

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 34, 2026, № 3 (346), 33-40

<https://doi.org/10.15407/steelcast2026.03.033>

УДК 621.746.5

О.М. Хорошилов¹, д-р техн. наук, доц., професор кафедри машинобудування, транспорту і зварювання,

e-mail: olegkhoroshilov2020@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2048-6311>

О.І. Пономаренко², д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри ливарного виробництва,

e-mail: olha.ponomarenko@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>

А.А. Севоян², аспірант кафедри ливарного виробництва, e-mail: prometmetall@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0005-7966-2545>

О.С. Подоляк¹, канд. техн. наук, доц., в. о. завідувача кафедри машинобудування, транспорту і зварювання,

e-mail: o.s.podoliak@karazin.ua, <https://orcid.org/0009-0009-4490-5497>

¹Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (Харків, Україна)

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)

Метод встановлення термопар у графітовому кристалізаторі для визначення температурних полів у заготовці з мідних сплавів

Статтю присвячено розробленню та експериментально-розрахунковому обґрунтуванню способу встановлення термопар у графітовому кристалізаторі горизонтальної машини безперервного лиття мідних сплавів. Схему термометрування сформовано з пар термопар, розміщених на різній глибині стінки у характерних поздовжніх перерізах кристалізатора, що дає змогу визначати локальний радіальний градієнт температури і використовувати виміряні значення як вузлові дані для відновлення температурного поля. Обґрунтування розташування виконано за теплотехнічним розрахунком системи «заготовка—графітова втулка—водоохолоджуваний мідний кожух» та експериментальним термометруванням у перерізах 20, 60 і 150 мм від вхідного торця. Встановлено зниження густини теплового потоку з приблизно $4,14 \cdot 10^5$ Вт/м² у перерізі 20 мм до $1,11 \cdot 10^5$ Вт/м² у перерізі 150 мм; у перерізі 60 мм тепловий потік на нижній твірній був приблизно на 22 % меншим, ніж на верхній. Вихідні розрахункові температури мали систематичне заниження відносно експерименту; після введення єдиного коригувального коефіцієнта $k = 1,064$ середня залишкова розбіжність становила 1,5 %, максимальна — 3,2 %. На виробничій базі підприємства із термопарами, встановленими за запропонованою методикою, проведено п'ять плавок; розкид показань між окремими плавками для кожної контрольної точки перебував у межах 3,5—5,0 %, а максимальне відхилення не перевищувало 5,0 %. Термоконтвективне розшарування запропоновано оцінювати за положенням точок початку твердіння на верхній і нижній частинах заготовки та кутом φ відхилення прямої АВ, що їх сполучає, від вертикалі.

Ключові слова: безперервне лиття; мідні сплави; графітовий кристалізатор; термопара; температурне поле; тепловий потік; фронт твердіння; термоконтвективне розшарування; верифікація.

Вступ. Безперервне лиття мідних сплавів дає змогу одержувати заготовки з високим виходом придатного металу, скорочувати обсяг металу, що видаляється разом із прибутковою частиною, а також керувати умовами формування структури зміною швидкості витягування та інтенсивності охолодження кристалізатора [1—3].

Стабільність процесу безпосередньо пов'язана з тепловідведенням у кристалізаторі та положенням фронту твердіння. Тому температурні вимірювання у стінці кристалізатора застосовують для оцінювання температурних полів, теплових потоків і зміни зони твердіння за нестационарних режимів лиття [4—6].

Для горизонтального безперервного лиття міді та мідних сплавів особливе значення має стан графітового кристалізатора: якість його поверхні, геометрія, контакт із водоохолоджуваним кожухом і режим охолодження впливають на температуру процесу, якість поверхні та структурний стан заготовки [7—10].

Сучасні дослідження горизонтального безперервного лиття мідних сплавів підтверджують чутливість макроструктури, сегрегації та дефектоутворення до параметрів переривчастого витягування й теплового режиму [11—13].

У попередніх роботах авторів розглядалися формоутворення безперервнолитих заготовок із мідних сплавів та особливості взаємодії пари «заготовка—кристалізатор». Ці результати обґрунтовують необхідність надійного локального контролю температури графітового кристалізатора під час експериментального дослідження процесу [14, 15].

Постановка проблеми (задачі). У горизонтальному кристалізаторі внаслідок природної конвекції та різниці густини шарів розплаву формується термоконвективне розшарування: верхня частина ванни має інший тепловий стан, ніж нижня. Тому фронт твердіння біля верхньої та нижньої твірних графітового кристалізатора розташовується на різній відстані від вихідного торця. Для опису цього стану доцільно використовувати кут φ відхилення від вертикалі прямої АВ, що сполучає характерні точки А і В початку твердіння на верхній і нижній частинах заготовки (рис. 1) [5—9].

