

Армування виливків при литті за моделями, що газифікуються

Дорошенко В. С., доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, doro55v@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

Небожак І. А., кандидат технічних наук, науковий співробітник, nebozhak@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0291-8144>

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

У статті на основі аналізу патентних рішень способів армування проведено дослідження технологічних особливостей виготовлення армованих і біметалевих виливків із використанням методу лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Авторами проаналізовано недоліки традиційних способів армування у порожнистих піщаних формах, серед яких найбільш критичними є складність просторової фіксації арматури, ризики зміцнення її елементів при кантуванні півформ чи транспортуванні форм та висока ймовірність руйнування піщаної поверхні форми при монтажі арматури до її стінок. Обґрунтовано концепцію використання полімерної моделі не лише як формотворчого елемента, а й як надійної монтажної основи. Такий підхід дозволяє інтегрувати армувальні компоненти безпосередньо в тіло моделі, забезпечуючи високу точність їх розташування у майбутньому виливку. Відзначено подвійну функціональну роль армувальних елементів: крім механічного зміцнення, вони діють як внутрішні мікрохолодильники, що дозволяє ефективно керувати процесами кристалізації, подібнювати структуру металу та мінімізувати усадочні дефекти у масивних вузлах. Також увагу приділено синергії ЛГМ-процесу з адитивними технологіями. Застосування 3D-друку полімерних моделей дозволяє створювати внутрішні ніші в моделі і розміщувати в них арматуру з високою геометричною точністю. У роботі представлено практичну реалізацію цієї методики на прикладі розробки литої бронеперешки з інтегрованими пружинними елементами. Описано механізм реалізації TRIP-ефекту (перетворення, індуковане пластичністю) для загартованих залізовуглецевих сплавів, де пружинні структури діють як акумулятори енергії фазового перетворення, що підвищує живучість конструкції при динамічних та ударних навантаженнях. Запропонована технологія відкриває нові можливості для виробництва легковагих металовиробів з диференційованими властивостями, інтелектуальних засобів пасивного захисту та високонавантажених деталей машинобудування.

Ключові слова: лиття за моделями, що газифікуються, армування виливків, монтажна основа, полімерна модель, адитивні технології, 3D-друк моделей, пружинні елементи, внутрішні холодильники, TRIP-ефект, диференційовані властивості.

Сучасне ливарне виробництво має значний науково-технічний потенціал у сфері створення композитних і біметалевих виливків, що складаються з двох і більше різнорідних сплавів. Зокрема, спосіб армування надає металовиробу комбінованих експлуатаційних показників, забезпечуючи, наприклад, високу пластичність або ударну в'язкість у центральній частині при збереженні високої твердості та зносостійкості зовнішнього шару. Багаторічний досвід науковців ФТМС НАНУ у застосуванні методу лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), забезпечує технологічну реалізацію складних просторових конфігурацій армованих виливків, де параметри макроструктури задаються відповідно до функціонального призначення виробу (рис. 1).

