

В.І. Альохін, А.П. Марченко, С.С. Кравченко, А.Г. Лал

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДИК ІНДУСТРІЇ 4.0 У ВИРОБНИЦТВІ ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ ДВЗ, АЛГОРИТМ ЇХ КОМПЛЕКСНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

У роботі представлено результати досліджень по впровадженню технологічних методик Індустрії 4.0 у виробництво литих деталей ДВЗ, які є продовженням питання зміни стратегій щодо використання PLM систем у контексті досягнення цілей сталого розвитку. З огляду на те, що ливарна промисловість є ключовим постачальником металевих компонентів для автомобілебудування та енергетичного сектору, основну увагу приділено комплексному застосуванню комп'ютерного моделювання, адитивних технологій та управління мікроструктурою сплавів, які вважаються важливими щодо забезпечення сталого розвитку в цій галузі. Зазначено, що впровадження запропонованого підходу дозволяє мінімізувати відходи, покращити механічні характеристики деталей, підвищити енергоефективність виробничих процесів та скоротити тривалість життєвого циклу розробки нових конструкцій. Дослідження даної тематики відкривають нові перспективи щодо реалізації принципів циркулярної економіки та створення більш екологічно відповідального виробництва у двигунобудуванні. Виконано моделювання технологічних ливарних процесів виготовлення литої деталі циліндра двотактного двигуна з метою аналізу особливостей кристалізації та фазових перетворень у процесі охолодження виливка. В результаті чисельного моделювання були отримані дані щодо заповнення форми, розподілу температурних полів, послідовності охолодження та затвердіння, а також проаналізовано кінетику фазових переходів з визначенням місць можливої появи дефектів газосушкового характеру. Управління зазначеними процесами надало можливість запобігти нерівномірності зростання кристалів у перехідних масивах виливка та подальшого впливу на механічні властивості деталі при експлуатації. Зроблено висновки щодо використання моделювання в рамках PLM-систем для автоматизації процесів удосконалення технологій лиття. Розглянуто питання інтеграції адитивного виробництва у технологічні етапи формоутворення при виготовленні литих деталей ДВЗ. Встановлено, що впровадження цих технологій у двигунобудуванні дозволить виготовляти комплектуючі із оптимізованим дизайном, який буде відповідати вимогам сталого розвитку. У якості модельного оснащення створено надруковану литу деталь циліндру та зазначені основні параметри 3D-друку. Зазначені певні напрямки подальших досліджень по використанню адитивних технологій. Висвітлено питання підвищення рівня управління мікроструктурою сплавів з використанням машинного навчання та штучного інтелекту, як перспективного для подальших досліджень у рамках сталого виробництва. Запропоновано принципові кроки методики комплексного застосування технологій Індустрії 4.0 у сталому виробництві литих деталей ДВЗ. Розроблено алгоритм безперервної взаємодії між основними етапами виробництва, у центрі якого знаходиться концепція цифрового двійника як базової одиниці управління. Зроблено висновки, що запропонований підхід дозволяє системно вдосконалювати технологічні процеси, забезпечуючи адаптацію виробництва до викликів сталого розвитку за допомогою комплексного застосування технологій Індустрії 4.0 та створюючи передумови для переходу до Індустрії 5.0. **Ключові слова:** технології Індустрії 4.0; литі деталі ДВЗ; циліндр двотактного двигуна; проектування; комп'ютерне моделювання; адитивні технології; управління мікроструктурою сплавів.

Вступ

Сучасне виробництво литих деталей ДВЗ перебуває на етапі фундаментальних змін, обумовлених необхідністю підвищення ефективності виробничих процесів, зменшення негативного впливу на довкілля та забезпечення раціонального використання ресурсів. Сьогодні не кращі часи для ливарної промисловості, яка є ключовою у формуванні виробничого потенціалу автомобілебудування та перебуває під тиском потреб глобальної трансформації, згідно з цілями сталого розвитку, тому актуальним завданням є створення нової парадигми впровадження сучасних технологій у виробництво литих деталей ДВЗ. В першу чергу впровадження технологій Індустрії 4.0, зокрема комп'ютерного моделювання, адитивного виробництва та управління мікроструктурою сплавів, як основних складових для формування інноваційно-орієнтованої, ресурсоефективної та

екологічно відповідальної виробничої системи. Реалізація даного підходу спрямована на створення високотехнологічних виробничих середовищ (інтелектуальних підприємств), у межах яких усі стадії життєвого циклу продукції, від концептуального проектування до виробництва, експлуатації та сервісного обслуговування інтегруються в єдиний цифровий ланцюг, хмарно пов'язаний через інформаційну платформу. Таке цифрове об'єднання забезпечує перехід від традиційного серійного виробництва до моделі масової кастомізації, що передбачає гнучке адаптування до індивідуальних запитів замовників без суттєвого збільшення витрат на виробництво.

Комп'ютерне моделювання відіграє вирішальну роль на етапі віртуального проектування литих компонентів, надаючи можливість створення високоточних цифрових двійників, які забезпечують комплексний аналіз

термічних, механічних та технологічних характеристик деталі ще до її фізичного виготовлення, а потім і в умовах експлуатації. Використання методів чисельного моделювання, зокрема методу кінцевих елементів (FEM) та методу моделювання гідродинамічних потоків (CFD), надає можливість управління технологічними параметрами для покращення мікроструктури, зниження ризиків виникнення ливарних дефектів, мінімізації кількості відходів та скорочення часу розробки нових конструкцій литих деталей ДВЗ [1–3].

Аддитивні технології, як складова Індустрії 4.0, відкривають нові можливості для методів формоутворення литих деталей складної геометрії, реалізація яких за допомогою традиційних методів лиття є неможливою або економічно не вигідною. Технології 3D-друку використовуються, як для швидкого створення функціональних прототипів, так і для виготовлення високоточних ливарних форм та оснащення з оптимізованою структурою. Раціональне поєднання аддитивного виробництва з традиційними технологіями литва формує нові підходи до виробництва литих деталей ДВЗ, орієнтованого на сталий розвиток, з підвищеним рівнем адаптивності та функціональності.

Не менш важливим чинником є підвищення рівня контролю над мікроструктурою сплавів, що прямо впливає на експлуатаційні властивості литих деталей ДВЗ. Управління мікроструктурою сплавів, легування та термічна обробка забезпечують

формування необхідних характеристик сплавів, таких як міцність, жаростійкість, зносостійкість тощо. Застосування сучасних підходів до цифрового прогнозування мікроструктури сплавів, зокрема моделей на основі методів машинного навчання, комбінованих із чисельним моделюванням надало змогу здійснити оптимізацію термічних режимів та забезпечувати задану якість готової деталі на ранніх стадіях проектування.

