефект.

З метою отримання ізотермічно загартованого виливка з чавуну або сталі з можливістю утворення залишкового аустеніту для перетворення останнього в мартенсит деформації нашим інститутом отримано ряд зазначених нижче патентів України щодо способів ливарного процесу, в якому виконується відповідне СО. Як базовий для таких патентів взято спосіб ЛГМ в вакуумованій формі з піску (без зв'язуючого компоненту), сипкість якого після зняття вакууму дозволяє виконувати швидке вибивання з форми гарячого виливка і його СО, подібного до ізотермічного загартування для отримання, зокрема високоміцного чавуну, з бейнітною структурою і можливим утворенням залишкового аустеніту (пат. UA 123731, 2018, повний опис патентів за вказаними в статті номерами є на сайті Укрпатенту http://base.uipv.org/searchINV/). У варіанті цього способу СО ізотермічну витримку виконують в нагрітому піску, засипаючи ним виливок в такому ж контейнері, як і при формуванні моделі.

Такий метод СО розкриває до реалізації, крім вище описаної формовки в плинному середовищі, такий резерв сипкого формувального піску, як можливість легкого видалення (вибивання) гарячого, переважно в аустенітному стані, виливка з ливарної форми для його СО за режимом гартування переважно в водному, газовому (в тому числі в печі [20]) чи газо-дисперсному середовищі з наступною ізотермічною витримкою переважно в сипкому нагрітому середовищі, для чого (в варіанті) запропоновано застосовувати той же сухий формувальний пісок. Таким чином, в способах, що розглядаються при ЛГМ, плинність сипкого формувального піску, як перевагу, можуть застосовувати тричі: для виготовлення форми за піно-полімерними моделями при досить нетривалій формовці (з короткочасною вібрацією), вибиванні з форми гарячого виливка та в якості середовища для ізотермічної витримки виливка при СО методом ізотермічного гартування. Відоме також застосування сипкого графіту в якості середовища для гартування (пат. UA 43690, 2009, Заблоцький В. К., Фельдман В. Є., Фесенко А. М. та ін.).

Також при СО чавунного або сталевого виливка можуть засипати нагрітими вогнетривкими матеріалами – гранульованими пропантами підвищеної «плинності», в т. ч. використовуючи вібрацію або псевдозрідження сипкого матеріалу (пат. UA 131581, 2019). Для зручності видалення з сипкого піску форми дрібних гарячих виливків для СО в контейнерну опоку поміщають сітчастий металевий кошик (чи дротяну корзину), в якому після формування, заливки і затвердіння виливків виймають їх з піщаної форми, і в цьому кошику проводять СО виливків подібно до ізотермічного загартування, минаючи перлітне перетворення в металі з потенціалом отримання в ньому залишкового аустеніту (пат. UA 131907, 2019).

Для досягнення в литві протягом СО необхідної кількості аустеніту (парамагнітної фази) використовують магнітний датчик (за методом магнітної феритометрії), що подає сигнал про закінчення циклу СО (пат. UA 131968, 2019). Також швидке охолодження виливка в ливарній контейнерній формі запропоновано проводити методом псевдозрідження піску в цій формі (пат. UA 106005, 2016) та при цьому для ізотермічної витримки при СО застосовувати продувку піску нагрітим газом (пат. UA 133701, 2019).

Для механізації і автоматизації ЛГМ-процесу з СО виливків розроблені концепції ливарного (пат. UA 140588, 2020) і роторно-конвеєрного (пат. UA 137850, 2019) комплексів, а також для Укроборонпрому – способи лиття боєприпасів (пат. UA 139559, 2020) і легковагих ґратчастих броне-перешкод (пат. UA 139560, 2020) [19], в обох останніх способах із металу з залишковим аустенітом в кількості, достатній для утворення мартенситу деформації. Відомо, що мартенсит деформації, зміцнюючи метал при імпульсному руйнуванні, підвищує експлуатаційні властивості як корпусів боєприпасів, так і перешкод [19]. Також відома технологія зміцнення вибухом, а в нашому випадку зміцнення литої стінки відбувається практично одночасно з її імпульсним руйнуванням.

