

<https://doi.org/10.15407/plit2022.02.024>

УДК 621.74.02: 621.744

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: doro55@gmail; ORCID 0000-0002-0070-5663

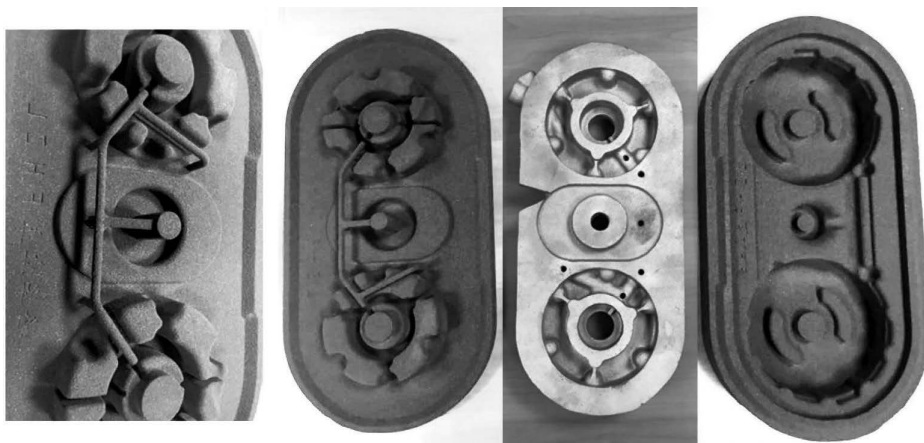
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

3D-ФОРМОВКА РОБОЧОЇ ПОРОЖНИНИ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ З СИПКОГО ПІСКУ МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО ВІДКАЧУВАННЯ

Недоліком традиційного виготовлення піщаних форм чи стрижнів для отримання металопродукції в ливарному виробництві є необхідність проектування та виготовлення модельно-стрижневої оснастки, без чого обходиться метод 3D-виготовлення таких форм на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), що значно скорочує тривалість технологічної підготовки виробництва. Розроблено спосіб формоутворення робочої порожнини при вакуумній формовці з сипкого піску переважно на верстаті з ЧПК шляхом видалення піску з вакуумованої півформи, що представляє собою заповнену піском опоку з двома плоскими ладом і контрладом. Таке видалення піску виконують крізь всмоктувальну трубку пилососа з насадкою, при цьому залишковий тиск повітря на вході якої підтримують нижчим, ніж залишковий тиск повітря в порах вакуумованого формувального піску. Цим способом досягається скорочення тривалості технологічної підготовки екологічного способу формоутворення порожнини вакуумованої форми з сипкого піску, автоматизація процесу виготовлення таких форм на верстатах з ЧПК і збільшення гнучкості такого процесу при виготовленні разових і дрібносерійних виливків. Екологічності процесу формоутворення сприяє контакт інструменту, як носія вакууму, з вакуумованим матеріалом, що виключає будь-які варіанти пилоутворення. Програмування і керування формоутворенням методом вакуумної обробки на верстаті з ЧПК практично не відрізняється від застосованого для відомих 3D-пристроїв з ЧПК тримірною фрезерування чи екструдерного формування. Розроблений спосіб відповідає сучасному розвитку 3D технологій, які є складовими тренду цифровізації виробництва, що дозволяє без паперових креслень з цифрової моделі за комп'ютерними програмами автоматично виготовляти виробів. Варіанти способу дозволяють різноманітні не лише процес 3D-формоутворення, але і змінювати деякі властивості виливків.

Ключові слова: 3D-формовка, ливарна форма, вакумна формовка, сипкий пісок, вакуумне відкачування, верстати з ЧПК, цифровізація виробництва, екологічний процес

Недоліком традиційного виготовлення ливарних піщаних форм чи стрижнів являється необхідність проектування та виготовлення модельно-стрижневої оснастки, без чого обходиться метод 3D-виготовлення таких форм на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), чим значно скорочує тривалість технологічної підготовки виробництва. Таке скорочення в часі може зменшити кількість тижнів приблизно до такої ж кількості днів. 3D-друк піщаних форм – ливарне виробництво без оснастки (англ. PCM — Patternless Casting Manufacturing), вважається одною з найпередовіших технологій лиття на даний час, яка поєднує традиційну технологію лиття в піщану форму та 3D-виробництво [1]. Приклад 3D-друкованої форми з тонкостінним стрижнем показано на рисунку; форма виготовлена на установці FHZL PCM1200 [1].



Дві половинки піщаної форми і виливок, зліва крупніше показано тонкий піщаний стрижень в центрі півформи

Оскільки одна з провідних наукових тем відділу проф. О. Й. Шинського у ФТІМС НАН України є дослідження гідроаеродинаміки пористих і сипких середовищ та удосконалення технології і обладнання лиття у вакуумованих піщаних формах з сипкого піску, то постало питання: як 3D-метод впровадити у вакуумну формовку (ВФ, V-process) з піску без зв'язувального компонента (ЗК)? Різновиди ВФ детально описано, зокрема, в монографії [2].

