

В.Ю. Селівьорстов, Т.В. Селівьорстова

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ НА РОЗПЛАВ В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ

Анотація. Представлений аналіз науково-технічної інформації щодо використання процесів позапічної обробки для підвищення якості литого металу. Показана перспективність застосування вказаних впливів для обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі (виливниці). Визначена можливість реалізації процесу комплексного внутрішньоформенного газодинамічного впливу на розплав крупних виливків та злитків, який складається з послідовних операцій продувки інертними газами через сифонну ливникову систему, вакуумування та наступного газодинамічного тиску в процесі затвердіння за допомогою відповідних пристроїв. Визначені конкретні варіанти їх конструкції та технологічні особливості роботи. Показано, що відмінною рисою технології є те, що протягом усього процесу від початку твердіння на рідкий метал здійснюється вплив за рахунок створення регульованого газового тиску в герметизованій системі виливок-пристрої для введення газу. Запропоновані пристрої, що є конструктивно простими та можуть бути з легкістю вбудованими у вже діючий технологічний процес без необхідності значних капітальних витрат. Зазначена необхідність подальших досліджень для розробки загальної методики визначення режимів тривалості продувки та раціональних режимів внутрішньоформенного вакуумування розплаву.

Ключові слова: комплексна технологія, форма, виливниця, розплав, вплив, виливок, злиток, інертний газ, продувка, вакуумування, газодинамічний тиск, герметизація, пристрій, розрахунок.

Вступ. Відомо, що машинобудування незмінно займає одне з провідних місць в структурі товарного виробництва усіх промислово розвинутих країн світу. Зокрема, у 2017 році в Україні частка реалізованої продукції машинобудування в загальному промисловому обсязі складала 10,9 % [1]. При цьому важливість ролі металургійного та ливарного виробництва, як основних заготівельних баз для машинобудування, зберігається на високому рівні та, разом з цим, підвищуються вимоги до якості злитків та виливків. Неоднорідність розмірів, форми

та розподілу кристалів в об'ємі литої заготовки, шпаристість, хімічна неоднорідність є основними проблемами при отриманні якісного вилівка або зливка, і повною мірою це стосується крупних литих заготовок, зважаючи на комплекс специфічних теплофізичних умов формування структури та геометричних характеристик, що зумовлені, в свою чергу, технологічними особливостями виробництва [2]. Зокрема, економічний аналіз виробництва сталевих злитків показує, що частка злитків масою більше 10-15 т складає приблизно 7-10% загальної кількості, однак витрати на їхнє виробництво, в свою чергу, складають біля третини усіх виробничих витрат внаслідок високої трудомісткості та унікальності оснащення [2]. Особливістю таких технологічних схем є, насамперед, обов'язкова наявність додаткового досить складного обладнання, що тягне за собою необхідність реалізації раціональної об'ємно – планувальної схеми побудови усіх технологічних агрегатів. При цьому, тенденції до розширення номенклатури, нестабільність та дроблення заказів на вже діючих ливарних виробництвах, що не мають додаткового спеціалізованого обладнання, великі капітальні витрати на глобальне технічне переозброєння, зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних шляхів отримання якісної продукції. Тому все більшу увагу науковців та професіоналів-практиків привертають питання, що пов'язані з удосконаленням існуючих та розробкою нових процесів, які забезпечують підвищення якості литого металу, зниження собівартості отримання виробів, підвищення ступеню екологічності виробництва в цілому. Одним із таких визнаних шляхів підвищення якості литих заготовок є використання зовнішніх фізичних впливів на рідкий метал, та метал, що кристалізується безпосередньо в ливарній формі [2, 3].

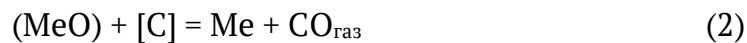
Аналіз стану питання. Усталена практика виробництва якісних злитків передбачає використання одного або одночасно декількох технологічних прийомів: обробки розплаву вакуумом, продувку інертним газом, введення порошкоподібних матеріалів або дроту, перемішування розплаву зі спеціально приготовленим шлаком або лігатурою. Всі ці операції здійснюються в ковші після завершення процесу плавки за допомогою відповідного обладнання, до якого відносяться установки ківш-піч

та вакууматори різних конструкцій [2 - 6]. Біля 60 % всієї сталі за даними [2] піддається вакуумуванню для зниження вмісту водню менше 1,5-2ppm і 30 % - для підвищення ступеню чистоти за неметалевими включеннями.

Технологія вакуумної обробки заснована на термодинамічній можливості зміщення рівноваги хімічних реакцій в бік виділення газоподібних продуктів в результаті зниження атмосферного тиску і, насамперед, це відноситься до розчинених в розплаві сталі водню, азоту та кисню [2, 6]. В результаті хімічної реакції (1) кисень виділяється із розплаву у вигляді оксидів вуглецю, чим забезпечує разом з розкисленням також і зниження вмісту вуглецю.



В тих випадках, коли кисень в металі знаходиться в складі оксидних неметалевих включень, зниження тиску над розплавом призводить до часткового або повного руйнування деяких сполук в результаті взаємодії з вуглецем (2). Наприклад, MnO та Cr₂O₃ відновлюються майже повністю, а для навіть часткового відновлення Al₂O₃ або TiO₂ необхідний дуже глибокий вакуум [7].



При зниженні тиску над розплавом рівновага реакції $2[H] \leftrightarrow H_{2\text{газ}}$ зміщується вправо. Водень в рідкій сталі має велику рухомість, коефіцієнт його дифузії достатньо великий ($D_H = 1,2 - 1,5 \cdot 10^{-3}$ см/с) і в результаті вакуумування він виводиться з розплаву значною мірою на відміну від азоту, в якого відповідний коефіцієнт є на порядок меншим ($D_N = 1 - 4 \cdot 10^{-4}$ см/с). Тому для видалення азоту необхідний більш глибокий вакуум та збільшення часу витримки [2, 7].

