ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 32, 2024, № 2 (337), 41-45
https://doi.org/10.15407/steelcast2024.02.005
УДК 621.74.669.13.017

М.І. Замятін, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри, e-mail: zamyatinnikiv@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8458-6341

Т.В. Лисенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, e-mail: tvl12odessa@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3183-963x

М.П. Тур, ст. викладач кафедри, e-mail: tyrmp15@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5028-9744

К.О. Данілова, студент, магістр кафедри, e-mail: danilova.8089488@stud.op.edu.ua, https://orcid.org/0009-0004-7513-2136

Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

Аналіз теплообмінних процесів у системі «метал — протипригарне покриття — заморожена форма»

Статтю присвячено аналізу теплообмінних процесів у системі «метал — протипригарне покриття — заморожена форма», який є важливим аспектом досліджень у сфері матеріалознавства та промислової технології, оскільки він впливає на якість та ефективність кінцевого продукту. В дослідженні також надано особливу увагу процесам теплообміну між металом, протипригарним покриттям та замороженою формою завдяки аналізу отриманих показників, розрахункових та експериментальних даних. Крім того, необхідно врахувати взаємодію між різними елементами системи, такими як термодинамічні властивості покриття та теплоізоляційні властивості замороженої форми. Одним із ключових аспектів аналізу було урахування теплоємності та теплопровідності матеріалів, які входять до складу системи, оскільки теплоємність вказує на здатність матеріалу поглинати тепло, а теплопровідність визначає його здатність передавати тепло. Розглянуто властивості протипригарного покриття, яке захищає метал від високих температур та забезпечує оптимальні умови для замороження форми, оскільки вони можуть впливати на теплообмін шляхом зменшення чи збільшення контакту між металом та замороженою формою. На основі отриманих даних побудовано номограму для визначення мінімальної товщини замороженого стрижня залежно від товщини стінки виливка та температури охолодження форми. Розроблена математична модель процесу теплопереносу в системі ґрунтується на методі клітинних автоматів. Модель адекватно описує реальний процес і може бути використана для чисельних досліджень. Результати роботи дають можливість допомогти покращити технологію виробництва та підвищити якість кінцевого продукту саме завдяки аналізу теплообмінних процесів у системі «метал — протипригарне покриття — заморожена форма».

Ключові слова: *лиття в заморожені форми, протипригарне покриття, теплообмін, математичне моделювання, номограма, охолодження, розплав, температура, алюміній.*

Вступ. Ливарне виробництво дає можливість виготовлення деталей високої якості — у тому числі і для авіаційної промисловості. Більшість виливків виготовляється з алюмінієвих сплавів, які заливаються у піщані форми. Даний метод лиття — технологічний, економічний і дозволяє виготовляти фасонні виливки високої якості. Однак він має низку недоліків. Низька міцність формувальної суміші призводить до виникнення поверхневих дефектів, у яких найбільш поширені ужиміни, і вимагає використання різноманітних сполучних матеріалів, що призводить до ускладнення технології та погіршення процесу вибивання формувальної та стрижневої сумішей. Це особливо важливо для отримання виливків із кольорових сплавів металів, які мають малу твердість та високу хімічну активність [1]. Ці особливості не дозволяють використовувати механічний та хімічний вплив на виливок при його вибиванні з форми та очищення. Одним із перспективних методів отримання виливків із кольорових сплавів, які не мають вищенаведених недоліків, є лиття в заморожені ливарні форми (ЗЛФ). Особливістю лиття в ЗЛФ є суттєве збільшення міцності (понад 10 разів) форм проти міцності піщано-глиняних сухих форм. Використання води як основного сполучного, призводить до скорочення часу вибивання форм і стрижнів на ~ 90 % та покращення умов вибивання. Однак спосіб лиття в ЗЛФ має ряд недоліків, пов'язаних з утворенням поверхневих дефектів, у тому числі — пригару, що призводить до браку виливків та підвищення витрат на фінішну обробку [2]. Використання низького тиску для заливки металу сприяє підвищенню проникнення розплаву в пори форми та стрижня, що, відповідно, призводить до збільшення пригару на виливках. Використання високоякісних протипригарних покриттів дозволяє

істотно знизити шорсткість поверхні виливків, покращити товарний вигляд виробів, покращити умови праці на очисних операціях та знизити матеріальні витрати.