Огляд інформації за цією темою виявив, що один із способів тривимірної обробки, а саме 3D-деформації сипкого вакуумованого піску, вже відомий [3]. Він включає виготовлення заготовки з піску методом ВФ при покритті її еластичною синтетичною плівкою, вакуумуванні цього піску і деформуванні цієї заготовки за заданими програмою, кресленням чи шаблоном. Після чого пісок просочують під вакуумом реагентом, за допомогою якого його зв'язують подібно до піщаних форм із ЗК і після тужавлення чи тверднення утвореної піщаної суміші відключають вакуум. Для такого формоутворення деформуванням передбачено застосування верстатів з ЧПК з моніторингом в поточному часі розмірів і стану поверхні заготовки, а заготовку з сипкого наповнювача виконують з порожниною, в напрямку якої деформують стінки заготовки, або деформування стінки заготовки виконують з боку порожнини, при цьому застосовують вібрацію деформуючого інструменту. Проте виготовити цим способом ливарну форму проблематично, так можна виробляти піщані стрижні із ЗК чи бетонні вироби, додаючи воду. Але цей спосіб слугує прикладом (першим кроком) запровадження методу 3D-формовки виробів з сипкого піску, поки той перебуває без ЗК з застосуванням регулювання рівня вакууму в піщаному середовищі.

Також вже тривалий час відоме використання для ливарного виробництва верстатів з ЧПК у вигляді 3D-фрезерів для обробки ливарних моделей і традиційних піщаних форм з моніторингом їх розмірів [4]. Верстати з ЧПК часто обладнують системами контролю точності розмірів заготовки для обробки прецизійних деталей складної форми різним інструментом практично з будь-якого виду оброблювального матеріалу. Наприклад [5], датчик забезпечує таку точність близько 0,6 мкм для різального інструменту, рух якого керується сучасною обчислювальною технікою.

Фрезерні верстати з ЧПК мають широке застосування, однак фрезерування піщаних блоків, плит чи кубів, виготовлених з піску із ЗК для виробництва піщаних форм, супроводжується значними відходами у вигляді стружки та такі матеріали погано піддаються фрезеруванню через високу твердість зерен кварцового піску, крихкість традиційних форм із ЗК, високий знос різальних інструментів, а також пилоутворення. Зважаючи на останнє, пристрої для обробки різанням нерідко обладнують засобом кріплення всмоктувального шланга (рукава) пиłosоса [6] (пиловловлювача) для видалення стружки і пилу.

Аналізуючи застосування сучасних пілососів, виявлено, що для поліпшення їх роботи всмоктувальну трубку пілососа подовжують насадкою та можуть створювати направлені вібрації корпусу насадки [7], а також для активізації всмоктування потоку повітря по додатковому трубопроводу регульований потік очищеного повітря, що пройшло крізь пілосос і виходить з нього, направляють на поверхню, яку очищають [8]. Застосування таких пілососів описано для очищення поверхонь, а для формотворення в піщаних середовищах ще не запропоновано.

Механічна обробка піщаних блоків при швидкому обертанні фрез спричиняє кварцовий пил (досить шкідливий для органів дихання людини) і не завжди дозволяє повністю його видалити, що потребує фрезерування в закритих камерах при ускладненні обладнання. Тому така механічна обробка піщаних форм на станках з ЧПК останнім часом практично не застосовується. Як правило, вигідніше виготовляти піщані форми із ЗК за моделями чи адитивно [1], ніж фрезерувати їх з піщаних блоків чи кубів.

Однак, в секторі дрібно-серійного виробництва піщаних форм зараз все більше орієнтуються на 3D-друкування (3D-принтинг), що не потребує ливарних моделей, чим значно (нерідко на порядок) скорочує технологічну підготовку виробництва [1]. Саме друкування форм за цифровими моделями і комп'ютерними програмами, що керують рух формотворного інструменту в автоматичному режимі, триває години чи десятки годин без твердих моделей виливків, що є прикладом «перетворення» («матеріалізації») цифрової (без паперових креслень і модельної оснастки) інформації у фізичний виріб, в нашому випадку – ливарну форму.

Проте такі 3D-принтери серійно не виготовляють в Україні, а імпортують. Ці принтери для друку піщаних форм складні та дорогі, в них комп'ютерне програмування та управління системою руху друкарської голівки (за найбільш поширеним методом Binder Jet для друку ливарних форм) поєднується з системами подачі та дозування піщаних сумішей, які запатентовано, включають ЗК і компоненти, що є, як правило, імпортними без розшифрування їх складу. Отримані виливки з друкованих форм часто на порядок дорожчі за ті, що вилиті з традиційних форм. А подібні принтери, які запатентовано в Україні представниками зарубіжних компаній, мають достатньо громіздкі і капіталоемні конструкції, до прикладу [9].