Таким чином, комплексне застосування зазначених технологій у виробництві литих деталей ДВЗ формує основу для переходу до сталого виробництва, а їх комплексне поєднання дозволяє не лише зменшити обсяг виробничих відходів, підвищити енергоефективність процесів і поліпшити якість виробів, але й забезпечити скорочення життєвого циклу розробки та виведення нових продуктів на ринок. Внаслідок цього створюються умови для реалізації концепції циркулярної економіки, переходу до екологічно збалансованого виробництва та формування конкурентних переваг у галузі двигунобудування в умовах нових викликів глобального сталого розвитку.

Узагальнену схему етапів застосування ключових технологічних методик Індустрії 4.0, зазначених вище, завершальним етапом якої є формування методики їх комплексного застосування у процесі виробництва литих деталей ДВЗ, представлено на Рис. 1.



Рис. 1. Схема застосування технологічних методик Індустрії 4.0 у виробництві литих деталей ДВЗ

Моделювання ливарних процесів та визначення шляхів управління кристалізацією і фазовими перетвореннями виливків

Одним із ключових етапів формування ефективного технологічного процесу виготовлення литих деталей є інженерне моделювання ливарних процесів з використанням сучасних програмних засобів, що забезпечують функціональне середовище для високоточного моделювання фізико-технологічних процесів. Ці засоби характеризуються інтерактивністю, доступністю інтерфейсу користувача та забезпечують змогу на ранніх стадіях проектування визначити критичні ділянки, потенційно схильні до дефектів, а також аналізувати гідродинамічні та теплові параметри процесу заповнення форми та кристалізації металу. У практичному аспекті застосування подібного програмного забезпечення дозволяє суттєво знизити витрати на фізичне прототипування, скоротити цикл розробки технології, та уникнути переробок на етапах виготовлення.

Запропонована концепція охоплює впровадження комплексу заходів, спрямованих на зниження екологічного впливу виробництва та раціоналізацію використання ресурсів без втрати якісних і продуктивних характеристик литих деталей. Моделювання ливарних процесів, що протікають при виробництві литих деталей ДВЗ, проводилося відповідно до цілей та завдань дослідження, а саме:

- локалізація ділянок потенційного утворення газоусадкових дефектів, визначення їх імовірної геометрії та розташування;
- аналіз термодинаміки фазових перетворень у процесі кристалізації та охолодження виливка у формі;
- формування рекомендацій щодо параметричного управління структурою сплаву.

Моделювання здійснювалося, відповідно до послідовності, запропонованої у [4] і охоплювало наступні етапи:

- задання початкових умов моделювання;
- створення 3D-моделі виливка з урахуванням конструктивних особливостей;
- комп'ютерно-інтегроване моделювання гідродинамічних та теплових процесів заповнення форми та кристалізації;
- аналіз результатів моделювання;
- аналіз характеру заповнення форми розплавом та розташування ливарних дефектів;
- розробка рекомендацій з удосконалення технології за результатами комп'ютерно-інтегрованого моделювання.

Вибір початкових параметрів моделювання ливарних процесів здійснювався на основі геометричних характеристик литої деталі циліндра двотактного двигуна, зокрема конфігурації, товщини та розміщення ребер охолодження (Рис. 2).

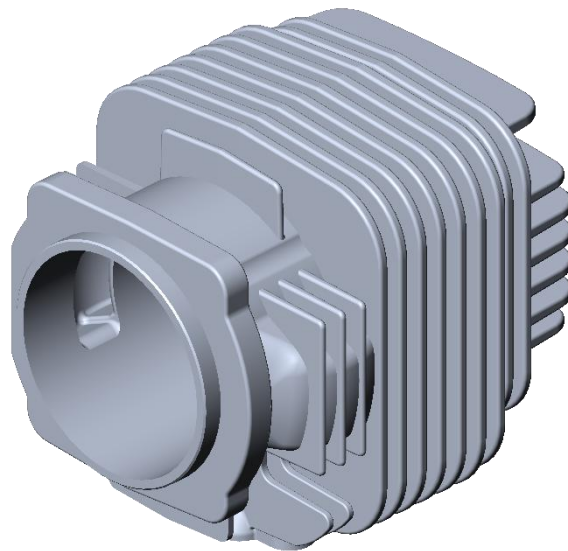


Рис. 2. 3D модель виливка циліндра

За допомогою вбудованого модуля у розрахунковому програмному забезпеченні, 3D-модель циліндра була конвертована у кінцево-елементну модель з загальними параметрами (Рис 3):

- розмір елементу — 1,8 мм, при переважній середній товщині литої деталі 3,9 мм;
- кількість елементів — 170000.

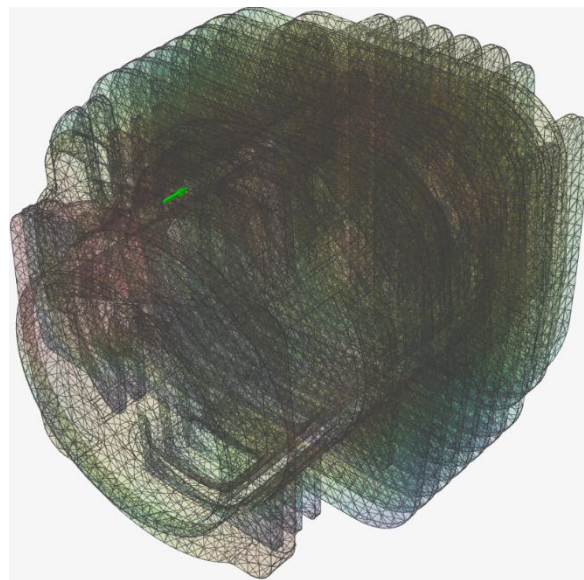


Рис. 3. Кінцево-елементна модель виливка циліндра

У якості початкових та граничних умов для інженерного моделювання було використано наступні:

- Матеріал виливка — АК5М2 (ДСТУ2839-94);
- Матеріал форми — Alfa-set форма;
- Роздільне покриття форми — Покриття на основі графітової пудри (товщина шару не більше 1мм);
- Початкова температура розплаву — 710 °С;
- Початкова температура форми — 25 °С;
- Об'ємна швидкість заповнення форми — 1,7 кг/сек.