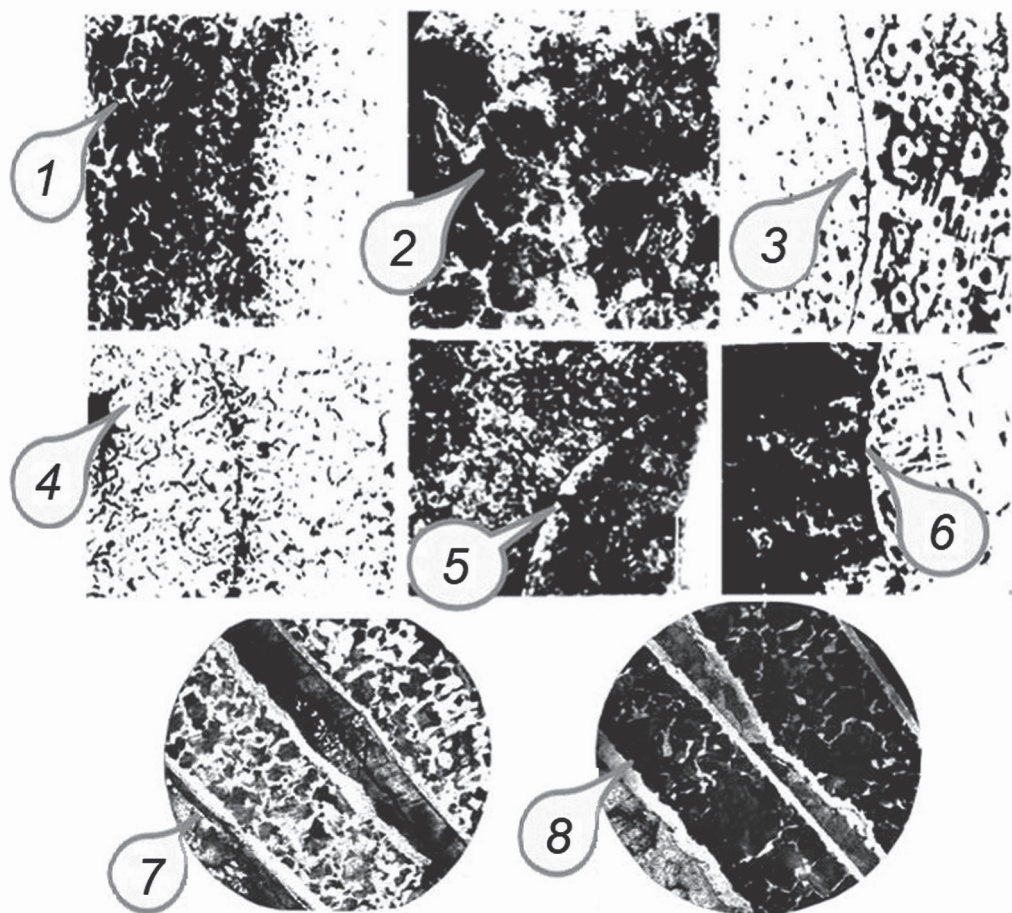


Рис. 1. Структура армованих литих конструкцій та виливків з диференційованими властивостями із чавунів, сталей, Cu- та Al-сплавів: 1 – сірий чавун - сталь (кулі); 2 – сталь - сталь (стрижні); 3 – ВЧ-сталь (кулі); 4 – ВЧ - ВЧ (кулі); 5 – Al - Cr (дисперсна фаза); 6 – сталь - сталь (смуга) – зносостійкий чавун; 7 – бронза - сталь (смуга); 8 – бронза - сталь (смуга) [1].

Fig. 1. Structure of reinforced cast structures and castings with differentiated properties made of cast irons, steels, Cu-, and Al-alloys: 1 – gray cast iron - steel (balls); 2 – steel - steel (rods); 3 – ductile iron - steel (balls); 4 – ductile iron - ductile iron (balls); 5 – Al - Cr (dispersed phase); 6 – steel - steel (strip) – wear-resistant cast iron; 7 – bronze - steel (strip); 8 – bronze - steel (strip) [1].

Об'єктом дослідження є процеси формування армованих і біметалевих виливків у разових піщаних формах при термодеструкції (газифікації) полімерних моделей. Предметом дослідження є методи просторової фіксації та функціональної інтеграції армувальних елементів у структуру виливка, а також їх вплив на формування макроструктури та експлуатаційних характеристик готових виробів. **Метою роботи** є аналіз вітчизняних і закордонних патентних рішень способів армування при ЛГМ та на цій основі розробка комплексних методів армування, що дозволяють перейти від пасивного зміцнення до активного керування властивостями металовиробів, зокрема шляхом створення попередньо напружених структур та використання адитивних технологій для проєктування внутрішньої структури виливків.

Попри тривалий досвід застосування армування у ливарництві [2, 3], використання традиційних порожнистих піщаних форм накладає низку конструктивних обмежень, що стримують розвиток цього напрямку. Зокрема, методи виготовлення армованих виробів шляхом розміщення сталевих арматур в порожнині форми з наступним заливанням чавуном [4] та отримання армованого сталевих інструменту в порожнистих формах [5], включають механічну фіксацію арматури за допомогою додаткових скоб, гачків чи жеребійок. Це створює ризики локального руйнування стінок форми, утворення піщаних включень у металі та геометричних перекосів під час заливання. Ці недоліки посилюються при динамічних навантаженнях на арматуру, коли більша частина виливка розміщується у верхній півформі, що потім піддається кантуванню, а також при транспортуванні форм на конвеєрі або при їх вистоюванні перед заливанням. Перекоси та зміщення арматури особливо вірогідні при використанні масивних закладних вкладишів. Ненадійність такого кріплення та загроза засмічення форми потребують застосування формувальних сумішей з підвищеною міцністю, що погіршує їх податливість та ускладнює вибивання виливків. Окрім того, жорстка прив'язка до стінок форми обмежує можливість створення інтегрованих каркасів складної просторової конфігурації.

На противагу цьому, технологія ЛГМ дозволяє використовувати полімерну модель як надійну монтажну основу, що однозначно фіксує в своєму об'ємі різномірні елементи. Цей підхід нівелює ризики зміщення компонентів каркаса, забруднення розплаву продуктами деструкції стінок форми, забезпечуючи високу відтворюваність заданої геометрії та внутрішньої структури виливка. Використання сухого незв'язаного піску у вакуумованій формі трансформує трудомістке вибивання виливка у вільне гравітаційне висипання наповнювача.

Перейдемо до аналізу запатентованих методів армування, що базуються на технології ЛГМ. Зокрема, відома конструкція металевих виливків, виготовлених способом ЛГМ у вигляді просторового каркаса [6] для армування великогабаритних виливків. Попри складну біонічну конфігурацію, оптимізовану за допомогою математичного моделювання, такий литий каркас не передбачає інтеграції з комбінованими армувальними елементами та створення закритих порожнин чи пор, заповнених легкокованими

нemetалевими матеріалами. Це звужує потенціал для зниження металоємності армованого виробу та формування багатofункціональних зміцнювальних структур із диференційованим рівнем фізико-механічних властивостей.

Також спосіб виготовлення армованих виливків [7], у якому арматура слугує лише допоміжним кріпленням при складанні пінополістирольної моделі, не враховує її вплив на формування службових властивостей металу, що звужує сферу ефективного застосування даного способу на основі ЛГМ.

