

Маринич І.А.

Криворізький національний університет

Сердюк О.Ю.

Криворізький національний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ НА МАШИНІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

У статті розглядається розробка математичної моделі, яка враховує нерівномірність розподілу температури у заготівлі під час процесу розливання для завчасного прогнозу і формування керуючих впливів з метою недопущення теплових напруг, що можуть призвести до виникнення тріщини і прориву рідкої сталі у неперервно литому злитку. Практична значимість полягає у застосуванні отриманої математичної моделі при побудові адаптивної системи автоматичного керування, що дозволить досягти зменшення кількості браку та зниження часу аварійних простоїв обладнання через прориви рідкої сталі.

Безперервнолиті заготовки є основною сировиною для виробництва прокату, і якість заготовок визначає якість готового металовиробу. Однією з основних проблем, що зустрічається при розливанні металу на машині безперервного лиття заготовок радіально-криволінійного типу, є наявність тріщин і ліквіаційних зон у внутрішній структурі металу, а також на поверхні заготівлі. Однією з причин появи дефектів у безперервнолитих заготовках є термічні напруги. Зменшення термічних напруг забезпечується за допомогою підвищення якості управління в АСУ ТП за рахунок введення оптимального управління охолодженням заготовок.

Завдання підвищення якості заготовок вирішується оптимізацією процесу їх охолодження за рахунок застосування адаптивної системи автоматичного керування температурним полем заготовок машини безперервного лиття заготовок, яка використовує розроблену математичну модель процесу охолодження заготовок, що відрізняється від відомих тим, що дозволяє розраховувати температурне поле по всьому об'єму заготівлі в часі при змінній швидкості лиття заготівлі та з урахуванням теплоти кристалізації, структурних переходів сталі, тепловіддачі за рахунок водяного охолодження.

Ключові слова: автоматизація, машина безперервного лиття заготовок, математична модель, кристалізатор, безперервнолита заготовка, температурне поле.

Постановка проблеми. Процес розливання розплавленої сталі є важливим складником металургійного циклу. Цей процес може здійснюватися як дискретно, при розливанні у виливниці, так і безперервно, на машинах безперервного лиття заготовок (далі – МБЛЗ). Під час процесу розливання необхідно контролювати нерівномірність розподілу температури. Через це виникають теплові напруги, які можуть призвести до виникнення тріщин у злитку. При неперервному розливанні особливо важливо вміти запобігати прориву рідкої сталі. Дослідження, представлене у [1], проводилося з метою розробки та випробування системи управління для МБЛЗ.

Завдання розробки системи керування процесом кристалізації металу на МБЛЗ із використанням систем оцінювання їх теплового стану ускладнюється його характерними властивостями.

Зокрема, процес кристалізації сталевих злітка відбувається в умовах складного накладення процесів конвективного переміщення рідкого металу, росту кристалів та інших фізико-хімічних явищ. Структура злітка визначається взаємодією усіх цих складних факторів. З урахуванням вказаних особливостей, можна вважати перспективним для автоматизації процесів керування тепловим режимом кристалізатора МБЛЗ використання методів теорії керування на основі прогнозуючих моделей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основна проблема, що вирішується у цій роботі, – вдосконалення процесу керування охолодженням заготовок для отримання заданої якості і температурного стану на виході з МБЛЗ. У роботі враховані результати досліджень А.Г. Бутковського, Т.К. Сіразетдінова, Ш.Л. Ліонса, В.І. Панфьорова в області теорії управління та методів оптиміза-

ції; Д.П. Євтеєва, В.Т. Борисова, В.Г. Лісієнко та інших в області розробки теоретичних положень, практичної розробки, впровадження та експлуатації машин безперервного лиття заготовок.

У роботі [7] в загальній постановці розвинена математична модель, яка розглядає кристалізацію безперервного злитка як результат одночасного протікання теплових, дифузійних і гідродинамічних явищ. Така модель представляє великий принциповий інтерес з точки зору дослідження умов отримання бездефектного литого металу, оскільки картина фізичних явищ, що протікають у твердій, рідкій і двофазній зонах, складається із сукупності взаємопов'язаних процесів тепло-масо-переносу. Але практична реалізація такої складної моделі зустрічає серйозні труднощі. У зв'язку з цим в інженерній практиці використовують спрощені варіанти подібної моделі для досягнення головної мети – дослідження теплових режимів формування безперервного злитка.