Відома велика кількість протипригарних покриттів піщано-глинистих форм і стрижнів, які знайшли застосування при литті кольорових сплавів. Але розробка подібних покриттів для заморожених ливарних форм і стрижнів не велася, тому відсутні відомості про раціональні склади цих покриттів, закономірностях їх взаємодій, теплових процесах при їх використанні, впливу протипригарних покриттів на якість поверхні виливків [3].

Відсутність цих даних призводить до неможливості ефективного використання цього методу лиття. Тому робота, спрямована на вирішення науково-практичного завдання з розробки теоретичних та технологічних основ застосування протипригарних покриттів на водній основі для заморожених ливарних форм та стрижнів, які дозволили б зменшити кількість поверхневих дефектів на виливках за рахунок зменшення шорсткості поверхні, попередження виникнення пригару, ерозії поверхонь форми та стрижнів, а також за рахунок підвищення ужиміностійкості заморожених форм та стрижнів, є актуальною.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі були сформульовані наступні завдання:

1. Дослідити процес теплопереносу в системі «метал — протипригарне покриття — заморожена форма (стрижень)» за результатами математичного моделювання.

2. Експериментально встановити вплив температури ЗЛФ на швидкість охолодження та кристалізації сплаву АК5М2.

3. Отримані експериментальним шляхом дані відобразити на номограмі для подальших досліджень.

Метою роботи стало дослідження та виявлення закономірностей процесів теплообміну в системі «метал — протипригарне покриття — заморожена форма» з метою розробки рекомендацій щодо оптимізації технологічних параметрів процесу.

Результати дослідження. Для вивчення теплофізичних явищ, що відбуваються в ЗЛФ з протипригарним покриттям при затвердінні металу, був проведений ряд експериментів з дослідження температурних полів в системі «метал — протипригарне покриття — ЗЛФ».

Для визначення впливу технологічних параметрів форми на особливості перебігу процесів кристалізації металу в ЗЛФ використовувалася форма, представлена на рис. 1.

Експериментальний виливок мав форму циліндра діаметром 100 мм і висотою 200 мм. Заливка металу у форму здійснювалася знизу через ливник.

Виготовлення форми відбувалося на вібраційній формувальній машині. На внутрішню поверхню форми наносилося досліджуване протипригарне покриття [4]. Для контролю температури в процесі затвердіння металу у форму були встановлені термопари. Схему розташування термопар представлено на рис. 2.

