

Исследование процессов дифференциации структуры чугунных отливок методом компьютерного моделирования

Представлены основные варианты повышения эксплуатационного ресурса деталей высоконагруженных рабочих органов машин и механизмов измельчения, размола и другой обработки минерального сырья, работающих в условиях абразивного и ударно-абразивного износа, и пути улучшения технологий их изготовления, которые основываются на использовании свойств такого класса материалов, как биметаллы. Показана эффективность применения современных методов компьютерного моделирования процессов кристаллизации отливок. Установлена возможность использования данных, полученных средствами компьютерного моделирования, для определения скоростей охлаждения в любой точке отливки. На примере высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита, полученного путем сфероидизирующего модифицирования в реакционной камере литейной формы, с известной критической скоростью охлаждения, превышение которой ведет к изменению пути его кристаллизации со стабильной системы на метастабильную и, как следствие, к отбелу, произведены расчеты, которые позволяют прогнозировать глубину отбеленного слоя чугуна отливки в зависимости от заданных технологических факторов процесса литья. Установлено, что использование полученных данных моделирования и расчетов может быть применено для задания необходимой глубины рабочего отбеленного слоя чугуна на этапе их изготовления, что, в свою очередь, обеспечит получение более оптимизированных эксплуатационных свойств. В работе показаны результаты экспериментальных исследований технологии получения отливок, которые сочетают в себе структуру высокопрочного чугуна в материале основы и белого чугуна в их рабочей части. Проведено сравнение результатов этих исследований с результатами компьютерного моделирования и расчетов, которое подтверждает их сходимость.

Ключевые слова: биметаллические отливки, абразивный и ударно-абразивный износ, двухслойные чугуны отливки, литье в песчано-глинистые формы, компьютерное моделирование, кривая охлаждения, внешний холодильник, глубина отбела, высокопрочный чугун, критическая скорость охлаждения.

В отраслях промышленности, связанных с добычей, транспортировкой, обработкой абразивных материалов широко используются машины и механизмы, детали которых работают в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Исследование процессов дифференциации структуры чугунных отливок методом компьютерного моделирования позволяет решать актуальную задачу для промышленности Украины по разработке новых и улучшению существующих способов получения такого рода деталей.

Из анализа литературных источников [1–3] установлено, что экономически выгодным является изготовление таких деталей из биметаллов. Например, по данным работы [1], использование биметаллов для изготовления высоконагруженных рабочих органов механизмов измельчения, размола и другой обработки минерального сырья увеличивает их технический ресурс в 2–4 раза. При этом в качестве материала основы применяют низколегированные, углеродистые стали или чугуны, что позволяет сократить затраты на использование высоколегированных сплавов.

Однако, технологии изготовления биметаллических отливок достаточно сложны и требуют повышенных затрат на подготовку производства для одновременного приготовления двух расплавов различного химического состава, особого внимания к переходной зоне, где материал основы переходит в рабочий слой, поскольку наличие в ней дефектов влияет на эксплуатационные показатели биметаллических деталей.

Использование одного исходного материала при изменении условий его кристаллизации позволяет обеспечивать различные свойства в отливке и ликвидирует вышеуказанные недостатки. Таким материалом является чугун, структура и механические свойства которого существенно меняются в зависимости от его химического состава, использования операций внепечной обработки и регулирования скорости охлаждения.

Для проведения моделирования и исследований в работе использовали способ получения двухслойных чугунных отливок [4], сущность которого заключается в заливке расплава в литейную форму, где он проходит внутриформенную обработку и заполняет полость формы. С целью обеспечения получения дифференциации слоев в полость формы предварительно установлен внешний холодильник.

Для работы в условиях абразивного и ударно-абразивного износа материалом основы может служить высокопрочный чугун с шаровидным графитом, а материалом рабочей части детали – отбеленный чугун с включениями структурно-свободного цементита.

Использование сфероидизирующего модификатора при внутриформенном модифицировании обеспечивает образование в отливке слоя из высокопрочного чугуна в качестве материала основы, а применение внешнего холодильника способствует образованию отбеленного рабочего слоя. При этом глубину данного слоя можно регулировать для обеспечения оптимального эксплуатационного ресурса отливки.

Целью работы было установление влияния технологических факторов процесса литья (толщины сечения отливки и толщины сечения внешнего холодильника) на глубину отбеленного слоя чугуновой отливки. Материалом холодильника был выбран серый чугун, вследствие его лучших, по сравнению со сталью, теплофизических свойств.

Известно, что для чугунов существует критическая скорость охлаждения, при достижении которой меняется характер кристаллизации чугуна с кристаллизации по стабильной системе с выделением графита в свободном состоянии, на кристаллизацию по метастабильной системе с включениями структурно-свободного цементита или цементита ледебурита. Для определения глубины отбеленного слоя необходимо установить скорости охлаждения по сечению отливки и сравнить их со значениями критической скорости для конкретного сплава.