У роботі [8] була зроблена спроба побудови математичної моделі кристалізації злитка, що враховує закономірності росту кристалів у переохолоджених зонах розплаву, а також нестационарне і нерівномірне по перетину злитка поле температур. Однак у цій моделі зустрілися методичні труднощі через невизначеність величини об'ємної концентрації центрів кристалізації і не досить обґрунтоване прийняття лінійної залежності швидкості росту кристалів, від переохолодження для сталей. Крім того, модель вийшла громіздкою, що ускладнює її реалізацію на ЕОМ.

У зв'язку з цим більш доступними і зручними є моделі, не пов'язані з кінетикою зародження і росту кристалів. Останнім часом для вирішення завдань затвердіння металевих сплавів широко використовують теорію квазі-рівноважної двофазної зони, розвинену у роботах [9; 10]. Ця теорія не враховує кінетичного і концентраційного (або дифузійного) переохолодження розплаву, оскільки їх величини для реальних умов замалі. Однак практичне вирішення наведеної системи рівнянь також зустрічає низку методичних труднощів.

Постановка завдання. У роботі необхідно виконати математичне моделювання та дослідження ефективності розроблених моделей і методів оцінювання теплового стану заготовок та алгоритмів керування процесом кристалізації металу на МБЛЗ для покращення якісних характеристик кінцевого продукту, зниження його собівартості за рахунок автоматизації процесу із застосуванням методів оцінювання теплового стану заготовок і методів адаптивного керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Процес безперервного розливання металу забезпечує послідовну розливу певної кількості ківшів, що подаються від сталеплавильних агрегатів, а отримувана заготовка при цьому розрізається на мірні довжини відповідно до вимог споживачів і потім відправляється на перекат у відповідні прокатні цехи. При цьому вихід придатної заготовки становить 98,5-99,5% від маси розливої рідкої сталі.

Процес безперервного розливання сталі полягає у тому, що рідка сталь зі сталерозливного ківша надходить у проміжний ківш, а далі – в інтенсивно охолоджувану наскрізну форму прямокутного, квадратного, круглого або спеціального фасонного перерізу – кристалізатор, де відбувається часткове затвердіння злитка, що безперервно витягується, і утворюється тверда оболонка, заповнена рідкою сталлю по формі й перетину, відповідна готовій заготовці.

Кристалізатор є одним із найбільш функціонально важливих вузлів, що визначають раціональну роботу МБЛЗ і оптимальну якість неперервно литої заготовки. Особливістю роботи кристалізатора є інтенсивний відвід тепла від заготовлі. Управління першою стадією кристалізації здебільшого зводиться до управління тепловим режимом кристалізатора (при постійній швидкості розливання), що полягає в стабілізації різниці (перепаду) між температурою води на виході і вході в канали кристалізатора шляхом зміни витрати води. Величина перепаду вибирається максимальною, яка відповідає розрахунковій температурі води на вході у кристалізатор, і гранично допустимою (за умовами відкладення солей) температурі води на виході з нього. Ця умова відповідає мінімальній витраті охолоджувальної води.

Забезпечення необхідного температурного режиму при виробництві заготовок на МБЛЗ є однією з основних технологічних задач. Температурний режим визначає швидкість затвердіння сталі, глибину рідкої лунки, фізико-механічні характеристики сталі. Нерівномірність температурного поля по перерізу і довжині заготовки призводить до температурних деформацій, які можуть виходити за межі пружності і текучості. Швидкість охолодження визначає структурні перетворення у сталі, тобто робить внесок у формування властивостей готового виробу [6–8].

Для дослідження теплових процесів, що протікають у застигаючому злитку під час його проходження МБЛЗ, розроблено кілька фізико-математичних теорій. Найбільшого поширення набули два підходи до вивчення процесів затвер-

діння злитків. Перший представлений у літературі як задача Стефана, другий – як теорія двофазної зони [9].

