

<https://doi.org/10.15407/plit2022.01.039>

УДК 621.74.047:669-154

А. М. Верховлюк, д-р техн. наук, проф, зав. відділу;

e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com; ORCID 0000-0002-2657-405

Р. В. Петровський*, аспір., гол. інженер; *e-mail: cadet2000@ukr.net*

Р. А. Сергієнко, канд. техн. наук, старш. досл., старш. наук. співроб.;
e-mail: rsruslan17@gmail.com

В. М. Бабич, мол. наук. співроб.; *e-mail: mekol@meta.ua*

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

*ТзДВ «ГАЛ-КАТ» (Львів, Україна)

ОСОБЛИВОСТІ ПОДАЧІ РОЗПЛАВІВ НА ОСНОВІ Fe та Cu В МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ

Представлено дві схеми установок, які доцільно використовувати як для безперервної подачі високотемпературних розплавлених металів на основі заліза, так і для їх переривчастої дозованої подачі в ливарні форми. Друга конструкція найбільш ефективно пристосована для безперервної подачі міді та її сплавів. Базовими вузлами, що входять в обидві конструкції установок, є піч, індукційний нагрівач, реверсивний індукційний рушій, металопровід для транспортування розплаву та швидкоз'ємний перенастроюваний вузол для формування і подачі плоского потоку розплаву – горизонтальне щілинне сопло. Конструкції металопроводів, які входять до складу апаратів також мають подібні елементи. Окрім того, обидві конструкції металопроводів для можливості рециркуляції розплаву в тиглі виконано за схемою замкнутого гідравлічного контуру. Гідравлічний контур включає напірну трубу, яка забезпечує нагнітання розплаву в горизонтальне щілинне сопло та зливну трубу, на яку, в приведених варіантах виконання гідравлічного контуру, покладається декілька функцій. Завдяки тому, що при монтажі гідравлічного контуру зливну трубу піднімають на деяку висоту відносно горизонтальної вісі отвору щілинного сопла, вона підтримує в процесі роздачі розплаву функцію стабілізації тиску в горизонтальному щілинному соплі. Металостатичний тиск P_m , який створюється стовпом розплавленого металу висотою H розраховується за формулою: $P_m = \rho H$, де ρ – густина рідкого металу. В конструкціях металопроводів зливна труба замикається на тигель скидним патрубком, який вмонтовано в бічну стінку тигля. В першій конструкції застосовано укорочену систему для транспортування розплавів, тому вона більш пристосована для розливання високотемпературних розплавів, таких як залізо-вуглецеві та леговані сталі. Конструктивні особливості наступної установки передбачають подовжену проточну систему для транспортування, завдяки чому вона більш ефективна для подачі кольорових металів та сплавів. В даному випадку подача розплаву в ливарні машини забезпечується способом, в якому застосовано суміщення операцій рециркуляції розплаву в тиглі і створення необхідного металостатичного напору.

Ключові слова: чорні та кольорові сплави, залізо, мідь, установка, безперервне лиття, ливарні форми.

Пристрої різного конструктивного виконання для подачі розплавленого металу з проміжного ковша в кристалізатор, відомі вже протягом тривалого часу, однак не всі з них можна використовувати в процесах керованої дозованої подачі розплавів в рухомі ливарні форми. Так, основною технічною проблемою в процесах безперервного лиття, які отримали також назву «Twin-Roll Casting» [1], є забезпечення гнучкої узгодженої подачі розплаву в кристалізатор та прагнення до розширення діапазону регулювання швидкостей потоку розплавленого металу.

Наявність регулювання подачі розплаву визначає умови якісного керування процесом, що запобігає переливу металу або розриву полоси. Він може бути застосований при литті мідних металевих дротів і стрічок шляхом безперервної подачі розплаву або для переривчастого дозування металевих суспензій, наприклад, на стрічковий кристалізатор. Безперервна регульована подача стає добротною і більш ефективною при узгодженні швидкості витікання розплавленого металу з окружною швидкістю поверхні кристалізатора, в які направляється потік розплавленого металу. В ливарному виробництві поширені різні конструкції механізмів, апаратів і систем, які забезпечують подачу розплавленого металу в валкові машини. Наприклад, відомі конструкції механічних шибєрних затворів, опис яких наведено в роботах [2–4]. Особливістю зазначених пристроїв є те, що вони придатні для формування масивних виливків та слябів товщиною від 15 до 30 мм, і практично не пристосовані для виготовлення тонких смуг або дротів.