Для проведения исследований был выбран метод компьютерного моделирования, использование которого позволяет четко зафиксировать технологические параметры процесса заливки, имитировать условия заливки, кристаллизации и охлаждения расплава, за-

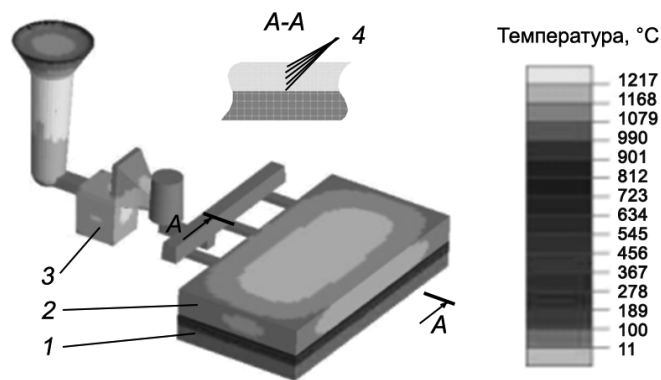


Рис. 1. Схема моделирования процесса заливки, кристаллизации и охлаждения чугуновой отливки: 1 – внешний холодильник; 2 – отливка; 3 – реакционная камера; 4 – термопары

писать кривые охлаждения в любой точке отливки и провести необходимое количество циклов моделирования при минимальных затратах.

Модель отливки, как и модель внешнего холодильника, выбрали размерами 240×120 мм, что обеспечило исключение влияния граничных условий на

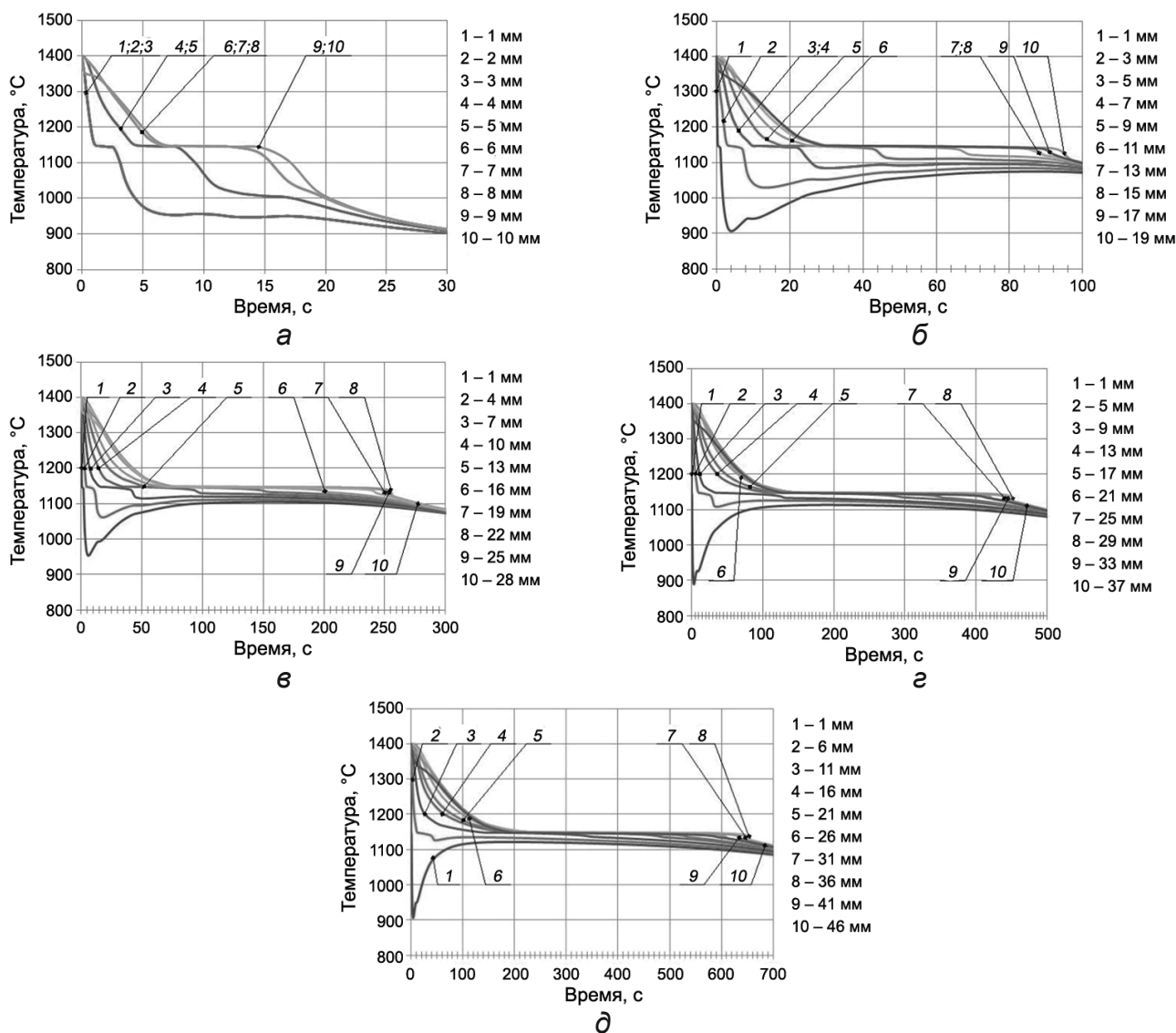


Рис. 2. Кривые охлаждения, полученные по результатам моделирования в отливках с толщинами стенок: а – 10 мм; б – 20 мм; в – 30 мм; г – 40 мм; д – 50 мм с использованием внешнего холодильника толщиной 10 мм на разном расстоянии термопар от него

