
ЗАТВЕРДІННЯ СПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2022.01.011>

УДК 669.14:62-412:621.746.5

М. І. Тарасевич, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., зав. відділу;
e-mail: nit@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1092-0949

А. В. Нарівський, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
e-mail: office@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1596-6401

О. М. Смірнов, д-р техн. наук, проф., зав. відділу; e-mail: stalevoz@i.ua;
ORCID 0000-0001-5247-3908

І. М. Тарасевич, головний програміст; e-mail: ivan.tarasevich@gmail.com

І. В. Корнієць, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., заст. зав. відділу;
e-mail: ivk@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1803-9283

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

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ КОНВЕКТИВНИХ ПОТОКІВ В ПРОЦЕСІ ЗАЛИВКИ І ФОРМУВАННЯ КРУПНОГО ЗЛИВКА

В роботі, на базі математичного та комп'ютерного моделювання, проведено дослідження перерозподілу конвективних потоків в процесі заливання рідкого металу в виливницю. Показано, що в процесі заливки з масовою швидкістю 114 кг/с знімається перегрів рідкого металу над ізотермою ліквідус та проходить сепарація шарів металу при заповненні виливниці. Це явище може впливати на утворення хімічної та фізичної неоднорідностей у зливках в процесі їх формування.

Ключові слова: великий зливоч, математичне та комп'ютерне моделювання, конвективні потоки, виливниця, сепарація.

Для створення високотехнологічного обладнання, що використовують в енергетиці, важкому машинобудуванні, металургії, суднобудуванні, залізничному транспорті, гірничодобувній та хімічній промисловостях і т. ін., потрібні великогабаритні сталеві вироби [1]. Експлуатаційні характеристики таких виробів залежать від якості зливоків, з яких їх виготовляють. В даний час отримання крупних зливоків пов'язано, як правило, з технологією безперервної розливки сталі на установках МБЛЗ, але частину рідкого металу і сьогодні розливають до виливниць. Це ковальські зливки, плоскі зливки для виробництва товстого листа. Тому дослідження, що пов'язані з підвищенням якості сталевих зливоків, розкриттям механізмів їх формування, не втратили актуальності.

Якість зливоків обумовлена насамперед одночасною наявністю складних фізико-хімічних процесів при переході сталі з рідкого стану в твердий. В цей найбільш відповідальний період формування у зливку укрупнюються і нерівномірно

розподіляються неметалеві включення, утворюються газоусадкові та інші внутрішні дефекти, інтенсивно розвиваються хімічна та фізична неоднорідності у вигляді *L*-подібної сегрегації. Одним із лімітуючих факторів, які впливають на зміну температури і перерозподіл домішки в об'ємі металу, що твердне, є перерозподіл гідродинамічних потоків в процесі твердіння.

В роботах В. О. Єфімова і В. І. Легенчука [2] висловлено припущення, що зональна ліквация може розвиватися під дією перерозподілу конвективних потоків, зумовлених зміною градієнта температури в рідкій фазі в процесі твердіння. Ці автори припустили, що зональну ліквацию може викликати переміщення металу в об'ємі двофазної зони під впливом капілярних сил, за припущенням переміщення домішки від периферії до центру зливка.

Вважають, що *L*-подібна ліквация, так звані «вуса», формується при твердінні зливка через утворення мікроскопічних бульбашок газу. Припускають також, що вуса – це сліди з боку домішки, що відірвались від бульбашок, які проходили крізь об'єм рідкого металу.

Мета даної роботи – дослідити перерозподіл гідродинамічних потоків в процесі розливки і твердіння великого зливка та визначити їх зв'язок з зональною неоднорідністю зливка, що затвердів. Досліди проводили з використанням методів математичного та комп'ютерного моделювання [3, 4].

В якості об'єкту дослідження обрано 142-тонний зливко (сталь 25ХНЗМФА). На рис. 1 представлено геометрію зливка і вигляд області розрахунку. Час заповнення виливниці при проведенні обчислювального експерименту становив 30 хвилин, що відповідає масовій швидкості заливки 114 кг/с. Температура металу, що заливають – 1580 °С (температура солідус – 1406 °С, температура ліквідус – 1483 °С).