Також з метою удосконалення лиття з високоміцних сплавів нами запропоновано способи виробництва високоміцного чавуну (пат. UA 131906, 2019 і 139557, 2020), контролю рідкого (пат. UA 112646, 2016 і 131912, 2019) і твердого металу (для високоміцного чавуну – пат. UA 131910, 2019), способи підвищення якості шляхом ротаційної обробки рідкого металу (пат. UA 131909, 2019) і фільтри для його очищення (пат. UA 141852, 2020).

Отже, вмонтувавши ізотермічне загартування в процес лиття і назвавши цей етап ливарного процесу СО виливка, замість того, щоб для традиційних ливарних процесів виливок в цей час охолоджувався в піщаній формі, ми отримуємо метод лиття ізотермічно загартованих чавунних і сталевих заготовок не тільки підвищеної міцності, але й із можливістю утворення залишкового аустеніту (в деяких вищевказаних патентах обумовлена його відсоткова кількість), здатного до утворення мартенситу деформації, чим створюємо технологічні основи виробництва виливків з металевих матеріалів, що можна віднести до адаптивних матеріалів, які мимовільно реагують на зовнішні механічні дії з заданою зміною власної структури і характеристик. За двома вищевказаними патентами показані схеми планувань, як переобладнати раніше спроектовані цехи ЛГМ досить некапіталоємними установками і оснасткою для ливарних комплексів, а також як скомплектувати роторно-конвеєрну лінію з модулів головним чином на основі обладнання, що описане в технічній літературі і наявне на європейському ринку.

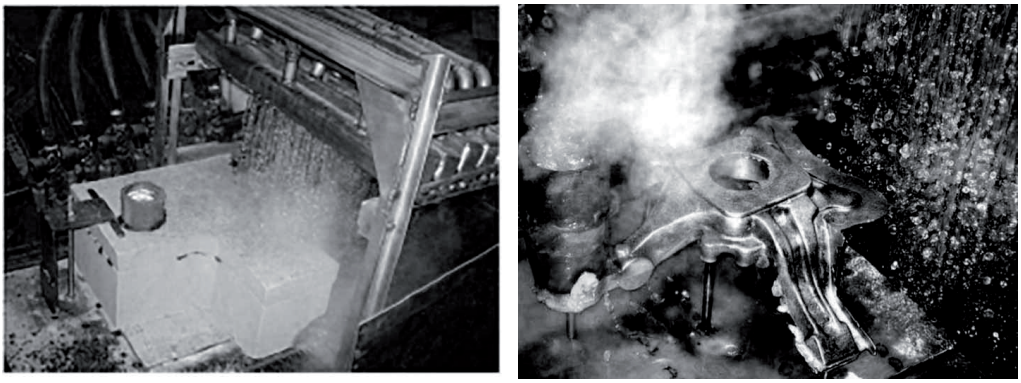
У цій статті ми не зосереджували увагу на досить детально описаних в технічній інформації металознавчих процесах утворення бейнітних структур та механізмах протидії деформації за тріп-ефектом, коли в зонах інтенсивної пластичної течії розвивається ряд твердофазних перетворень, ініційованих деформацією. Структурно-фазові перебудови призводять до суттєвої зміни фізико-механічних властивостей матеріалів і пов'язані здебільшого з карбідоутворенням, зокрема, яке у різних залізовуглецевих сплавів відпрацьоване методами відповідних режимів термічної обробки, реалізуючи закономірний зв'язок процесу утворення карбідів заліза, які блокують зрушення і є основною причиною зміцнення цих сплавів при деформації. Найдрібніші частинки карбідів (мартенситу) грають роль шпильок чи

пластинок, які «замикають» та армують площини зсуву чи «зшивають» матеріал в місці виникнення тріщини [19].

За сучасною світовою тенденцією виробництва виливків з огляду співвідношення об'ємів литва з різних сплавів відзначається випереджаюче зростання випуску алюмінієвого литва, викликане збільшенням частки транспортних засобів, що переводяться на електричні приводи. Це відповідно наштовхує науковців на створення нових ливарних процесів та удосконалення існуючих саме по тематиці лиття алюмінієвих сплавів.