Зі зміною температури розплаву та продуктивності безперервного лиття положення фронту твердіння зміщується. Для заготовок діаметром 0,135—0,160 м підвищення продуктивності потребує контролю наближення зони твердіння до вихідного торця кристалізатора, оскільки надмірне зміщення фронту може знизити стабільність формування твердої оболонки заготовки.

Водночас вимірювання температури у графітовій втулці має конструктивну проблему. Графіт є крихким і має самозмашувальні властивості, тому механічне зачekanювання термопар є неприйнятним, а просте ущільнення електроізоляційним матеріалом не гарантує постійного контакту спаю зі стінкою за дії вібрацій і знакозмінних навантажень, особливо на нижній твірній [7, 8, 15].

Отже, необхідно розв'язати три взаємопов'язані

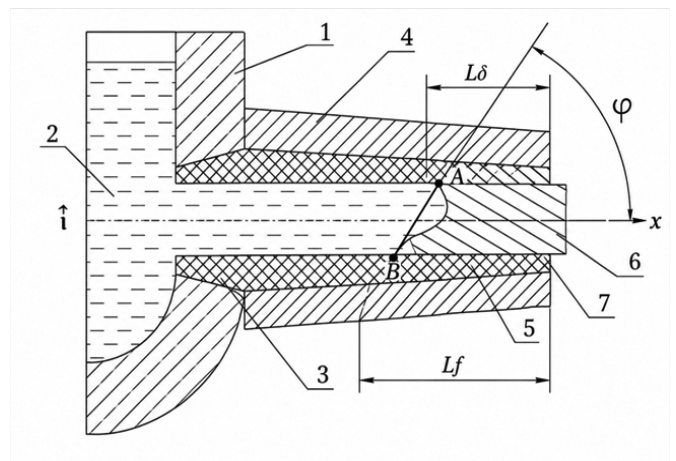


Рис. 1. Вузол кристалізації машини безперервного лиття: 1 — корпус металопримача; 2 — розплав; 3 — графітовий кристалізатор; 4 — мідний водоохолоджуваний кожух кристалізатора (не деталізовано); 5 — лінія фронту твердіння; 6 — затверділа заготовка; 7 — вихідний торець кристалізатора. А і В — точки початку твердіння заготовки відповідно у верхній та нижній частинах її перерізу; пряма АВ сполучає ці точки. Кут φ характеризує відхилення прямої АВ від вертикалі

задачі: сформувати схему визначення термоконвективного розшарування розплаву за температурними вимірюваннями на верхній і нижній твірних; визначити контрольні точки для оцінювання наближення граничного теплового режиму; забезпечити стабільний тепловий контакт спаю термопар з графітовим кристалізатором у важкодоступних місцях.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення та обґрунтування способу встановлення термопар у графітовому кристалізаторі горизонтальної машини безперервного лиття, який забезпечує стабільний тепловий контакт спаю термопар зі стінкою кристалізатора та дає змогу одержувати температурні дані для оцінювання термоконвективного розшарування розплаву і контролю положення зони твердіння під час лиття заготовок із мідних сплавів.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є тепловий стан графітового кристалізатора та зони твердіння під час горизонтального безперервного лиття заготовок із мідних сплавів діаметром 0,135—0,160 м. Для локального термометрування застосовано термопару хромель—алюмель, спаї яких розміщували у радіальних гніздах графітової втулки на заданій відстані від її робочої поверхні.

Спосіб установлення термопар передбачає послідовне виконання таких операцій:

- 1) визначити місця встановлення термопар у графітовій втулці кристалізатора;
- 2) виконати пази для прокладання провідників і висвердлити радіальні гнізда під термопару;
- 3) розмістити провідники термопар у керамічних трубках та рівномірно прокласти їх у пазах;
- 4) захистити компенсаційні провідники за межами графітового кристалізатора термостійкою ізоляцією;
- 5) установити спаї термопар у підготовлене гніздо;

- 6) внести у гніздо розраховану навіску стружки олов'яно-свинцевого припою;
- 7) підігріти графітову втулку до розплавлення припою;
- 8) притиснути спай термопар у розплавленому припої до дна гнізда до формування стійкого теплового контакту;
- 9) охолодити графітову втулку до кімнатної тем-

ператури;

- 10) закрити шар припою пробкою з керамічного матеріалу.

Кількість припою добирають так, щоб після занурення спаю його рівень у гнізді не перевищував висоту спаю термопар. Конструкцію вузла закріплення наведено на рис. 2.

