

розплавом, що кристалізується, є джерелом дефектів виливків у вигляді плівок та газових раковин.

Небезпека неповного видалення модельної маси збільшується при наявності на поверхні кераміки різних дефектів, що формуються при неякісному виготовленні моделей або при нанесенні першого шару кераміки.

Таким чином, окрім попадання шкідливих домішок в розплав з матеріалами шихти та модельної маси, в процесі виплавляння виробів значне забруднення може бути внесено при використанні тиглів, стрижнів, кераміки форми, що виготовлені з керамічних вогнетривів (плавленого магнезиту, корунду, муліто-корунду та таке ін.), за звичайною для серійного виробництва технологією. Тому, важливе значення для запобігання від засмічення лужними металами під час плавлення та кристалізації заготовки має розробка більш хімічно – та термостабільних керамічних матеріалів. Також, як показали дослідження авторів, використання ливарних пінополістиролових (ППС) моделей, які розчинюються або випалюються, замість різних видів парафіно-стеаринових композицій, що можуть вміщувати лужні метали, сприяє значному, до 30 %, зниженню забрудненості лужними металами.

УДК 621.74.002.6:681.3

С. І. Клименко, В. С. Дорошенко

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м.Київ

e-mail: ukrdeplit15@ukr.net

ПРО ПЕРЕДУМОВИ І НАПРЯМИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Поширення цифровізації – одна з базових ознак нової економіки, що формується в сучасному світі шляхом впровадження досягнень науково-технічного прогресу. Проте, процес цифровізації у ливарному виробництві ще перебуває на ранній стадії [1]. Ступінь адаптації цифрових технологій на крупних ливарних підприємствах з огляду реалізації їхнього економічного потенціалу експертно оцінюють приблизно в 20 % [2], маючи на увазі вирішення питань автоматизації управління технологічними процесами з використанням цифрових АСУ ТП. Останні дозволяють управління процесами в замкнутому контурі (локально) за певними алгоритмами, оптимізувати планування управління та автоматично виконувати послідовності операцій (пуск та зупинку

обладнання; розрахунок та введення металевої шихти; розрахунок рецептур, дозування та змішування формувальних та стрижневих сумішей) багатостадійних періодичних ливарних процесів.

На відміну від автоматизації технологічного процесу управління самим виробництвом не автоматизовано. У перелік завдань управління виробництвом можуть входити, зокрема, підготовка та контроль виконання виробничих планів, задачі оптимізації та моніторингу виробничих режимів [3], діагностики та прогнозування дефектності продукції, контролю стану основного обладнання, питання безпеки та надійності обладнання, питання безпеки персоналу, контролю викидів тощо. Передумови створення і прообраз таких систем описано в роботі [4].

Різноманітність виробничих завдань поєднується з недостатнім впровадженням систем, що дозволяють автоматизувати їх виконання, недостатньою кількістю вихідних даних для роботи таких систем, а також неповною інтегрованістю існуючого програмного забезпечення між собою [2, 5]. Розглядаючи їх за аналогією із завданнями автоматизації технологічних процесів, на сьогодні більшість завдань управління виробництвом виконується в ручному режимі, а не в замкнутому контурі. Цифровізація націлена на те, щоб «замкнути» цей контур та забезпечити виконання таких завдань у автоматизованому режимі. Отримавши всю повноту даних про виробництво в реальному часі та в архіві історії підприємства, його фахівці зможуть застосовувати аналітичні додатки (загально-цільові чи спеціалізовані) для вироблення рішень та їх виконання. З цією метою можуть бути підключені галузеві експерти чи спеціальні комп'ютерні програми [5], які також мають доступ до необхідної інформації. Контроль рішень здійснюється на підставі даних реального часу, автоматично отриманих з АСУ ТП та інших джерел.

Інша група завдань, де цифровізація може істотно поліпшити роботи ливарного виробництва, – це завдання, що пов'язані з роботою в небезпечних зонах підприємства і на віддалених об'єктах. До таких завдань належать обходи польових операторів, контроль стану обладнання, технічне обслуговування та ремонт обладнання. Нові підходи дозволяють не лише отримати доступ до інформації, раніше недоступної для працівників, що перебувають у небезпечних зонах, а й скоротити кількість виходів у такі зони.

Важливим аспектом цифровізації в ливарному виробництві є принципова зміна бізнес методики, пов'язаної з реалізацією готової продукції споживачам. Оскільки серед великих ринкових гравців нерідко виступають держпідприємства, транснаціона-

льні компанії, великі об'єднання, багато з яких уже не один рік займаються цифровізацією в основних сферах своєї діяльності, то в найближчому майбутньому вони як замовники купуватимуть продукцію, технології, послуги передусім у тих виробників, які зможуть інтегруватися до їх цифрових платформ, бо в цьому випадку постачальники стануть найбільш вигідними та актуальними для стратегічного розвитку замовників.