Аналізуючи нові ливарні процеси, пов'язані з керуванням структурою литих деталей при їх кристалізації і охолодженні в піщаній ливарній формі, увагу привертає метод абляційного лиття (англ. *ablation casting*) – процес виготовлення виливків, при якому ливарна форма піддається розмиванню струменями води. Цей метод практично не описаний в вітчизняній фаховій інформації. За даним методом [21, 22] розплав заливають в форму, яка виготовлена з піщаної суміші з водорозчинним зв'язувальним компонентом, і, коли метал досягає температури твердження, ливарну форму піддають абляції (рис. 1) (з англ. *ablation* – вимивання, руйнування дією води). Оскільки форма поступово руйнується, вода (чи інший рідкий холодоагент) отримує можливість безпосередньо контактувати з поверхнею виливка, створюючи умови для інтенсивного відведення тепла від нього. Високий температурний градієнт, поступово «просуваючись» крізь виливок, призводить до твердження сплаву з високою швидкістю. В результаті у виливку утворюється дрібнозерниста мікроструктура, а механічні властивості сплаву значно підвищуються [23–25]. Окрім того знижується пористість алюмінієвих виливків, одержаних методом абляційного лиття [21, 26].

Для абляційного лиття найбільш підходящими матеріалами є алюмінієві та магнієві



а *б*

Рис. 1. Процес абляційного лиття [22]: початок розмивання форми (*а*), затверділий виливок після завершення видалення форми (*б*)

сплави завдяки їхній високій питомій міцності. Окрім ливарних алюмінієвих сплавів при даному методі одержання виливків можуть застосовуватися деформаційні алюмінієві сплави. Можливість використання вуглецевих та легованих сталей в даний час ще досліджується.

Окрім високих механічних властивостей, низької пористості виливків додатковими перевагами даної технології є висока продуктивність виробництва та конкурентоздатна вартість литва, можливість лиття складних деталей, що мають як тонкі, так і товсті стінки, разом зі складними внутрішніми поверхнями. Недоліком абляційного лиття є необхідність використання водорозчинних зв'язувальних компонентів, спеціального обладнання для руйнування форм, очищення води, віджимання та сушіння формувальної суміші при її регенерації.

Приклади реальних виробів з алюмінієвих сплавів, що виготовляються абляційним

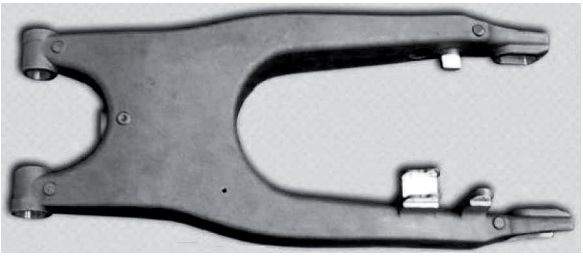


Рис. 2. Маятник задньої підвіски мотоцикла

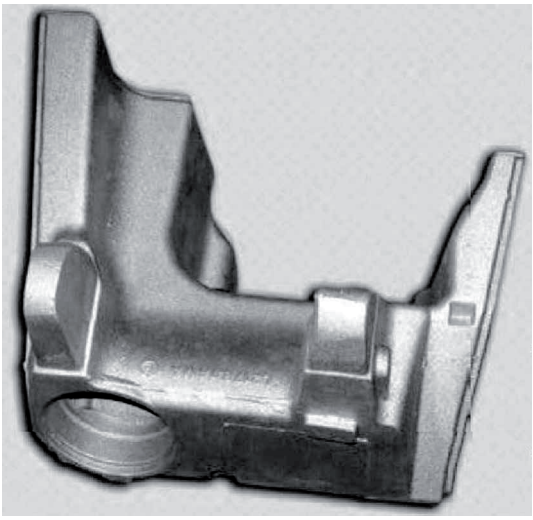


Рис. 3. Частина рами мотоцикла

литтям, показано на рис. 2 і 3 [21, 22]. Виливок маятника задньої підвіски (рис. 2) масою 3,2 кг і розмірами 660х260х152 мм з двоміліметровими стінками та великою внутрішньою порожниною виготовляється з алюмінієвого сплаву В206 (Al–Cu4.5). Хоча даний сплав і схильний до утворення гарячих тріщин і пористості, абляційним литтям було досягнуто 1 класу рентгенівського рівня за пористістю та включеннями.