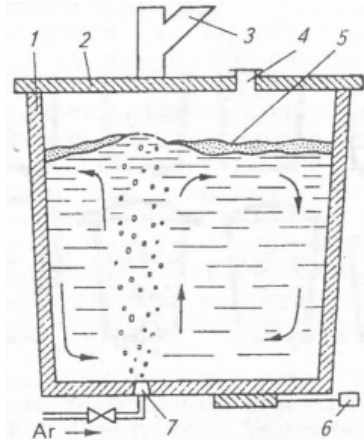
Процес очищення металу від водню та азоту під вакуумом прискорюється процесом виділення пухирців оксиду вуглецю (CO), що протікає одночасно. Ці пухирці перемішують метал та є маленькими «вакуумними камерами», тому що всередині них парціальний тиск водню та азоту дорівнює нулю [7]. При обробці сталі під низьким вакуумом (1мбар) вміст водню знижується з 6,0 – 8,0 до 1,5 – 2, 0 ppm, азоту з 80 – 100

до 70, а при тривалому вакуумуванні до 40 ppm. Вміст кисню після вакуумної обробки знижується до рівня 25 -30 ppm і менше [2, 6].

Таким чином, при обробці металу вакуумом зменшується кількість розчиненого кисню, водню, азоту і вміст оксидних неметалевих включень, а виділення великої кількості газових пухирців сприяє перемішуванню та певній гомогенізації розплаву, проте ефективна глибина такої обробки в разі відсутності інтенсивного примусового перемішування розплаву по висоті литої заготовки (злитка) відносно невелика (до 0,5 – 0,7 м). Тому для забезпечення достатньої площі поверхні розділу фаз, що взаємодіють, вакуумну обробку розкисленої сталі поєднують з продувкою розплаву інертним газом. Таке поєднання дозволяє досягнути збільшення потужності перемішування у 4 -5 разів [2, 5, 6]. Операція продувки великих мас металу інертними газами в ковші більш проста та дешевша, ніж обробка вакуумом, тому в багатьох випадках вона може замінювати вакуумування [8].

Особливостями процесу продувки з точки зору впливу на певні характеристики стану та процеси у розплаві є: зменшення вмісту газів в металі, інтенсивне перемішування розплаву, поліпшення умов протікання реакцій окислення вуглецю, зниження температури металу. Витрати інертного газу (переважно аргону) складають, зазвичай, 0,1 – 3 м³/т сталі: продувка з витратою газу до 0,5 м³/т достатня для усереднення хімічного складу та температури металу, з інтенсивністю до 1 м³/т – впливає на видалення з металу неметалевих включень, а для ефективної дегазації необхідні витрати інертного газу на рівні 2 – 3 м³/т. В залежності від маси рідкої сталі в ковші, зниження температури розплаву при таких витратах аргону складає 2,5 – 4,5 °С/хв (без продувки розплав в ковші охолоджується зі швидкістю 0,5 – 1 °С/хв) [5, 6, 8]. Тепло при продувці додатково витрачається на нагрів інертного газу та випромінювання поверхнями металу і шлаку, що активно перемішуються, при цьому більша частина теплових втрат пов'язана зі збільшенням саме теплового випромінювання, тому використання кришки для ковша забезпечує зменшення втрат тепла та ступеня окиснення металу [5, 6, 8]. На цьому принципі, зокрема, базується технологія CAB – процесу (Capped – накривати, Argon – аргон,

Bubbling – продувка), що розроблена в Японії (рис. 1) [8]. Як видно з рисунку, технологією передбачена не тільки наявність синтетичного шлаку на поверхні металу, але й створення певної захисної атмосфери в закритому кришкою об'ємі ковша при здійсненні процесу продувки.



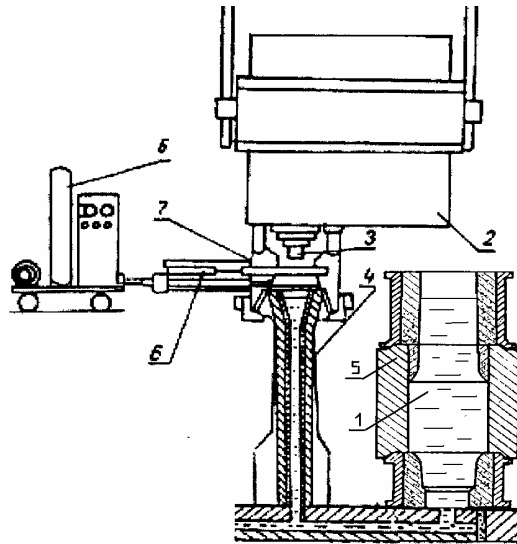
1 – ківш з металом, 2 – кришка ковша, 3 – пристрій для завантаження феросплавів, 4 – отвір для відбору проб, 5 – синтетичний шлак, 6 – шиберний затвор, 7 – шпариста пробка для введення аргону

Рисунок 1 – Схема САВ –процесу [8]

На теперішній час у виробничій практиці знайшли своє застосування багато варіантів пристроїв та обладнання для здійснення технологічної операції продувки розплаву в ковші: крізь шиберний затвор, газопроникливу вставку, крізь фурму, що занурюється у розплав та ін. Окрім того, вони використовуються при реалізації комбінованих технологій, наприклад, в установках ківш-піч та вакууматорах. Однак, значною вадю, що знижує кінцеву ефективність усіх ковшових процесів позапічної обробки, є об'єктивна технологічна необхідність подальшого переливання розплаву в ливарну форму (вилівницю) або проміжний ківш, і чим більший об'єм металу треба розливати, тим більший цей негативний вплив. Наприклад, за даними [3] майже 70 % неметалевих включень, що виявляються в сталі, виникають внаслідок вторинного окислення металу в процесі його переливання із основного ковша в проміжний. Результати досліджень В.А. Єфімова показали, що ступінь поглинання кисню визначається турбулентністю струменю сталі, що заливається, та площею до-

тику її поверхні з навколишнім середовищем. Витікання струменів із основного ковша здійснюється під тиском стовпа металу 3 – 5 м при великих значеннях числа Рейнольдса. Бічна поверхня дотику струменю повітря за час розливки 300 тоннних ковшів складає 300 – 400м² [3]. Дослідження показали, що за час розливки сталі кількість кисню, поглиненого струменем, складає 0,5 – 2,3 кг/т сталі [3]. Основним засобом захисту струменю металу при переливі із основного ковша в проміжний є використання спеціальних вогнетривких труб та створення в них позитивного тиску аргону.