Серед інших методів подачі розплавів поширені методи дозування розплавів шляхом нахилу тигля печі за допомогою поворотного привода. Проте, в процесах дозування плоского потоку вони не забезпечують достатню точність. Окрім цього значна інерційність поворотних механізмів нахилу тиглів також є фактором, який стримує їх застосування для подачі плоского потоку.

Для регулювання потоку розплаву застосовують також спосіб подачі розплаву з сопла під тиском газу [5]. Слід зауважити, що, в даному процесі, для оптимізації швидкості подачі розплавленого металу за допомогою газового тиску, необхідно враховувати коливання параметрів розплаву і дотримуватись оптимальних параметрів в'язкості. Отже, необхідність контролю в'язкості розплаву значно ускладнює побудову систем регулювання. Окрім цього, при створенні газового тиску треба вживати додаткові заходи для забезпечення надійності ливарних печей та підвищення рівня техніки безпеки обслуговуючого персоналу.

В технічному аспекті практичного втілення набули дві групи конструкцій електромагнітних насосів для транспортування розплавлених металів. Перша конструктивна група – кондукційні насоси, в яких магнітне поле діє поперек труби, яка містить розплавлений метал, а струм подається в розплав через електроди, які приєднуються до стінок труби. Другий конструктивний тип становлять індукційні насоси. Індукційні насоси застосовують для прокачування розплавленого натрію або калію в системах охолодження активної зони атомних реакторів.

В роботі [6] показано, що для запобігання витікання розплавленого металу з відкритого кінця металопроводу використовують електромагнітні утримуючі пристрої. В них, при роботі електромагнітів змінного струму, утворюється магнітне поле, яке обмежує тиск на масу розплавленого металу на відкритому кінці простору між валками і завдяки цьому можливе регулювання подачі розплаву в двовалкову ливарну машину. При цьому дисперсійний розплав подається за рахунок його нагнітання з тигля печі через сопло в ливарні форми з рухомими стінками. В процесі нагнітання дисперсійного розплаву індукційним рушієм забезпечуються його рециркуляція в тиглі і створюється металостатичний напор, який стабілізує робочий тиск в щілинному соплі, причому задану величину металостатичного напору, який встановлюється необхідною різницею висот між горизонтальною віссю отвору щілинного сопла і рівнем поверхні розплаву, що стікає в тигель в процесі рециркуляції. Окрім того в процесі подачі розплаву у ливарні форми з рухомими стінками здійснюється регулювання кондукційним рушієм об'ємної витрати розплаву, що витікає з щілин-

ного сопла, для чого його встановлюють на корпусі щілинного сопла. Регулювання витікання потоку розплаву з щілинного сопла проводять в реверсивному діапазоні потужності кондукційного рушія. Також перед початком робочого процесу проводять цикл рециркуляційної прокачки каналів металопроводу для чого індукційним рушієм піднімають тиск розплаву до рівня встановленого металостатичного напору, а кондукційним рушієм встановлюють режим електродинамічного гальмування потоку розплаву в зоні розташування отвору в щілинному соплі. Пристрій для подачі розплавів в ливарні форми з рухомими стінками містить реакторну піч з тиглем, обладнаним транспортним металопроводом, який виготовлено по схемі замкнутого гідравлічного контуру для рециркуляції розплаву в тиглі. В транспортний металопровід вмонтовано вузол щілинного сопла, причому в трійниковому вузлі транспортного металопровода вбудовано індукційний рушій, а на корпусі щілинного сопла додатково встановлено кондукційний рушій.

Після підготовки розплавленого металу шляхом термохімічного, електрохімічного і механотермічного впливів на розплав в тиглі апарату та його подальше електромагнітне транспортування здійснюється електромагнітними силами регульованої подачі розплаву в спеціалізовані ливарні форми. Зокрема, подача розплавленого металу може бути організована в будь-який ливарний пристрій, ливарну форму з рухомими стінками або у ливарні машини, наприклад, здійснюється постійна керована подача розплаву в машину безперервного лиття.

Режим роботи такого пристрою може бути як прямим, так і зворотним для зупинки руху або дроселювання розплаву. Проблема зниження вартості апаратів для подачі розплаву і значних габаритів електричних індукційних систем для створення магнітного поля, необхідного для перекриття великого зазору в щілинному соплі, вирішили за рахунок часткового використання високоенергетичних постійних магнітів, які містять рідкоземельні елементи, наприклад, такі, як неодим. Розрахунки довели, що індукційні котушки, тобто дрітові мідні обмотки електромагніту, що мають потужність еквівалентну потужності високоенергетичних постійних неоманітів з рідкоземельними елементами, займатимуть об'єм приблизно в 105–125 разів більший, ніж об'єм постійних неоманітів. Більш того, постійні неоманіти не виділяють побічного тепла, в той час як електромагніти розсіюють значну кількість теплової енергії за рахунок проходження струму через електричний опір його обмоток.