Повна модель двофазної зони бінарного сплаву представляє собою систему диференціальних рівнянь, яка охоплює рівняння енергії, масопереносу, нерозривності середовища та стану системи. При прийнятій розрахунковій схемі математична модель теплообміну є двовимірним нелінійним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності для області, що охоплює рідку і тверду фази злитка.

Відповідно до прийнятої схеми теплообмін описується таким рівнянням:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \right], \quad (1)$$

де $c = c(x_1, x_2, z, T)$ – питома масова теплоємність; $\rho = \rho(x_1, x_2, z, T)$ – щільність; x_1, x_2, z – поточні координати; τ – час; $\lambda(x_1, x_2, z, T)$ – коефіцієнт теплопровідності.

Таким чином, для подальших досліджень складена математична модель теплообміну у неперервному злитку, що враховує нестационарну температурну залежність теплофізичних параметрів і трансляційне перенесення теплоти вздовж технологічної осі. З урахуванням сумірності розмірів граней злитка у поперечному перерізі температурне поле розглядається тримірним.

У динамічних режимах роботи МБЛЗ швидкість розливки сталі може бути величиною змінною. Це вимагає удосконалення математичної моделі (1) для урахування змінної швидкості плавки. Також у цьому випадку краще використовувати модель у декартовій тривимірній системі координат, що дозволяє визначити температуру по всьому об'єму заготовок у часі.

У запропонованій динамічній моделі враховуються вхідні теплофізичні властивості сталі, кристалізатора, зон охолодження і просторова конфігурація МБЛЗ. Диференціальне рівняння теплопровідності у координатах із внутрішніми джерелами тепла (система координат нерухома, щодо неї зі швидкістю рухаються неперервно литі заготовки (вісь z направлена по осі руху, осі x і y – по товщині і ширині заготовок) має такий вигляд:

$$\rho(t)C(t)\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_x(\tau)\frac{\partial t}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda(t)\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda(t)\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda(t)\partial t}{\partial z}\right) + q_n, \quad (2)$$

де $t = f(x, y, z, \tau_0)$ – температурне поле, °C; τ – час, с; $V_x(\tau)$ – швидкість розливання в певний момент часу, м/с; q_n – щільність внутрішніх дже-

рел теплоти, Вт/м³; $C(t)$ – питома теплоємність сталі при певній температурі, кДж/кг·K; $\rho(t)$ – щільність сталі при такій температурі, кг/м³; $\lambda(t)$ – коефіцієнт ефективної теплопровідності при певній температурі, Вт/м·K.

Для обліку теплоти кристалізації, що виділяється, вводиться величина відносної кількості твердої фази $\varphi = v_{me}/v_0$. За змістом вона може розглядатися як відносна кількість ще не виділеного тепла кристалізації, v_0 та v_{me} – як обсяги усього розплаву і твердої фази; $\varphi = 0$ для рідкої фази, $\varphi = 1$ для твердої фази, а для двофазної зони може змінюватися від нуля до одиниці.

Із введенням величини φ для застигаючого шару вираз (2) запишеться у вигляді:

$$\rho(t)C(t)\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_x(\tau)\frac{\partial t}{\partial z}\right) = \text{div}(\lambda(t)\text{grad}t) + \Delta h_\varphi \left(\frac{\rho_{me}\partial\varphi(t)}{\partial \tau} + V_x(\tau)\frac{\rho_{me}\partial\varphi(t)t}{\partial z} \right) + q_{cm}, \quad (3)$$

де Δh_φ – тепло, що виділяється при фазовому переході, кДж/кг; ρ_{me} – щільність затверділої сталі, кг/м³; $\varphi(t)$ – відносна кількість твердої фази; q_{cm} – щільність внутрішніх джерел теплоти за рахунок структурних переходів, Вт/м³.

На основі запропонованих моделей (1, 3) із застосуванням пакету *Matlab PDE Toolbox* була розроблена цифрова модель процесу теплообміну у кристалізаторі МБЛЗ, що дозволяє виконувати моделювання процесу теплообміну в процесі охолодження заготовки.

На першому етапі необхідно визначити форму та розміри заготовки. Геометрична фігура (рис. 1) – квадрат січенням 150*150 мм – задається вручну або за допомогою вікна *Object Dialog*.