Також для друку будівельних об'єктів є різновиди 3D-принтерів з екструдером, який подає пластичну суміш з ЗК. При чому екструдер відносно корпусу верстата можуть встановлювати з можливістю повороту у вертикальній площині [10], а також екструдер можуть додатково оснащувати механізмом регулювання перерізу вихідного отвору [11]. Це показує розвиток принтерів для друку пластичною чи рідкоплинною сумішшю з ЗК, але вони поки не застосовуються для виготовлення ливарних форм, бо, як правило, дають видимі стики шарів суміші у виробках та не придатні, зокрема, для виготовлення вакуумованих форм. Також за повідомленням сайту www.3dpulse.ru від 08.10.2021 компанія Sculpmaker представила друкувальну головку з перемінним соплом.

В розробці нового методу формотворення опирались на властивості способу виготовлення ливарних форм методом ВФ з сипкого формувального піску [12] авторства О. Й. Шинського та ін., що включає накладення на поверхню моделі синтетичної плівки, заповнення опоки формувальним піском, ущільнення останнього, герметизацію контрлада опоки плівкою, вакуумування порожнини опоки, видалення моделі і складання форми. Відмінною особливістю цього способу є те, що з метою поліпшення якості поверхневого шару форми, підвищення продуктивності і зниження трудомісткості виготовлення форми перед складанням форми синтетичну плівку, нанесену на робочу порожнину (поверхня якої контактує з металом) півформи, піддають термодеструкції.

Основний недолік цього способу ВФ – це необхідність застосування високоточних перфорованих (з виконаними в них вентами) моделей, які облицьовують синтетичною плівкою шляхом присмоктування її до моделі при вакуумуванні моделі крізь венти. Така особлива конструкція моделі забезпечує як щільне накладання плівки на модель, так і протяжку піщаної форми (після формотворення її робочої порож-

нини за допомогою моделі) без розривання цієї плівки. Для одиничного чи дрібно-серійного виробництва значні тривалість (від кількох тижнів до місяців) і вартість технологічної підготовки, що включає проектування і виготовлення таких моделей та передує початку отримання перших виливків, визначає високу вартість виливків і низьку гнучкість процесу для швидкого освоєння нової номенклатури литва чи зміни конструкції виливка. Тому виникає потреба у способі швидкого формоутворення методом піщаної формовки з застосуванням ЧПК для ВФ без ливарних моделей з їх облицюванням плівкою і наступною протяжкою форми при видаленні з неї моделі, опису чого в технічній інформації не виявлено.

Таким чином, мета нашої розробки полягала в скороченні тривалості технологічної підготовки способу формоутворення порожнини вакуумованої форми, автоматизації процесу виготовлення таких форм на верстатах з ЧПК і збільшенні гнучкості такого процесу при виготовленні разових і дрібносерійних виливків, оскільки зміна конструкції виливка при цьому можлива при зміні його «цифрового» креслення на моніторі комп'ютера. Варіант ВФ без застосування високоякісної плівки розширює область застосування ВФ, цього екологічного процесу без ЗК у сипкому піску, що характеризується відсутністю газів від термодеструкції ЗК і легкою регенерацією сухого піску з втратами лише до кількох відсотків при повторному його поданні на формовку [2, 13].

Виходячи з виконаного аналізу інформації, з огляду досягнення зазначеної мети, нами розроблено спосіб формоутворення робочої порожнини при ВФ переважно на верстаті з ЧПК шляхом видалення піску з вакуумованої півформи, що представляє собою заповнену піском опоку з двома плоскими ладом і контрладом. Таке видалення піску виконують крізь всмоктувальну трубку пилососа з насадкою, на вході якої при цьому залишковий тиск повітря підтримують нижчим, ніж залишковий тиск повітря в порах вакуумованого формувального піску.

Розроблено порядок операцій формування в наступній послідовності. Після заповнення рамкової опоки формувальним піском та його ущільнення, покриття синтетичною плівкою плоских поверхонь піску в опоці, вакуумування піску, виконання термодеструкції синтетичної плівки (аналогічно [12]) на місці виготовлення робочої порожнини форми, формоутворення робочої порожнини форми на верстаті з ЧПК виготовляють шляхом видалення піску крізь всмоктувальну трубку пилососа з насадкою, на вході якої регулюють залишковий тиск повітря (величину розрідження) і цим самим також регулюють відбирання піску. Також величину тиску повітря (розрідження) на вході в трубку пилососа можна регулювати залежно від кількості проходження твердого компоненту в одиницю часу за даними датчика в трубопроводі чи рукаві пилососа. Наприклад, акустико-емісійними датчиками реєструють винесення піску з газових свердловин, а для вдування пилоподібного вугільного палива застосовують датчик MWS-DP-3 руху твердих сипких матеріалів з використанням мікрохвильового випромінювання високої проникності і ефекту Доплера, датчик може мати аналоговий вихід 4...20 мА, електричний сигнал з якого пропорційний величині потоку.