Для реалізації способу подачі розплаву в машину безперервного лиття в залежності від цільового призначення розроблено дві модифікації апаратних засобів, конструкції яких представлено на рис. 1, рис. 2 [7].

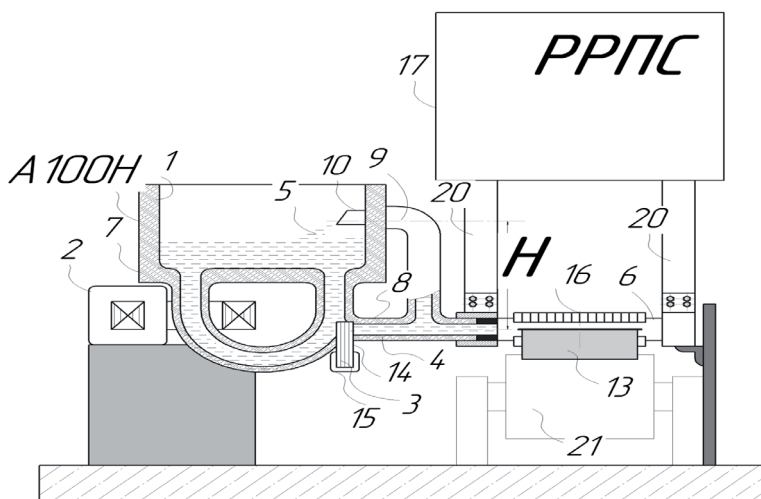


Рис. 1. Схема установки для безперервної або дозованої подачі розплавів на основі заліза у ливарні форми

На рис. 1 зображено схему установки, яку доцільно використовувати як для безперервної подачі високотемпературних розплавлених металів, так і для їх переривчастої дозованої подачі в ливарні форми. Друга конструкція найбільш ефективно пристосована для безперервної подачі кольорових металів та їх сплавів (рис. 2).