Для реєстрації температурного поля термопар

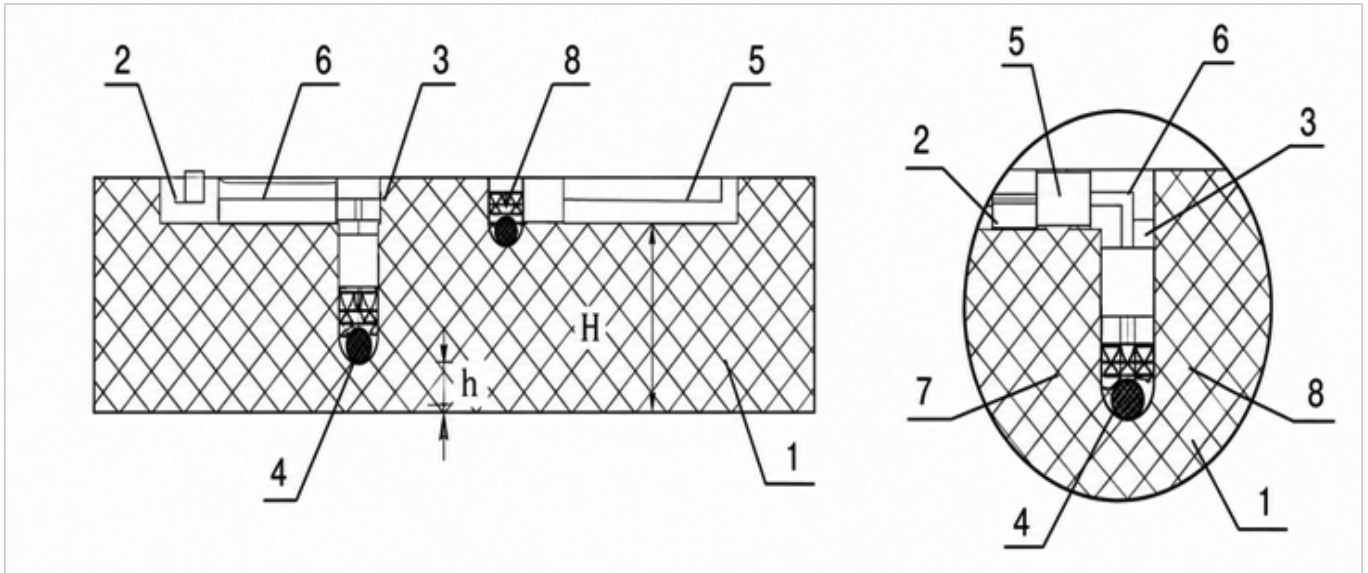


Рис. 2. Поперечний переріз графітового кристалізатора на ділянці вимірювання температури: 1 — стінка графітового кристалізатора; 2 — паз для прокладання термопар; 3 — свердління (гніздо) для встановлення термопар; 4 — спай термопар; 5 — керамічна трубка; 6 — компенсаційні провідники термопар хромель—алюмель; 7 — припій; 8 — пробка з керамічного матеріалу; H , h — відстані від холодної та гарячої точок до внутрішньої поверхні графітового кристалізатора відповідно

розподіляють уздовж верхньої та нижньої твірних графітової втулки. На верхній твірній установлено три пари, на нижній — дві пари. Кожна пара містить «гарячу» та «холодну» точки на різній радіальній координаті, тому вимірювання дають не лише локальну температуру, а й радіальний температурний градієнт у стінці. Поздовжні координати пар вибрано так, щоб охопити ділянку інтенсивного теплообміну біля входу, зону початку твердіння та ділянку формування газового зазору. Нижні пари необхідні для виявлення вертикальної асиметрії температурного поля, пов'язаної з термоконвективним розшаруванням розплаву.

Результати дослідження. Після затвердіння припою спай термопар утримується у заданому положенні відносно дна гнізда. Керамічна пробка механічно фіксує шар припою, перешкоджає його витіканню під час нагрівання та виконує функцію електричного ізолятора. Для нижньої твірної це принципово важливо, оскільки напрямок дії сили тяжіння та вібраційні навантаження сприяють зміщенню незакріпленого спаю. Загальний вигляд графітової втулки кристалізатора з установленими термопарами для заготовки типорозміру 150/90 мм наведено на рис. 3.

Сформована схема термометрування дозволяє одержувати набір температурних значень на верхній і нижній твірних та зіставляти їх з температурою

твердіння досліджуваного сплаву. Точки однакової температури на протилежних твірних визначають по-

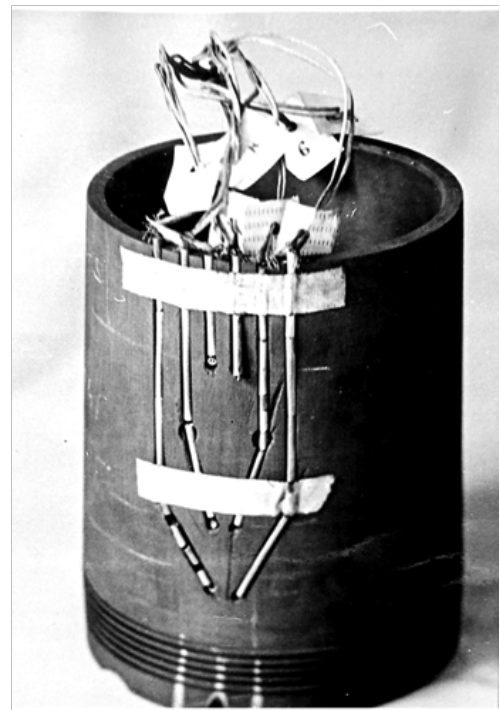


Рис. 3. Загальний вигляд графітової втулки кристалізатора з установленими термопарами для заготовки типорозміру 150/90 мм