На другому етапі необхідно визначити для кожної з граней заготовки граничні умови, що є однаковими для кожної сторони (оскільки у поперечному перерізі заготовка являє собою квадрат) (рис. 2) і визначаються температурою стінок кристалізатора у певний момент часу.

Рівняння (1, 3), що описують тепловий стан заготовки у процесі кристалізації, є диференціальними рівняннями параболічного типу з параметрами ρ – коефіцієнт теплопровідності, C – питома масова теплоємність, k – щільність, Q – об'ємна щільність потужності сторонніх джерел тепла (рис. 3).

Оскільки теплофізичні параметри процесу є нелінійними, залежать від температури, то коефіцієнти диференційного рівняння теплообміну є не скалярними величинами, а їх необхідно представити у вигляді кусочно-лінійних функцій, створених у *Matlab*. Так, для опису залежності коефі-

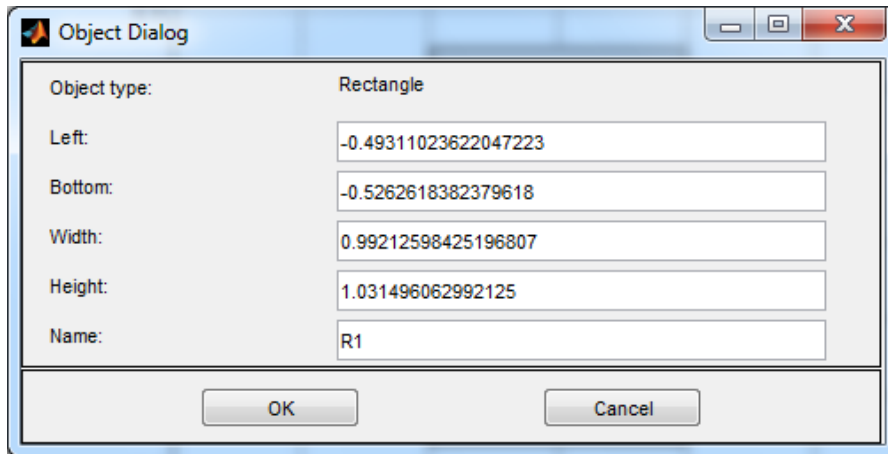


Рис. 1. Параметри геометричної фігури

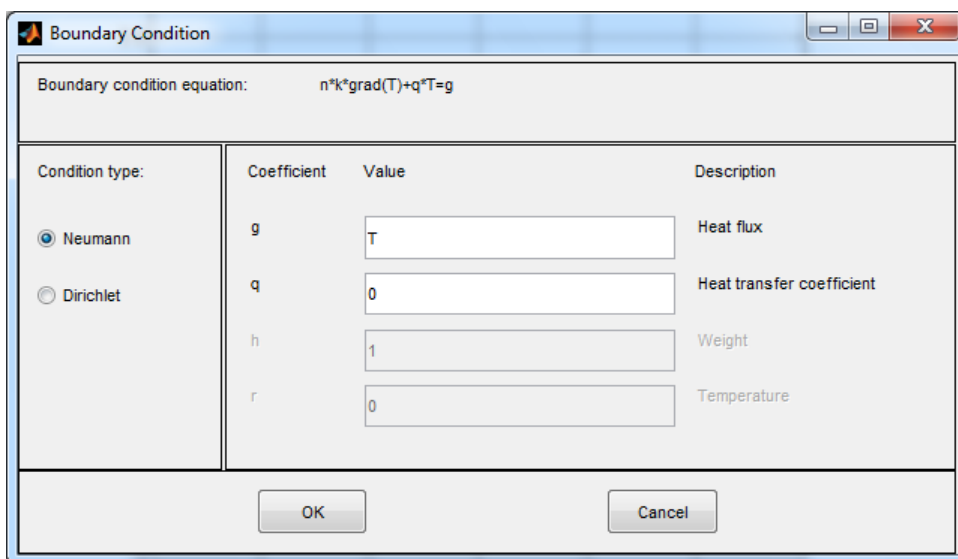


Рис. 2. Граничні умови для сторони заготовки

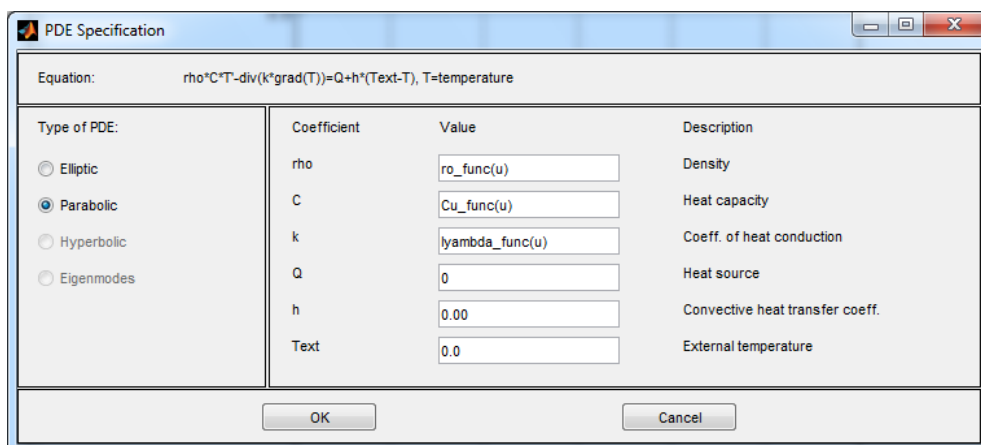


Рис. 3. Диференціальне рівняння параболічного типу

цієнту теплопровідності від температури металу створено функцію $ro_func(u)$, яка як параметр приймає вихідну величину моделі PDE – функцію розподілу температури металу у заготовці та

функції $Cu_func(u)$ і $lyambda_func(u)$, які реалізують залежність масової теплоємності від температури металу та повертають щільність теплопровідності залежно від його температури.

Далі була сформована кінцево-елементна сітка (рис. 4), від щільності точок якої залежить швидкість розрахунку та точність розрахунку моделі й налаштовані параметри розв'язувача *PDE* у вікні *Plot Selection* (рис. 5).