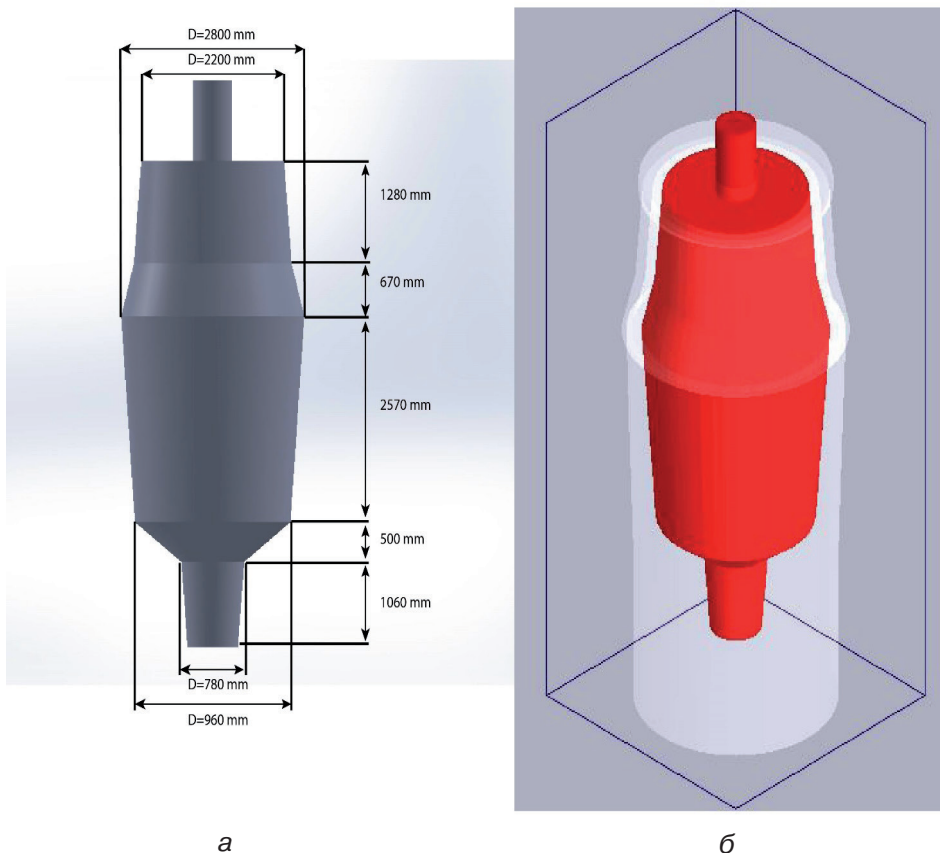


Рис. 1. Геометрія зливка (а) та вигляд області розрахунку (б)

Затвердіння сплавів

Протягом заливки рідкого металу у виливницю спостерігаємо значну турбулентність, що пов'язана з масовою швидкістю заливки. При заповненні виливниці на 20 % рідкий метал зберігає перегрів над температурою ліквідус у всьому об'ємі. По мірі заповнення виливниці спостерігаємо охолодження металу в хвостовій частині зливка за рахунок порівняно малого об'єму та великої площі поверхні тепловідводу. При заливці 40 % маси зливка в хвостовій частині перегрів знято на відстані 30 см від донної поверхні виливниці. Швидкість вхідного потоку рідкого металу на вільній поверхні в центрі становить біля 20 см/с. При наближенні до хвостової частини швидкість потоку значно знижується і в конусній частині при повороті до бічної поверхні її значення досягає 5 см/с. Бачимо також, що в центральній частині сформувався кільцевий вихор, інтенсивність якого зумовлена швидкістю зануреного струменя металу, що заливають. Вздовж бічної поверхні сформовано два симетричних вихори, швидкість яких нижча на порядок порівняно зі швидкостями в центрі (рис. 2). В хвостовій частині потоки металу після підйому вздовж бокової поверхні розвертаються до центру, обумовлюючи кільцевий вихор в цій області. Таким чином, ми бачимо, що між хвостовою та конусною частинами зливка сформовано різноспрямовані горизонтальні потоки. Положення ізотерми ліквідус показує, що зняття перегріву рідкого металу відбувається в процесі заливки від хвостової частини до надливу.