В процесі розробки варіантів способу видалення піску крізь всмоктувальну трубку пилососа з насадкою запропоновано застосувати механізм повороту насадки у вертикальній площині та (або) регулювання перерізу її отвору, та (або) створення вібрації насадки, та (або) по додатковому трубопроводу регульований потік очищеного повітря, що пройшло крізь пилосос і виходить з нього, направляти на поверхню піску, з якої його видаляють, та (або) по додатковому трубопроводу на поверхню для видалення піску направляти регульований потік нагрітого повітря чи охолодженого нижче 0 °С повітря. Крім того, при видаленні чи після видалення піску поверхню утвореної робочої порожнини вакуумованої форми можуть повністю чи частково покривати герметизуючим чи (та) зв'язувальним матеріалом, та (або) протипригарним покриттям, та (або) синтетичною плівкою, та (або) шаром піщаної суміші чи покриттям із функціональними властивостями.

Також є перспектива трансформації способу ВФ у формовку з ЗК тим шляхом, що вакуумований пісок чи піщану суміш виготовленої ливарної порожнини з боку

поверхні, непокритої плівкою, можна наситити на глибину до 10–15 мм методом фільтрації рідким ЗК, що твердне, і отримати оболонкову форму. Цей процес відомий під назвою «фільтраційна формовка» [3]. При цьому слід підібрати достатньо рідкоплинний ЗК, додати в пісок сипкий компонент, що створює в контакт з цим ЗК швидкоотвердну композицію, а регульований рівень вакууму форми сприятиме такому просоченню на глибину, яка відповідає заданій товщині утворюваної оболонкової піщаної форми.

Таким чином, на додаток до таких відомих видів 3D-формоутворюючих пристроїв на верстатах з ЧПК, як фрезерного, екструдерного, чи деформуючого в розробленому способі застосовано пристрій для вакуумного видалення сипкого матеріалу. Обґрунтовано таке 3D-формоутворення в сипкому піску форми застосуванням ряду фізичних явищ і технічних досягнень в області технології ВФ. Згідно теорії механіки ґрунтів, пісок, що становить основу формувальних сумішей, є сипким матеріалом, що не має сил зчеплення між частинками, але має сили внутрішнього тертя. При накладенні на поверхню піщин пониженого газового тиску з різних боків, а саме: з боку вакуумованої піщаної форми і з боку наближеної до піщини насадки пілососа, відбувається деформація зсуву в напрямку меншого тиску, а потік повітря у всмоктувальний отвір насадки пілососа захоплює і переносить піщини по його трубопроводу. Тому, як вирішальний фактор, застосували те, що залишковий тиск повітря на вході всмоктувальної трубки регулюють та підтримують нижчим, ніж залишковий тиск повітря в порах вакуумованого піску форми.

Залишковий тиск повітря у формі доцільно підтримувати максимально допустимим (тобто, розрідження мінімально допустиме), але нижче атмосферного, який складає близько 100 кПа, і не вище якого можливе самовільне осипання піску зі стінок порожнини форми під час її формоутворення. Невисокий рівень вакууму форми, але достатній для утримання без осипання (оповзання) піщинок під дією сил тяжкості, полегшує формоутворення методом відсмоктування піщин пілососом з досить невисоким вакуумом. Підвищення розрідження у формі стимулюватиме стрімкі потоки повітря між піщинками, це може «вимивати» тонку фракцію піску і деформувати чи псувати поверхню форми, що можна запобігти застосуванням різних герметизаторів піщаної поверхні. Практично пропорційні залежності впливу величини вакууму на міцність і твердість сипкого піску для вакуумованої форми при ВФ дозволяють величиною вакууму у порах кварцового піску регулювати міцність матеріалу форми (σ_s від 0 до 0,45 МПа) і твердість (від 0 до 94 НВ) [2]; в цих межах характеристик доступне регулювання режиму видалення піску.

Після термодеструкції плівки на частині поверхні форми піщинки стінок новоутвореної робочої порожнини в непорушному стані утриме перепад тиску, зумовлений опором фільтрації повітря в порах піску. Цей опір фільтрації буде утворювати градієнт тиску по товщині форми, що означає: чим глибше знаходиться прошарок піску форми, тим нижчий буде в ньому тиск [2]. До цього додаються сили внутрішнього тертя ущільненого вібрацією піску форми в стінках утвореної робочої порожнини форми, а також деякий ефект склеювання продуктами термодеструкції синтетичної плівки в порах піску, якою від початку формовки покривали пісок форми. Саме такі механізми утримують пісок робочої порожнини в способі [12] після термодеструкції плівки на поверхні цієї порожнини. В нашому розробленому способі до цього додається ефект філігранного формоутворення робочої порожнини форми за технологією, що сумісна з більшістю верстатів з ЧПК і функціонує у форматі файлів для 3D-пристроїв.

Під час накладення вібрації (швидкого повторно-змінного навантаження) на піщини торкання до них торця насадки пілососа, яка піддається вібрації, рух піщини відбувається шляхом тонкого ковзання по окремих поверхнях у зерновому середовищі піску, що вимагає менших силових впливів для переміщення окремих піщин чи шарів піску [3]. Застосування вібрації до піщинок з боку насадки знижує тертя між піщинками за рахунок їх коливання і полегшує відрив їх від форми з засмоктуванням пілососом.