Значення *temperature* у параметрі *Height (3-D plot)* дозволить бачити зміну температури металу у реальному часі на поверхні всієї заготовки у трьох вимірах (рис. 6).

Експортуючи дані моделювання до вікна *Workspace* пакету *Matlab*, маємо змогу у подальшому будувати залежність розподілу температури уздовж поверхні злитку, оцінювати товщину застигаючої кірки металу. Так, на рис. 7 представлені графіки розподілу температури уздовж поверхні на деякій відстані від поверхні і на осі злитка. Із результатів моделювання видно, що кривизна злитка тягне за собою асиметрію температурного поля. Навіть при однаковій інтенсивності охолодження на поверхнях внутрішнього і зовнішнього радіусів температура на зовнішній поверхні трохи нижча. Таке ж явище спостерігається у виробничих умовах.

На рис. 8 представлені графіки залежності глибини рідкої фази від швидкості витягування злитка при різних режимах охолодження.

Висновки. Отриманий математичний опис задачі теплопровідності для неперервнолитих заготовок дозволяє, на відміну від відомих моделей, виконувати розрахунок температури заготовок по всьому об'єму в реальному масштабі часу з урахуванням тепловиділення при фазовій і структурній трансформаціях з урахуванням тепловіддачі внаслідок водяного охолодження, теплового випромінювання, природної і вимушеної конвекції.

Якщо взяти до уваги той факт, що наявні МБЛЗ розливають сталь із різним хімічним складом застигаючого металу, з різною газонасиченістю, температурою і швидкістю розливання металу, протяжністю зони двофазного стану, тривалістю затвердіння, формою готової заготовки та у різних за технічними характеристиками кристалізаторах, то відповідний підхід дозволить скоротити до мінімуму витрати, пов'язані з пристосуванням розробленої системи керування до особливостей конкретної МБЛЗ.