При розливанні злитків і крупних виливків проблема захисту струменя металу та застосування зовнішніх фізичних впливів на розплав, в тому числі в процесі затвердіння безпосередньо у формі, є не менш актуальною, тому у виробничій практиці з'являються відповідні технологічні процеси та обладнання. Одна з таких технологій розроблена в Японії [9]. На рисунку 2 представлена схема установки для розливки крупних виливків та злитків, що має ущільнювальний пристрій 7, що герметизує систему ківш – виливок та забезпечує в процесі заливки ливарної форми (виливниці) та після її завершення можливість створення понадатмосферного тиску аргону. При цьому, після завершення заливки рідкий метал витісняється із стояка у виливкок з можливістю здійснення в подальшому продувки аргонном вісьової зони виливка та вдування різних порошкоподібних реагентів. До недоліків даного способу можна віднести наявність легко уразливих системи з'єднання стояка і ковша та ущільнюючого пристрою за наявності бризок та охолодей металу під час заливки. Окрім того, конструкція установки достатньо складна та громіздка, відповідно, використання її у вже діючому технологічному процесі потребує значних капітальних витрат.



1-розплав; 2-стопорний ківш; 3-залівний стакан; 4-стояк;
5-ливарна форма; 6-гідралічний привод; 7- ущільнювальний пристрій;
8-балон з газом

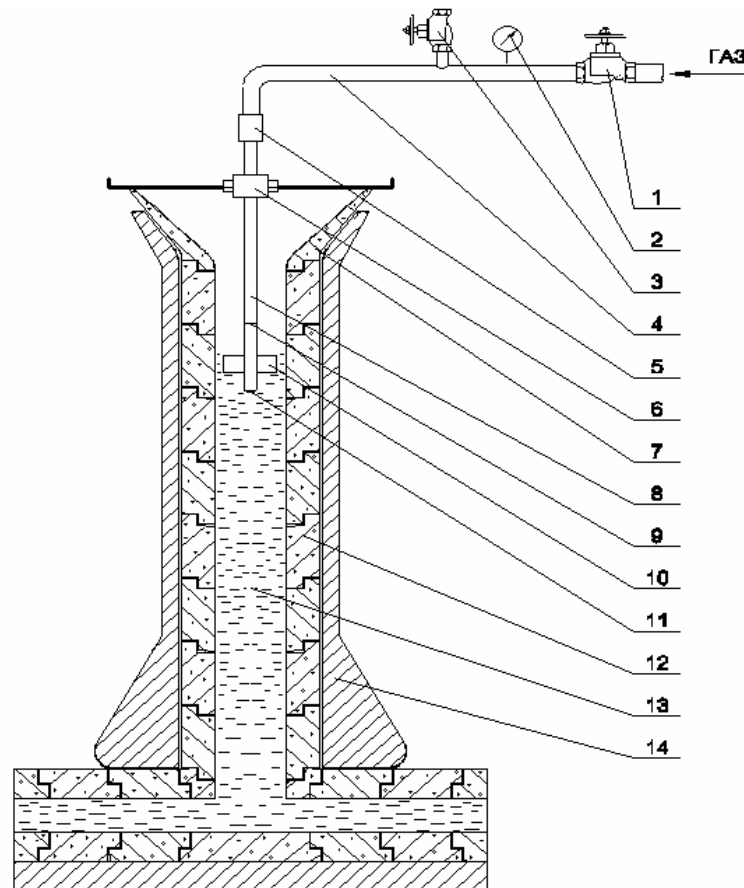
Рисунок 2 – Установа для розливки сталі

Наведені вище дані свідчать про актуальність питань, що пов'язані з розробкою ефективних методів використання продувки інертними газами та вакуумування для підвищення якості кінцевої литої заготовки, зокрема, нових комбінованих технологій, що поєднують ці впливи та реалізуються за допомогою відповідних технологій обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі (виливниці). Зокрема, перспективним представляється використання для цього існуючих технологічних схем та пристроїв для газодинамічного впливу на розплав, що передбачають використання герметизації системи виливок (злиток) – пристрій для введення (відводу) газу за рахунок залитого в форму (виливницю) металу [10].

Метою роботи є обґрунтування технологічної можливості та розробка принципів схем здійснення комбінованих технологій, що включають процеси продувки інертними газами, вакуумування та наступний вплив газовим тиском на розплав в процесі затвердіння виливка в ливарній формі (виливниці).

Основний матеріал. На відміну від вищеописаної технології (див. рис. 2), спеціалістами кафедри ливарного виробництва НМетАУ запропоновані конструкції пристроїв, що вводяться безпосередньо в ливникову систему після завершення заливки та герметизують її від навколишнього середовища, після чого розплав витісняється із ливникової системи у вилівок (злиток) під дією газового тиску [11, 12]. Наступним етапом може бути здійснення продувки вісьової зони залитого в форму вилівка (злитка). Схема одного з варіантів конструкції такого пристрою представлена на рис. 3. Ефективність його роботи залежить від забезпечення герметичності системи стояк – пристрій для введення газу. При цьому проміжок часу від завершення заливки до початку подачі стисненого газу, включаючи процес герметизації, повинен бути меншим ніж час затвердіння металу у найбільш вузькому перетині ливникової системи, яким є перетин живильників. Для лиття злитків, зазвичай, використовують сифонний вогнетривкий припас з діаметром ≥ 50 мм в місці підводу металу від стояка до виливниці, діаметр стояка ≥ 100 мм. При цьому тривалість затвердіння живильника діаметром 50 мм складає більше 70 с в залежності від тривалості заливки, відповідно від маси розплаву, що проходить через ливникову систему (ЛС). Цього часу цілком вистачає для введення пристрою, його герметизації та початку подачі газу в ЛС. Наприклад, експериментальні дослідження технології витиснення розплаву із стояка діаметром 100 мм та висотою 2,7 м в злитки масою 7,2 т в умовах ККЦ ПАТ «Дніпровський металургійний завод» (завод ім. Г.І. Петровського) показали, що товщина затверділого шару металу на стінках вогнетривких провідок після витиснення розплаву з ЛС складала від 1,5 – 2,0 мм у верхній частині стояка до 3,5 – 5,0 мм в нижній його частині. Таким чином, використання пристрою дозволяє також зекономити на металі, що переходить в злиток із сифонної ЛС, маса якого з врахуванням товщини затверділого шару на стінках вогнетривких провідок для вищезазначеної ЛС становить біля 200 кг. В процесі продувки можливе введення в струмінь газу та, відповідно, у вилівок (злиток) порошкоподібних реагентів (лігатур, розкислювачів, модифікаторів тощо). Треба відзначити, що даний пристрій конструктивно простий, а технологічний

процес його використання може бути легко вбудованим в діючий технологічний процес. Окрім того, пристрій може працювати навіть у разі потрапляння в стояк наприкінці заливки шлаку із ковша.