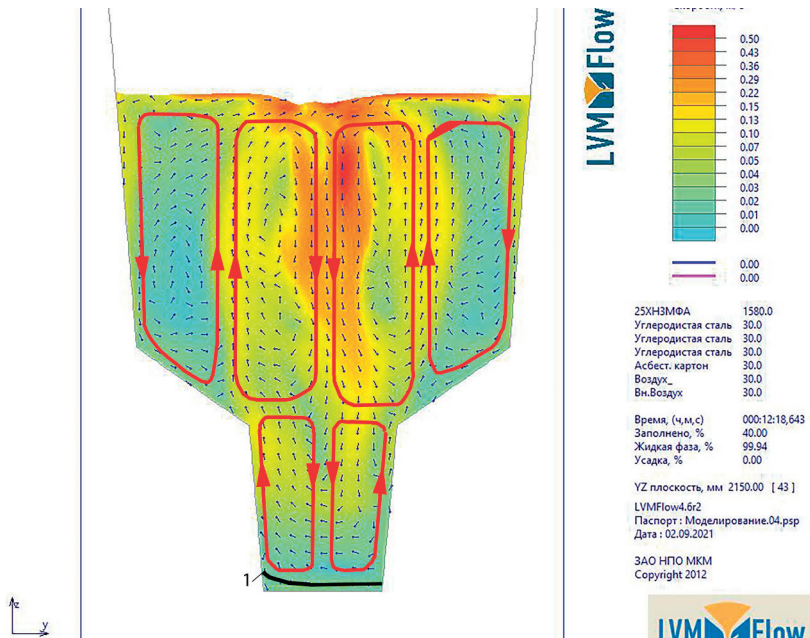


Рис. 2. Поле швидкостей у виливниці при її заповненні на 40 % (1 – ізотерма ліквідус)

При заповненні виливниці металом на 50 % (рис. 3) в хвостовій частині зливка температура нижча за температуру ліквідус, в'язкість металу низька і ми спостерігаємо локальний вихор, швидкість висхідних потоків в якому становить 0,5–0,7 см/с.

В хвостовій частині по лінії ліквідус має місце розділення нижнього і верхнього вихорів, що ускладнює перемішування перегрітого металу з металом, що знаходиться у двофазному стані. Тому можна припустити, що з цього моменту в нижній частині формується так звана зона осадження (конус осадження).

В конусній частині зливка по центру, як і в хвостовій частині, мають місце висхідні потоки, які в центральній частині по напрямку співпадають з центральним кільцевим вихором. При наближенні до бічної поверхні спостерігаємо зустрічні потоки металу від бічної поверхні основного тіла зливка в сторону центру і металу конусної частини, який

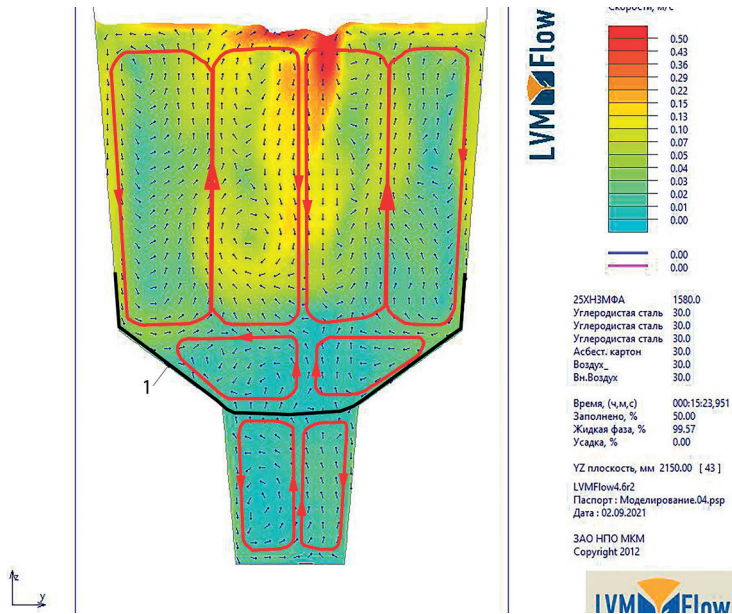


Рис. 3 . Поле швидкостей у виливниці при її заповненні на 50 %
(1 – ізотерма ліквідус)

рухається до зовнішньої частини. Напрямок та швидкість потоків в верхній частині зливка практично залишилися такими ж, як і були при заповненні металом на 40 %.