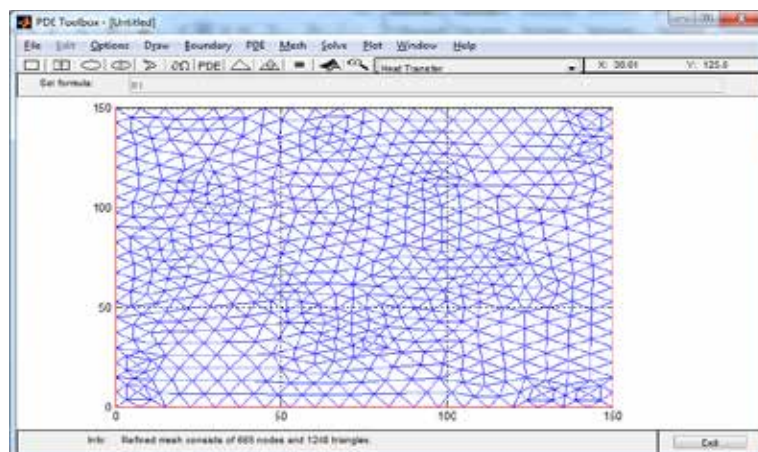


Рис. 4. Кінцево-елементна сітка моделі



Рис. 5. Налаштування параметрів візуалізації моделі

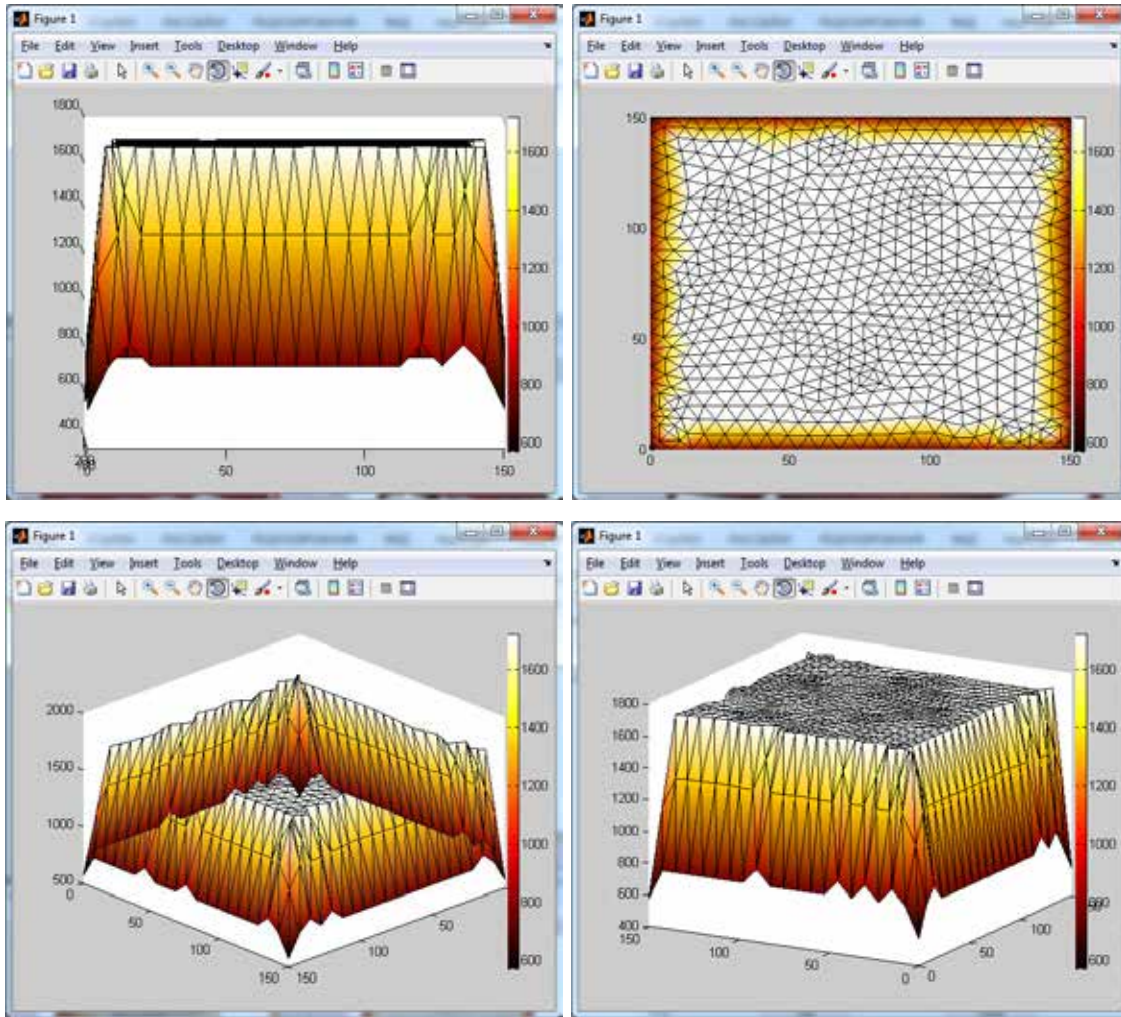


Рис. 6. Моделювання теплового стану заготовок