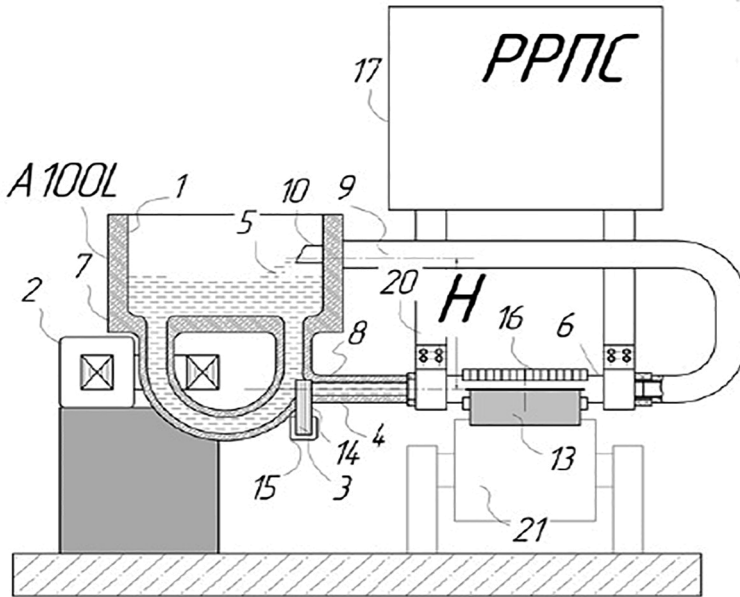


Рис. 2. Схема установки для безперервної подачі рідкої міді та її сплавів

Базовими вузлами, що входять в обидві конструкції установок, є піч 1, індукційний нагрівач 2, реверсивний індукційний рушій 3, металопровід 4 для транспортування розплаву 5 та швидкоз'ємний перенастроюваний вузол для формування і подачі плоского потоку розплаву – горизонтальне щілинне сопло 6. Конструкції металопроводів, які входять до складу апаратів, що показані на рис. 1 та рис. 2, також мають подібні елементи. Окрім того, обидві конструкції металопроводів 4 для можливості рециркуляції розплаву 5 в тиглі 7, виконано по схемі замкнутого гідрравлічного контуру. Гідрравлічний контур включає напірну трубу 8, яка забезпечує нагнітання розплаву в горизонтальне щілинне сопло 6, та зливу трубу 9, на яку в приведених варіантах виконання гідрравлічного контуру покладається декілька функцій. Завдяки тому, що при монтажі гідрравлічного контуру зливу трубу піднімають на висоту H відносно горизонтальної вісі отвору щілинного сопла 6, (рис. 1, рис. 2), вона підтримує в процесі роздачі розплаву функцію стабілізації тиску в горизонтальному щілинному соплі. Металостатичний тиск P_m , який створюється стовпом розплавленого металу висотою H , розраховується за формулою: $P_m = \rho H$, де ρ – густина рідкого металу. В конструкціях металопроводів злива труба 9 замикається на тигель 2 скидним патрубком 10, який вмонтовано в бічну стінку тигля. В першій конструкції, яку представлено на рис. 1, застосовано укорочену систему для транспортування розплавів, тому вона краще пристосована для розливання високотемпературних розплавів, таких як залізовуглецеві та леговані сталі. Конструктивні особливості наступної установки (рис. 2) передбачають подовжену проточну систему для транспортування, завдяки чому вона більш ефективна для подачі кольорових металів та сплавів.

Отже, конструкції транспортного металопроводу, які виконано за схемами з рециркуляцією розплавів в тиглі, здатні забезпечувати наступні технологічні функції: термостабілізація та гомогенізація параметрів розплавленого металу; забезпечення подачі розплаву в горизонтальне щілинне сопло під постійним стабільним тиском. Формування плоского потоку при подачі розплаву забезпечується наявністю в апаратах щілинного сопла 6.

Вузол щілинного сопла встановлюють над ливарною машиною або безперервним кристалізатором та з'єднують з металопроводом замкнутого гідрравлічного контуру

так, що при нагнітанні розплаву в сопло гідравлічна схема забезпечує підтримку процесу рециркуляції розплаву в тиглі. Рециркуляцію розплаву в тиглі необхідно підтримувати згідно технічних вимог: необхідність постійного поточного форматування і підтримка необхідного термодинамічного стану розплавленого металу, який подається у ливарну машину; необхідність безперервного перемішування розплаву в тиглі з метою протікання процесу його гомогенізації та усереднення властивостей металевих сплавів; необхідність підтримки напору розплаву для стабілізації тиску в горизонтальному щілинному соплі.

В даному випадку рециркуляцію розплаву в тиглі 7 проводять шляхом нагнітання в металопровід розплавленого металу реверсивним індукційним рушієм 3, для чого його встановлюють в зоні розташування трійникового вузла металопровода.

Для розширення функціональних можливостей в конструкції установок (рис. 1, 2) введено другий рушій розплавленого металу (кондукційний рушій 16). Його встановлено на щілинному соплі, завдяки чому він може виконувати регуляторні функції при дозуванні розплавів з щілинного сопла. Для цього встановлено реверсивний регулятор 17 постійного струму (РРПС), який здійснює подачу електричного струму через розплав на ділянці щілинного сопла, а по кінцях вогнетривкої труби 11 розміщені кільцеві електроди 18, які контактують з розплавом, що знаходиться в трубі 11. Поперечний магнітний потік створюють набором постійних магнітів 19. Залежно від необхідної довжини щілинного отвору може бути використане більша або менша кількість неодимових магнітів 19. Підключення регулятора до кільцевих електродів здійснюється за допомогою перехідних плоских мідних шин 20. Подачу розплаву 5 в ливарну машину 21 здійснюють шляхом його нагнітання з тигля 7 плавильної печі по напірній трубі 8 в горизонтальне щілинне сопло 6 індукційним рушієм 3. В процесі нагнітання розплаву індукційним рушієм забезпечують його рециркуляцію в тиглі, і одночасно, завдяки створенню металостатичного напору, підтримують стабільний робочий тиск в горизонтальному щілинному соплі 6, причому величину металостатичного напору задають різницею висот H між горизонтальною віссю отвору щілинного сопла і рівнем поверхні розплаву, що стікає в тигель в процесі рециркуляції (рис. 1, 2). Для узгодження швидкостей подачі потоку розплаву і швидкості обертання валків ливарної машини додатково проводять регулювання кондукційним рушієм об'ємної витрати плоского потоку 13, що витікає з щілинного сопла. При цьому кондукційний рушій 16 встановлюють на корпусі 11 щілинного сопла, а процес регулювання витікання потоку розплаву з щілинного сопла проводять змінюючи струм I в прямому або в протилежному напрямку і, таким чином, охоплюють реверсивний діапазон потужностей, який має реверсивний регулятор 17. Перед початком робочого процесу проводять цикл рециркуляційної прокачки каналів металопровода, для чого індукційним рушієм піднімають тиск розплаву до рівня встановленого металостатичного напору, а кондукційним рушієм встановлюють режим електродинамічного гальмування потоку розплаву в зоні розташування отвору в щілинному соплі. Процес електродинамічного гальмування витікання розплаву з щілинного отвору відбувається з моменту виникнення електричного моста між кільцевими електродами 18.