- 1 – вентиль подачі газу; 2 – манометр; 3 – випускний вентиль;
4 – основна частина; 5 – з'є муфта; 6 – опорна струбцина; 7 – заливальна
лійка; 8 – змінна частина; 9 – кільцева насічка; 10 – холодильник;
11 – торцова вставка-пробка; 12 – вогнетривка проводка;
13 – розплав; 14 – корпус центрної

Рисунок 3 – Пристрій з регульованою подачею газу

Комбінована технологія продувки, вакуумування та впливу газовим тиском на розплав в процесі затвердіння в ливарній формі заснована на тому, що протягом усього процесу від початку твердіння на рідкий метал здійснюється вплив за рахунок створення регульованого газового тиску в герметизованій системі виливок-пристрої для введення газу. Реалізовуваний процес передбачає як необхідну умову здійснення наяв-

ність на поверхні ЛС та робочої порожнини ливарної форми шару затверділого металу до моменту подачі газу в систему виливок-пристрої для подачі газу. Товщина цього шару, що збільшується в часі, повинна забезпечувати за своїми міцністними характеристиками герметичність системи виливок-пристрої для введення газу, що знаходиться під тиском, аж до повного затвердіння виливка. Загальна схема реалізації комбінованої технології представлена на рисунку 4.

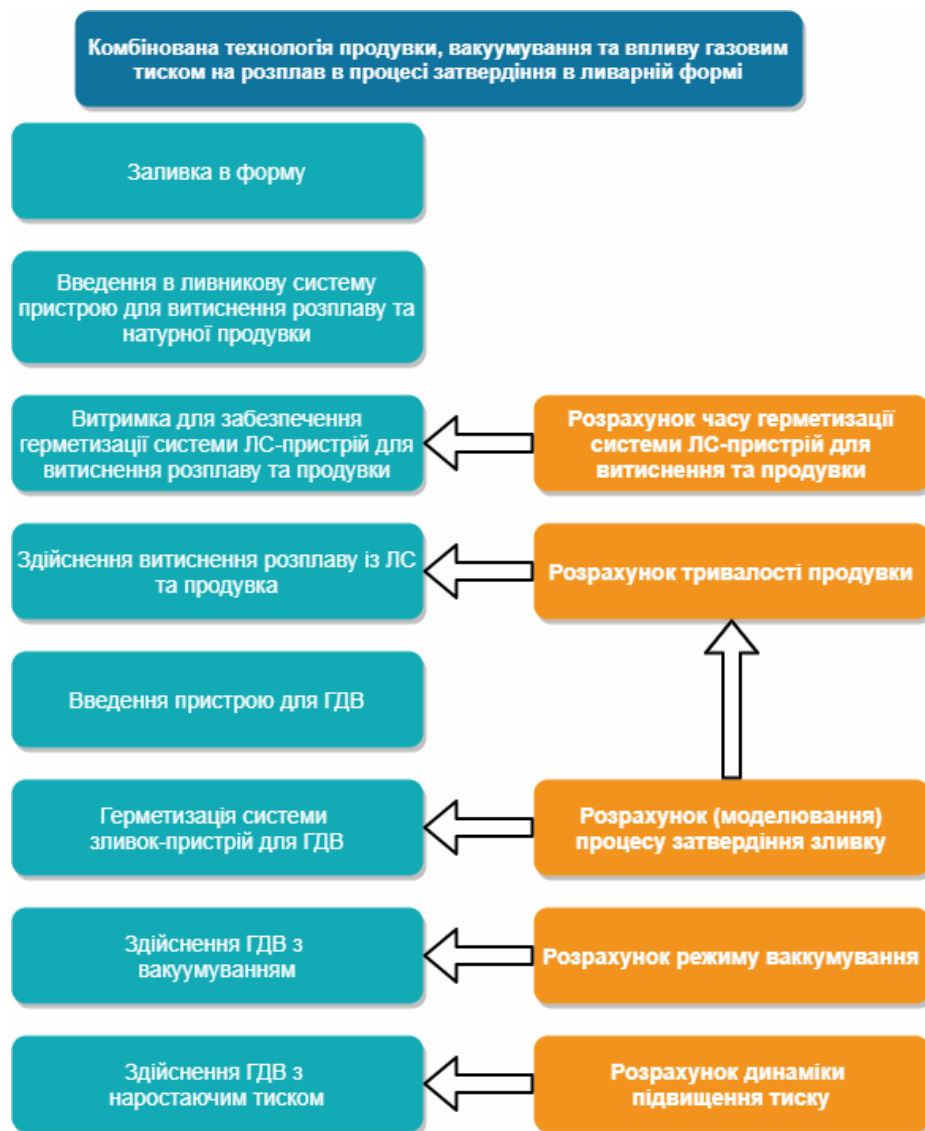


Рисунок 4 – Комбінована технологія продувки, вакуумування та впливу газовим тиском на розплав в процесі затвердіння в ливарній формі

Технологія може застосовуватися для злитків та виливків, що використовують для заливки сифонну ЛС, і включає дві основні складові.

Реалізація першої складової пропонованого загального технологічного процесу пов'язана з використанням сифонної ЛС для витиснення рідкого металу у виливок (злиток) після заливки розплаву в форму та наступної продувки інертним газом вісьової зони виливка за допомогою пристрою, що представлений на рис. 3. При цьому, інертний газ (зазвичай аргон), що необхідний для витиснення розплаву з ЛС та наступної продувки вісьової зони виливка (злитка) після герметизації системи за допомогою дискового сталевого холодильника 10, подається від зовнішнього джерела через пневмопровід 4 та змінний трубчастий елемент 8.

Після занурення пристрою в рідкий метал 13 вентиль 3, що пов'язує систему з атмосферою, залишається відкритим до тих пір, поки не здійсниться затвердіння розплаву в зазорі між холодильником 10 та внутрішньою поверхнею вогнетривкої проводки 12 стояку, що викликано необхідністю відводу із системи надлишків газу, що розширюється при нагріві та здатний порушити процес герметизації. Після завершення процесу герметизації вентиль 3 перекривають, після чого подається газ, що спочатку витісняє розплав з ЛС, а потім потрапляє у ливарну форму (виливницю).