Закачане повітря з піском і пилом пиłosос очищує і викидає зі свого корпусу, тому має пило- чи піскозбірник з фільтром і суміжну з ним нагнітальну камеру очищеного повітря з вихідним отвором для нього [8]. Для покращення відбору і видалення сипкого матеріалу по додатковому гнучкому трубопроводу, аналогічно [8], рекомендовано (у варіанті) направляти в зону видалення піску регульований потік очищеного повітря, що пройшло крізь пиłosос і виходить з нього. Цим потоком повітря з пиłosоса чинять силову дію на піщини, щоб відірвати їх від поверхні форми і засмокотати в той же пиłosос.

Також при обробці поверхні і видаленні сипкого піску крізь всмоктувальну трубку пиłosоса з насадкою варіанти способу з поворотом насадки у вертикальній площині та (або) зміною перерізу її вхідного отвору допускають додаткове регулювання інтенсивності чи швидкості відбирання (засмоктування) матеріалу з різної форми утворених стінок робочої порожнини. Отвір насадки може взагалі закриватись при переміщенні насадки над поверхнею форми, відкриватись на розмір усмоктування лише пилоподібних часток, або на ширину щілини для пропускання не більше однієї піщини, або максимально відкриватись для найбільшого потоку піску в повітрі. Таке регулювання методами зміни насадок різних конструкцій чи (та) застосування механізмів їх повороту чи, (та) зміни перерізу вхідного отвору (сопла) насадки додає універсальності способу для виконання порожнин різних конфігурацій з різною інтенсивністю і чистотою поверхні форм різних геометричних розмірів.

Крім того, при видаленні чи після видалення піску поверхню утвореної робочої порожнини вакуумованої ливарної форми можуть повністю чи частково покривати герметизуючим чи (та) зв'язувальним матеріалом для кращої фіксації поверхні [13]. Як правило, протипригарне покриття чи фарба з дрібнозернистим вогнетривом і зв'язувальним матеріалом, які рекомендується в цьому варіанті напильати (наносити у вигляді аерозолі чи спрею) на піщану поверхню формоутвореної порожнини має одночасно герметизуючі (поверхню), зв'язувальні (за рахунок проникнення в пори вакуумованого піску) і протипригарні властивості. Також нанесення води на таку поверхню, як слабкого зв'язувального компоненту завдяки добрій змочуваності кварцового піску, можна вважати покриванням зв'язувальним матеріалом, а за певної концентрації в піску – і герметизуючим матеріалом. Також нанесення і заморожування води (як зазначено в роботі [2]) дозволяють виконати обидві останні вказані операції, для чого на поверхню змоченого піску можуть направляти по додатковому трубопроводу регульований потік охолодженого нижче 0 °C повітря. А за потреби наступною аналогічно подачею нагрітого повітря можна виконати деструкцію зв'язувального льодяного компоненту в піску для подальшого формоутворення (відкачуванням) в ньому елементів робочої порожнини.

Повністю чи частково робочу порожнину можна покривати термопластичною синтетичною плівкою в нагрітому стані до пластичного стану, коли плівка практично втрачає міцність і у плинному стані здатна розширюватись на сотні процентів, притягуючись вакуумом до піску. Таке допустимо, зокрема, для крупних форм з габаритами до кількох метрів, коли триває переналадка чи очистка верстату з ЧПК і потрібно тимчасово припинити формоутворення вакуумованої форми, або щоб зберегти енергію на підтримання вакууму, який може «втрачатись» на утримання форми на значній площі (без плівки на ній) під час формоутворення відсмоктуванням піску. Тоді також можлива місцева термодеструкція плівки в тому місці, де здійснюють формоутворення, для цього розроблено згаданий вище варіант подачі на поверхню форми для видалення піску регульованого потоку нагрітого повітря, зокрема, до температури термодеструкції плівки, яку вказано в роботах [2, 12].

Описані операції в складі низки варіантів способу можна змінювати в процесі вакуумної 3D-обробки форми залежно від застосовуваних режимів та інструменту. Зміною величини вакууму у формі і пиłosосі можна регулювати швидкість і тривалість формоутворення. Застосування ЧПК-верстату з великого арсеналу сучасних способів 3D-обробки, високоточних методів позиціонування і руху інструменту, в даному разі – насадки пиłosоса, у відповідності до зміни геометрії піщаної форми,

свідчить про створення методу 3D-виготовлення піщаних виробів з фасонною порожниною вакуумним видаленням («зайвого») піску для формоутворення заданої геометрії поверхні робочої порожнини піщаної форми.

Для дослідження промислової придатності методу в лабораторних умовах виконали наступні роботи. Рамкову опоку з засобами (фільтрами) для вакуумування на вібраційному столі засипали кварцовим формувальним піском, який віброущільнювали. В результаті отримували без ливарної порожнини форму, пісок якої по ладу і контраду був покритий типовою для ВФ синтетичною плівкою товщиною 0,05...0,10 мм марки севілен за ТУ2245-561-00203521-2002 (допустима марка EVA [2]), що дає можливість кількаразового відносного подовження плівки при нагріванні. Штуцер до фільтрів вакуумування піску на опоці під'єднували гнучким трубопроводом з вакуумметром на ньому до вакуумного водокільцевого насосу ВВН1-1,5 і вакуумували піщану форму, довівши на період формоутворення в ній залишковий тиск повітря відомими способами на вході штуцера до рівня 87 кПа. Щоб не переробляти наявні в розпорядженні ФТМС 3D-пристрої, змодельовали спосіб ручного формоутворення вакуумуванням при виготовленні виливка прямокутної плитки з заоваленими чотирма кутами.