У патентній практиці також розглядається спосіб виготовлення армованого валка за технологією ЛГМ [8], за яким сталева вісь, що виступає різновидом металевої арматури, інтегрується в полімерну модель перед її формуванням у піску. Процес передбачає виливання зносостійкого бандажа, геометрія якого задається моделлю, навколо центральної осі. Недоліками даного рішення є вузька спеціалізація та низька універсальність щодо виливків іншої конфігурації. Крім того, технологія потребує розміщення між литим бандажем і віссю прошарку вогнетривкого матеріалу, просоченого рідким зв'язувальним компонентом, для забезпечення можливості подальшого ремонту виробу. Така специфіка не лише ускладнює технологічний цикл, а й унеможливорює створення суцільнолитої армованої структури з міцним дифузійним або металургійним зв'язком між шарами металу, що є критичним для забезпечення цілісності багатьох високонавантажених деталей.

Також заслуговує на увагу спосіб одержання виливків із диференційованими властивостями за технологією ЛГМ [9], що передбачає процеси армування та модифікування безпосередньо в порожнині ливарної форми. Проте зазначене рішення має переважно декларативний характер, оскільки в описі способу відсутня деталізація конструкції арматури та її матеріалів. Крім того, авторами не наведено поопераційну методику розміщення арматури у тілі моделі чи форми, а також відсутні приклади практичної реалізації та технологічної послідовності операцій. Це ускладнює відтворюваність даного способу, що обмежує його промислове впровадження.

Серед спеціалізованих розробок також варто виділити спосіб одержання виливків колінчастих валів за технологією ЛГМ [10], один із варіантів якого передбачає оснащення крайніх щік моделі колінчастого валу армувальними вставками. Дане рішення дозволяє ефективно оптимізувати спрямоване живлення виливка та вивести усадкову пористість у зону надливів, проте воно має вузькоспеціалізований характер, обмежуючись литтям колінчастих валів.

Окремої уваги заслуговує спосіб одержання армованих виливків за технологією ЛГМ [11], який передбачає встановлення металевих стрижнів, пластин або вогнетривких волокон безпосередньо в порожнину прес-форми перед задуванням гранул пінополістиролу для створення нероз'ємної армованої моделі. Проте даний спосіб обмежений конструктивними можливостями прес-форм, що часто не дозволяє формувати складні об'ємні каркаси, зокрема з внутрішніми порожнинами або використовувати пористі nemetалеві структури.

Також методологія армування виливків доповнюється завдяки введенню nemetалевих матеріалів у тіло моделі, зокрема стрижнів із піщано-

рідкоскляних сумішей [12]. Під дією теплового впливу від розплаву металу така суміш спікається, формуючи стійкий метало-піщаний композит [13]. Це реалізує ефект диференціації механічних характеристик матеріалу вздовж вектора зовнішнього впливу, що суттєво підвищує опір виливка імпульсному руйнуванню і є базовим для проектування бронеперешкод та захисних конструкцій. Особливості реалізації цього способу за допомогою оболонкових моделей деталізовано нижче у прикладі практичного застосування.

Аналіз патентних рішень [6-11] свідчить, що потенціал ЛГМ-процесу у напрямі армування наразі реалізований не повною мірою. Використання полімерної моделі як носія армувальних елементів або надійної монтажної основи дозволяє відмовитися від механічної фіксації арматури до стінок форми, що є недоліком традиційного лиття. Також перевагою є здатність моделі утримувати в межах єдиного каркаса розрізнені елементи, навіть за відсутності безпосереднього контакту між ними. Матеріал моделі виконує функцію просторової опори з можливістю довільного позиціонування різномірних за конструкцією та матеріалом армувальних компонентів. Це дозволяє формувати складні об'ємні каркаси в межах габаритів тіла моделі, запобігаючи зміщенню каркаса під час формування моделі в сухому піску контейнерної форми.

Науковий інтерес становить розширення функціональної ролі арматури: перехід від пасивного зміцнення до активного керування кінетикою кристалізації та структуроутворення шляхом варіативного використання армувальних елементів як інтегрованого комплексу внутрішніх холодильників. Такий підхід забезпечить стабільну якість та диференціацію властивостей виливка за рахунок цілеспрямованого перерозподілу теплових потоків. Крім того, створення комбінованих каркасів із поєднанням металевих і неметалевих елементів, а також заповнення внутрішніх порожнин арматури неметалевими наповнювачами відкриває можливості для програмного регулювання показників міцності та маси виробу. Розвиток ЛГМ-технології шляхом усунення обмежень методів [6-12] мінімізує ймовірність появи дефектів лиття та гарантує стабільність експлуатаційних характеристик виробів при екстремальних механічних впливах.

Дослідження у напрямі комбінування армувальних елементів, зокрема із використанням фігурного (у поперечному перетині), перфорованого та трубчастого прокату, відкриває шлях до суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик виливка. Формування внутрішньої каркасної арматури дозволить досягти зниження маси виробу без втрати міцності при зменшенні витрат рідкого металу. Виправданим є створення порожнин із піщаним заповненням або без нього, а також застосування різновидів внутрішньої каркасної арматури в литій матриці, як умови для керованої інтенсифікації тепловідведення з внутрішніх зон виробу для подрібнення та оптимізації мікроструктури металу матриці, а також підвищення щільності виливка в термічних вузлах.