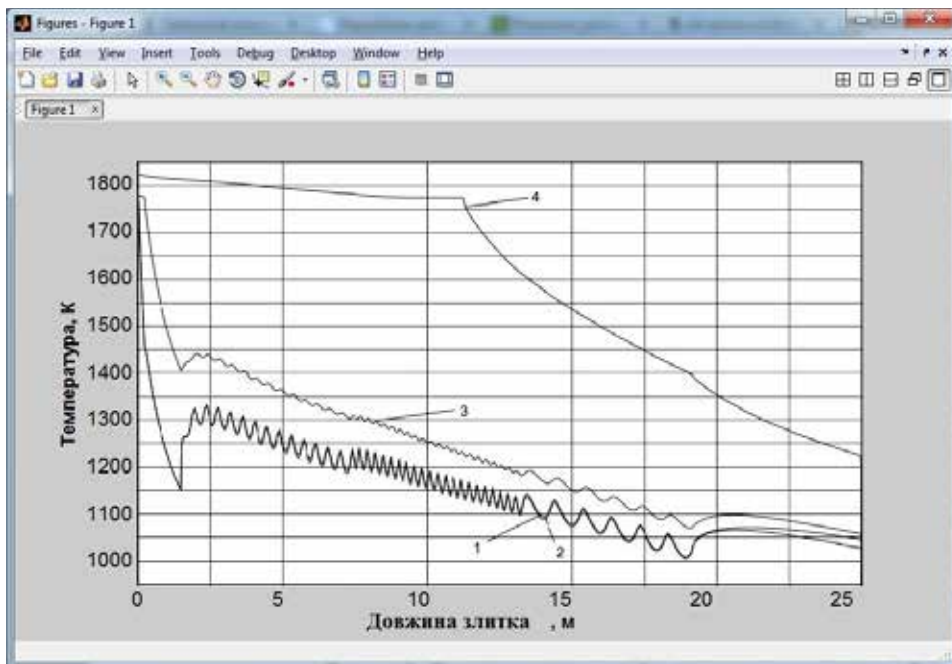


Рис. 7. Температура зливка: 1 – внутрішня поверхня, 2 – зовнішня поверхня, 3 – на відстані 4 мм від зовнішньої поверхні, 4 – на осі зливка