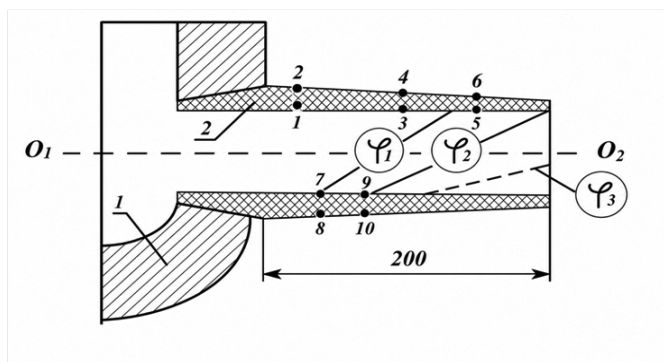


Рис. 4. Схема встановлення термопар у графітовому кристалізаторі: 1 — корпус металопримача; 2 — графітовий кристалізатор; O1—O2 — вісь графітового кристалізатора; 1–10 — точки встановлення термопар; φ_1 , φ_2 , φ_3 — характерні положення лінії температури твердіння за різних режимів лиття

ложення характерної лінії, кут нахилу якої змінюється зі зміною теплового та швидкісного режимів лиття (рис. 4).

Обґрунтування кількості та розташуван-

ня термопар і параметри розрахункової схеми. У цій роботі поняття температурного поля не ототожнюється з простим набором локальних показань. Експериментальні температури використовують як вузлові значення, а поле між ними відновлюють з урахуванням теплотехнічної моделі кристалізатора. Розрахункова схема включає три області: рухомий метал, графітову втулку та мідний водоохолоджуваний кожух. Для металу враховують перенесення теплоти теплопровідністю і рухом розплаву, для графіту та мідного кожуха — теплопровідність; на контактних поверхнях задають умови неперервності температури та теплового потоку. У кожному характерному перерізі пара термопар на різних радіальних координатах забезпечує оцінювання градієнта температури та теплового потоку, а сукупність перерізів уздовж осі — відновлення поздовжньої зміни температурного поля. Основні геометричні та технологічні параметри розрахункової схеми наведено в табл. 1.

Розташування пар у перерізах 20, 60 і 150 мм обрано за зміною механізму тепловідведення. Біля входу в кристалізатор реалізується найбільш інтенсивний

Таблиця 1

Основні геометричні та технологічні параметри, використані для обґрунтування схеми термометрування

Параметр	Значення	Примітка
Базовий діаметр робочої поверхні графітової втулки, м	0,165	За вихідною схемою контрольних точок
Діапазон діаметрів розташування контрольних точок, м	0,1682—0,2150	Охоплює внутрішні та зовнішні радіальні координати стінки
Характерні поздовжні перерізи від вхідного торця, мм	20; 60; 150	У перерізі 60 мм вимірювання виконано на верхній і нижній твірних
Діапазон швидкості лиття у теплотехнічному розрахунку, м/с	0,09—0,11	Розрахунковий діапазон режимів
Температура металу на вході у розрахунковій серії, °C	1025—1175	Розрахунковий діапазон режимів
Швидкість води у водоохолоджуваному кожусі, м/с	0,07—0,08	Розрахункова серія теплової роботи кристалізатора
Витрата води, л/с; підвищення температури води, °C	15,76—17,9; 12—15	Розрахункова серія теплової роботи кристалізатора

Примітка. Наведені технологічні діапазони характеризують серію теплотехнічних розрахунків і використовуються для обґрунтування розташування датчиків; вони не трактуються як параметри одного єдиного експериментального режиму.

теплозім; далі формується затверділа оболонка, а на віддаленій ділянці зростає роль додаткового термічного опору газового зазору між заготовкою і графітом. Тому датчики розміщено не рівномірно по довжині, а у фізично різних зонах теплопередачі. Результати термометрування та розрахунку теплового

потоку в характерних перерізах графітової втулки наведено в табл. 2.

За верхньою твірною густина теплового потоку зменшується від $4,14 \cdot 10^5$ Вт/м² у перерізі 20 мм до $1,11 \cdot 10^5$ Вт/м² у перерізі 150 мм, тобто приблизно на 73 %. У перерізі 60 мм значення на нижній твірній при-

Таблиця 2

Результати термометрування та розрахунку теплового потоку у характерних перерізах графітової втулки

l , мм	Твірна	T^* , °C	T^{**} , °C	d^*/d^{**} , м	λ графіту, Вт/(м·K)	q , Вт/м ²
20	верхня	930	765	0,1694 / 0,1990	64,371	$4,14 \cdot 10^5$
60	верхня	800	722	0,1690 / 0,1962	70,99	$2,33 \cdot 10^5$
60	нижня	805	740	0,1680 / 0,1950	69,322	$\approx 1,82 \cdot 10^5$
150	верхня	475	460	0,1681 / 0,1837	104,79	$1,11 \cdot 10^5$

Примітка. У двох вихідних таблицях для перерізу 60 мм на нижній твірній наведено близькі значення теплового потоку $1,8066 \cdot 10^5$ і $1,8366 \cdot 10^5$ Вт/м²; тому в статті використано округлене значення $q \approx 1,82 \cdot 10^5$ Вт/м² без штучної надлишкової точності.