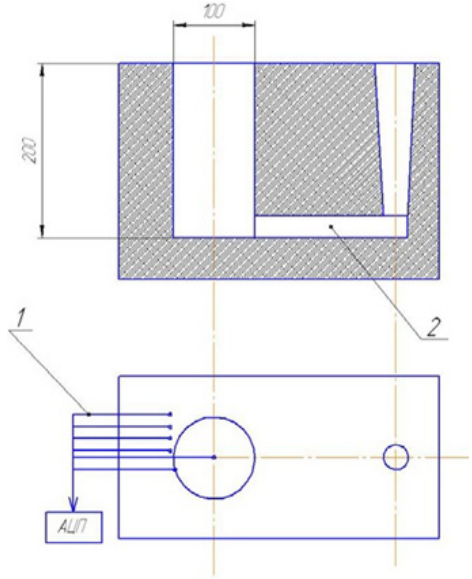

Рис. 1. Експериментальна форма: *1* — термопари; *2* — порожнина форми

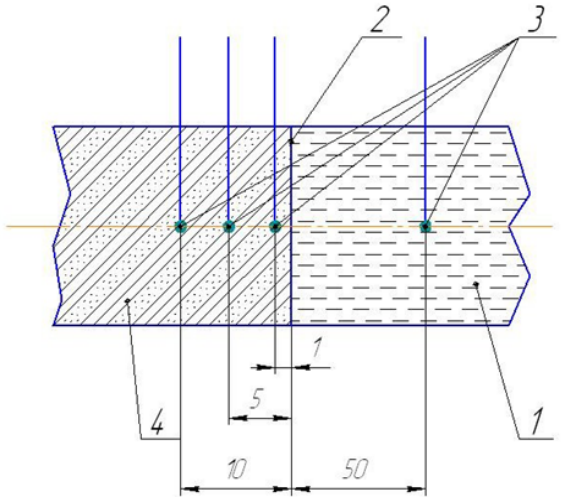

Рис. 2. Схема розташування термопар: *1* — рідкий метал; *2* — межа розділу метал — форма; *3* — термопари; *4* — заморожена форма

Після цього форму охолоджували до заданої температури протягом 3 годин. Потім в отриману заморожену ливарну форму заливали алюмінієвий сплав АК5М2 (ГОСТ 1583-93) при температурі 700 °С. Показання термопар фіксувалися за допомогою автоматичного цифрового потенціометра (АПЦ), а дані записувалися у вигляді графіків залежності температури від часу.

Аналіз отриманих кривих показав, що швидкість охолодження розплаву до температури солідуса залежить від початкової температури форми. Так, при охолодженні розплаву у формі з температурою +20 °С вона становить 1,2 °С/с, а в замороженій формі з температурою -20 °С і -60 °С температура охолодження вже досягає 2,5 °С/с і 40 °С/с, що в 2 і 3,5 рази вище, ніж у піщано-глинистій формі.

При досягненні розплавом температури солідуса (TS) в контактному шарі (1 мм) заморожена ливар-

на форма з температурою -20 °С прогрівається за 55 секунд, при цьому він нагрівається до 300 °С. Для піщано-глинистої форми з температурою +20 °С ці значення становлять 100 секунд і 400 °С відповідно.

Важливо зазначити, що в обох випадках не відбувається формування «зони конденсації вологи». Про це свідчить відсутність зупинки температури на рівні 100 °С [5].

Температура поверхні контакту на межі «метал — форма» в ЗЛФ нижча на 100 °С, що забезпечує більш високий темп охолодження розплаву в цій формі порівняно з піщано-глинистою формою (+20 °С).

В той же час, на кривій нагріву поверхневого шару ЗЛФ (-60 °С) спостерігається формування «зони конденсації вологи», тобто зупинка температури при 100 °С, що на 30 секунд перевищує час закінчення кристалізації виливка.

Стабілізація температури на рівні 100 °С в контактній зоні «метал — форма» значно прискорює охолодження виливка до температури солідуса (TS). В результаті час кристалізації в піщано-глинистій формі (+20 °С) і ЗЛФ (-20 °С) становить 20, 50 і 100 секунд відповідно.

Прогрів ділянок на глибині 5 і 10 мм для піщано-глинистої форми і ЗЛФ (-20 °С) і (-60 °С) відбувається схожим чином. Однак при зниженні температури форми спостерігається подовження температурної зупинки при 100 °С на кривих нагріву і зниження максимальної температури прогріву шару [6].

Так, в поверхневому шарі ЗЛФ (-60 °С) температура не піднімається вище 180 °С. Це пояснюється додатковою витратою тепла, що виділяється при кристалізації виливка, на агрегатне перетворення води, а також меншою швидкістю переміщення 100-градусної зони, що визначається по закінченню 100-градусної зупинки на кривій нагріву.