Частина рами мотоцикла (рис. 3) масою 1,8 кг розмірами 254х203х152 мм виготовляється з алюмінієвого сплаву А356 (Al–Si7). В тонких перетинах даної деталі було досягнуто підвищених механічних властивостей саме завдяки абляційному литтю.

З початку перших згадувань в публікаціях технологія абляційного лиття досліджується та зазнає вдосконалення, так в вихідному випадку (див. рис. 1) ливарна форма переміщується в горизонтальному напрямі на зустріч вертикальним струменям води. В модифікованому процесі [24] ливарна форма рухається в вертикальному напрямі і може обертатися, а її розмивання відбувається завдяки розташованим симетрично по колу горизонтальним струменям води.

Застосування нового методу спонукало до розробки формувальних сумішей, які б володіли достатньою міцністю, необхідною для відтворення конфігурації виливка, та прогнозовано руйнувалися під дією струменів води. Дослідження формувальних сумішей з гідратованим силікатом натрію та різними добавками [27] і технологій зміцнення форм [28] показали можливість використання даних сумішей для абляційного лиття алюмінієвих сплавів як з точки зору якості литва, так і регенерації піску.

Розглянуті в статті технології відповідають загальносвітовій тенденції розвитку виробництва легковагих тонкостінних виливків з високоміцних сплавів і поліпшеними експлуатаційними властивостями. Методи регульованого структуроутворення взаємно доповнюються оптимальним моделюванням, у т. ч. з застосуванням для виготовлення ливарних разових моделей на автоматичних 3D-верстатах з ЧПУ, що дозволить знизити товщини стінок литих конструкцій, а цифровізація і автоматизація підвищать швидкість технологічної підготовки та продуктивність виробництва, у тому числі великогабаритних, оболонкових та комірчастих виливків, що, в цілому, завдяки поглибленню досліджень за цією темою, сприятиме вирішенню актуальної проблеми зменшення металоємності та збільшення ресурсу експлуатації литих заготовок для машинобудування. Розкриття потенціалу різнопланового застосування плинного формувального піску та водорозчинних формувальних сумішей застосовується для швидкого чи ступінчастого охолодження виливків, в свою чергу розкриваючи потенціал підвищення їх механічних властивостей.