Також провели підготовчі роботи. Попередньо вирізали плоский шаблон з твердого картону. Шаблон по зовнішньому розміру покривав лад форми, а отвір в ньому точно відповідав обрисам і розміру виливка плитки. Зовні на металеву трубчасту насадку побутового пилососа насадили рухливий фланець, що мав отвір з різьбою і віссю перпендикулярною осі трубки насадки. У цей отвір закрутили гвинт, який в закрученому стані упирався в зовнішню стінку насадки і нерухомо фіксував на ній фланець. Таким чином, фланець можна було рухати уздовж трубки насадки і фіксувати його упором гвинта в її стінку.

Підготували два прямокутних дерев'яних бруска за габаритними розмірами опоки, які використовували як упорні лінійки для ковзання по них торця фланця при русі насадки вздовж них. Фланець фіксували на насадці на певній відстані від її вхідного отвору, зміною цієї відстані регулювали глибину занурення насадки у форму і виконували рух насадки в горизонтальній площині.

Послідовність виконання операцій формоутворення була такою. Поклали на столі вакуумовану з указаним вище залишковим тиском (за вакуумметром) форму у горизонтальне положення її ладу, наклали і закріпили на ладі картонний шаблон з отвором у ньому над тим місцем, де мала бути робоча порожнина. Нагрівальним пристроєм з температурою близько 250 °С нагріли над отвором шаблону плівку і виконали її термодеструкцію. Над отвором шаблону помістили паралельно два прямокутних дерев'яних бруска, з упором фланця з насадкою на них пошарово по 5 мм (переміщенням фланця вздовж насадки) видалили вакуумуванням пісок на глибину 25 мм. Рухали насадку по всій площі, обмеженій отвором картонного шаблону, пересовуючи бруски по шаблону і за необхідності похитуючи насадку в вертикальній площині вздовж брусків. Пилосос за виміром вакуумметра в отворі насадки створював залишковий тиск повітря 76 кПа. Після формоутворення робочої порожнини форми її покрили спиртовою протипригарною фарбою з пилоподібним вогнетривом і добавкою зв'язувального матеріалу – пульвер-бакеліта.

Невисокий вакуум у формі підтримували (залишковий тиск рівня 85–87 кПа) при її розташуванні на столі під час формоутворення, а при переміщенні форми залишковий тиск зменшували до ~50 кПа, що відповідає традиційній технології ВФ [2]. Після фарбування поверхні утвореної порожнини півформу її складали (збирали) з парною до неї вакуумованою півформою, в якій виконано ливникову систему відомими способами. Метод складання і скріплення півформ, а також мав традиційні операції. Після заливання форми розплавом сірого чавуну отримали виливок плитки товщиною 25 мм задовільної якості.

У разі потреби витримки вакуумованих півформ чи складених форм протягом тривалого часу (від кількох хвилин до годин) до операції їх заливання металом (виплавка його в цехах може затримуватися) доцільна додаткова герметизація форм.

Для екстрених випадків з накопиченням вакуумованих форм можливо стане недостатньо потужності вакуумних насосів для обслуговування значного числа форм. Для таких випадків відпрацювали накладення нагрітої плівки на поверхню пофарбованої робочої порожнини, в момент накладення плівки максимально в межах технічної можливості насосів зменшували залишковий тиск у формі, наприклад, насос ВВН1-1,5 забезпечив тиск близько 30 кПа. Проходячи крізь нечисленні пори висушеної вакуумом протипригарної фарби, цього розрідження повітря було достатньо для швидкого присмоктування плівки до поверхні робочої порожнини. Після цього ВФ перетворювалась у типову повністю облицьовану плівкою форму за прикладами із роботи [2]. Якщо треба виконання способу [12] такі вакуумно-плівкові півформи перед їх складанням над ними на 5–15 с можна поміщати нагрівач, яким виконувати термодеструкцію плівки на формі згідно способу [12], потім півформи складати у форму (можлива установка піщаних стрижнів), яку заливати металом.

Для кожного конкретного випадку вакуумного формоутворення слід підбирати опробування оптимальну різницю залишкових тисків у формі і на вході в отвір всмоктувальної пісок насадки, а також вище розглянуті, як операції для полегшення відриву піщинок від форми при їх видаленні, так і методи герметизації сформованої поверхні чи засоби запобігання її руйнування. Рекомендуються для формовки кар'єрні формувальні піски з високим внутрішнім тертям (на відміну від річних), що мають підвищену стійкість до осипання.