Результати, що були отримані у ході інженерного моделювання графічно наведено у вигляді заповнення форми розплавом, спрямованості кристалізації при охолодженні (перехід від рідкої до твердої фази) та відображення розташування газоусадкових дефектів.

Характер заповнення форми відіграє важливу роль у створенні сприятливих умов для спрямованої кристалізації. Досліджувані нами результати моделювання заповнення форми показали, що швидкість руху розплаву у середньому становила близько $V=0,5$ м/с, за рахунок чого досягається ламінарний характер руху розплаву. На Рис. 4

визначено характер руху розплаву у формі, де розподіл швидкостей визначається згідно кольоровому маркуванню та відповідних чисельних значень, здійснюється спокійно без зустрічних потоків.

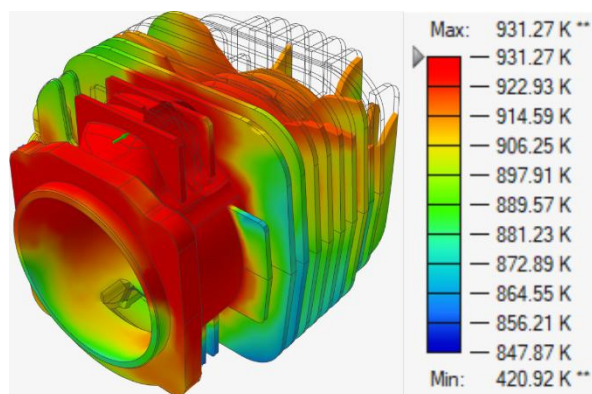


Рис. 5. Характер розподілу температурних полів при кристалізації виливка

У результаті аналізу виявлено, що рух розплаву у формі можна вважати таким, що задовольняє вимоги [5-7], а саме:

- проходячи через тонкі елементи виливка, розплав не набуває турбулентного характеру руху,
- повністю заповнює ребра охолодження.

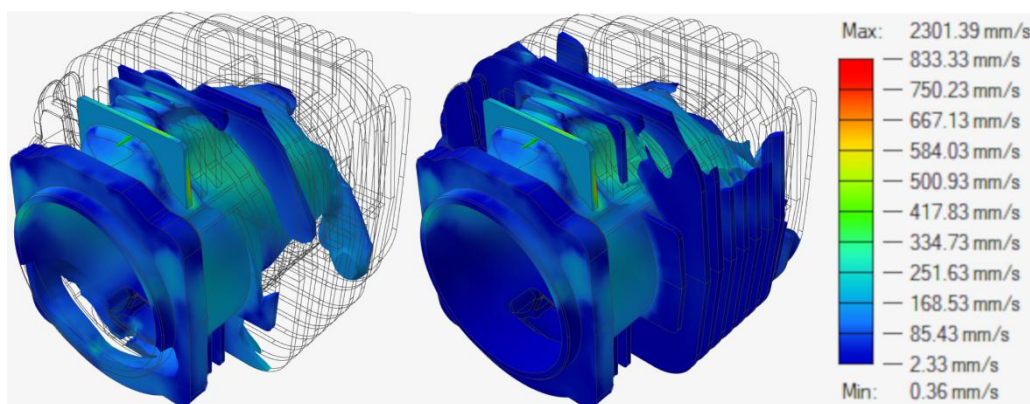


Рис. 4. Характер заповнення та швидкість руху розплаву у формі

За результатами чисельного моделювання процесу охолодження виливка, а також на основі подальшого аналізу розподілу температурних полів було встановлено характер існування рідкої, напівтвердої та твердої фаз у тілі виливка, що дало змогу детально оцінити послідовність охолодження та фазового затвердіння (Рис. 5). З'ясувалось, що процес твердіння не є рівномірним: спостерігається асиметричність температурних градієнтів, що призводить до затримки кристалізації в окремих ділянках виливка.

Такий характер охолодження свідчить про наявність критичних ділянок затвердіння, де останні об'єми рідкого металу ізольовані від живильників, що безпосередньо вказує на потребу корекції технологічних параметрів лиття або геометрії живильної системи, для запобігання можливої появи дефектів газоусадкового характеру [6, 10]. Аналіз конструкції ребер підтвердив їх ефективність, за рахунок виводу тепла через них прискорювалось локальне твердіння, проте це вказало на доцільність впровадження додаткових охолоджувачів або зміни

теплоізоляційних характеристик форми у ділянках з підвищеною температурною інерційністю.

Для підтвердження вищезазначених висновків виконано аналіз зон ізоляції розплаву при переході з рідкої в твердо-рідку та тверду фази, згідно з Рис. 6, де графічно наведено ізоляцію рідкої фази, за рахунок зменшення критичного значення проникності розплаву у зазначених зонах, відповідно до теорії перколяції [8-9].

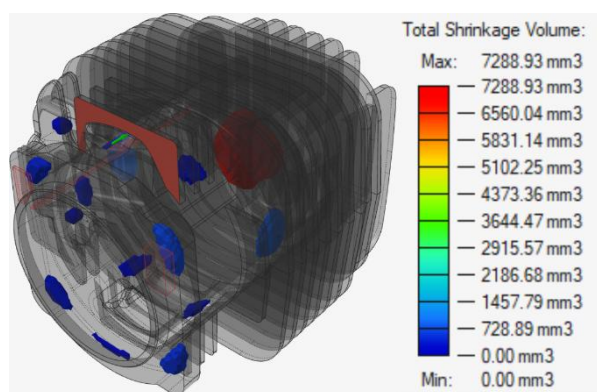


Рис. 6. Локації розташування газоусадкових дефектів у виливку циліндра

Вказані локації розташування дефектів та їх ймовірні об'єми дозволили остаточно визначити проблемні місця у виливку циліндра. Таким чином, результати моделювання охолодження виливка стали основою для формування рекомендацій щодо корегування геометрії ливниково-живильної системи та технологічних режимів заливання й охолодження, що у перспективі дозволяє зменшити кількість внутрішніх дефектів, покращити однорідність мікроструктури та забезпечити стабільні механічні характеристики готової деталі.

Інженерне моделювання ливарних процесів з використанням сучасних програмних засобів є важливим інструментом для забезпечення високої якості литих деталей, мінімізації дефектів та підвищення технологічної ефективності виробництва.