Список літератури

1. Марчук Л. С. Дослідження та аналіз світових і вітчизняних факторів розвитку інтелектуального потенціалу підприємств машинобудівної галузі. *Держава та регіони*. 2020. № 1 (112). С. 59–66.
2. Дорошенко В. С. Моделирование отливок как оболочковых конструкций с целью металлосбережения. *Литейное производство*. 2018. № 6. С. 26–30.
3. Дорошенко В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям. *Литейное производство*. 2008. № 9. С. 28–32.
4. Дорошенко В. С. Математическое проектирование каркасно-ячеистых отливок. *Литейное производство*. 2013. № 2. С. 9–12.
5. Дорошенко В. С. Проектирование легковесных литых каркасно-ячеистых металлоконструкций с помощью моделирования структур природы. LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2015. 54 с.
6. Дорошенко В. С. Трехмерная формовка из сыпучих материалов. *Литейное производство.* 2013. № 4. С. 8–11.
7. Дорошенко В. С., Шинский И. О. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям. *Металл и литье Украины.* 2009. № 4–5. С. 30–33.
8. Дорошенко В. С. 3D технологии изготовления отливок как примеры аддитивного производства. *Металл и литье Украины*. 2014. № 12. С. 4–9.
9. Дорошенко В. С. 3D-технологии для формовки и литья. Литье и металлургия. 2015. № 3. С. 30–39.
10. Дорошенко В. С. Примеры 3D-технологии в литейном производстве. Снижение металлоемкости отливок. *Литье и металлургия*. 2016. №1. С. 34–39.
11. Дорошенко В. С. Примеры гармонизации с природой технических и декоративных отливок. *Литейное производство*. 2016. № 9. С. 30–37.
12. Дорошенко В. С. Литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением. *Литейное производство*. 2016. № 1. С. 25–28.
13. Шинский О. И., Дорошенко В. С. Варианты использования на роторно-конвейерных линиях способов литья с кристаллизацией металла под давлением. *Процессы литья*. 2019. № 6. С. 24–37.
14. Дорошенко В. С. Примеры металлосбережения при литье высокопрочного чугуна в песчаные формы. *Литейное производство*. 2016. № 11. С. 19–24.
15. Дорошенко В. С., Кравченко Е. В. Новые способы отбора проб при идентификации свойств металла методом термоанализа, с возможностью оптимизации конструкций отливок. *Литейное производство*. 2017. № 2. С. 28–33.
16. Дорошенко В. С. Предпосылки встраивания термообработки в процесс литья высокопрочного чугуна по газифицируемым моделям. *Металл и литье Украины*. 2017. № 6–7. С. 10–16.
17. Шинский О. И., Марукович, Е. И. Дорошенко В. С., Калюжный П. Б. Регулирование свойств литых конструкций интенсификацией теплообмена в литейной форме с газифицируемой моделью. *Литье и металлургия*. 2017. № 4. С. 60–67.
18. Дорошенко В. С. Способи охолодження виливків при проектуванні ЛТО-процесу, що взаємодоповнює технології лиття та термообробки. *Процеси лиття*. 2020. № 1. С. 3–13.
19. Дорошенко В. С. О литье защитных и износостойких конструкций из изотермически закаленного высокопрочного чугуна. *Литейное производство*. 2020. № 5. С. 28–31.
20. Дорошенко В. С. Концепция литейного роторно-конвейерного комплекса с возможностью регулируемого охлаждения отливок, включая их термообработку. *Литейное производство*. 2019. № 8. С. 15–22.
21. Grassi J., Campbell J., Hartlieb M., Major F. The Ablation Casting Process. *Materials Science Forum*. 2009. Vols. 618–619. P. 591–594.
22. Weiss D., Grassi J., Schultz B., Rohatgi P. Testing the Limits of Ablation. *Modern Casting.* 2011. Vol. 101. No. 12. P. 26–29.
23. Bohlooli V., Shabani Mahalli M., Boutorabi S.M.A. Effect of ablation casting on microstructure and casting properties of A356 aluminium casting alloy. *Acta Metallgica Sinica*. 2013. Vol. 26. No. 1. P. 85–91.
24. Dudek P., Fajkiel A., Reguła T. The Research on the Ablation Casting Technology for Aluminium Alloys. *Solid State Phenomen*a. 2014. Vol. 223. P. 70–77.
25. Tiryakioğlu M., Grassi J. On the Properties and Performance of Ablation Cast Components. In: *Shape Casting: 6th International Symposium* / Tiryakioğlu M., Jolly M., Byczynski G. (eds). Springer, Cham. 2016. P. 93–98.
26. Taghipourian M., Mohammadaliha M., Boutorabi S. M., Mirdamadi S. H. The effect of waterjet

beginning time on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy during the ablation casting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 238. P. 89–95.
27. Moulding Sand with Inorganic Cordis Binder for Ablation Casting / M. Hosadyna-Kondracka, K. Major-Gabryś, and etc. Archives of Foundry Engineering. 2018. Vol. 18. Iss. 4. P. 110–115.
28. Major-Gabryś K., Hosadyna-Kondracka M., Grabarczyk A., Kamińska J. Selection of hardening technology of moulding sand with hydrated sodium silicate binder devoted to aluminum alloys ablation casting. Archives of Metallurgy and Materials. 2019. Vol. 64. Iss. 1. P. 359–364.