Технологічна варіативність методів розміщення арматури в тілі моделей може бути реалізована як шляхом проектування технологічних порожнин безпосередньо при виготовленні моделі, так і методами

термічного впливу: прошиванням нагрітими стрижнями або створенням каналів за допомогою інструменту типу термоножа. Такі підходи подібні до раніше запатентованих нами способів виконання вентканалів у моделі та сприятимуть точній інтеграції арматури у стінки ливарної моделі без порушення її зовнішньої конфігурації та з урахуванням оптимальної газифікації пінополімеру.

Застосування адитивних технологій для виготовлення комірчастих моделей відкриває принципово нові можливості для прецизійного армування. Крім того, що друк моделей практично не змінює традиційний виробничий цикл ЛГМ [14], він ще дозволяє на етапі 3D-проектування закладати складні внутрішні ніші, канали та посадкові місця для арматури будь-якої конфігурації в контексті зміцнювальної, охолоджувальної та структуроутворювальної функцій. Це дозволяє нівелювати геометричні відхилення при встановленні арматури, які є можливими при формуванні моделей у прес-формах або їх вирізанні з пінопластових блоків, а також інтегрувати ніші для арматури одночасно з вентиляційними каналами в єдиному циклі друку. Цифровий дизайн у поєднанні з адитивними технологіями не лише спрощує складання комбінованих каркасів, а й дозволяє проектувати внутрішні структури та порожнини з геометрією, що оптимізована під конкретні вектори навантажень майбутнього металовиробу. У такому контексті друкована модель трансформується в інтелектуальну матрицю, яка визначає не лише зовнішню конфігурацію, а й внутрішню топологію зміцнення. Це є логічним розвитком концепції: від використання моделі як «монтажної основи» до створення «розумної» металоконструкції в умовах сучасного цифрового виробництва.

Впровадження запропонованих підходів до армування за технологією ЛГМ створює передумови для розвитку низки стратегічних галузей, трансформуючи традиційне лиття у високотехнологічний процес створення функціонально-градієнтних матеріалів. В енергетичному машинобудуванні це дозволяє виготовляти високонавантажені корпусні деталі та вузли турбін із інтегрованими трубчастими системами, які забезпечують диференціацію теплопровідності та корозійної стійкості у критичних зонах виливка. Аналогічно у транспортному машинобудуванні та вагонобудуванні формування внутрішнього силового каркаса відкриває шлях до створення полегшених рамних конструкцій, кронштейнів та деталей транспортного візка, зокрема в вагонобудуванні та електромобільності, суттєво знижуючи їхню металоємність при одночасному збереженні високої жорсткості. У верстатобудуванні застосування пористих неметалевих наповнювачів у металевій матриці станин дозволяє програмувати демпфувальні властивості обладнання, що в поєднанні зі зміцненням робочих поверхонь валків чи інструменту значно подовжує їхній експлуатаційний ресурс.

Особливого значення ці методи набувають в аерокосмічній галузі та біонічному дизайні, де використання друкованих моделей дозволяє реалізувати складні об'ємні каркаси з прецизійною внутрішньою геометрією, важкодоступною для традиційних методів лиття. Для видобувної промисловості актуальним залишається локальне армування робочих органів

машин, таких як зуби екскаваторів чи футеровки млинів, у зонах найбільш інтенсивного тертя. У сфері спеціального лиття та створення засобів пасивного захисту поєднання металевих матриць із неметалевими елементами та порожнинами дозволяє формувати нові типи композитів з високим опором імпульсному руйнуванню. Таке розширення функціональних можливостей арматури сприяє перетворенню металевого виливка на інженерну систему, адаптовану до екстремальних умов експлуатації через керування його внутрішньою структурою.

Приклад армування литої бронеперешкоди.

Сучасна концепція розвитку засобів захисту бронетехніки і захисних споруд прагне переходу до інтелектуальних метаматеріалів, здатних активно протидіяти динамічним навантаженням. Найбільш виразно переваги ЛГМ-процесу проявляються при виготовленні захисних елементів та бронеперешкод, де армований метало-керамічний композит реалізує принцип динамічної дисипації енергії.

Особливість застосованої технології [12] полягає у виготовленні з пінополістиролу ливарної полімерної моделі у вигляді двох симетричних оболонок із рельєфною поверхнею, що нагадують за зовнішнім виглядом лотки для яєць чи блістери для цукерок. Такі оболонки можуть бути виготовлені методами спікання у прес-формах, термоформування термопластичного полімерного листа товщиною 0,2-2,0 мм, або 3D-друку. В утворений при складанні оболонок внутрішній простір моделі розміщують ливарні піщані стрижні, які після заливання металом формують метало-піщаний композит або, після їх видалення, каркасно-комірчасту конструкцію. У цій системі піщані стрижні разом з пінополістирольними вставками виконують між оболонками роль розпірок, що регулюють газотвірність моделі та водночас формують «різнокутне» розташування стінок металевої матриці відносно напрямку дії силового вектора руйнування, що часто застосовують для конструкцій бронеперешкод.