У разі потреби порожнини вакуумованої форми повністю чи частково можуть покривати тонким шаром піщаної суміші чи покриттям із функціональними властивостями. Наприклад, для утворення поверхні підвищеної шорсткості можуть покривати шаром піску чи фарби з піщинами більшої крупності, ніж у всій формі. Такі виливки з поверхнею проти ковзання потрібні для сходів, кранових драбин, елеваторів, особливо розміщених поза приміщенням. Кольоровим крупним піском на деяких поверхнях без фарбування можуть утворювати декоративний кольоровий механічний «пригар», коли всмоктуванням вакуумом форми в пори піску метал охоплює кольорові піщини, викладені по шаблону певного малюнка, що, зокрема, застосовують для лиття декоративних тротуарних люків. Додаванням у протипригарну фарбу чи сипкий шар легуючих елементів можливе нанесення їх на окремі поверхні і контактуванням з ними розплаву металу – утворення на них поверхневих шарів металу з особливими функціональними структурами чи властивостями, зокрема, з підвищеною твердістю чи стійкістю до зносу.

Розробленим способом досягається скорочення тривалості технологічної підготовки екологічного способу формоутворення порожнини вакуумованої форми з сипкого піску, автоматизація процесу виготовлення таких форм на верстатах з ЧПК і збільшення гнучкості такого процесу при виготовленні разових і дрібносерійних виливків. Екологічності процесу формоутворення сприяє контакт інструменту, як носія вакууму, з вакуумованим матеріалом, що виключає будь-які варіанти пилоутворення. А при литті металу з застосуванням ВФ можливе виділення газу повністю відсмоктується в систему вакуумування, а сухий формувальний пісок після охолодження на близько 97 % придатний для багатократного використання [2].

Програмування і керування вакуумною обробкою на верстаті з ЧПК практично не відрізняється від застосованого для відомих 3D-пристроїв з ЧПК тримірного фрезерування, екструдерного формування чи деформування піщаного матеріалу. Розроблений спосіб відповідає сучасному розвитку 3D технологій, які є складовими тренду цифровізації виробництва, що дозволяє без паперових креслень з цифрової моделі за комп'ютерними програмами автоматично виготовляти вироби. До того ж традиційна ВФ з використанням плівки доступна для виливків, геометрія поверхні яких дозволяє швидко облицьовувати (обтягнути) синтетичною плівкою. Деякі з варіантів формоутворення вакуумним видаленням сипкого піску без застосування плівки знімають це «облицьовальне» обмеження традиційної ВФ.

Тенденція поширення замовлень на кастомізовану литу продукцію, конструкція якої персоналізована під потреби конкретних вимог замовника, за цим способом

дозволяє швидко ввести корекції в комп'ютерну програму обробки на верстаті з ЧПК (як елемент гнучкості процесу) без виготовлення нової дерев'яної, металевої чи пластикової ливарної моделі, що притаманно традиційній ВФ [2]. А описані варіанти дозволяють різноманітнити не лише процес 3D-формоутворення, але і змінювати деякі властивості виливків. Створений спосіб є один з варіантів автоматизації виробництва на основі перетворення цифрового (образу, моделі) у фізичне (термін: digital-to-physical conversion) у вигляді ливарної форми, що є одною із характерних ознак кіберфізичної сутності «Індустрії 4.0» [14].

Список літератури

- 1 Рихирев М. Цифровая аддитивная литейка. *Аддитивные технологии*. 2020. № 3. С. 16–26.
- 2 Минаев А.А., Ноткин Е.Б., Сазонов В.А. Вакуумная формовка. М.: Машиностроение. 1984. 216 с.
- 3 Дорошенко В.С. Трехмерная формовка из сыпучих материалов. *Литейное производство*. 2013. № 4. С. 8–11.
- 4 Дорошенко В.С., Шинский И.О. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям. *Металл и литье Украины*. 2009. № 4–5. С. 30–33.
- 5 Патент 19180 Україна, МПК B23Q 17/22, B23B 39/00. Віброакустична система для обробки на верстатах високоточних деталей. Опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.
- 6 Патент 71093 Україна, МПК B23B 39/14, B23B 49/00. Пристрій для установки на ньому свердлильного обладнання і оброблюваної деталі. Опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
- 7 Патент 104962 Україна, МПК A47L 9/00. Спосіб створення вібрації насадки для пило-соса. Опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.
- 8 Патент 77826 Україна, МПК A47L 9/00. Пиросос. Опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
- 9 Патент 122408 Україна, МПК B22C 9/00, B22C 11/00, B29C 67/00, B33Y30/00. Пристрій для 3D-друку піщаних форм з декількома робочими коробами. Опубл. 10.11.2020, Бюл. № 21.
- 10 Патент 19180 Україна, МПК E04G 21/04. Головка 3D-друку будівельних об'єктів. Опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.
- 11 Патент 122408 Україна, МПК E04G 21/04, E04G 21/20. Головка 3D-друку будівельних виробів. Опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20.
- 12 А. с. СССР 1063528 А. М. Кл. B22C 9/02. Способ изготовления литейных форм вакуумной формовкой. Опубл. 30.12.1983, Бюл. № 48.
- 13 Патент 122408 Україна, МПК B22C 9/02. Спосіб 3D формоутворення робочої порожнини вакуумованої ливарної форми на верстаті з ЧПК. Опубл. 26.01.2022, Бюл. № 4.
- 14 Дорошенко В.С., Гнатуш В. А. Перспективы развития рынка литья в контексте «Индустрия 4.0». *Литье Украины*. 2017. № 6. С. 18–21.