Інженерне моделювання теплових і гідродинамічних процесів ливарного виробництва циліндра є важливим інструментом для підвищення якості та ефективності. На основі проведеного комп'ютерного моделювання отримано наступні ключові висновки:

1. Формування дефектів у зоні охолоджувальних ребер. У результаті моделювання процесу заповнення форми розплавленим металом встановлено, що в місцях охолоджувальних ребер виливка циліндра можуть виникнути дефекти форми. Це обумовлено локальними змінами

швидкості потоку та нерівномірністю тепловідводу, тому процес формоутворення потребує більшої уваги.

2. Проблеми газовідведення та утворення ливарних несплавень в складних зонах форми. Відведення газів з форми у місцях де утворюються ребра потребують додаткової уваги, щоб уникнути газових раковин на поверхні виливка.

3. Аналіз динаміки заповнення форми продемонстрував, що конструкція ливникової системи забезпечує рівномірний розподіл розплаву по об'єму виливка. Такий результат підтверджує адекватність її конфігурації.

4. Результати визначення динаміки охолодження виливка дозволили ідентифікувати зони ізоляції рідкої фази та зробити висновки щодо виявлення дефектів газоусадкового характеру. Ці ділянки вимагають корекції геометрії виливка або конструкції ливникової системи для забезпечення ефективного живлення під час затвердіння.

5. Використання інженерного моделювання дозволило ідентифікувати критичні зони та зробити коригувальні рекомендації без проведення дорогих фізичних експериментів, що суттєво скоротило цикл розробки та зменшило кількість відходів у серійному виробництві. Застосування цифрового моделювання в межах PLM-систем дало змогу автоматизувати процес удосконалення технологічних рішень та забезпечити їх простежуваність тим самим покращити загальний рівень управління якістю у виробництві.

Адитивне виробництво (Additive Manufacturing, AM) в контексті виготовлення ливарного оснащення

Сучасні технології адитивного виробництва (AM) становлять один із ключових напрямів розвитку інноваційного інжинірингу у промисловому секторі, зокрема у виробництві литих деталей ДВЗ. Ця технологія забезпечує реалізацію геометрично складних конструкцій, які є недосяжними або економічно недоцільними для реалізації традиційними методами виготовлення, такими як механічна обробка чи класичне прототипування (Rapid prototyping).

Попри суттєві переваги, зокрема гнучкість дизайну, масову кастомізацію, оптимізацію ваги деталей та скорочення термінів розробки, технологія AM все ще обмежена тривалістю виробничого циклу та меншою продуктивністю при серійному виробництві, що дещо стримує її застосування у масовому виготовленні литих компонентів.

Найбільший потенціал AM у ливарному виробництві полягає у створенні високоточних

модельних комплектів, що застосовуються для виготовлення форм, зокрема у дрібносерійному та дослідному виробництві. Інтеграція технології 3D-друку у ливарні процеси дозволяє підвищити точність формоутворення, скоротити час виготовлення оснащення, зменшити витрати на виготовлення складних форм і значно підвищити екологічну ефективність завдяки зниженню матеріаломісткості. У цьому контексті АМ стає не альтернативою, а доповненням до традиційних технологій, розширюючи їх функціональні можливості.

Серед основних технологій 3D-друку, які використовуються для виробництва модельного оснащення, слід виділити селективне лазерне спікання (SLS), моделювання наплавленням (FDM) та стереолітографію (SLA). Технологія SLS забезпечує високоточне спікання порошкових матеріалів (пластиків, металів, кераміки) за допомогою лазерного випромінювання. У випадку FDM, термопластичний філамент розплавляється у соплі та накладається шарами, формуючи кінцеву геометрію об'єкта. SLA реалізує формування об'єкта шляхом поетапного затвердіння фотополімерної смоли під дією УФ-лазера, що забезпечує високу точність і якість поверхні.

Застосування АМ у технологічному процесі виготовлення литих деталей ДВЗ має низку стратегічних переваг, таких як зменшення маси, раціоналізація споживання матеріалів і зменшення кількості операцій вторинної обробки, що відповідає вимогам сталого розвитку. Тому компанія General Motors однією з перших впровадила 3D-друк у прототипуванні складних вузлів, що дозволило значно скоротити цикл розробки та зменшити витрати [11]. Але разом з тим, як зазначено у [12-13] 3D-друк стає більш доповненням до виробничих процесів ніж революційним перетворенням.

У межах даного дослідження було проаналізовано застосування АМ для створення модельного оснащення циліндра двотактного двигуна. З огляду на складність геометрії виливка, необхідність високої точності та короткі терміни виробництва, було обрано FDM-технологію як найбільш доцільну на даному етапі. Для друку було використано принтер «Bambu Lab X1» з робочим об'ємом 256×256×256 мм і філамент PLA Basic. Встановлена товщина шару — 0,2 мм, внутрішнє заповнення — 15%, що відповідає вимогам до забезпечення мінімального використання матеріалу за відсутності потреби у високій механічній міцності.

Особливу увагу було приділено контролю

якості друку тонких ребер охолодження товщиною 3 мм, які є критичними з точки зору формування мікроструктури при литві. Крім того, враховано коефіцієнт усадки PLA після затвердіння (0,8%), що було компенсовано у цифровій 3D-моделі для досягнення точності геометрії виливка.

Надруковану модель циліндра, що забезпечує повноцінну придатність для подальшого застосування у формоутворенні, за рахунок високої якості поверхні, відсутніми макроскопічними дефектами та задовільною точністю, представлено на Рис. 7.

Важливою складовою процесу виготовлення 3D-друкованої модельної оснастки є верифікація геометричних параметрів надрукованої деталі з CAD-моделлю. Така перевірка забезпечує точність відтворення проектних розмірів і геометричних допусків, що є критичним для подальших етапів ливарного виробництва. Втім, зазначене питання має високу технічну складність, включає застосування координатно-вимірювальних машин, цифрової обробки хмар точок, і тому потребує окремого поглибленого аналізу, що виходить за рамки цього дослідження.



Рис. 7. Надрукована модель циліндра

Сучасна промисловість дедалі активніше інтегрує технології адитивного виробництва на всіх етапах життєвого циклу продукції. Зокрема, автомобільна та енергетична галузі демонструють особливу зацікавленість у впровадженні АМ як ключового інструменту для реалізації стратегій сталого розвитку та інноваційного оновлення виробництва.