У розвиток методу [12] із застосуванням піщаних стрижнів було розроблено спосіб одержання армованого легкового виливка з підвищеними механічними властивостями, переважно для бронеперешкод, за рахунок створення в структурі активного поля попереднього напруження та реалізації ефекту трансформаційного зміцнення. Цей спосіб включає (рис. 2) виготовлення разової полімерної моделі з оболонок 1, аналогічно [12], розміщення в утворених при їх збиранні порожнинах металевих пружних армувальних елементів (пружин) 2, зафіксованих у стиснутому стані легкоплавкими фіксаторами 8, з подальшим заливанням форми матричним металом при одночасному її вакуумуванні. Дві половинки полімерної оболонкової моделі 1 скріплюються за допомогою формувальних гвіздків 4, що проходять крізь локальні розпірки (прокладки) 3 з пінополістиролу (кілька подібних прокладок також встановлюють між оболонками 1 для контролювання товщини моделі), та рулонів (валиків) 6 із муліто-кремнеземного волокна.

На схемі відображено приклад зібраної з двох оболонок 1 ділянку моделі, але таких оболонок при пошаровій збірці може бути три і більше.

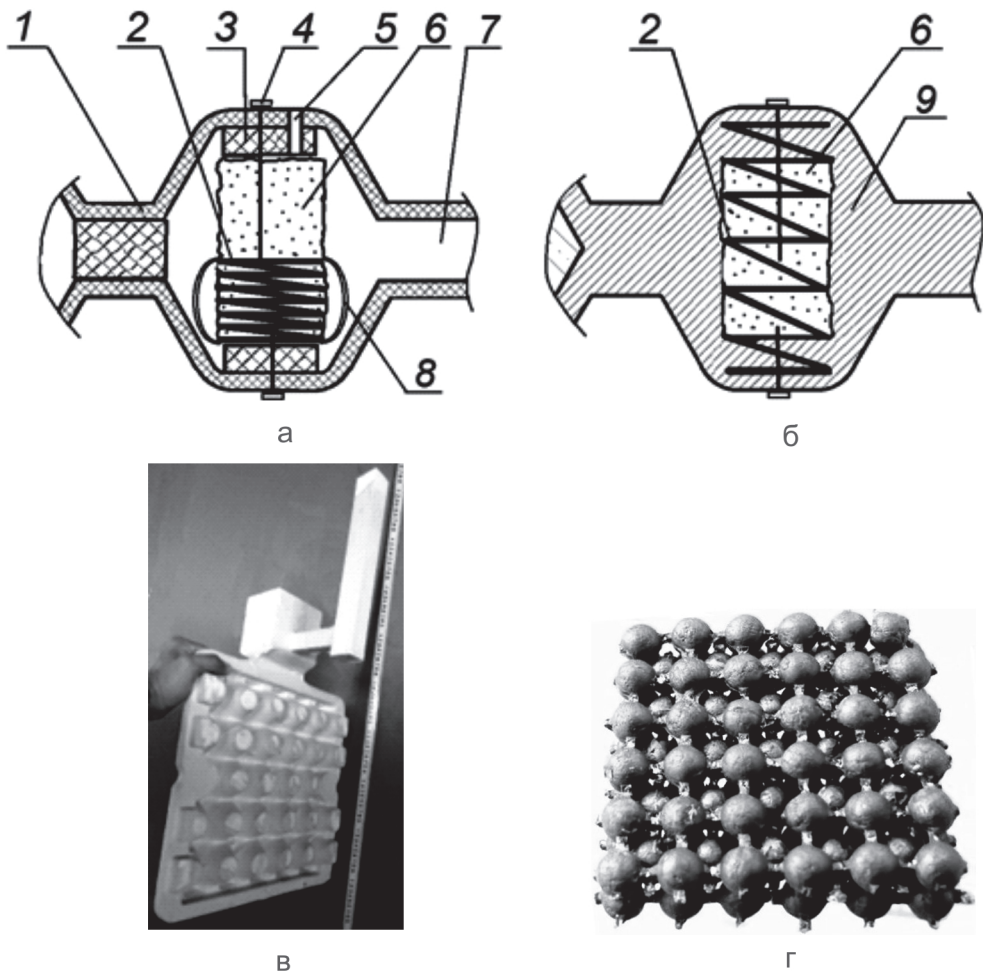


Рис. 2. Схема встановлення арматури в модель (а), частина виливка навколо однієї пружини (б), а також приклади модельного комплексу (в) та армованого виливка (г): 1 – модель з двох оболонок; 2 – пружний елемент (пружина); 3 – розпірки з пінополістиролу; 4 – фіксуючий гвіздок; 5 – вентканал (накол); 6 – валик із муліто-кремнеземного волокна; 7 – вільний простір; 8 – фіксатор стиснутої пружини; 9 – метал виливка.

Fig. 2. Diagram of reinforcement installation into the pattern (a), section of the casting around a single spring (b), as well as examples of a pattern assembly (c) and a reinforced casting (d): 1 – two-shell pattern; 2 – elastic element (spring); 3 – expanded polystyrene spacers; 4 – fixing nail; 5 – vent channel (piercing); 6 – mullite-silica fiber roll; 7 – free space; 8 – compressed spring retainer; 9 – casting metal.

Наприклад, при трьох оболонках у стик до середньої оболонки пружні елементи 2 у стиснутому фіксаторами 8 стані та з валиками 6 можуть встановлювати по обидві сторони. Між оболонками 1 утворюється газопроникний простір 7. Для сприяння виходу газів з валика 6 у верхній оболонці моделі виконують вентканал (накол) 5. На рис. 2 б показано ділянку виливка з литого металу 9 і з розтиснутим пружним елементом 2 та валиком 6, який в моделі був вставлений в середину гвинтової пружини. Таке компонування забезпечує локальну анізотропію властивостей у заданих

(опуклих) зонах секції бронеплити, приклади модельного комплекту (з ливниковою системою) та вилівка показано на рис. 2 в, г.