Важливість ливарного виробництва в тому, що воно, як заготівельне виробництво, спрямоване на забезпечення машинобудування, приладобудування та інших галузей народного господарства литими заготовками та виробами. У найближчому майбутньому в рамках цифровізації кожен литий виріб матиме цифровий паспорт (Digital Passport), в якому зберігається весь життєвий цикл продукту. У загальному вигляді інформація про литий виріб міститиме наступне [2] :

- унікальний номер виробу, за яким відбувається ідентифікація серійного номера виробу та виводиться інформація щодо конкретного екземпляра;
- технічні характеристики виробу (паспорт виробу);
- матеріали та/або компоненти, що використано при виробництві виробу;
- перелік обладнання, на якому виготовлено виріб із зазначенням параметрів технологічного ланцюжка його виробництва, включно з безпосередніми виконавцями (змін, бригад, конкретних працівників по технологічних операціях), які здійснювали випуск виробу;
- результати випробувань, діагностики на кожному технологічному етапі виробництва виробу;
- відомості про методи та засоби контролю якості виробу із зазначенням отриманих у ході даних операцій результатів;
- відомості про дефекти, відновлювальні та технологічні ремонти по всьому ланцюжку кооперації виготовлення виробу;
- умови зберігання та експлуатації виробу;
- умови знищення, утилізації чи переробки виробу.

Такий підхід дозволить прямиий зв'язок зі споживачем, налагодить оперативний електронний документообіг продукції, виключить контрафакт і її підробку, виявить можливі причини відмови та поломки виробу у складі обладнання, дозволить прогнозувати його технічний стан і значно підвищить рівень управління якістю. Створюється робочий онлайн простір для оперативного обміну документацією від виробника та взаємодії постачальника із замовниками, а виробник отримує обсяг аналітичної інформації, при фаховому використанні якого він зможе підтримувати витрати на виробництво литого виробу на низькому (конкурентному) рівні.

Цифрова трансформація в ливарному виробництві – це об'єктивна необхідність «виживання» всієї галузі загалом, потребує застосування сучасних цифрових інструментів усіма переділами виготовлення виливків (табл.) [1, 2]. Серед галузей економіки, в яких насамперед відбуватиметься цифрова трансформація ливарного виробництва, – це автомобіле-, авіа-, судно- та корабле-, двигуно-, машинобудування (атомне, нафтогазове, важке, спеціальне), залізничний транспорт.

Вже зараз ливарним підприємствам доцільно розпочати розробку стратегії цифровізації свого виробництва, в якій доцільно врахувати такі аспекти:

- цифровізацію процесів (дані рішення мають спростити технологічні процеси виробництва, технічне обслуговування та ремонт обладнання, адміністративні процеси; сюди повинні входити мобільні рішення для робочого персоналу);

- роботизацію та автоматизацію (рішення, що дозволяють знизити або виключити участь людини в некритичних процесах, а також рішення, що покращують контроль та стабільність виробничих процесів);

- поопераційний контроль якості готової продукції (рішення, що дозволяють сформулювати систему обліку та ідентифікації готової продукції на підприємстві, розробити цифровий паспорт Digital Passport виробу);

- системне управління активами підприємства (рішення для взаємодії в єдиній інформаційній системі виробника, постачальників та споживачів);

- просунуту аналітику та штучний інтелект (рішення, пов'язані з діагностикою та прогнозуванням технологічних, виробничих та бізнес-процесів, створення інтелектуальних систем динамічного управління процесами).

Таблиця - Цифрові інструменти ливарного виробництва

Технологічні та організаційні операції	Цифрові інструменти
Підготовка виробництва, технологія ливарної форми та модельно-опочне оснащення	<ul style="list-style-type: none"> – створення комп'ютерної 3D-моделі вилівка в системах тривимірного твердотільного та поверхневого параметричного проектування [6]; – проектування ливникової системи, моделювання та оптимізація лиття на базі спеціальних програм; – комп'ютерне моделювання, віртуальні випробування, цифрові двійники (DTA);

ЛИТВО.МЕТАЛУРГІЯ. 2023

	<ul style="list-style-type: none"> – підготовка комплексу креслень ливарної технології з урахуванням САD-систем; – адитивні технології (АТ); – технологічне проектування з урахуванням САМ-систем; – застосування верстатів з ЧПУ.
Процеси формоутворення та виготовлення стрижнів	<ul style="list-style-type: none"> – роботизована автоматизація процесів (RPA); – АФЛ та стрижневі автомати.
Шихтовка, плавка металу та заливання ливарних форм	<ul style="list-style-type: none"> – роботизована автоматизація процесів (RPA); – аналітика даних у ланцюгах поставок; – "розумний" склад (SW).
Фінішні операції для виливків (охолодження, вибивання, обрубка та зачистка, усунення дефектів, термообробка)	<ul style="list-style-type: none"> – роботизована автоматизація процесів (RPA); – комп'ютерний зір (CV); – дистанційне цифрове керування (RCU).
Обслуговування та ремонт	<ul style="list-style-type: none"> - доповнена реальність (AR); - Віртуальний помічник (VH).
Складування, зберігання, закупівля та реалізація, утилізація та рециклінг	<ul style="list-style-type: none"> – "розумний" склад (SW); – керування життєвим циклом виробу або продукції (Smart Design).
Контроль якості та оптимізація виробництва	<ul style="list-style-type: none"> – цифровий поопераційний контроль виробництва продукції; – цифровий паспорт виробу (DPP); – технології <i>block chain</i> – рекомендаційні та інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (DSS) [5]; – просунута бізнес-аналітика (BI); – штучний інтелект та машинне навчання (AI&ML); – цифрові бізнес-сервіси та програми для управління та моніторингу виробничими та іншими процесами.