Таким чином, сучасні досягнення в галузі АМ трансформують її з допоміжного інструменту розробки у стратегічну технологію, що здатна

радикально змінити парадигму виробничих процесів у контексті цифровізації ливарного виробництва, забезпечуючи відповідність вимогам сталого розвитку, а також слугуючи надійною технологічною платформою для подальшої інтеграції у концепції «розумного» виробництва у рамках Індустрії 4.0.

Шляхи підвищення рівня дослідження та управління мікроструктурою сплавів у контексті сталого виробництва

Сучасні підходи до дослідження мікроструктурних характеристик ливарних сплавів стрімко еволюціонують під впливом технологій машинного навчання (МН) та штучного інтелекту (ШІ), які докорінно змінюють традиційні методи аналізу. У той час як оптична і електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз і диференціально-термічний аналіз залишаються поширеними засобами дослідження, їх застосування значною мірою залежить від експертної інтерпретації результатів, що часто супроводжується суб'єктивністю та значними часовими затратами. Натомість, використання МН і ШІ дає змогу суттєво підвищити об'єктивність досліджень, автоматизувати процеси морфологічної оцінки та класифікації структур, збільшити точність прогнозів та сприяти ефективній оптимізації хімічного складу сплавів і термомеханічних режимів їх обробки.

Щоб окреслити критичні можливості на шляху до більш стійких конструкційних сплавів, треба зазначити прямі ефекти сталого розвитку для різних етапів ланцюжка створення вартості, включаючи первинне виробництво зі зниженим викидом CO₂, вторинне виробництво шляхом переробки та більш ефективне виробництво. У цьому контексті перспективним напрямком є розробка сплавів, що орієнтовані на ефективну переробку.

Інша стратегія зосереджена на покращенні довговічності сплаву за рахунок захисту від корозії, стійкості до пошкоджень та ремонтпридатності для тривалого використання продукту, що можливо досягти лише з розробкою і впровадженням нових матеріалознавчих технологій.

Актуальним також є вектор досліджень, пов'язаний із розробкою конструкційних сплавів, орієнтованих на підвищення енергоефективності готових виробів. Це передбачає створення матеріалів, які, за рахунок покращеного співвідношення маса-міцність, сприятимуть зменшенню загальної маси виробів і, відповідно, зниженню споживання енергії під час експлуатації, не поступаючись при цьому чинним вимогам до безпеки та надійності [14].

Впровадження чисельних методів у виробництві для аналізу матеріалів стає невід'ємною частиною розвитку і впровадження технологій Індустрії 4.0, серед яких можна виділити такі: аналіз будови матеріалів на різних масштабних рівнях (мікроскопія), визначення хімічного складу, різних фізичних властивостей, фізико-механічних характеристик, моделювання методом кінцевих елементів структурно-механічних змін тощо [15]. Кожен із цих методів досліджує окремий аспект структури матеріалу і зазвичай не може повністю замінити інші. Для отримання повної інформації про будову та властивості матеріалів необхідно застосовувати комплекс структурних аналізів, що доповнюють один одного. Найбільшу групу складають методи, які базуються на взаємодії матеріалів із різними типами випромінювання.

Подальша перспектива розвитку досліджень у цій галузі пов'язана із повною автоматизацією процесу аналізу матеріалів та синтезу сплавів на основі принципів цифрового матеріалознавства. Завдяки використанню глибоких нейронних мереж, методів підкріпленого навчання та інтеграції з системами Інтернету речей (IoT), очікується значне прискорення інноваційного циклу розробки нових матеріалів, здатних відповідати зростаючим вимогам сталого виробництва. Варто зазначити, що питання розробки таких цифрових інструментів вимагає окремого, більш глибокого дослідження, яке виходить за межі цієї роботи та буде розглянуте в наступних публікаціях.

Створення методики комплексного застосування технологій Індустрії 4.0 у процесі виробництва литих деталей ДВЗ для досягнення цілей сталого розвитку

Сучасне виробництво литих деталей ДВЗ стрімко змінюється під впливом технологій Індустрії 4.0, важливими інструментами для реалізації цього процесу є моделювання, адитивні технології (3D-друк) та управління мікроструктурою сплавів. Поєднання цих підходів дозволяє оптимізувати процес виробництва, покращити якість деталей і знизити негативний вплив на довкілля.

Метою розробленої методики є формування інтегрованого підходу до проектування та реалізації процесів виготовлення литих деталей ДВЗ, що ґрунтується на використанні цифрових технологій у сфері створення ливарної оснастки й управління структурою сплавів з метою досягнення заданих експлуатаційних властивостей готових деталей. Реалізація запропонованої методики забезпечується за рахунок:

- підвищення якості шляхом зменшення кількості дефектів завдяки вдосконаленню параметрів виробничих процесів;
- покращення економічної ефективності за рахунок скорочення витрат на матеріали і енергію;
- зміцнення екологічної сталості завдяки скороченню шкідливих викидів і більш раціональному використанню ресурсів;
- впровадження інновацій у технологію виробництва через можливість реалізації складних геометричних форм і комбінування різномірних матеріалів.

Алгоритм комплексного застосування технологічних методик Індустрії 4.0 у виробництві литих деталей ДВЗ представлено на Рис. 8.

Схема наочно демонструє безперервну взаємодію між усіма етапами виробничого циклу, а також центральну роль цифрового двійника як ядра інтеграційної цифрової інфраструктури. Цифровий двійник не лише акумулює та зберігає усі релевантні дані, але й забезпечує двосторонній зв'язок із кожним етапом процесу з метою їхньої оптимізації.