близко на 22 % менше, ніж на верхній. Така різниця є прямим аргументом на користь вимірювань на обох твірних: одна верхня лінія датчиків не дає змоги відокремити поздовжній градієнт від вертикальної асиметрії теплового стану.

Визначення термоконвективного розшарування та призначення контрольних термопар. Ступінь термоконвективного розшарування визначають не за абсолютною температурою однієї термопар, а за положенням характерної ізотерми, що відповідає температурі твердіння досліджуваного сплаву. За послідовністю температур на верхній та нижній твірних визначають (за інтерполяцією між сусідніми точками) поздовжні координати перетину цієї ізотерми з твірними — точки А і В, які відповідають початку твердіння заготовки у верхній та нижній частинах її перерізу. Параметром розшарування є різниця їхніх поздовжніх координат Δx та кут φ відхилення прямої АВ від вертикалі. Якщо H_{AB} — відома поперечна відстань між точками А і В, то геометрично $\tan \varphi = |\Delta x|/H_{AB}$. Отже, температурне поле графітової втулки використовується для реконструкції положення фронту твердіння, а не як його пряме візуальне спостереження.

Контрольне призначення термопар № 5 та № 9 пов'язане не з номером датчика, а з його положенням відносно характерної ізотерми. За вихідними експериментами термопара № 5 на верхній твірній відповідала робочому положенню ізотерми φ_1 , яке приймали як режим стабільної продуктивності. За підвищення продуктивності ізотерма зміщується

та змінює кут нахилу; термопара № 9 на нижній твірній була розташована у зоні, наближення до якої відповідало граничному тепловому режиму. Таким чином, № 5 є робочою, а № 9 — граничною контрольною точкою саме для дослідженої геометрії. Для іншого діаметра, сплаву або швидкості лиття контрольні координати мають бути уточнені повторним тепловим розрахунком.

Експериментальна перевірка розрахункової схеми та оцінювання точності. Для верифікації температурного поля зіставлено експериментальні та розрахункові температури в десяти контрольних точках (рис. 5). Вихідний теплотехнічний розрахунок мав переважно систематичне заниження температур відносно експерименту. Щоб усунути цей масштабний зсув без зміни експериментальних даних, введено єдиний коригувальний коефіцієнт $k = 1,064$, визначений як середнє відношення $T_{\text{експ}}/T_{\text{розрах}}.$ за десятима контрольними точками. Скориговану температуру визначали як $T_{\text{розрах, скор.}} = k \cdot T_{\text{розрах, вих.}}$, а залишкову відносну розбіжність — як $\delta = |T_{\text{експ}} - T_{\text{розрах, скор.}}|/T_{\text{експ}} \cdot 100 \%$. Вихідні та скориговані значення наведено в табл. 3.

Після введення єдиного коригувального коефіцієнта середня залишкова відносна розбіжність для десяти контрольних точок становить 1,5 %, максимальна — 3,2 % (точка № 7). Для точки № 5 вона становить 2,2 %. Таким чином, після усунення систематичного масштабного зсуву розрахункова схема відтворює експериментальні температури з розбіжністю не більше 5 %. Водночас вихідні