Таким чином удосконалення подачі розплаву в ливарні машини, забезпечується способом, в якому застосовано суміщення операцій рециркуляції розплаву в тиглі і створення необхідного металостатичного напору. Такого типу установки значно розширюють функціональні можливості для лиття низькотемпературних та високотемпературних дисперсійних розплавів і металевих сплавів.

References

- 1 Barekar N.S., Dhindaw B.K. Twin-Roll Casting of Aluminum Alloys – An Overview. Journal Materials and Manufacturing Processes. 2014. Vol. 29. Is. 6. P. 651–661
- 2 Patent DE 3616115 (A1). Method and apparatus for governing the flow of liquid metal through a vessel's pouring nozzle, 1987.
- 3 Patent JP 2014008512 (A). Automatic Surface Pressure Load Slide Valve Apparatus, 2014.

- 4 Patent CA 2969198 (A1). A Slide Metal Frame-Drive unit Coupling Position Switching Mechanism For a Sliding Nozzle Apparatus, 2016.
- 5 Patent CA 2986347 (A1). Apparatus and Method of Manufacturing Metallic or Inorganic Fibers Having a Thickness in the Micron Range by Melt Spinning, 2017.
- 6 Patent EP0586732 (A1). Apparatus and Method for Magnetically Confining Molten Metal, 1994.
- 7 Патент України на винахід 124671. Спосіб і пристрій для подачі розплавів в ливарні форми з рухомими стінками, 2021. [Patent of Ukraine for the invention 124671.

Received 14.12.2021

A. M. Verkovliuk, *Dr. Sci. (Engin.). Professor, Head of the Department;*

e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com; ORCID 0000-0002-2657-405

R. V. Petrovskyi*, *Pregraduate., Senior Researcher;*

e-mail: cadet2000@ukr.net

R. A. Sergiienko, *PhD (Engin.), Senior Research Scientist;*

e-mail: rruslan17@gmail.com

V. M. Babych, *Junior Researcher; e-mail: mekol@meta.ua*

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

*TzDV «GAL-KAT» (Lviv, Ukraine)

FEATURES OF FE AND CU-BASED MELT SUPPLIES IN CONTINUOUS CASTING MACHINES

Two schemes of installations are presented, which should be used both for continuous supply of high-temperature molten metals based on iron and for their intermittent metered supply to molds. The second design is most effectively adapted for the continuous supply of copper and its alloys. The basic units included in both constructions are a furnace, an induction heater, a reversible induction motor, a metal pipe for melt transportation and a quick-release reconfigurable unit for forming and supplying a flat melt flow - a horizontal slot nozzle. The designs of metal pipelines that are part of the devices also have similar elements. In addition, both designs of metal pipelines for the possibility of recirculation of the melt in the crucible are made according to the scheme of a closed hydraulic circuit. The hydraulic circuit includes a pressure pipe that provides injection of the melt into a horizontal slit nozzle and a drain pipe, which, in the above embodiments of the hydraulic circuit, has several functions. Due to the fact that, when installing the hydraulic circuit, the drain pipe is raised to a certain height relative to the horizontal axis of the slot nozzle, it supports in the process of distributing the melt pressure stabilization function in the horizontal slot nozzle. The metastatic pressure P_m , which is created by a column of molten metal of height H is calculated by the formula: $P_m = pH$, where p is the density of the liquid metal. In the construction of metal pipelines, the drain pipe is closed to the crucible by a discharge pipe, which is mounted in the side wall of the crucible. The first design uses a shortened system for transporting melts, so it is more suitable for casting high-temperature melts such as iron-carbon and alloy steels. The design features of the next installation include an extended flow system for transportation, making it more efficient for the supply of non-ferrous metals and alloys. In the present case, the supply of melt to the foundry machine is provided by a method in which the combination of operations of recirculation of the melt in the crucible and the creation of the required metastatic pressure.

Keywords: *ferrous and nonferrous alloys, iron, copper, installation, continuous casting, cast molds.*