Надійшла 28.05.2020

References

1. Marchuk, L. S. (2020). Research and analysis of world and domestic factors of development of intellectual potential of enterprises of machine-building branch. *State and regions*. 1(112), pp. 59–66. [in Ukrainian]
2. Doroshenko, V. S. (2018). Modeling of castings as shell structures for metal saving purposes. *Foundry production*. 6, pp. 26–30. [in Russian]
3. Doroshenko, V. S. (2008). Methods for obtaining frame and cellular cast materials and parts based on gasified models. *Foundry production*. 9, pp. 28–32. [in Russian]
4. Doroshenko, V. S. (2013). Mathematical design of frame-cellular castings. *Foundry production.* 2, pp. 9–12. [in Russian]
5. Doroshenko, V. S. (2015). Designing lightweight cast frame-cellular metal structures by modeling the structures of nature. LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 54. [in Russian]
6. Doroshenko, V. S. (2013). 3D molding from bulk materials. *Foundry production*. 4, pp. 8–11. [in Russian]
7. Doroshenko, V. S., Shinskij, I.O. (2009). 3D technologies for gasified casting. *Metal and casting of Ukraine*. 4–5, pp. 30–33. [in Russian]
8. Doroshenko, V. S. (2014). 3D technologies for making castings as examples of additive manufacturing. *Metal and casting of Ukraine*. 12, pp. 4–9. [in Russian]
9. Doroshenko, V. S. (2015). 3D-technologies in forming and foundry. *Litiyo i metallurgiya (Foundry production and metallurgy)*. 3, pp. 30–39. [in Russian]
10. Doroshenko, V. S. (2016). Examples of 3D-technologies in foundry processes. Decrease in metal consumption in castings. *Litiyo i metallurgiya (Foundry production and metallurgy*). 1, pp. 34–39. [in Russian]
11. Doroshenko, V. S. (2016). Examples of harmonization with the nature of technical and decorative castings. *Foundry production*.9, pp. 30–37. [in Russian]
12. Doroshenko, V. S. (2016). Casting on gasified models with metal crystallization under pressure. *Foundry production*. 1, pp. 25–28. [in Russian]
13. Shinskij, O. I., Doroshenko, V. S. (2019). Variants of use on rotary conveyor lines of casting methods with metal crystallization under pressure. Casting processes. 6, pp. 24–37. [in Russian]
14. Doroshenko, V. S. (2016). Examples of metal saving when casting ductile iron into sand molds. Foundry production. 11, pp. 19 –24. [in Russian]
15. Doroshenko, V. S., Kravchenko, E. V. (2017). New methods of sampling for identification of metal properties by thermal analysis, with the possibility of optimizing cast designs. *Foundry production*. 2, pp. 28–33. [in Russian]
16. Doroshenko, V. S. (2017). Prerequisites for the integration of heat treatment into the casting process of ductile iron using gasified models. *Metal and casting of Ukraine*. 6–7, pp. 10–16. [in Russian]
17. Shinskij, O. I., Marukovich, E. I., Doroshenko, V. S., Kaliuzhnyi P. B. (2017). Regulating of cast constructions properties by intensifying heat exchange in mold with gasified pattern. Litiyo i metallurgiya (*Foundry production and metallurgy*). 4, pp. 60–67. DOI: https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-4-60-67 [in Russian]
18. Doroshenko, V. S. (2020). Methods of cooling castings in the design of the LTO process, which complements the technology of casting and heat treatment. *Casting processes*. 1, pp. 3–13. [in Ukrainian]
19. Doroshenko, V. S. (2020). Casting of protective and wear-resistant structures from isothermally hardened ductile iron. *Foundry production.* 5, pp. 28–31. [in Russian]
20. Doroshenko, V. S. (2019). The concept of a casting rotor-conveyor complex with the possibility of controlled cooling of castings, including their heat treatment. *Foundry production*.8, pp. 15–22. [in Russian]