На відміну від інших форм, в ЗЛФ з температурою -60 °С 10-міліметровий шар за даний проміжок часу не прогрівається до 100 °С. Це означає, що просування фронту 100-градусної зони в цій формі припиняється раніше, ніж у звичайній піщано-глинистій формі й ЗЛФ з температурою -20 °С, де воно продовжується монотонно.

В перші хвилини після заливки металу відбувається інтенсивний нагрів прилеглих до нього шарів форми (рис. 3). Швидкість і ступінь прогріву на цьому етапі визначаються кількістю тепла, необхідного для перетворення води в пару, а також інтенсивністю відводу тепла за рахунок теплообміну між шарами і переносу пари, що виникає під дією градієнта тиску, направленого вглиб форми.

Для математичного моделювання процесу теплопереносу в системі «метал — протипригарне покриття — заморожена форма» був розроблений метод на основі клітинних автоматів [7].

Для перевірки достовірності моделі результати розрахунків були зіставлені з даними, отриманими в ході фізичного експерименту.

На рис. 4 представлені розрахункові криві і експериментальні точки, що відображають швидкості охолодження виливків зі сплаву АК5М2.

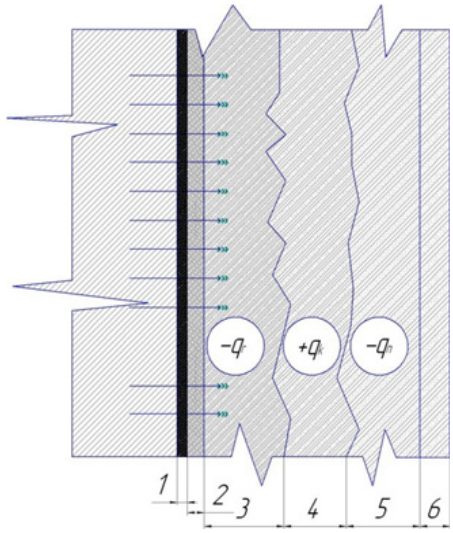

Рис. 3. Схема розташування зон агрегатного стану вологи в замороженій ливарній формі (стрижні): *1* — протипригарне покриття; *2* — зона сухого піску; *3* — зона випаровування; *4* — зона конденсації; *5* — вологий пісок; *6* — заморожена суміш

Висновки та перспективи дослідження

Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало, що розроблена модель з урахуванням теплопередачі володіє достатньою мірою кореляції з реальним процесом.

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє виконувати достовірні розрахунки нестаціонарних температурних полів і може бути використана для чисельних досліджень.

Проведені дослідження підтверджують, що пропонована модель адекватно описує реальний процес, що робить її придатною для вивчення впливу технологічних параметрів ЗЛФ на формування виливків з різних сплавів. На основі отриманих даних було побудовано номограму (рис. 5).

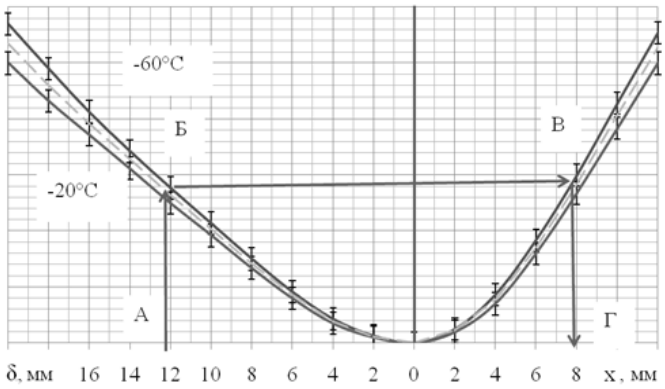

Рис. 5. Номограма визначення товщини замороженого стрижня залежно від товщини стінки виливка

За допомогою цієї номограми можна визначити мінімальну товщину замороженого стрижня залежно від товщини стінки виливка й температури охолодження форми (стрижня).