По мірі заповнення виливниці межа розподілу між двофазною зоною та перегрітим металом є плоскою. Цей характер вона зберігає до моменту зняття перегріву рідкого металу в надливковій частині зливку. Таким чином, ми бачимо, що перегрів рідкого металу знімається послідовно з горизонтальних шарів металу, що заливають, – від хвостової до головної частини зливка. В процесі заливки температура металу в нижній частині зливка падає, а його в'язкість росте, що призводить до зниження швидкості конвективних потоків у двофазній зоні.

При заповненні виливниці на 75 % спостерігаємо утворення трьох самостійних областей, в яких сформовано локальні горизонтально-розділені вихори (рис. 4). Внизу хвостовика потоки металу спрямовані до центру, де спостерігаємо формування висхідних потоків. Перед конусною частиною потоки різко повертаються до бічної поверхні виливниці (швидкість нижча за 0,3 см/с). Після досягнення бічної поверхні вони повертають до донної поверхні (спадні потоки) і утворюють замкнений вихор.

Друга частина висхідних потоків формує конвективну область, яка, можна вважати, обмежена в верхній частині ізотермою ліквідус. Вздовж цієї ізотерми висхідні потоки розвертаються до бічної поверхні виливниці, вздовж якої спускаються донизу (на рівні хвостової частини) і, досягнувши швидкості нижче 0,2 см/с, розвертаються до центру зливка. Зниження температури призводить до падіння інтенсивності цих потоків.

Під дією рідкого металу, що надходить до виливниці, формується область турбулентності розплаву. Об'єм металу, залученого до руху за рахунок швидкості металу, що заливається, збільшується, а об'єм металу, залученого до руху вздовж бічної поверхні, знижується, і швидкість їх менша за 1 см/с.

По центру швидкість руху металу, що заливають, становить більше, ніж 20 см/с, по мірі занурення вона падає до 8 см/с. При повороті до бічної поверхні швидкість горизонтального потоку досягає значень 0,4–0,6 см/с. Швидкість висхідних потоків зі сторони бічної поверхні при підйомі збільшується від 6 до 9 см/с на дзеркалі металевої ванни.

Після завершення заливки з 30 відсотків залитого металу знято перегрів (рис. 5). Межа розподілу між металом, з якого перегрів знято, та перегрітим металом плоска. В двофазній області в нижній частині зливка спостерігаємо згасаючі вихрові потоки, швидкість яких не перевищують 0,1–0,15 см/с. Висхідні потоки спостерігаємо в надливу, які збільшуються від 1,6 см/с в нижній частині до 5 см/с в верхній частині.

Затвердіння сплавів

В конусній частині зливка вони збільшуються від 3 до 7 см/с в нижній частині зливка. Під надливом зона турбулентності формується за рахунок швидкості низхідних конвективних потоків (від 6 до 1,2 см/с).

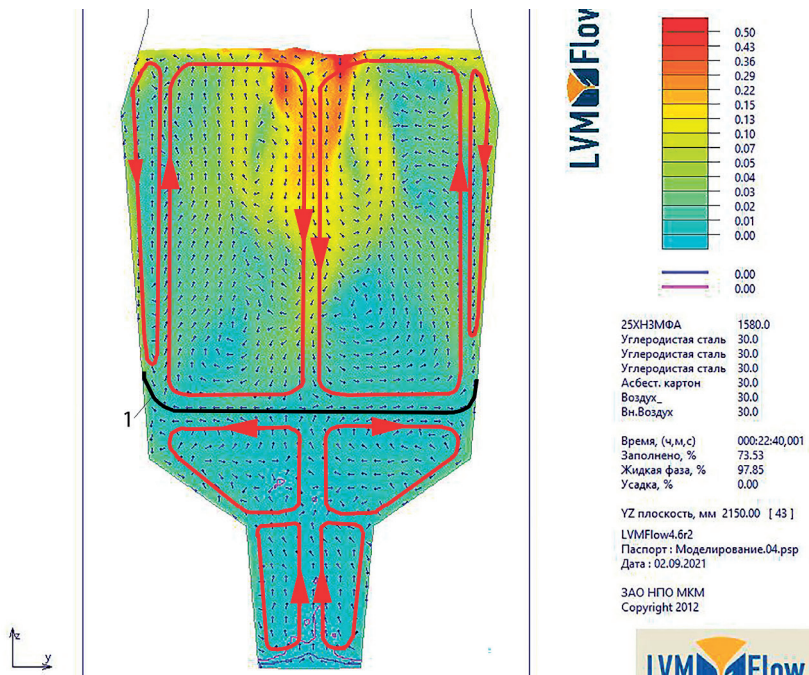


Рис. 4 . Поле швидкостей у виливниці при її заповненні на 75 % (1 – ізотерма ліквідус)