Таким чином, технологічним критерієм успішності цифровізації ливарного виробництва буде випуск номенклатури виливків з мінімальним рівнем дефектності, комерційним критерієм – випуск номенклатури виливків, що користуються попитом на ринку (деталі машин та механізмів) з мінімальною собівартістю, яка визначається технологічним рівнем підготовки виробництва та його реалізацією і, як наслідок, низькими витратами та оптимальною якістю форм, металу та виливків, переходом від ревізійної до постійної оптимізації бізнес-процесів. Це вплине на всі параметри підприємства: економічну ефективність виробництва (продуктивність, експлуатаційні витрати); надійність (експлуатаційну готовність); безпеку (кількість інцидентів); відповідність законодавчим нормам з екології.

Список літератури

1. Дорошенко В. С. Методи цифровізації ливарно-металургійного виробництва: віртуальний інжиніринг, цифровий двійник, адитивні технології // *Метал і лиття України*. – 2021. – № 3. – С. 62-66. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.03.062>.
2. Князев С. В., Куценко А. И., Усольцев А. А., Козырев Н. А., Куценко А. А. Перспективы и направления цифровой трансформации в литейном производстве. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2023. – № 2. – С. 140-147. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-140-147>.
3. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Передумови створення цифрового двійника технологічного процесу лиття за моделями, що газифікуються, за даними моніторингу ливарного цеху // *Процеси лиття*. – 2020. – № 4. – С. 42 - 52.
4. Шалевская И. А., Богдан А. В., Шинский В. О. Мониторинг и контроль параметров при изготовлении литейных пенополистироловых моделей // *Процессы литья*. – 2015. – № 3. – С. 42-47.
5. O. V. Tokova, V. S. Doroshenko, O. B. Yanchenko. Computer systems of thermal analysis for monitoring of foundry and metallurgical processes // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – 2022. – № 2. – С. 86-93. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-86-93>.
6. Дорошенко В. С. Топологічна оптимізація конструкцій виливків при адитивному виробництві з застосуванням цифрового двійника // [Процеси лиття](#). – 2020. – № 4. – С. 53-62.

С. І. Клименко, В. С. Дорошенко

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

e-mail: ukrdeplit15@ukr.net

ПРИКЛАДИ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ, В КИТАЇ

В 2021 р. в Китаї було вироблено 54,05 млн. т металевих виливків, що на 4,0 % більше ніж у 2020 р. і, по суті, складає близько половини виливків світу. Про досягнення Китаю у литті за моделями, що газифікуються (ЛГМ), розглянемо у цих тезах. В технічних публікаціях відмічається, що спосіб ЛГМ має безліч переваг у порівнянні з традиційними технологіями лиття, тому в Китаї та за кордоном цей метод був проголошений ливарниками «Ливарною технологією XXI століття» [1].

У Китаї державою було підтримано розвиток цієї технології, ЛГМ набуло значного масштабу і стало важливою складовою ливарної промисловості, питома вага виробленої продукції якої в ливарній галузі зростає. ЛГМ стала однією з поширених високих технологій, що використовуються для модернізації традиційних ливарних заводів і організації нових [1].

Нині технологію ЛГМ в Китаї та Японії використовують для виробництва виливків з таких сплавів: алюмінієвих, магнієвих, мідних; із сірого чавуну, чи високоміцного чавуну, спеціального чавуну (чавуну з високим вмістом хрому, антифрикційного чавуну, зносостійкого чавуну, корозійностійкого чавуну); зі звичайної вуглецевої сталі, середньо- і високовуглецевої низьколегованої антифрикційної сталі, спеціальної ливарної сталі (з великим вмістом марганцю та сталі корозійностійкої).

Типи виливків, що виготовляються [1]:

- антифрикційні виливки (дрібні кулі, підкладки з марганцевистої сталі, екскаваторні зуби, виливки з бейнітного чавуну тощо);
- вогнетривкі виливки (пічні колосники з жароміцної сталі та чавуну, термічні опалювальні піддони, корпуси та рами для різних матеріалів тощо);
- труби (з сірого чи високоміцного чавуну, а також з чавуну з високим вмістом алюмінію, фасонні частини труб);
- клапани (клапани, в тому числі з високоміцного чавуну, штуцери зі сталі Ст25Л, Ст35Л);
- інженерні механічні деталі (шестерні, зубчасті рейки, деталі зі сталі для вилкових навантажувачів);
- корпуси (коробки передач, диференціалу, редуктора, блоку двигуна, пожежних колонок, корпусів боєприпасів тощо);
- виливки для гальмівної системи автомобілів (гальмівні апарати, гальмівні диски);
- колінчасті вали (компресора,