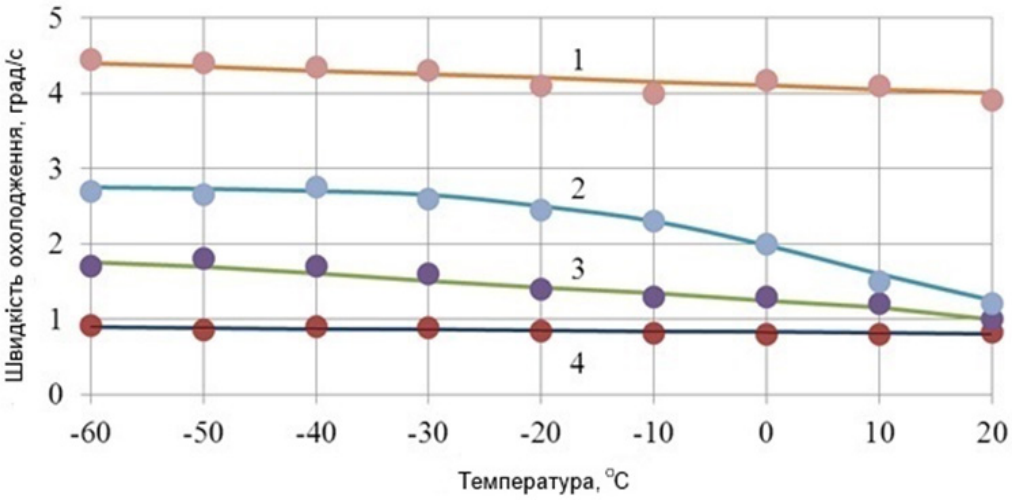

Рис. 4. Розрахункові залежності швидкості охолодження виливків зі сплаву АК5М2 від початкової температури форми: 1, 3 — в інтервалі температур 720 … 500 °С; 2, 4 — в інтервалі температур 720 … 577 °С; 1, 2 — приведена товщина стінки виливка 5 мм; 3, 4 — приведена товщина стінки виливка 15 мм. Точками позначені експериментальні дані

ЛІТЕРАТУРА

1. Берлизева Т.В., Пономаренко О.И., Горб В.А. Использование добавок вспененного пенополистирола в качестве разупрочняющих для формовочных и стержневых смесей на жидком стекле. *Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология* : междунар. науч.-практ. конф, 19—21 ноября 2012 г.: тезисы докл. Киев: ФТИМС НАНУ, 2012. С. 31—33.
2. Берлизева Т.В., Пономаренко О.И. Исследование влияния комплексной разупрочняющей добавки на свойства холоднотвердеющих смесей на жидком стекле. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 4. С. 27—30.
3. Берлизева Т.В. Использование холоднотвердеющих смесей на жидком стекле с применением циклокарбонатов. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2013. № 42 (1015). С. 21—26.
4. Замятин Н.И., Лысенко Т.В., Русева В.А. Применение противопригарных красок на водной основе при литье в замороженные формы. Литье 2013. Запорожье: ЗТПП, 2013. С. 60—62.
5. Замятин Н.И., Прокопович Л.В., Малих С.В. Технологический процесс формообразования электрофоретических оболочек. *Одесса. Труды ОПУ.* 1999. Вып. 3(9). С. 8—9.
6. Лисенко Т.В., Замятін М.І., Русєва В.А. Отримання виливок в заморожених формах під низьким тиском. Материалы II Международной научно-практической конференции «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». Киев: ФТИМС НАНУ, 2012. С. 127—129.
7. Замятин Н.И., Замятин С.А. Математическая модель тепломассопереноса в низкотемпературной форме на основе клеточных автоматов. Материалы XI Международной научно-практической конференции. Запорожье: ЗТПП, 2015. С. 100—102.