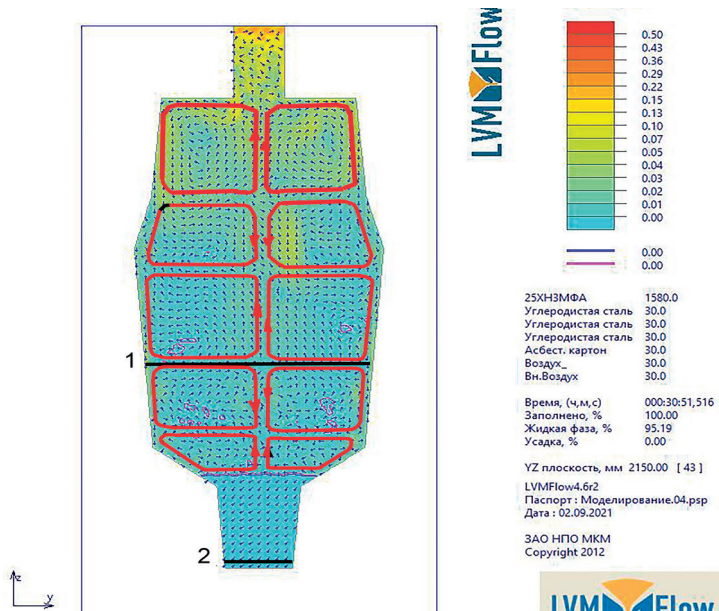


Рис. 5 . Поле швидкостей у виливниці при її заповненні на 100 % (1 – ізотерма ліквідус; 2 – ізотерма солідус)

Таким чином при заповненні виливниці рідким металом можна виділити кілька стадій гідродинамічного стану рідкого розплаву. При заповненні хвостової і нижньої частин виливниці, на початку заливки, вектор швидкості по центру виливниці

направлений в бік донної поверхні. По мірі занурення в розплав, швидкість рідкого потоку знижується і в нижній частині з'являється його горизонтальна складова, що направлена до бічної поверхні. Після досягнення бічної поверхні спостерігаємо формування висхідного потоку, який в верхній частині розвертається до центру. Це зумовлює формування циркуляційного вихору на цьому етапі (рис. 6, а). По мірі заповнення виливниці в її хвостовій і нижній частинах метал охолоджується. Через деякий час перегрів металу знято з хвостового об'єму виливниці і послідовно, горизонтальними шарами, спостерігаємо зняття перегріву з об'єму металу, що заливають. Після зняття перегріву в області двофазного стану рух розплаву, у зв'язку з підвищенням його в'язкості, відбувається в основному за рахунок переміщення конвективних потоків, зумовлених градієнтом температур. Швидкість конвекції знижується по мірі зниження градієнту температури в розплаві. В нижній частині двофазної області в центрі мають місце висхідні конвективні потоки, які розвертаються до бічної поверхні. Вздовж бічної поверхні спостерігаємо спадні потоки, які згодом змінюють напрям і формують замкнений вихор (рис. 6, б). Зняття перегріву нижніх областей зливка призводить до просунення зони двофазного стану вгору. В цей же час над областю двофазного стану спостерігаємо зону гідродинаміки, що формується за рахунок струменя металу, що заливають (рис. 6, б). В центральній частині струмінь металу, що заливають, створює вертикальний вектор швидкості, спрямований в бік донної поверхні виливниці, величина якого по мірі занурення в рідкий метал знижується. Після досягнення області, де температура розплаву нижча за температуру ліквідус, векторна складова швидкості розвертається до бічної поверхні. Вздовж бічної поверхні спостерігаємо низхідні потоки, які в нижній частині розвертаються в бік центру і при зустрічі з горизонтальною складовою центрального циркулюючого потоку піднімаються вгору, формуючи таким чином два замкнених вихора другого ярусу. Звертає на себе увагу той факт, що між цими двома вихорами (зверху – низхідний, а знизу – висхідний вихор) утворюється область розділення (сепарації) сформованих потоків (рис. 6, б).