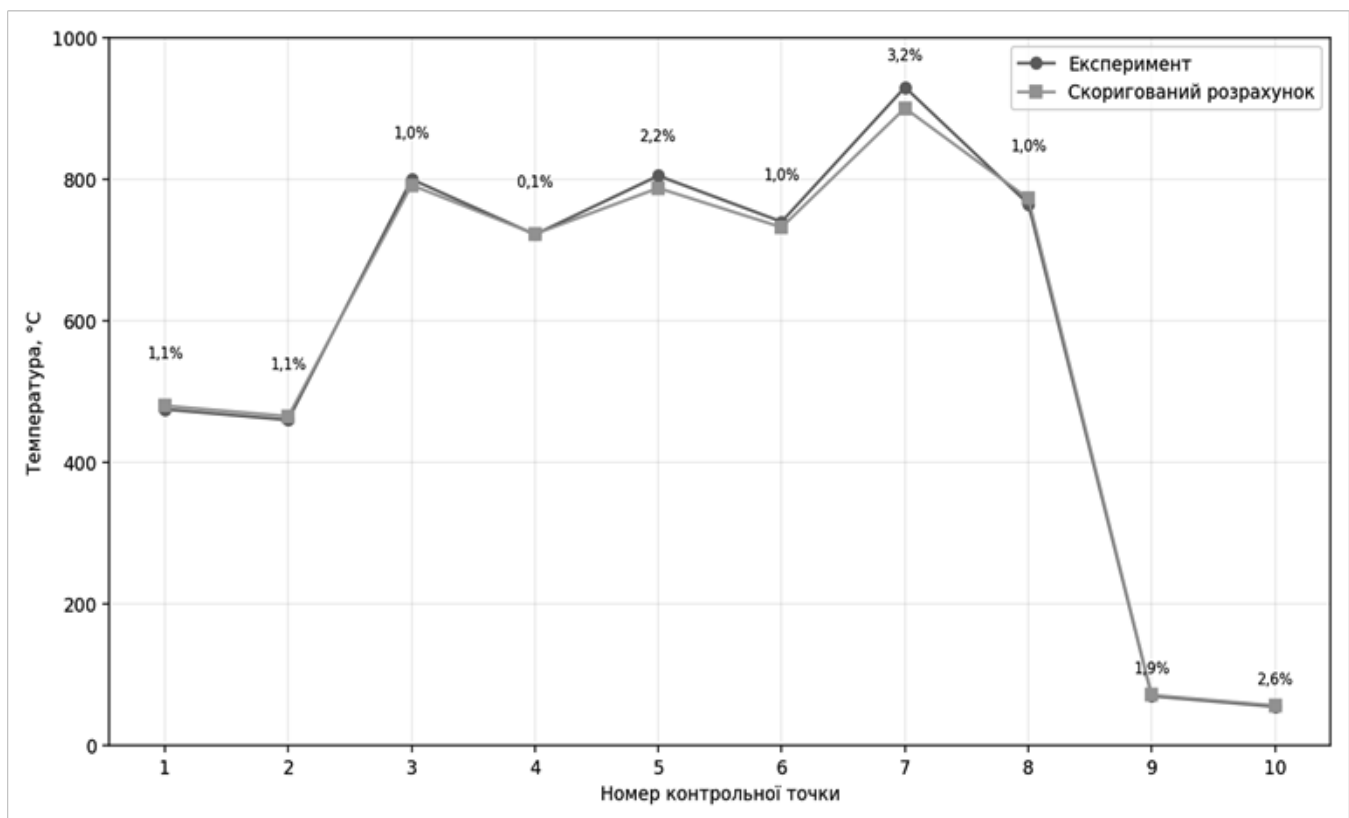


Рис. 5. Зіставлення експериментальних і скоригованих розрахункових температур у десяти контрольних точках. Над розрахунковими точками наведено залишкову відносну розбіжність δ

Зіставлення експериментальних і розрахункових температур у контрольних точках

Точка	Діаметр, м	$T_{\text{експ}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{розра}}, \text{вих.}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{розра}}, \text{скор.}, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{скор}}, \%$
1	0,1682	475	451	480,0	1,1
2	0,1838	460	437	465,1	1,1
3	0,1685	800	744	791,9	1,0
4	0,1956	722	679	722,7	0,1
5	0,1683	805	740	787,6	2,2
6	0,1954	740	688	732,3	1,0
7	0,1691	930	846	900,4	3,2
8	0,2020	765	726	772,7	1,0
9	0,2100	70	67	71,3	1,9
10	0,2150	55	53	56,4	2,6

розрахункові значення збережено в табл. 3, що дає змогу відокремити початкову похибку моделі від результату її калібрування.

Наведена величина δ характеризує залишкову розбіжність «експеримент—скоригований розрахунок» після однофакторного калібрування теплової моделі і не повинна ототожнюватися з паспортною похибкою окремої термопар. Повна метрологічна невизначеність каналу «хромель—алюмелева термопара—компенсаційні проводи—реєстратор» потребує окремого врахування класу точності датчиків, похибки реєстратора та результатів калібрування.

Обговорення результатів. Традиційне ущільнення термопар у свердловині електроізоляційним матеріалом не усуває ризику мікропереміщення спаю відносно графітової стінки. За такого переміщення змінюється локальний тепловий опір, а вимірювана температура характеризує вже не лише стан кристалізатора, а й нестабільність контакту. Заповнення гнізда металевим припоєм із подальшою фіксацією керамічною пробкою зменшує цей конструктивний чинник, що особливо важливо для нижньої твірної. Після усунення систематичного масштабного зсуву розрахункової схеми максимальна залишкова розбіжність за десятима контрольними точками становила 3,2 %. Це не є прямою метрологічною атестацією, проте є кількісним підтвердженням працездатності запропонованої схеми в дослідженому режимі.