Вивільнення пружної енергії армувальних елементів відбувається в інтервалі температур вище солідусу, що супроводжується їх розпрямленням до упору в поверхневу кірку матричного сплаву, сформовану в контакт з стінкою вакуумованої форми, що створює зони попереднього напруження стиску та механічне ущільнення матриці. Внутрішні порожнини стиснутих гвинтових пружних елементів заповнюють муліто-кремнеземним волокном (вата, повсть або картон [15]) для підвищення вогнетривкості, зменшення маси вилівка та посилення демпфувальних властивостей при поглинанні енергії удару. Як матрицю використовують залізовуглецевий сплав, причому охолодження вилівка рекомендовано виконувати у піщаній формі до температури 1000-900 °С для видалення його з форми в аустенітному стані і виконання такого режиму ізотермічного гартування, щоб отримати 25-35 % залишкового аустеніту у матричному металі. При цьому метал отримує здатність до TRIP-ефекту (Transformation Induced Plasticity) [16].

Ключовим технологічним рішенням є фіксація пружних елементів (можуть застосовуватись пружини не лише гвинтового типу) у стиснутому стані за допомогою легкоплавких фіксаторів 8, матеріал і товщина яких підбираються таким чином, щоб їх руйнування відбувалося саме в інтервалі температур між ліквідусом і солідусом матричного металу. Після розміщення моделі, що газифікується, у формі з сухим піском вакуумовану форму заливають розплавом. Вакуумування за рахунок ефекту присмоктування металу до стінки форми забезпечує інтенсивний відвід тепла, що гарантує швидке утворення поверхневої кірки. Коли тепло розплаву руйнує фіксатори, пружні елементи розпрямляються всередині напівтвердої матриці, спираючись на вже сформовану кірку. Це перетворює вилівок на напружену конструкцію ще до завершення кристалізації всього об'єму, забезпечуючи здрібнення кристалічного зерна матриці за рахунок дії арматури як внутрішнього холодильника і тепловідводу до валика 6.

Особливого значення набуває синергетичний ефект при використанні як матриці залізовуглецевих сплавів, «передчасного» видалення гарячого вилівка з форми і подальшого охолодження в режимі гартування з досягненням структури, придатної до TRIP-ефекту (перетворення в мартенсит деформації) [16]. При цьому сталеві пружини виступають не просто як арматура, а як акумулятори фазового перетворення. Внутрішні мікродеформації від зусилля пружного елемента сприяють перетворенню залишкового аустеніту в мартенсит ще до початку зовнішнього впливу – ефекту «самогартування». Якщо пружний елемент розпрямилася не повністю, вона залишається постійним джерелом енергії. При виникненні тріщини від вибуху пружна вставка намагається дотиснути матрицю, що знову провокує утворення мартенситу прямо в «голові» тріщини, працюючи як «інтелектуальний пластир».

Застосування цієї технології, наприклад, при створенні секцій протимінного захисту днища (бронетехніки) з залізовуглецевого сплаву із залишковим аустенітом, дозволяє отримати дворівневу систему захисту:

макроскопічну пружність пружин та мікроскопічну міцність мартенситу деформації. Пружини «зшивають» структуру, запобігаючи відколюванню внутрішніх шарів броні, а попереднє напруження стиску змушує ударну хвилю витрачати енергію на подолання внутрішнього тиску. Це зменшує вразливість такого метаматеріалу до розколювання, як інноваційний крок у створенні бронеперешкод з інтегрованими системами накопичення внутрішньої енергії.

Додаткову функціональність армованого матеріалу забезпечує заповнення внутрішніх порожнин гвинтових (циліндричних) пружин муліто-кремнеземним волокном для створення легковагих конструкцій з підвищеною вогнетривкістю та сприяння демпфувальним властивостям. Таким чином, поєднання ЛГМ-процесу з механізмом самозміцнення на стадіях кристалізації та зовнішнього деформування з метою створення адаптивного захисту техніки дозволяє отримувати активні бронеструктури складної геометрії, які за рівнем захисту та питомою міцністю перевершують гомогенну броню.

Висновок. Запропонований підхід до армування виливків у процесі ЛГМ забезпечує комплексний вплив на якість литої конструкції. Використання моделі як монтажної основи поліпшує стабільність геометричного позиціонування каркаса — металевого чи неметалевого, суцільного чи порожнинного. Залучення армувальних елементів як внутрішніх холодильників забезпечує спрямовану кристалізацію, здрібнення зерна мікроструктури матричного металу та дозволяє утворювати перехідні прошарки на межі з арматурою. Це не лише знижує матеріаломісткість, а й сприяє створенню нових типів багатофункціональних металовиробів із заданим комплексом властивостей, зокрема адаптує деталі до екстремальних умов експлуатації, перетворюючи звичайний виливок на складну інженерну систему.