Розрахункова тривалість продувки залежить від конкретних параметрів виливка та форми (температури, фізичних та теплофізичних властивостей сплаву, маси, геометричних особливостей та ін.). Дане питання є дуже важливим та потребує проведення подальших досліджень для розробки загальної методики визначення режимів реалізації цієї складової комплексної технології.

Реалізація другої складової процесу пов'язана з використанням технології газодинамічного впливу на розплав (ГДВ), що знаходиться в робочій порожнині ливарної форми (виливниці) за допомогою відповідних пристроїв різних конструкцій [13 - 16]. В цілому, ці пристрої представляють собою металеві холодильники корпусного типу, що забезпечують функції герметизації виливка (злитка) від навколишнього середовища та подачу стисненого газу від зовнішнього джерела або відвід газу

вакуумною системою. Один з варіантів конструкції такого пристрою для здійснення ГДВ (рис 5, а, б) складається з металевого корпусу 1, вставки з вогнетривкого матеріалу 2, що розташована в цьому корпусі, газопроводу, поєднаного з системою зовнішнього забезпечення газом високого тиску або вакуумною системою (на рисунку не показано). Металевий корпус обладнаний осьовим газопостачальним патрубком 3 з наскрізними отворами 4, що розташовані безпосередньо під внутрішньою поверхнею верхньої стінки металевого корпусу, а кінцівка та отвори газопостачального патрубку перекриті газопроникливою пробкою 5.

За одним з варіантів реалізації технологічного процесу після завершення продувки на поверхню рідкого металу в надливну частину ливарної форми (виливниці) крізь шар теплоізоляційної засипки опускають пристрій, при чому, бічна поверхня металевого корпусу, що опиняється зануреною у розплав, герметизує злиток або вилівок (рис 5, в).

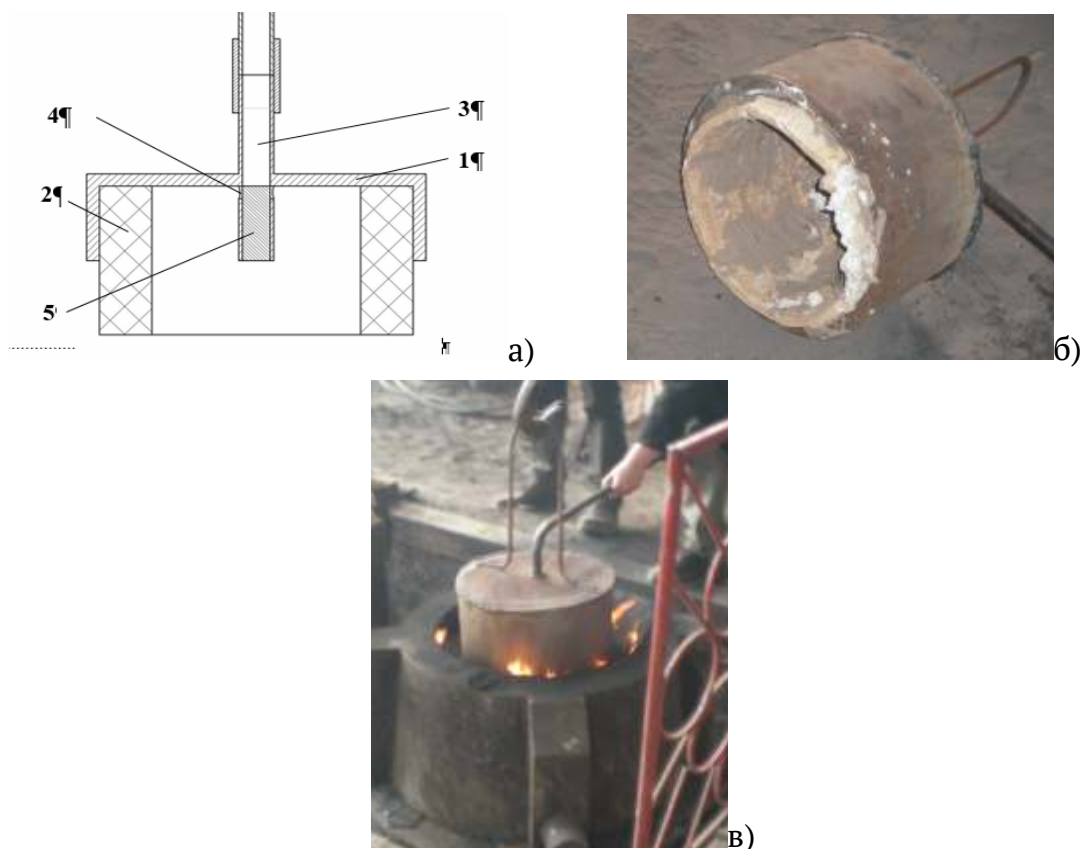


Рисунок 5 – Схема конструкції (а) та загальний вигляд (б) пристрою для реалізації ГДВ, а також фрагмент занурення його в надливну частину злитка (в)

Впродовж розрахункового часу процес герметизації системи виливок (злиток) – пристрій для ГДВ протікає при атмосферному тиску, що виключає можливість прориву газом шару металу між стінками корпусу та ливарної форми. Це дозволяє згодом здійснити процес ГДВ на рідкий метал та метал, що твердіє. Варіантами реалізації такого впливу можуть бути здійснені послідовно вакуумування та газодинамічний тиск, або щось одне, відповідно до конкретних завдань щодо якості литого металу та технологічних можливостей в умовах діючого виробництва.

Розрахунки технологічних режимів здійснення процесів вакуумування та газодинамічного тиску треба проводити в кожному випадку окремо, враховуючи всі необхідні параметри виробництва конкретного вилівка або злитка. Треба відзначити, що питання, пов'язані з методологією визначення раціональних режимів внутрішньоформенного вакуумування розплаву в герметизованій системі виливок – пристрій для ГДВ потребують проведення подальших досліджень для отримання відповідних науково обгрунтованих результатів з метою їх використання в якості вихідних даних для створення ефективних розрахункових схем, алгоритмів та відповідного програмного забезпечення.