21. Grassi, J., Campbell, J., Hartlieb, M., & Major, F. (2009). The Ablation Casting Process. *Materials Science Forum*. 618–619, pp. 591–594. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.618-619.591 [in English]
22. Weiss, D., Grassi, J., Schultz, B., Rohatgi, P. (2011). Testing the Limits of Ablation. *Modern Casting.* 101/12, pp. 26–29. [in English]
23. Bohlooli, V., Shabani Mahalli, M. & Boutorabi, S.M.A. (2013). Effect of ablation casting on microstructure and casting properties of A356 aluminium casting alloy. *Acta Metallgica Sinica*. 26/1, pp. 85–91. DOI: https://doi.org/10.1007/s40195-012-0092-6 [in English]
24. Dudek, P., Fajkiel, A., Reguła, T. (2014). The Research on the Ablation Casting Technology for Aluminium Alloys. *Solid State Phenomena*. 223, pp. 70–77. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.223.70 [in English]
25. Tiryakioğlu, M., Grassi, J. (2016). On the Properties and Performance of Ablation Cast Components. In: Tiryakioğlu M., Jolly M., Byczynski G. (eds) Shape Casting: 6th International Symposium. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48166-1_12 [in English]
26. Taghipourian, M., Mohammadaliha, M., Boutorabi, S. M., Mirdamadi, S. H. (2016). The effect of waterjet beginning time on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy during the ablation casting process. *Journal of Materials Processing Technology.* 238, pp. 89–95. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.004 [in English]
27. Hosadyna-Kondracka, M. Major-Gabryś, K. Kamińska, J. Grabarczyk, A. Angrecki, M. (2018). Moulding Sand with Inorganic Cordis Binder for Ablation Casting. *Archives of Foundry Engineering.* 18 (4), pp. 110–115. DOI: 10.24425/afe.2018.125178 [in English]
28. Major-Gabryś, K., Hosadyna-Kondracka, M., Grabarczyk, A., Kamińska, J. (2019). Selection of hardening technology of moulding sand with hydrated sodium silicate binder devoted to aluminum alloys ablation casting. *Archives of Metallurgy and Materials*. 64 (1), pp. 359–364. DOI: 10.24425/amm.2019.126260 [in English]

Received 28.05.2020

V. S. DOROSHENKO, *Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist,*
e-mail: doro55v@gmail.com
P. B. KALIUZHNYI, *PhD (Engin.), Senior Research Scientist,*
e-mail: kpb.ptima@gmail.com

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

THIN-WALL CASTING FROM HIGH-STRENGTH ALLOY AS ONE OF THE MAIN TASKS OF FOUNDRY

The current trend to reduce the metal content of products can be satisfied through the use of spatial castings of thin-wall shell and/or cellular structure. Such castings can be obtained by lost-foam casting, in which the foundry pattern interacts with two fluid media - metal, which is poured and replaces the pattern from the inside, and a mobile sandy medium that surrounds the pattern during molding from the outside. In addition, to obtain a thin wall in the castings of light weight allows the use of high-strength alloys that can be obtained using methods of structure control, including step cooling. Due to the latter in cast iron and steel products it is possible to obtain a multiphase structure with metastable residual austenite, which under load on the casting undergoes deformation martensitic transformation, thus strengthening the alloy. The use of dry unbound sand in the lost-foam casting allows for rapid knocking out of the hot casting mold, and use this sand as a medium for isothermal holding of the casting under step cooling by isothermal hardening. In contrast to steel and cast iron castings, where the increase of mechanical properties is achieved by processes similar to heat treatment, in aluminum parts the increase of mechanical characteristics is possible with rapid cooling of the casting by ablation casting. The essence of this method is to erode of the mold by water jets during hardening of the casting, while water, in contact with the surface of the casting, creates conditions for intensive cooling of the alloy and, as a consequence, the formation of fine-grained structure. In this way, thin-wall castings of complex configuration are obtained, using both cast and deformable aluminum alloys as the material. The technologies considered in the article contribute to the development of lightweight thin-wall castings from high-strength alloys with improved performance properties.

Keywords: *thin-wall castings, high-strength alloys, step cooling, mechanical properties, lost-foam casting.*