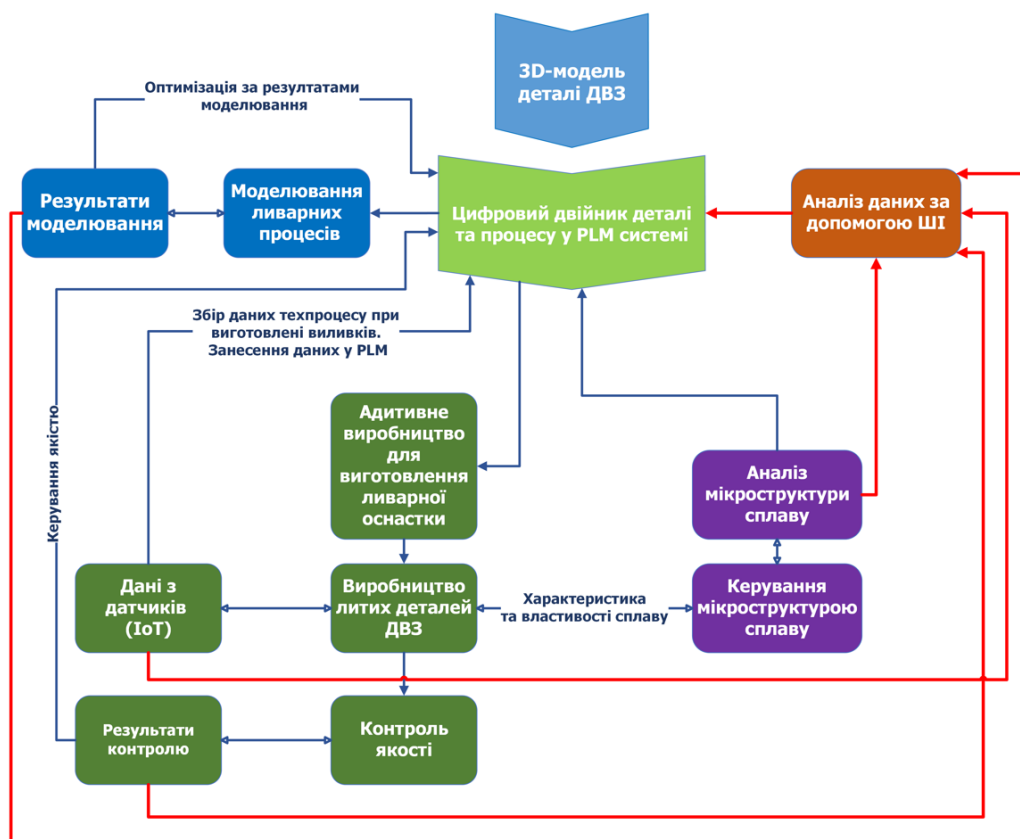


Рис. 8. Алгоритм комплексного застосування технологічних методик Індустрії 4.0 у процеси виробництва литих деталей ДВЗ

На початковому етапі 3D-модель деталі ДВЗ інтегрується у PLM-систему у формі цифрового двійника, який виступає як центральний хаб для зберігання інформації про геометрію, матеріальні властивості та параметри виготовлення. Під час моделювання ливарних процесів, цифровий двійник використовується для віртуальної репрезентації фізичних процесів з метою прогнозування дефектів і визначення оптимальних технологічних режимів. Отримані результати зберігаються в цифровому двійнику, доповнюючи його даними для подальшого вдосконалення. Адитивне виробництво при виготовленні ливарного оснащення використовує дані з цифрового двійника для створення ливарних моделей,

форм або стрижнів. Протягом реального виробництва IoT-сенсори здійснюють безперервний моніторинг технологічних параметрів та передають ці дані назад у цифровий двійник, де вони використовуються для верифікації та аналізу у режимі реального часу. На етапі контролю якості, виготовлені деталі перевіряються, а дані про їхні характеристики та виявлені дефекти надходять до цифрового двійника. Застосування аналітики великих даних і методів штучного інтелекту дозволяє на основі інформації, накопиченої в цифровому двійнику, здійснювати прогнозування потенційних проблем, виявляти приховані закономірності та надавати рекомендації щодо покращення технологічних режимів, які також інтегруються назад у систему. Крім того, цифровий

двійник забезпечує можливість тестування нових матеріалів із покращеними властивостями шляхом віртуального моделювання їхньої поведінки в умовах реального виробництва. Дані щодо таких матеріалів і їхніх характеристик також включаються в цифрову модель для врахування в наступних циклах проєктування й виготовлення.

Висновки

Запропонований підхід демонструє нову парадигму впровадження сучасних технологій, що дозволяє виробникам не лише вдосконалювати процеси, але й адаптуватися до сучасних викликів сталого розвитку, інтегруючи досягнення Індустрії 4.0. Комплексне застосування технологій Індустрії 4.0 у виробництві литих деталей ДВЗ відкриває нові можливості для підвищення ефективності, якості та екологічної стійкості виробничих процесів. Впровадження комп'ютерного моделювання, адитивних технологій та управління мікроструктурою сплавів сприяє не лише оптимізації ресурсоспоживання, а й мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Комп'ютерне моделювання значно підвищує точність проєктування литих деталей завдяки використанню цифрових двійників та чисельних методів аналізу, що дозволяє заздалегідь прогнозувати механічні властивості деталей, а оптимізація ливарних процесів забезпечує скорочення витрат матеріалів та енергії для забезпечення сталості виробництва. Адитивні технології дозволяють використовувати їх при виготовленні форм та прототипів, що сприяє зниженню матеріальних витрат, скороченню часу на розробку нових деталей та підвищенню їхньої експлуатаційної ефективності. Поєднання традиційного лиття з адитивними методами сприяє впровадженню безвідходних та низьковуглецевих технологій, що відповідає принципам циркулярної економіки. Управління мікроструктурою сплавів є критичним фактором у досягненні оптимальних фізико-механічних властивостей деталей. Контроль над кристалізацією, фазовими перетвореннями, легуванням та термічною обробкою дозволяє отримати матеріали з підвищеною міцністю, зносостійкістю та термостійкістю.

Загалом, впровадження запропонованого комплексного підходу у виробництві литих деталей ДВЗ є ключовим кроком у забезпеченні сталості та призводить до:

- зменшенню споживання природних ресурсів та скороченню кількості відходів;
- оптимізації виробничих процесів та скорочення витрати на матеріали та енергію;

- підвищенню якості і довговічності деталей, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат;

- інтеграції принципів циркулярної економіки та підвищення екологічної відповідальності підприємств.

У перспективі, подальше вдосконалення технологій Індустрії 4.0 та перехід до Індустрії 5.0, орієнтованої на людину, дозволить досягти ще більшої гнучкості та ефективності виробничих процесів. Використання штучного інтелекту, IoT та автономних систем моніторингу створить самооптимізовані виробничі середовища, що відповідатимуть високим стандартам сталого розвитку та економічної ефективності.

Дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2023.04/0124 «Поліпшення тактико-технічних характеристик вітчизняних БПЛА шляхом розробки авіаційного двигуна з перспективними показниками питомої потужності».

The research was carried out with the grant support of the National Research Foundation of Ukraine within the framework of the project 2023.04/0124 "Improving the tactical and technical characteristics of domestic UAVs by developing an aircraft engine with promising specific power indicators."