Література

1. Найдек В. Л. Вклад Физико-технологического института металлов и сплавов в инновационное развитие литейного производства Украины. Литейное производство. 2009. № 11. С. 6-13.
2. Смеляков Н. Н. Армированные отливки. Москва: Машгиз, 1958. 166 с.
3. Калюжний П. Б., Слюсарев В. А., Калашник Д. О. Армування виливків за технологією лиття за моделями, що газифікуються. Металознавство та обробка металів. 2017. № 4. С. 48-53.
4. А. с. 346020 СРСР, МПК В22D 19/02, В22D 27/02. Спосіб виготовлення армованих виливків / Местецький Р. А., Барабаш Л. З., Каменський А. Г. та ін.; заявник ДЗМО. № 1379424/22-2 ; заявл. 24.09.1969 ; опубл. 28.07.1972, Бюл. № 23.
5. Пат. 2186655 С1 Російська Федерація, МПК В22D 19/00. Способ получения армированных стальных отливок / Гиршов В. Л., Абрамов А. А., Васильев Д. Г. та ін. ; заявник НПО Металлоресурс. № 2001109086/02 ; заявл. 03.04.2001 ; опубл. 10.08.2002.
6. Пат. 90494 Україна, МПК В22D 7/00, В22D 23/00, В22D 25/0025. Просторовий металевий виливок / Шинський О. Й., Дорошенко В. С. ; заявник

- ФТІМС НАНУ. № а200708052 ; заявл. 16.07.2007 ; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.
7. Пат. 28127 Україна, МПК В22С 9/04. Спосіб виготовлення армованих деталей / Шинський І. О., Шинський О. Й., Яковичин О. А., Каричковський П. М. № u200708271 ; заявл. 19.07.2007 ; опубл. 26.11.2007.
 8. Пат. 83742 Україна, МПК В22D 25/00, В22D 27/02. Спосіб виготовлення двошарового валка / Шинський О. Й., Дорошенко В. С., Русаков В. П. ; заявник ФТІМС НАНУ. № а200611563 ; заявл. 02.11.2006 ; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.
 9. Пат. 45001 Україна, МПК В22D 27/00, В22С 9/00. Спосіб одержання виливків з диференційними властивостями / Шинський І. О., Шинський О. Й., Болюх В. А. № u200904323 ; заявл. 30.04.2009 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.
 10. Пат. 46431 Україна, МПК В22С9/00, В21К 1/00. Спосіб одержання виливків колінчастих валів / Шинський І. О., Шинський О. Й., Каричковський П. М., Болюх В. А. № u200905691 ; заявл. 03.06.2009 ; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.
 11. Пат. 43695 Україна, МПК В22С7/00, В22С9/04. Спосіб одержання армованих виливків / Шинський І. О., Шинський О. Й., Каричковський П. М., Болюх В. А. № u200903423 ; заявл. 09.04.2009 ; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
 12. Дорошенко В. С. Виготовлення метало-піщаного композиту методом лиття за моделями, що газифікуються. Нові матеріали і технології в машинобудуванні. 2025. № 7. С. 27-36. DOI: <https://doi.org/10.20535/2519-450X.7.2025.349068>
 13. Шалевська І. А., Дорошенко В. С., Дьяченко М. М. Особливості вибору дисперсних неметалевих матеріалів для армування литих металоконструкцій. Литво. Металургія. 2023: матеріали ХІХ міжнародної науково-практичної конференції (10-12 жовтня 2023 р., м. Харків, м. Київ) / за ред. Пономаренко О. І. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 224–227.
 14. Дорошенко В. С., Небожак І. А., Клименко С. І. Процес лиття за моделями, що газифікуються, як точка входу цифровізації в ресурсоефективне ливарне виробництво. Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві: матеріали Х міжнародної науково-технічної конференції (21-23 жовтня 2025 р., м. Краматорськ) / за ред. Фесенка А. М., Турчаніна М. А. Краматорськ: ДДМА, 2025. С. 38-40.
 15. Мазур В. В. Розвиток технології виробництва теплоізоляційних матеріалів для використання в металургії та машинобудуванні. Метал та лиття України. 2023. Т. 31, № 4. С. 59-63. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.01.063>
 16. Пат. 139560 Україна, МПК В22D 7/00, В22D 23/00, F41H 5/00. Спосіб виробництва броньової перешкоди з високоміцного чавуну у ливарних формах з сипкого піску / Дорошенко В. С., Шинський В. О. ; заявник ФТІМС НАНУ. № u201906841 ; заявл. 18.06.2019 ; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.

References

1. Naydek, V. L. (2009). Vklad Fiziko-tekhnologicheskogo instituta metallov i splavov v innovatsionnoe razvitie liteynogo proizvodstva Ukrainy [Contribution of the Physico-Technological Institute of Metals and Alloys to the innovative development of foundry production in Ukraine]. *Liteynoe proizvodstvo*, (11), 6-13.