Основні засади розрахунку режимів здійснення газодинамічного тиску базуються на відповідності створюваного в системі виливок – пристрій для ГДВ газового тиску кінетиці зростання затверділого шару металу вилівка в процесі затвердіння [17 – 19]. При цьому, максимальний рівень тиску газу в певний момент часу може бути близьким значенню тимчасового опору металу в затверділому шарі (σ_B) з урахуванням напружень розтягування, спричинених гідростатичним тиском всередині вилівка або злитка. Для виконання умови збереження стабільних геометричних характеристик вилівка в розрахунках використовується опір деформації матеріалу вилівка (σ), що розраховується з мінімальними значеннями швидкісного та ступеневого коефіцієнтів (3):

$$\sigma = \sigma_{\text{о.д.}} k_t k_\epsilon k_u \text{ при } k_\epsilon k_u \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{о.д.}}$ – базисне значення опору деформації, кг/мм²; k_t – температурний коефіцієнт; k_ϵ – ступеневий коефіцієнт; k_u – швидкісний коефіцієнт.

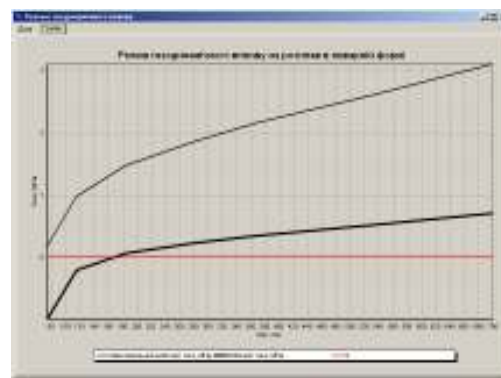
Загальна методика розрахунку технологічних параметрів включає етапи попередньої обробки і отримання вихідних даних, безпосереднього виконання розрахункового алгоритму і подальшого аналізу результатів. На початковому етапі визначається кінетика твердіння виливка і зміна температури його поверхні. Для цього будують температурне поле виливка на основі результатів моделювання або термографічних досліджень. До вихідних даних також відносяться залежності від температури тимчасового опору та опору деформації, щільності металу виливка, його геометричні характеристики.

Далі обчислюють динаміку наростання робочого тиску. В процесі твердіння виливка змінюється середня температура затверділого шару, відповідно і величини межі міцності та опору деформації металу, що дозволяє розраховувати динаміку зміни робочого тиску. Величина і динаміка зміни робочого тиску являє собою різницю між значеннями опору деформації та величиною розтягуючих напружень.

Для автоматизованого виконання розрахунків режимів газодинамічного тиску розроблена комп'ютерна програма «GDICalc» (Gas-Dynamic Influence Calculation) [20,21], що має зручний інтерфейс і забезпечує отримання результатів як в табличному, та і в графічному вигляді (рис. 6)

№ п/п	τ , сек	σ_{Γ} , МПа	σ_B , МПа	σ , МПа	P_{\max} , МПа	P , МПа
1	74	1,03	1,12	0,00667	0,0949	–
2	115	0,25	1,14	0,0133	0,892	–
3	184	0,107	1,49	0,14	1,39	0,033
4	282	0,067	1,84	0,267	1,78	0,2
5	366	0,0520	2,12	0,367	2,07	0,315
6	533	0,038	2,56	0,527	2,52	0,489
7	700	0,025	3,04	0,7	3,02	0,675

а



б

Рисунок 6 – Приклад результатів обчислення в програмі GDICalc: режими газодинамічного тиску для виливка із сталі 35Л в табличному вигляді (а) та інтерфейс програми, діалогове вікно «Режим газодинамічного впливу», закладка «Графіки»

Наявні засоби розрахунку режимів газодинамічного тиску дозволяють визначити необхідні параметри здійснення цієї частини комбінованої технології з врахуванням індивідуальних особливостей конкретного виливка або злитка без проведення додаткових натурних експериментальних, в тому числі термографічних, досліджень та значно скоротити витрати часу на етапі підготовки виробництва.

Висновки.

1. Проведений аналіз результатів теоретичних, експериментальних робіт, існуючих технологічних розробок по використанню процесів продувки, вакуумування та використання газового тиску для підвищення якості литого металу крупних виливків або злитків, показав перспективність застосування вказаних впливів для обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі (виливниці). Такий підхід до здійснення процесів позапічної обробки розплаву дає змогу, в тому числі, отримати переваги традиційно використовуваних технологій ковшової обробки без застосування спеціалізованого обладнання у випадку його відсутності або економічної недоцільності капітальних витрат для його встановлення.

2. Визначена можливість реалізації процесу комплексного внутрішньоформенного газодинамічного впливу на розплав крупних виливків та злитків, який складається з послідовних операцій продувки інертними газами через сифонну ливникову систему, вакуумування та наступного газодинамічного тиску в процесі затвердіння за допомогою відповідних пристроїв. Особливістю технології є те, що протягом усього процесу від початку твердіння на рідкий метал здійснюється вплив за рахунок створення регульованого газового тиску в герметизованій системі виливок-пристрої для введення газу. Необхідна умова - наявність на поверхні ливникової системи та робочої порожнини ливарної форми шару затверділого металу до моменту подачі газу в систему виливок-пристрої для подачі газу. Товщина цього шару, що збільшується в часі, повинна забезпечувати за своїми міцністними характеристиками герметичність системи виливок-пристрої для введення газу, що знаходиться під тиском, аж до повного затвердіння виливка (злитка).

3. В результаті проведення контекстного аналізу роботи пристроїв для витиснення розплаву із сифонної ливникової системи крупних виливків та злитків і здійснення внутрішньоформенної продувки, а також процесів вакуумування та газодинамічного тиску під час затвердіння металу в формі (виливниці), визначені конкретні варіанти їх конструкції та відповідні технологічні особливості роботи. Для витиснення розплаву із сифонної ливникової системи може використовуватися пристрій, що представляє собою провідник газу від зовнішнього джерела стисненого газу з металевим герметизуючим холодильником, що розпочинає «працювати» впродовж 1 – 2 хвилин після завершення заливки. Внутрішньоформенне вакуумування та реалізацію газодинамічного тиску впродовж затвердіння вилівка (злитка) забезпечує пристрій, що вводиться в надливну частину вилівка (злитка) після завершення операції продувки розплаву інертним газом та являє собою холодильник корпусного типу зі вставкою із вогнетривкого матеріалу. Відмінною рисою запропонованих пристроїв є, в тому числі, простота конструкції та легкість вбудовування процесів їх роботи у вже діючий технологічний процес без необхідності значних капітальних витрат.