Список літератури:

1. Riedel E. Foundry 4.0: digitally recordable casting ladle for the application of Industry 4.0-ready manual casting processes [Electronic resource] / Eric Riedel [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2023. – Vol. 116. – P. 95–100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.017>.
2. Ambarita E. Industrial digital twins in offshore wind farms [Electronic resource] / Evi Elisa Ambarita [et al.] // *Energy Informatics*. – 2024. – Vol. 7, no. 1. doi: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00306-6>.
3. Jabbari A. Modeling 4.0: Conceptual Modeling in a Digital Era [Electronic resource] / Araz Jabbari, Michael Rosemann // *Communications of the Association for Information Systems*. – 2023. – Vol. 53, no. 1. – P. 1028–1051. doi: <https://doi.org/10.17705/1cais.05344>.
4. Alyokhin V.I. Issledovanie vlijanija razmerov litejnyh defektov na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie porshnja / V.I. Alyokhin, A.V. Belogub, O.V. Akimov // *Nauchno tehniceskij zhurnal «Dvigateli vnutrennego sgoranija»*. Har'kov: NTU «HPI» – 2011. – №2. – S. 99 – 103.
5. Алехин В.И. Совершенствование литниковых систем для отливок цилиндрического типа из алюминиевых сплавов. / В.И. Алехин, Б.П. Таран, С.Б. Таран // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2006. – Вып.10. – С. 104–107.
6. Алехин В.И. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС / В. И. Алехин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко и др. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2009. – № 2. – С. 101-104.
7. Dojka R. The Importance of the Geometry of the Down Sprue in the Gravity Casting Process [Electronic resource] / Rafał Dojka, Jan Jezierski, Michał Szucki // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, no. 14. – P. 4937.

doi: <https://doi.org/10.3390/ma15144937>. 8. Basta M. An introduction to percolation [Electronic resource] / M. Basta, V. Picciarelli, R. Stella // *European Journal of Physics*. – 1994. – Vol. 15, no. 3. – P. 97–101. doi: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/15/3/001>. 9. Stauffer D. *Introduction to Percolation Theory* / D. Stauffer, A. Aharony. – London: Taylor and Francis, 1994. – 192 p. doi: <http://dx.doi.org/10.4324/9780203211595>. 10. Liao Q. Simulation Study on the Investment Casting Process of a Low-Cost Titanium Alloy Gearbox based on ProCAST [Electronic resource] / Qiang Liao [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–10. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4484762>. 11. Fish E. Rapid Prototyping How It's Done at GM: Additive Manufacturing Technology Is Helping the Automaker Reduce Product Development Times and Costs / E. Fish // *Automotive Design and Production*. – 2011. – 123, – P. 46–48. 12. Doroshenko V. & Mykhniian O. & Neima O. (2022). Problems and forecasts of the development of additive manufacturing and its use in foundry technologies // *Casting of Ukraine*, 2022. No. 3-4. pp. 48–52. 13. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing [Electronic resource] / Mohsen Attaran // *Business Horizons*. – 2017. – Vol. 60, no. 5. – P. 677–688. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>. 14. Raabe D. Strategies for improving the sustainability of structural metals [Electronic resource] / Dierk Raabe, C. Cem Tasan, Elsa A. Olivetti // *Nature*. – 2019. – Vol. 575, no. 7781. – P. 64–74. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1702-5>. 15. Князева Г. О. Переваги та недоліки різних методів досліджень фазово-структурних станів матеріалів (оглядова стаття) / Г. О. Князева (Постельник) [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Машинознавство та САПР = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Engineering and CAD : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 2. – С. 51–55. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2021.2.08>.

Bibliography (transliterated):

1. Riedel, E., Ahmed, M., Hellmann, B. and Horn, I. (2023). Foundry 4.0: digitally recordable casting ladle for the application of Industry 4.0-ready manual casting processes. *Procedia CIRP*, 116, pp.95–100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.017>. 2. Evi Elisa Ambarrita, Karlsen, A., Scibilia, F. and Hasan, A. (2024). Industrial digital

twins in offshore wind farms. *Energy Informatics*, 7(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00306-6>. 3. Jabbari, A. and Rosemann, M. (2023). Modeling 4.0: Conceptual Modeling in a Digital Era. [online] AIS Electronic Library (AISeL). Available at: <https://doi.org/10.17705/1cais.05344>. 4. Alyokhin V.I., Belogub A.V., Akimov O.V. (2011). Issledovanie vliyanija razmerov litejnykh defektov na napryazhenno-deformirovannoe sostojanie porshnja. *Nauchno tehnikeskij zhurnal «Dvigateli vnutrennego sgoraniya»*. Kharkov, NTU «KhPI», №2, pp. 99–103. 5. Alokhin V.I., Taran B.P., Taran S.B. (2006). Sovershenstvovanye lytnykovikh system dlia otlivok tsylindricheskogo tipa yz aliuminyevykh splavov. *Visnyk NTU «KhPI»*, Kharkiv, №10, pp. 104–107. 6. Alokhin V.I., Belogub A.V., Marchenko A. P. y dr. (2009). Kompiuterno-intehyrovannoe modelirovaniye lyteinykh protsessov v avtomobylnykh porshniakh na osnove konstruktorskoy-tekhnologicheskoy metodyky proektyrovaniya detalei DVS. *Dvyhateli vnutrennego shoraniya*, № 2, pp. 101–104. 7. Dojka, R., Jezierski, J. and Szucki, M. (2022). The Importance of the Geometry of the Down Sprue in the Gravity Casting Process. *Materials*, [online] 15(14), p.4937. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15144937>. 8. Basta, M., Picciarelli, V. and Stella, R. (1994). An introduction to percolation. *European Journal of Physics*, [online] 15(3), pp.97–101. doi: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/15/3/001>. 9. Stauffer, D. and Aharony (1985). *Introduction to Percolation Theory*. doi: <https://doi.org/10.4324/9780203211595>. 10. Liao, Q., Ge, P., Lu, G., Song, Y., Ye, W., Gao, J. and Luo, X. (2022). Simulation Study on the Investment Casting Process of a Low-Cost Titanium Alloy Gearbox based on ProCAST. *Advances in Materials Science and Engineering*, [online] 2022, p.e4484762. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4484762>. 11. Fish, E. (2011). Rapid Prototyping How It's Done at GM: Additive Manufacturing Technology Is Helping the Automaker Reduce Product Development Times and Costs. *Automotive Design and Production*, 123, 46–48. 12. Doroshenko V. & Mykhniian O. & Neima O. (2022). Problems and forecasts of the development of additive manufacturing and its use in foundry technologies. *Casting of Ukraine*, No. 3-4, pp. 48–52. 13. Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, [online] 60(5), pp.677–688. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>. 14. Raabe, D., Tasan, C.C. and Olivetti, E.A. (2019). Strategies for improving the sustainability of structural metals. *Nature*, [online] 575(7781), pp.64–74. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1702-5>. 15. Kniazieva (Postelnyk), H., Kniaziev, S., Tkachuk, M.M. and Pinchuk, N. (2021). Advantages and disadvantages of different methods for studying the phase-structural states of materials (a review). *Bulletin of the National Technical University 'KhPI' Series: Engineering and CAD*, (2), pp.51–55. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2021.2.08>.