Надійшла 28.10.2021

References

- 1 Rihirev M. (2020). Digital additive foundry. *Additivnye tekhnologii*. No. 3. Pp. 16–26. [in Russian].
- 2 Minaev A. A., Notkin E. B., Sazonov V. A. (1984). Vacuum molding. M.: Mashinostroenie. 216 p. [in Russian].
- 3 Doroshenko V. S. (2013). Three-dimensional molding from bulk materials. *Litejnoe proizvodstvo*. No. 4. Pp. 8–11. [in Russian].
- 4 Doroshenko V. S., Shinskij I. O. (2009). D technologies for gasified casting. *Metall i lit'e Ukrainy*. No. 4-5. Pp. 30–33. [in Russian].
- 5 Patent 19180 of Ukraine, MPK B23Q 17/22, B23B 39/00. Vibroacoustic system for machining high-precision parts on machines. Publ. 15.12.2006, Bul. № 12. [in Ukrainian].

- 6 Patent 71093 of Ukraine, MPK B23B 39/14, B23B 49/00. Device for installing drilling equipment and workpiece on it. Publ. 10.07.2012, Bul. № 13. [in Ukrainian].
- 7 Patent 104962 of Ukraine, MPK A47L 9/00. The method of creating a vibrating nozzle for a vacuum cleaner. Publ. 25.03.2014, Bul. № 6. [in Ukrainian].
- 8 Patent 77826 of Ukraine, MPK A47L 9/00. Vacuum cleaner. Publ. 15.01.2007, Bul. № 1. [in Ukrainian].
- 9 Patent 122408 of Ukraine, MPK B22C 9/00, B22C 11/00, B29C 67/00, B33Y 30/00. Device for 3D printing of sand molds with several work boxes. Publ. 10.11.2020, Bul. № 21. [in Ukrainian].
- 10 Patent 19180 of Ukraine, MPK E04G 21/04. Head of 3D printing of construction objects. Publ. 25.04.2017, Bul. № 8. [in Ukrainian].
- 11 Patent 122408 of Ukraine, MPK E04G 21/04, E04G 21/20. Head of 3D printing of construction products. Publ. 25.10.2019, Bul. № 20. [in Ukrainian].
- 12 A. s. SSSR 1063528 A, MPK B22C 9/02. A method of manufacturing casting molds by vacuum molding. Publ. 30.12.1983, Bul. № 48. [in Russian].
- 13 Patent 122408 of Ukraine, MPK B22C 9/02. Method of 3D forming of working cavity of vacuum mold on CNC machine. Publ. 26.01.2022, Bul. № 4. [in Ukrainian].
- 14 Doroshenko V. S., Gnatush V. A. (2017). Prospects for the development of the casting market in the context of "Industry 4.0". *Lite Ukrainy*. No. 6. Pp. 18–21. [in Russian].

Received 28.10.2021

V. S. Doroshenko, Dr. Sci. (Endin.), Senior Researcher;
e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663,

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

3D-MOLDING OF THE WORKING CAVITY OF A CASTING MOLD FROM LOOSE SAND BY VACUUM PUMPING

The disadvantage of traditional production of sand molds or rods for metal products in foundry production is the need to design and manufacture model-rod equipment, without which the method of 3D manufacturing of such molds on machines with numerical program control (CNC), which significantly reduces the duration of technological preparation. A method of forming a working cavity during V-process from loose sand, mainly on a CNC machine, has been developed by removing sand from a vacuumed half-form, which is a sand-filled crucible with two flat systems and a counter-device. This removal of sand is performed through the suction tube of the vacuum cleaner with a nozzle, while the residual air pressure at the inlet of which is maintained lower than the residual air pressure in the pores of the vacuum molding sand. This method reduces the duration of technological preparation of the ecological method of forming the cavity of the vacuum mold from loose sand, automates the process of manufacturing such molds on CNC machines and increases the flexibility of this process in the manufacture of single and small series castings. The environmental friendliness of the molding process is facilitated by the contact of the tool, as a vacuum carrier, with the vacuumed material, which eliminates any variants of dust formation. Programming and control of forming by the method of vacuum processing on a CNC machine is almost no different from that used for known 3D devices with CNC three-dimensional milling or extrusion molding. The developed method corresponds to the modern development of 3D technologies, which are part of the trend of digitalization of production, which allows to make products automatically without paper drawings from a digital model using computer programs. Variants of the method allow to diversify not only the process of 3D forming (3D molding), but also to change some properties of castings.

Keywords: 3D molding, casting mold, V-process, loose sand, vacuum pumping, CNC machines, digitalization of production, ecological process.