4. Встановлена необхідність подальших досліджень для розробки загальної методики визначення режимів здійснення певних складових комплексної технології, зокрема, реалізації розрахункової тривалості продувки, що залежить від конкретних параметрів вилівка та форми (температури, фізичних та теплофізичних властивостей сплаву, маси, геометричних особливостей та ін.). Також потребують проведення подальших досліджень для отримання відповідних науково обґрунтованих результатів з метою їх використання в якості вихідних даних для створення ефективних розрахункових схем, алгоритмів та відповідного програмного забезпечення питання, що пов'язані з методологією визначення раціональних режимів внутрішньоформенного вакуумування розплаву в герметизованій системі виливок – пристрій для газодинамічного впливу.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Державська А. В. Сучасний стан галузі машинобудування та тенденції її розвитку / А.В. Державська, П.В. Круш // Науковий вісник Ужгородського національного університету, Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. - Випуск 21, частина 1. – 2018. – С. 69 – 73.
2. Смирнов А.Н. Крупный слиток / А.Н. Смирнов, С.Л. Макуров, В.М. Сафонов, А.Ю. Цупрун ; Донецкий национальный техн. ун-т. – Донецк: изд-во «Вебер» (Донецкое отделение), 2009. – 278 с.
3. Ефимов В.А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Машиностроение, 1998. – 359 с.
4. Смирнов А.Н. Metallургические мини-заводы / А.Н. Смирнов, В.М. Сафонов, Л.В.Дорохова, А.Ю. Цупрун .- Донецк: Норд-Пресс, 2005.– 449 с.
5. Жульев С.И. Производство и проблемы качества кузнечного слитка / С.И. Жульев, И.А. Зюбан: Монография / Волг. ГТУ. – Волгоград, 2003. – 168 с.
6. Дюдкин Д.А. Производство стали на агрегате ковш- печь /Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг, С.Н. Маринцев. - Донецк: Юго-Восток, ЛТД, 2003. – 300 с.
7. Коломоец Д. Обработка металла вакуумом [Электронный ресурс] / Дмитрий Коломоец // Metallurgist.pro. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: <https://metallurgist.pro/obrabotka-metalla-vakuumom/>.
8. Коломоец Д. Продувка металла инертными газами [Электронный ресурс] / Дмитрий Коломоец // Metallurgist.pro. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: <https://metallurgist.pro/produvka-metalla-inertnymi-gazami/>.
9. Заявка № 59-215248. Япония. МКИ В22Д 7/00, В22Д 18/04. Способ разливки стали / Син Ниппон сэйтэцу К.К. (Япония); Заявл. 25. 05. 83; Опубл. 05.12.84./ / Технология и оборудование литейного производства. - 1986.- № 1, 1Г191П. – С. 36.
10. Селиверстов В.Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. 2007. – Том 10. – С. 25 – 35.
11. Хрычиков В.Е., Селиверстов В.Ю., Щеглова Т.С., Меняйло С.В. Уменьшение объема усадочных дефектов в нижних шейках чугуновых прокат-

ных валков // Теория и практика металлургии. Днепропетровск, 2001, №5, с.77-80.

12. Селиверстов В.Ю. Технология вытеснения расплава из стояка в отливку // Теория и практика металлургии. – 1999. - № 4. – С. 12–13.

13. Пат. 28858 Україна, МПК (2006) В22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708968; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.

14. Пат. 28859 Україна, МПК (2006) В22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708969; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.

15. Пат. 37838 Україна, МПК (2006) В22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808859; заявл.07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.

16. Пат. 37837 Україна, МПК (2006) В22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808858; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.

17. «Методика розрахунку режиму газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі»; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір /Селівьорстов В.Ю. – № 34833; дата реєстрації 06.09.2010.

18. Селиверстов В.Ю. Методика расчета параметров газодинамического воздействия на затвердевающий металл в литейной форме / В.Ю. Селиверстов, Т.В. Михайловская //Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 3 (68). – С. 186 – 192.

19. Селиверстов В.Ю. Особенности расчета режима газодинамического воздействия на расплав при кристаллизации отливок из сталей 35Л, Х18Ф1 и алюминиевого сплава АК5М в металлической форме /В.Ю. Селиверстов //Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1 – 2. – С. 64 – 67.

20. Селівьорстов В.Ю. Автоматизоване визначення режиму газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі /В.Ю. Селівьорстов, Т.В. Михайловська //Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010.–Вип. 4 (69).–С. 73 – 78.

21.Комп'ютерна програма «GDICalc»; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір /Селівьорстов В.Ю., Михайловська Т.В. – № 34834; дата реєстрації 06.09.2010.

REFERENCES

1. Derzhavska A. V. Suchasnyi stan haluzi mashynobuduvannia ta tendentsii yii rozvytku / A.V. Derzhavska, P.V. Krush // Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu, Serii: Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo. - Vypusk 21, chastyna 1. – 2018. – S. 69 – 73.
2. Smirnov A.N. Large ingot / A.N. Smirnov, S.L. Makurov, V.M. Safonov, A.Yu. Tsuprun; Donetsk national tech. un-t - Donetsk: publishing house "Weber" (Donetsk branch), 2009. - 278 p.
3. Efimov V.A. Modern technologies of casting and crystallization of alloys / V.A. Efimov, A.S. Eldarkhanov. - M.: Mechanical Engineering, 1998. -- 359 p.
4. Smirnov A.N. Metallurgical mini-plants / A.N. Smirnov, V.M. Safonov, L.V. Dorokhova, A.Yu. Tsuprun. - Donetsk: Nord-Press, 2005. -- 449 p.
5. Zhuliev S.I. Production and quality problems of a forging ingot / S.I. Zhuliev, I.A. Zyuban: Monograph / Volga. GTU. - Volgograd, 2003. -- 168 p.
6. Dyudkin D.A. Steel production at the ladle-furnace assembly / D.A. Dyudkin, S.Yu. Bat, S.E. Greenberg, S.N. Marintsev. - Donetsk: Southeast, LTD, 2003. - 300 p.
7. Kolomoets D. Processing of metal by vacuum [Electronic resource] / Dmitry Kolomoets // Metallurgist.pro. - 2020. - Access mode to the resource: <https://metallurgist.pro/obrabotka-metalla-vakuumom/>.
8. Kolomoets D. Purge metal with inert gases [Electronic resource] / Dmitry Kolomoets // Metallurgist.pro. - 2020. - Access mode to the resource: <https://metallurgist.pro/produvka-metalla-inertnymi-gazami/>.
9. Application No. 59-215248. Japan. MKI V22D 7/00, V22D 18/04. Steel casting method / Shin Nippon seitsetsu K.K. (Japan); Claim 25. 05. 83; Publ. 05.12.84./ Technology and equipment of foundry.-1986.- No. 1,1G191P.- S. 36.
10. Seliverstov V.Yu. The technology of gas-dynamic impact on the melt in the mold is one of the promising ways to improve the quality of metal castings // Modern problems of metallurgy. Initial works. 2007. - Volume 10.-P. 25 - 35.
11. Khrychikov V.E., Seliverstov V.Yu., Scheglova TS, Menyaylo SV Reducing the volume of shrinkage defects in the lower necks of cast-iron rolling rolls // Theory and Practice of Metallurgy. Dnepropetrovsk, 2001, No. 5, pp. 77-80.
12. Seliverstov V.Yu. Technology for displacing the melt from the riser into the casting // Theory and Practice of Metallurgy. - 1999. - No. 4. - S. 12–13.