Надійшла 29.05.2024

REFERENCES

1. Berlyzeva, T.V., Ponomarenko, O.I., Horb, V.A. (2012). The use of expanded polystyrene additives as softeners for molding and rod mixtures on liquid glass. Foundry production: technologies, materials, equipment, economics and ecology: international scientific and practical conference, November 19-21. Kyiv: PTIMA of the National Academy of Sciences, pp. 31-33 [in Russian].
2. Berlyzeva, T.V., Ponomarenko, O.I. (2014). Investigation of the influence of a complex softening additive on the properties of cold-hardening mixtures on liquid glass. *Metallurgical and mining industry*, 4, 27-30 [in Russian].
3. Berlyzeva, T.V. (2013). Use of cold-hardening mixtures on liquid glass using cyclocarbonates. *Bulletin of NTU "KhPI". Collection of scientific works. Series: New solutions in twisted technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 42(1015), 21-26 [in Russian].
4. Zamyatin, N.I., Lysenko, T.V., Ruseva, V.A. (2013). Application of water-based non-stick paints when casting into frozen molds. Casting 2013. Zaporozhye: ZTPP, pp. 60-62 [in Russian].

5. Zamyatyn, N.Y., Prokopovich, L.V., Malykh, S.V. (1999). The technological process of forming electrophoretic shells. Odessa. *Proceedings of the OPU, 3*(9), 8-9 [in Russian].
6. Lysenko, T.V., Zamyatin, M.I., Ruseva, V.A. (2012). Production of castings in frozen forms under low pressure. Materials of the II International scientific and practical conference "Foundry production: technologies, materials, equipment, economics and ecology". Kyiv: PTIMA of the National Academy of Sciences, pp. 127-129 [in Ukrainian].
7. Zamyatin, N.I., Zamyatin S.A. (2015) Mathematical model of heat and mass transfer in low-temperature form based on cellular automata. Materials of the XI International Scientific and Practical Conference. Zaporozhye: ZTPP, pp. 100-102 [in Russian].

Received 29.05.2024

Summary

M.I. Zamiatin, PhD (Engin.), Docent, Associate Professor of Department,
e-mail: zamyatinnikiv@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8458-6341
T.V. Lysenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department Chair,
e-mail: tvl12odessa@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3183-963x
M.P. Tur, Senior Lecturer of Department, e-mail: tyrmp15@gmail.com,
https://orcid.org/0000-0001-5028-9744
K.O. Danilova, student, Master's graduate of Department,
e-mail: danilova.8089488@stud.op.edu.ua,
https://orcid.org/0009-0004-7513-2136

Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

Analysis of heat exchange processes in the "metal — non-stick coating — frozen mold" system

The article is devoted to the analysis of heat exchange processes in the "metal — non-stick coating — frozen mold" system, which is an important aspect of research in the field of materials science and industrial technology, as it affects the quality and efficiency of the final product. The study also paid special attention to the processes of heat exchange between the metal, the non-stick coating and the frozen mold thanks to the analysis of the obtained indicators, calculated and experimental data. In addition, it is necessary to take into account the interaction between the various elements of the system, such as the thermodynamic properties of the coating and the thermal insulation properties of the frozen mold. One of the key aspects of the analysis was taking into account the heat capacity and thermal conductivity of the materials that make up the system, since heat capacity indicates the ability of a material to absorb heat, and thermal conductivity determines its ability to transfer heat. The properties of the non-stick coating, which protects the metal from high temperatures and provides optimal conditions for freezing the mold, are considered, since they can affect heat exchange by reducing or increasing the contact between the metal and the frozen mold. Based on the obtained data, a nomogram was constructed to determine the minimum thickness of the frozen rod depending on the thickness of the casting wall and the cooling temperature of the mold. The developed mathematical model of the heat transfer process in the system is based on the method of cellular automata. The model adequately describes the real process and can be used for numerical studies. The results of the work provide an opportunity to help improve production technology and improve the quality of the final product thanks to the analysis of heat exchange processes in the "metal — non-stick coating — frozen mold" system.

Keywords

Casting in frozen molds, non-stick coating, heat transfer, mathematical modeling, nomogram, cooling, melt, temperature, aluminum.