Надійшла до редакції 08.07.2025 р.

Альо́хін Віта́лій Ігорович – канд. техн. наук, докторант кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: vitalii.alokhin@khi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6290-5994>

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>.

Кравченко Сергій Сергійович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: Serhii.Kravchenko@khi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3250-8645>.

Лал Амір Гул – доктор філософії, молодший науковий співробітник кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Amir.Lal@ieec.khi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4729-3739>.

IMPLEMENTATION OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGICAL METHODS IN THE PRODUCTION OF CAST ICE COMPONENTS, AN ALGORITHM FOR THEIR COMPREHENSIVE APPLICATION

V.I. Alokhin, A.P. Marchenko, S.S. Kravchenko, A.G. Lal

The study presents the results of research on the implementation of Industry 4.0 technological approaches in the manufacturing of cast internal combustion engine (ICE) components, which continues the discourse on transforming strategies for using Product Lifecycle Management (PLM) systems in the context of achieving sustainable development goals. Given that the foundry industry is a key supplier of metal components for the automotive and energy sectors, particular attention is paid to the

integrated application of computer modeling, additive technologies, and microstructure control of alloys, which are considered essential for ensuring sustainability in this field. It is noted that the implementation of the proposed approach enables the minimization of waste, improvement of mechanical properties of components, enhancement of energy efficiency in manufacturing processes, and reduction of the product development life cycle for new designs. Research in this area opens up new prospects for realizing circular economy principles and creating more environmentally responsible production in engine manufacturing. Technological casting processes for producing the cylinder of a two-stroke engine were modeled to analyze crystallization characteristics and phase transformations during the cooling of the casting. As a result of numerical simulations, data were obtained regarding mold filling, temperature field distribution, cooling and solidification sequences, and the kinetics of phase transitions, with an assessment of the areas prone to shrinkage-related defects. Control over these processes made it possible to prevent crystal growth irregularities in the transition zones of the casting, thus mitigating their negative impact on the mechanical properties of the component during operation. Conclusions were drawn on the application of simulation within PLM systems for automating the improvement of casting technologies. The integration of additive manufacturing into technological stages of shape formation in ICE casting production was also examined. It was determined that the implementation of these technologies in engine manufacturing allows for the creation of components with optimized designs that meet the requirements of sustainable development. As a model tooling case, a printed cast cylinder part was developed, and the key parameters of the 3D printing process were presented. Directions for future research on the use of additive technologies were outlined. The study also highlights the enhancement of microstructure control using machine learning and artificial intelligence as a promising area for future research in sustainable manufacturing. The paper proposes fundamental steps for a methodology for the comprehensive application of Industry 4.0 technologies in the sustainable production of cast ICE components. An interaction algorithm between major production stages was developed, placing the concept of the digital twin at the center as the core management unit. It is concluded that the proposed approach enables systematic improvements of technological processes, ensuring production adaptability to sustainable development challenges through the comprehensive integration of Industry 4.0 technologies and laying the foundation for the transition to Industry 5.0.

Key words: Industry 4.0 technologies; cast ICE components; two-stroke engine cylinder; design; computer modeling; additive technologies; alloy microstructure control.

УДК 539.3

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.1.12

М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, С.О. Кравченко, Г.В. Ткачук, О.С. Льозний

ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі описане вирішення актуальної та важливої науково-прикладної проблеми – розроблення методів та засобів дискретно-континуального зміцнення при відновленні елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства. Робота покликана до реалізації нагальною необхідністю у відновленні зразків військової та важливої цивільної техніки у короткі терміни та з високою інтенсивністю. Ця техніка в умовах інтенсивних навантажень при експлуатації та виконанні бойових завдань в умовах ведення бойових дій досить швидко зношується у результаті контактної взаємодії та взаємного відносного руху. При цьому процеси навантаження, контактування, тертя та зношування розвиваються за прогресуючим сценарієм протягом терміну експлуатації. А це призводить до виходу із ладу цінних об'єктів. Для усунення цих проблемних ситуацій розроблено основи технології та засоби дискретно-континуального зміцнення. Вона полягає у дискретній обробці однієї із контактуючих деталей та континуальній – іншої. Здійснені дослідження процесів і станів при контактній взаємодії зміцнених деталей дали можливість на цій основі створити пристрій, який реалізує технологію дискретного зміцнення та дає можливість визначати раціональні технологічні режими при дискретно-континуальному зміцненні елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства. Така установка дає можливість суттєво підвищити твердість, зносостійкість та міцність оброблених деталей конструкцій. Усі ефекти, які призводять до поліпшення технічних характеристик зміцнених таким чином деталей, базуються на ефектах зміни профіля контактуючих поверхонь. Цей профіль набуває пагорбистого характеру. На цих пагорбах відбувається локалізація контактного тиску. Завдяки цьому напруження зміцнюються до матеріалу дискретно зміцнених зон. Враховуючи високі механічні характеристики матеріалу цих зон, відбувається підвищення загальної міцності. Крім того, підвищуються і трибологічні характеристики. Підвищується ККД, збільшується довговічність, знижується тертя у такому з'єднанні.

Ключові слова: військова техніка; техніка для стратегічних галузей; відновлення; дискретно-континуальне зміцнення; напружено-деформований стан; контактна взаємодія; ресурс; мікродугове окислювання; електроіскрове легування; прототип пристрою.

Вступ

В умовах, що склалися в Україні та у світі в цілому, у практичному аспекті відбулася різка зміна умов експлуатації складних технічних об'єктів.

По-перше, це стосується військової техніки: танків, бронемашин, тягачів, автомобілів тощо. У мирних умовах їх ресурс був достатньо великим - десятки років. Це було викликано ощадним режимом

© М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, С.О. Кравченко, Г.В. Ткачук, О.С. Льозний, 2025

ISSN 0419-8719 ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ 1'2025

97