Отримані результати показують, що вибір кількості й координат термопар має бути пов'язаний із тепловою моделлю конкретного кристалізатора. Найбільший градієнт теплового потоку спостерігається вздовж осі, а помітна відмінність верхньої та нижньої твірних виявляється вже в одному поздовжньому перерізі. Саме тому схема з кількома радіальними парами на верхній твірній і меншим числом пар на нижній є компромісом між кількістю каналів та можливістю реконструювати просторову асиметрію температурного поля. Такий підхід узгоджується з літературними даними про вплив геометрії, стану графіту та режиму тепловідведення на перебіг безперервного лиття міді та її сплавів [6—10].

Для перевірки повторюваності вимірювань на виробничій базі підприємства із термопарами, вста-

новленими за розробленою методикою, було проведено п'ять плавів. Для кожної контрольної точки розкид зареєстрованих температур між окремими плавками перебував у межах 3,5—5,0 %, при цьому максимальне відхилення не перевищувало 5,0 %. Отриманий результат характеризує експериментальну повторюваність показань у реальних умовах роботи кристалізатора та додатково підтверджує стабільність теплового контакту спаю термопар зі стінкою графітової втулки. Водночас для повного бюджету метрологічної невизначеності необхідні паспортні характеристики конкретних термопар і реєстратора та первинні протоколи калібрування.

Висновки та перспективи дослідження

1. Схему встановлення термопар обґрунтовано не лише конструктивно, а й теплотехнічним розрахунком: парні радіальні вимірювання у характерних поздовжніх перерізах використовуються як вузлові дані для реконструкції температурного поля системи «заготовка—графітова втулка—водоохолоджуваний кожух».

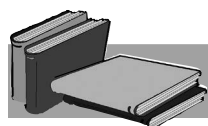
2. Розташування датчиків у перерізах 20, 60 і 150 мм відповідає різним умовам теплопередачі. За верхньою твірною густина теплового потоку зменшується приблизно з $4,14 \cdot 10^5$ до $1,11 \cdot 10^5$ Вт/м²; у перерізі 60 мм тепловий потік на нижній твірній приблизно на 22 % менший, ніж на верхній, що обґрунтовує необхідність двобічного контролю.

3. Термоконвективне розшарування визначають за координатами точок А і В початку твердіння заготовки у верхній та нижній частинах її перерізу та за кутом ϕ відхилення прямої АВ від вертикалі. Контрольні термопары № 5 і № 9 функціонально відповідають робочому та граничному положенню цієї характерної лінії для дослідженої геометрії.

4. Вихідні розрахункові температури мали систематичне заниження. Після введення єдиного коригувального коефіцієнта $k = 1,064$ середня залишкова розбіжність між експериментальними та скоригованими розрахунковими температурами в десяти контрольних точках становить 1,5 %, максимальна — 3,2 %, тобто не перевищує 5 %.

5. У п'яти плавках, проведених із термопарами, встановленими за запропонованою методикою, розкид показань між окремими плавками для кожної контрольної точки становив 3,5—5,0 %, а максимальне відхилення не перевищувало 5,0 %.

Ці дані підтверджують повторюваність вимірювань у виробничих умовах; повна метрологічна атестація вимірювального каналу потребує окремого врахування паспортних характеристик датчиків і реєстратора.