2. Smelyakov, N. N. (1958). *Armirovannyye otlivki* [Reinforced castings]. Mashgiz.
3. Kaliuzhnyi, P. B., Sliusarev, V. A., & Kalashnyk, D. O. (2017). Armuvannya vylivkiv za tekhnolohiyeyu lyttya za modelyamy, shcho hazyfikuyut'sya [Reinforcement of castings using lost foam casting technology]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (4), 48-53.
4. Mestetskiy, R. A., Barabash, L. Z., Kamenskiy, A. G., et al. (1972). *USSR Author's Certificate No. 346020* [Method of manufacturing reinforced castings].
5. Girshov, V. L., Abramov, A. A., Vasiliev, D. G., et al. (2002). *Russian Patent No. RU2186655C1* [Method for producing reinforced steel castings].
6. Shynskiy, O. Yo., & Doroshenko, V. S. (2010). *Ukrainian Patent No. 90494* [Spatial metal casting].
7. Shynskiy, I. O., Shynskiy, O. Yo., Yakovyshyn, O. A., & Karychkovskiy, P. M. (2007). *Ukrainian Patent No. 28127* [Method of manufacturing reinforced parts].
8. Shynskiy, O. Yo., Doroshenko, V. S., & Rusakov, V. P. (2008). *Ukrainian Patent No. 83742* [Method of manufacturing a double-layer roll].
9. Shynskiy, I. O., Shynskiy, O. Yo., & Boliukh, V. A. (2009). *Ukrainian Patent No. 45001* [Method of obtaining castings with differential properties].
10. Shynskiy, I. O., Shynskiy, O. Yo., Karychkovskiy, P. M., & Boliukh, V. A. (2009). *Ukrainian Patent No. 46431* [Method of obtaining crankshaft castings].
11. Shynskiy, I. O., Shynskiy, O. Yo., Karychkovskiy, P. M., & Boliukh, V. A. (2009). *Ukrainian Patent No. 43695* [Method of obtaining reinforced castings].
12. Doroshenko, V. S. (2025). Vyhotovlennya metalo-pishchanoho kompozytu metodom lyttya za modelyamy, shcho hazyfikuyut'sya [Production of metal-sand composite by lost foam casting method]. *Novi materialy i tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*, (7), 27-36. <https://doi.org/10.20535/2519-450X.7.2025.349068>
13. Shalevska, I. A., Doroshenko, V. S., & Diachenko, M. M. (2023). Osoblyvosti vyboru dyspersnykh nemetalevykh materialiv dlya armuvannya lytykh metalokonstruktsiy [Features of the choice of dispersed non-metallic materials for the reinforcement of cast metal structures]. In *Proceedings of the XIX international scientific and practical conference "Foundry. Metallurgy 2023"* (pp. 224-227). NTU "KhPI".
14. Doroshenko, V. S., Nebozhak, I. A., & Klymenko, S. I. (2025). Protses lyttya za modelyamy, shcho hazyfikuyut'sya, yak tochka vkhodu tsyfrovizatsiyi v resursoefektyvne lyvarne vyrobnytstvo [Lost foam casting process as an entry point for digitalization in resource-efficient foundry production]. In *Proceedings of the X international scientific and technical conference "Perspective technologies, materials and equipment in foundry production"* (pp. 38-40). DDMA.
15. Mazur, V. V. (2023). Rozvytok tekhnolohiyi vyrobnytstva teploizolyatsiynykh materialiv dlya vykorystannya v metalurhiyi ta mashynobuduvanni [Development of production technology of thermal insulation materials for use in metallurgy and mechanical engineering]. *Metal ta lyttya Ukrayiny*, 31(4), 59-63. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.07>
16. Doroshenko, V. S., & Shynskiy, V. O. (2020). *Ukrainian Patent No. 139560* [Method of production of armored obstacles from high-strength cast iron in casting molds from loose sand].

Одержано / Received 20.04.26

Прийнято до друку / Accepted 25.05.26

Опубліковано / Published 31.05.26

Reinforcement of castings in lost foam casting process

V. S. Doroshenko, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Research Scientist, doro55v@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

I. A. Nebozhak, Candidate of Technical Sciences, Researcher, nebozhak@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0291-8144>

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

Based on the analysis of patent solutions for reinforcement methods, the article investigates the technological features of manufacturing reinforced and bimetallic castings using the lost foam casting (LFC) method. The authors analyze the drawbacks of traditional reinforcement methods in hollow sand molds, the most critical of which are the difficulty of spatial fixation of the reinforcement, the risks of displacement of its elements during mold tilting or transportation, and the high probability of destruction of the sand mold surface when mounting the reinforcement to its walls. The concept of using a polymer pattern not only as a shaping element but also as a reliable mounting base is substantiated. This approach allows for the integration of reinforcing components directly into the pattern body, ensuring high positioning accuracy in the future casting. The dual functional role of the reinforcing elements is noted: in addition to mechanical strengthening, they act as internal micro-chillers, which allows for effective control of crystallization processes, refinement of the metal structure, and minimization of shrinkage defects in massive sections. Attention is also paid to the synergy of the LFC process with additive technologies. The use of 3D printing of polymer patterns makes it possible to create internal niches in the pattern and place reinforcement in them with high geometric precision. The paper presents the practical implementation of this technique on the example of the development of a cast armored barrier with integrated spring elements. The mechanism of the TRIP effect (transformation-induced plasticity) realization for hardened iron-carbon alloys is described, where spring structures act as accumulators of phase transformation energy, which increases the survivability of the structure under dynamic and impact loads. The proposed technology opens up new opportunities for the production of lightweight metal products with differentiated properties, intelligent means of passive protection, and highly loaded mechanical engineering parts.

Keywords: lost foam casting, casting reinforcement, mounting base, polymer pattern, additive technologies, 3D printing of patterns, spring elements, internal chillers, TRIP effect, differentiated properties.