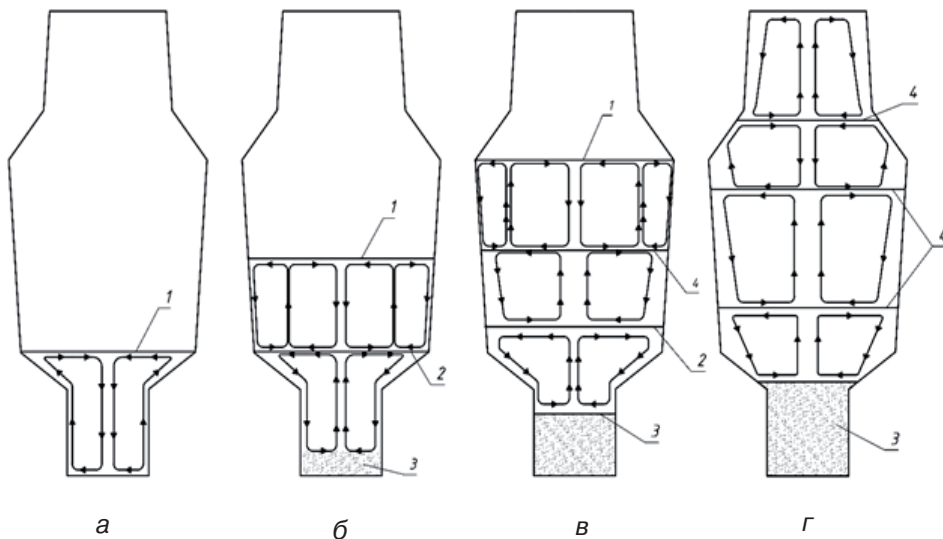


Рис. 6. Схема руху гідродинамічних потоків рідкого металу при заповненні виливниці: 1 – рівень залитого металу; 2 – положення ізотерми ліквідус; 3 – метал, що затвердів; 4 – лінія розділу різнонаправлених потоків

При заповненні виливниці металом на 3/4 його маси спостерігаємо зону конвективних потоків, що встановилася в двофазній області нижньої частини зливка, і зону конвекції перегрітого металу. Ця зона має дві характерні області – область формування потоків, викликаних струменем металу, що надходить, і нижче – зону

переважно конвективних потоків, розташовану над двофазною зоною зливка, що твердне (рис. 6, в). В верхній частині струмінь металу, який потрапляє до рідкого розплаву, має визначену швидкість (відповідно до масової швидкості розливки), яка знижується по мірі занурення у розплав. Досягнувши певної глибини, рухові металу визначальну роль задає горизонтальна складова, що спрямована в бік внутрішньої поверхні виливниці. Досягнувши бічної поверхні, потоки розплаву рухаються вгору та біля вільної поверхні перемішуються з об'ємом металу, що заливається. Під цим низхідним вихором за рахунок градієнту температур в об'ємі перегрітого металу над областю двофазного стану по центру формується висхідний потік, який після зустрічі з верхнім вихором розвертається до бічної поверхні. Протяжність кожної з областей залежить від початкової швидкості струменя металу, що заливають, його температури перегріву, а також геометрії виливниці. По мірі заливки спостерігаємо просунення цих зон в бік вільної поверхні металу, що заливають, і надливу.

Після повного заповнення виливниці в нижній частині в області двофазного стану спостерігаємо значне згасання конвективних потоків. Над ними сформувались висхідні потоки, в високотемпературній області двофазної зони. Потім формується зона спадних потоків, швидкість яких залежить від масової швидкості розливки, а в верхній частині сформовано висхідний тепловий потік, зумовлений градієнтом температур (рис. 6, г).

Таким чином в ході проведених досліджень встановлено сепарацію металу в процесі заповнення виливниці і зняття перегріву в її нижній частині. В «мертвій зоні» між шарами сепарації можна допустити залишок домішок в низькотемпературній зоні (максимально наближеної до бічної поверхні), яка призводить до формування фізичної та хімічної неоднорідностей.