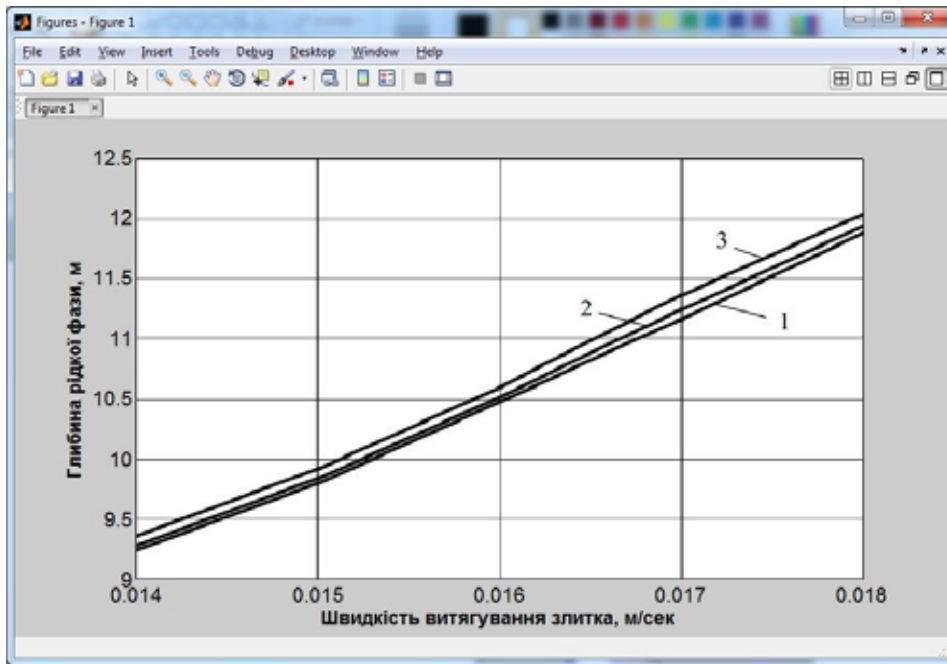


Рис. 8. Глибина рідкої фази залежно від швидкості витягування злитка

Список літератури:

1. Рей У. Методи управління технологічними процесами: переклад з англійського. М. : Мир, 1983. 368 с.
2. P.J. Flint, Q.L. he, R.B. Mahapatra, J. Herbertson. "Numerical model of heat transfer, fluid flow and solidification in the continuous steel slab caster" in Modelling of casting processes and solidification microstructures. BHP and Comalco (1992).
3. P.N. Hansen, E. Flender, G.C. Hartman. "MAGMASOFT – The MAGMA system of Mold filling and solidification modelling" in Numerical Simulation of casting solidification in automotive applications. The Minerals, Metals and Materials Society, 1991. P. 221.
4. X. Xue, S.F. Hansen, P.N. Hansen. "Numerical Simulation and Experimental Verification of Mold Filling Process through Less-depressurized and Depressurized gating systems". Pre-published, 1992.
5. Y. Iwata, Y. Yamamoto, K. Kagami. "Computer simulation of molten metal flow in thin plate die castings". Die Casting Association. 1991.
6. Irving W.R. Continuous Casting of Steel / W.R. Irving // Institute of Metals. London, 1993. P. 182–185.
7. Thomas B.G. Continuous Casting of Steel / B.G. Thomas // Modeling and Simulation for Casting and Solidification Processing. Chap. 15. O. Yu. editor. Marcel Dekker. New York, 2001. P. 499–540.
8. И.О. Мищенко. Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывнолитого слитка. Известия вуз. Черная металлургия. 2006, № 3. С. 15–21.
9. Теория квазиравновесной кристаллизации металлических сплавов / В.Т. Борисов, В.В. Виноградов, В.А. Ефимов, В.А. Журавлев // Кристаллизация и компьютерные модели: Всесоюзная конф. по проблемам кристаллизации сплавов и компьютерного моделирования. Ижевск, 1991. С. 5–10.

Marynych I.A., Serdiuk O.Yu. MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL STATE OF WORKPIECES FOR IMPROVEMENT OF CONTROL OF METAL CRYSTALLIZATION PROCESS ON CONTINUOUS CASTING MACHINE

Article considers development of mathematical model that takes into account uneven temperature distribution in the workpiece during the casting process, for early prediction and formation of control effects to prevent thermal stresses that can lead to cracking and breakthrough of liquid steel in continuously cast ingot. Practical significance lies in application of obtained mathematical model in construction of an adaptive automatic control system, which in turn will reduce amount of waste and reduce time of emergency downtime due to breakthroughs of liquid steel.

Continuously cast billets are main raw material for production of rolled products and quality of billets determines quality of finished metal product. One of the main problems encountered when pouring metal on

machine for continuous casting of workpieces of radial-curved type is presence of cracks and liquation zones in internal structure of metal, as well as on surface of workpiece. One of causes of defects in continuous billets is thermal stress. Reduction of thermal stresses is provided by means of increase of quality of management in ACS of TP due to introduction of optimum management of workpieces cooling.

Problem of quality improving of workpieces is solved by optimizing of workpieces' cooling process through applying of adaptive automatic temperature control system of workpieces continuous casting machine, which uses the developed mathematical model of cooling process of workpieces, that is different from those known in time at variable casting speed of workpiece and taking into account heat of crystallization, structural transitions of steel, heat transfer due to water cooling.

Key words: *automation, continuous billet casting machine, mathematical model, crystallizer, continuous cast billet, temperature field.*