13. Pat. 28858 Ukraina, MPK (2006) V22D 18/00. Sposib otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200708968; zaiavl.03.08.2007; opubl. 25.12.2007, Biul.№21.
14. Pat. 28859 Ukraina, MPK (2006) V22D 18/00. Prystirii dlia otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200708969; zaiavl.03.08.2007; opubl. 25.12.2007, Biul.№21.
15. Pat. 37838 Ukraina, MPK (2006) V22D 18/00. Sposib otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200808859; zaiavl.07.07.2008; opubl. 10.12.2008, Biul.№23.
16. Pat. 37837 Ukraina, MPK (2006) V22D 18/00. Prystirii dlia otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200808858; zaiavl. 07.07.2008; opubl. 10.12.2008, Biul.№23.
17. «Metodyka rozrakhunku rezhymu hazodynamichnoho vplyvu na rozplav v lyvarnii formi»; svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir /Selivorstov V.Iu. – № 34833; data reiestratsii 06.09.2010.
18. Seliverstov V.Yu. Method for calculating the parameters of gas-dynamic effects on the hardened metal in the mold / V.Yu. Seliverstov, T.V. Mikhailovskaya // System Technologies. - Dnepropetrovsk, 2010. - Issue. 3 (68). - S. 186 - 192.
19. Seliverstov V.Yu. Features of the calculation of the regime of gas-dynamic influence on the melt during crystallization of castings from steel 35L, Kh18F1 and aluminum alloy AK5M in metal form / V.Yu. Seliverstov // Theory and Practice of Metallurgy. - 2010. - No. 1 - 2. - S. 64 - 67.
20. Selivorstov V.Iu. Avtomatyzovane vyznachennia rezhymu hazodynamichnoho vplyvu na rozplav v lyvarnii formi /V.Iu. Selivorstov, T.V. Mykhailovska //Systemni tekhnolohii: Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. – Dnipropetrovsk, 2010. – Vyp. 4 (69). – S. 73 – 78.
21. Kompiuterna prohrama «GDICalc»; svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir /Selivorstov V.Iu., Mykhailovska T.V. – № 34834; data reiestratsii 06.09.2010.

Received 23.03.2020.

Accepted 03.04.2020.

Перспективы использования комплексных технологий газодинамического воздействия на расплав в литейной форме

Представленный анализ научно-технической информации по использованию процессов внепечной обработки для повышения качества литого металла. Показана перспективность применения указанных воздействий для обработки расплава непосредственно в литейной форме (изложницы). Определена возможность реализации процесса комплексного внутришньюформенного газодинамического воздействия на расплав крупных отли-

вок и слитков, который состоит из последовательных операций продувки инертными газами через сифонную литниковую систему, вакуумирования и последующего газодинамического давления в процессе затвердевания с помощью соответствующих устройств. Определены конкретные варианты их конструкции и технологические особенности работы. Показано, что отличительной чертой технологии является то, что в течение всего процесса от начала твердения на жидкий металл оказывается воздействие за счет создания регулируемой газовой давления в герметизированной системе отливка-устройства для ввода газа. Предложенные устройства, является конструктивно простыми и могут быть с легкостью встроенными в уже действующий технологический процесс без необходимости значительных капитальных затрат. Отмечена необходимость дальнейших исследований для разработки общей методики определения режимов продолжительности продувки и рациональных режимов внутришньоформенного вакуумирования расплава.

**Prospects for the use of integrated technologies
of gas-dynamic impact on the melt in the mold**

Trends in expanding the range of steel ingots, instability and crushing of orders at existing foundries that do not have additional specialized equipment, high capital costs for global technical re-equipment, necessitate the search for new technological ways to obtain quality products. Therefore, more and more attention of scientists and practitioners is attracting questions related to improving existing and developing new processes to improve the quality of cast metal, reduce the cost of producing products, and increase the degree of environmental friendliness of production in general. One of such recognized ways to improve the quality of cast billets is the use of external physical effects on the liquid metal, and the metal that crystallizes directly in the mold.

The paper presents an analysis of scientific and technical information on the use of out-of-furnace processing processes and the use of gas pressure to improve the quality of cast metal of large castings or ingots. The prospects of using these effects for processing the melt directly in the mold is shown. The possibility of implementing a process of complex in-situ gas-dynamic impact on the melt of large castings and ingots, which consists of sequential inert gas blowing through a siphon sprue system, evacuation and subsequent gas-dynamic pressure in the solidification process using the appropriate devices. Specific options for their design and technological features of the work are determined.

A distinctive feature of the technology is that during the entire process from the onset of solidification, the metal is affected by the creation of an adjustable gas pressure in a sealed casting-gas injection system. The proposed device is structurally simple and can be easily integrated into an existing process without the need for significant capital costs.

The need for further research to develop a common methodology for determining the duration of the purge, and rational modes of intra-molten melt evacuation of the sealed casting system - a device for gas-dynamic effects.

Селиверстов Вадим Юрьевич - д.т.н., професор, кафедра литейного виробництва, Національна металургічна академія України.

Селиверстова Татяна Віталіївна - к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем, Національна металургічна академія України.

Селівьорстов Вадим Юрійович - д.т.н., професор, кафедра ливарного виробництва, Національна металургічна академія України.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна - к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем, Національна металургічна академія України.

Selivyorstov Vadim - doctor of engineering's sciences, professor, Department of casting production, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Selivyorstova Tatjana - candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, The National Metallurgical Academy of Ukraine.