REFERENCES

1. Wilson, R. (2000). A Practical Approach to Continuous Casting of Copper-Based Alloys and Precious Metals. IOM Communications Ltd.
2. Tyler, D. E., & Vierod, R. P. (2008). Copper continuous casting. In S. Viswanathan, D. Apelian, R. J. Donahue, B. DasGupta, M. Gywn, J. L. Jorstad, R. W. Monroe, M. Sahoo, T. E. Prucha, & D. Twarog (Eds.), ASM handbook: Vol. 15. Casting (pp. 1019–1025). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.a0005288>
3. Merchant, H. D., Tyler, D. E., & Chia, E. H. (Eds.). (1989). Continuous casting of non-ferrous metals and alloys: Proceedings of a symposium. The Minerals, Metals & Materials Society.
4. Flemings, M. C. (1974). Solidification Processing. McGraw-Hill.
5. Rodríguez, J. M., Esteve, A., & Meza, S. (1999). A note on the control of the solidification front in the continuous casting of copper tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 96(1-3), 42-47. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00314-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00314-3)
6. Morelli, U. E., Barral, P., Quintela, P., Rozza, G., & Stabile, G. (2023). Novel methodologies for solving the inverse unsteady heat transfer problem of estimating the boundary heat flux in continuous casting molds. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 124(6), 1344-1380. <https://doi.org/10.1002/nme.7167>
7. Kwaśniewski, P., Strzępek, P., Kiesiewicz, G., Kordaszewski, S., Franczak, K., Sadzikowski, M., Ścieżor, W., Brudny, A., Kulasa, J., Juszczak, B., Wycisk, R., & Śliwka, M. (2021). External Surface Quality of the Graphite Crystallizer as a Factor Influencing the Temperature of the Continuous Casting Process of ETP Grade Copper. *Materials*, 14(21), 6309. <https://doi.org/10.3390/ma14216309>
8. Kordaszewski, S., Kwasniewski, P., Strzepek, P., Kiesiewicz, G., Sciezor, W., Sadzikowski, M., & Franczak, K. (2022). Graphite crystallizer and its surface quality as a factor affecting the copper continuous casting process. *Metalurgija*, 61(3-4), 603-605. <https://hrcak.srce.hr/en/273818>
9. Strzepek, P., Zasadzinska, M., Kordaszewski, S., & Sciezor, W. (2022). Geometry and surface quality of the crystallization system and their influence on the temperatures throughout the continuous casting processes of copper-magnesium alloys. *Metalurgija*, 61(3-4), 606-608. <https://hrcak.srce.hr/en/273819>
10. Brudny, A., Kulasa, J., Cwolek, B., Malec, W., & Juszczak, B. (2022). Influence of the continuous casting process of TIN-ZINC-LEAD bronze on the wear of the graphite crystallizer. *Metalurgija*, 61(3-4), 785-788. <https://hrcak.srce.hr/index.php/en/274039>
11. Strzępek, P., Mamala, A., Zasadzińska, M., Noga, P., & Sadzikowski, M. (2020). The Influence of the Continuous Casting Conditions on the Properties of High-Strength Two-Phase CuMg Alloys. *Materials*, 13(21), 4805. <https://doi.org/10.3390/ma13214805>
12. Jones, T. D. A., Strachan, R., Russell, K., Abdullah, M., Mackie, D. M., Cooper, M., Frame, B., & Vorstius, J. B. (2023). Prediction of Periodic Centerline Porosity and Pulse Marks by CFD and Experimentation for Continuously Cast Copper. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 54, 499-514. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02704-1>
13. Strzępek, P., Mamala, A., Boumerzoug, Z., Baudin, T., Brisset, F., Zasadzińska, M., & Noga, P. (2025). Effect of Horizontal Continuous Casting Parameters on Cyclic Macrosegregation, Microstructure, and Properties of High-Strength Cu–Mg Alloy Cast Rod. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 56, 41-60. <https://doi.org/10.1007/s11661-024-07609-z>
14. Khoroshylov, O. M., Kurylyak, V. V., Podolyak, O. S., & Antonenko, N. S. (2019). Study of the processes of shaping the hollow billets from antifriction alloys by the centrifugal and continuous casting methods. *Progress in Physics of Metals*, 20(3), 367-395. <https://doi.org/10.15407/ufm.20.03.367>
15. Khoroshylov, O., Podolyak, O., Kuryliak, V., Kipensky, A., & Lomakin, A. (2020). Analysis of Frictional Interaction in a Couple "Billet–Crystallizer". In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds.). Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_13

Надійшла/Received 11.08.2026

Прийнята/Accepted 27.08.2026

Опублікована/Published 28.09.2026

Summary

O.M. Khoroshylov¹, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding, e-mail: olegkhoroshilov2020@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2048-6311>

O.I. Ponomarenko², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Foundry, e-mail: olha.ponomarenko@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3043-4497>

A.A. Sevoian², PhD Student of the Department of Foundry, e-mail: prometmetall@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7966-2545>

O.S. Podoliak¹, PhD (Engin.), Associate Professor, Acting Head of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding, e-mail: o.s.podoliak@karazin.ua, <https://orcid.org/0009-0009-4490-5497>

¹*Education and Research Institute “Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy” of V.N. Karazin Kharkiv National University (Kharkiv, Ukraine)*

²*National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (Kharkiv, Ukraine)*

Method for Installing Thermocouples in a Graphite Mold for Determining Temperature Fields in a Copper-Alloy Billet

The article presents an experimentally and computationally substantiated method for installing thermocouples in the graphite mold of a horizontal continuous casting machine for copper alloys. The measuring scheme uses thermocouple pairs located at different radial depths in characteristic axial sections of the mold, providing local radial temperature gradients and nodal data for temperature-field reconstruction. Sensor locations were justified using a heat-transfer model of the billet–graphite sleeve–water-cooled copper shell system and experimental thermometry at 20, 60 and 150 mm from the mold inlet. The heat-flux density decreased from approximately $4.14 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ at 20 mm to $1.11 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ at 150 mm; at the 60 mm section, the heat flux at the lower generatrix was approximately 22 % lower than at the upper generatrix. The initial calculated temperatures showed a systematic underestimation relative to the experiment. After applying a single correction coefficient $k = 1.064$, the mean residual discrepancy was 1.5 % and the maximum was 3.2 %. Five industrial heats were carried out with thermocouples installed according to the proposed method; the inter-heat scatter at each control point was 3.5–5.0 %, with a maximum deviation not exceeding 5.0 %. Thermoconvective stratification is evaluated from points A and B corresponding to the onset of solidification in the upper and lower parts of the billet cross-section and from angle φ , defined as the deviation of line AB from the vertical.

Keywords

Continuous casting; copper alloys; graphite mold; thermocouple; temperature field; heat flux; solidification front; thermoconvective stratification; verification.