Список літератури

- 1 Смирнов А. Н., Макуров С. Л., Сафонов В. М., Цупрун А. Ю. Крупный слиток. Донецкий национальный техн. ун-т. Донецк: изд-во «Вебер», 2009. 279 с.
- 2 Ефимов В. А., Легенчук В. И., Буклан Б. А. Изучение роста кристаллов и формирование физической и химической неоднородности стального слитка. Физико-химические воздействия на кристаллизацию стали (сб. научных трудов). Киев: ИПЛ НАН Украины. 1982. С. 3–10.
- 3 Гуманюк С. Б., Руцкий Д. В., Зюбан Н. А., Пузииков А. Я., Кофтунов Е. Р. Исследование кинетики затвердевания слитков на основе физического моделирования разливки и кристаллизации расплава. *Черная металлургия*. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 7. С.818–827.
- 4 Бройтман О. А., Монастырский А. В., Мальгинов А. Н., Макарычева Е. В., Сапаев Д. Ю. Компьютерное моделирование процессов формирования крупных стальных кузнечных слитков. *Литейщик России*. 2011. № 190.

Надійшла 20.01.2022

References

- 1 Smyrnov A. N., Makurov S. L., Safonov V. M., Tsuprun A. Yu. (2009). Krupnyi slytok. [Large ingot]. Donetsk natsyonalnyi tekhn. University. Donetsk: «Veber». P. 279. [in Russian].
- 2 Yefimov V. A., Legenchuk V. I., Buklan B. A. (1982). Izucheniye rosta kristallov i formirovaniye fizicheskoy i khimicheskoy neodnorodnosti stal'nogo slitka. Fiziko-khimicheskiye vozdeystviya na kristallizatsiyu stali (sb. nauchnykh trudov). [Study of crystal growth and the formation of physical and chemical inhomogeneity of a steel ingot. Physical and chemical effects on the crystallization of steel (collection of scientific papers).] Kyiv: IPL of the NAN Ukraine. P. 3–10. [in Russian].
- 3 Humaniuk S. B., Rutskyi D. V., Ziuban N. A., Puzykov A. Ya., Koftunov E. R. (2019). Issledovaniye kynytyky zatverdevaniya slytkov na osnove fyzicheskoho modelyrovaniya razlyvki y krystallizatsyy rasplava. [Study of the kinetics of solidification of ingots based on physical modeling of casting and melt crystallization]. *Chernaia metallurhiya*. Bulletin of scientific, technical and economic information. V. 75. No 7. P. 818–827. [in Russian].

- 4 Broitman O. A., Monastirskyi A. V., Malhynov A. N., Makaricheva E. V., Sapaev D. Yu. (2011). *Kompiuternoe modelyrovanye protsessov formirovaniya krupnykh stalnykh kuznechnykh slytkov*. [Computer simulation of the formation of large steel forging ingots]. *Lyteishchyk Rossii*. 2011. No 190. [in Russian].

Received 20.01.2022

N. I. Tarasevich, *Dr. Sci. (Engin.)*, Senior Researcher; e-mail: nit@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1092-0949

A. V. Narivskyi, *Dr. Sci. (Engin.)*; Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Director of the PTIMA of the NAS of Ukraine; e-mail: office@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1596-6401

O. M. Smirnov, *Dr. Sci. (Engin.)*, Professor, Head of the Department; e-mail: stalevoz@i.ua; ORCID-0000-0001-5247-3908, Web of Science Researcher ID: N-1890-2017

I. N. Tarasevich, Chief programmer; e-mail: ivan.tarasevich@gmail.com

I. V. Korniets, *PhD (Engin.)*, Senior Researcher, Deputy Head of Department; e-mail: ivk@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1803-9283

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

PECULIARITIES OF FLOWS REDISTRIBUTION DURING FILLING AND FORMATION OF LARGE INGOT

There is executed the investigation of convective flows redistribution during the liquid metal pouring into mold on the base of mathematical and computer simulation in this work. It is shown that during the ingot pouring with 114 kg/s mass velocity pouring the liquid metal overheat over liquidus isotherm is removed and the separation of metal layers cooled during the mold filling takes place. This phenomenon can influence on the appearance of chemical and physical heterogeneity in ingots during their formation.

Keywords: large ingot, mathematical and computer simulation, convective flows, mold, separation.