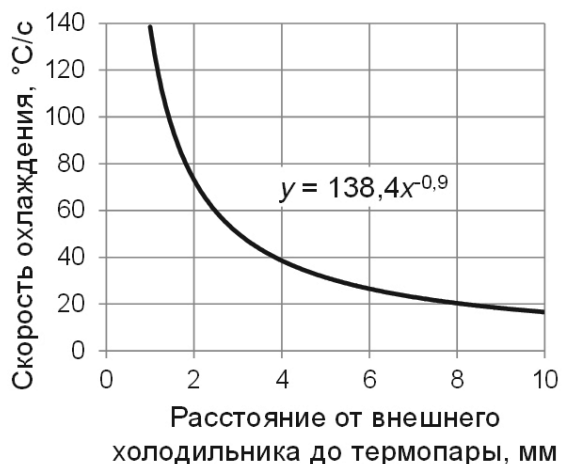
скорость охлаждения ее центральной части (рис. 1), в которой проводили запись кривых охлаждения. Толщины сечения моделей меняли в диапазоне от 10 до 50 мм с шагом 10 мм. Остальные технологические параметры процесса заливки при моделировании выбраны как для типичного процесса производства чугуновых отливок в формах из песчано-глинистой смеси с учетом использования метода внутриформенного сфероидизирующего модифицирования чугуна:

- температура заливки расплава – 1400 °С;
- материал формы – сухая песчано-глинистая смесь;

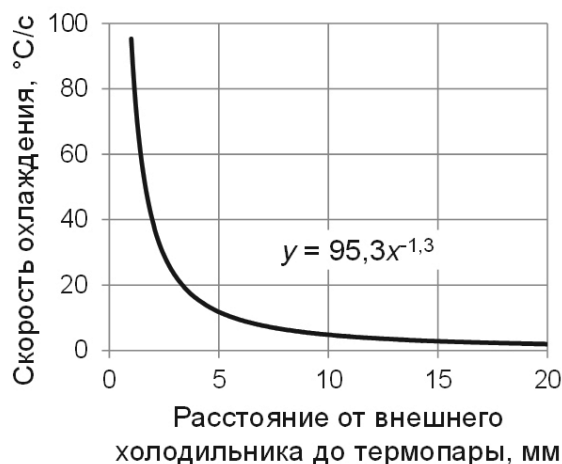
– материал холодильника – серый чугун марки СЧ 20.

При моделировании процесса кристаллизации отливки наблюдали за кривыми охлаждения, которые записывались с помощью термопар (п. 4, рис. 1), расположенных по центру модели отливки и распределенных равномерно по всей толщине ее сечения с шагом 1 мм.

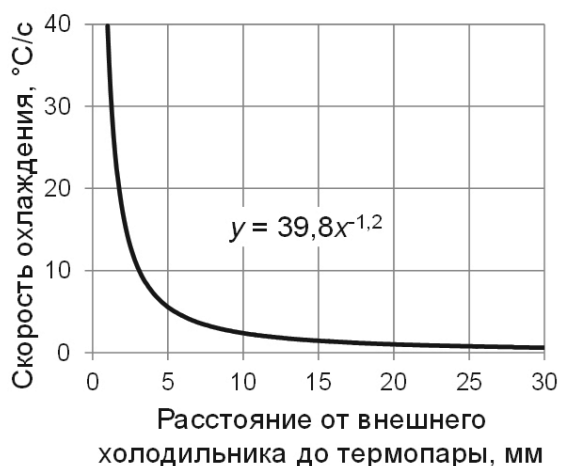
В результате моделирования был получен массив данных в виде кривых охлаждения для каждой термопары.



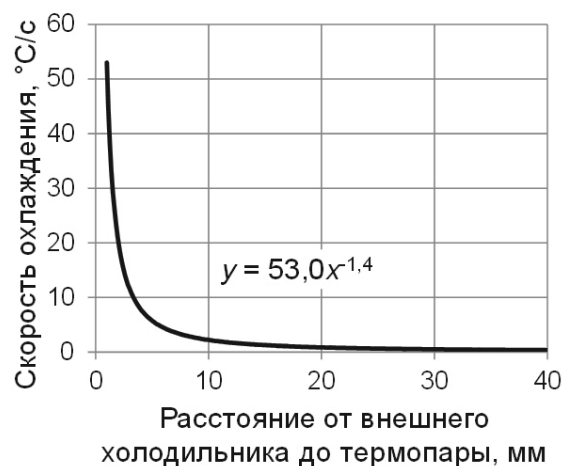
а



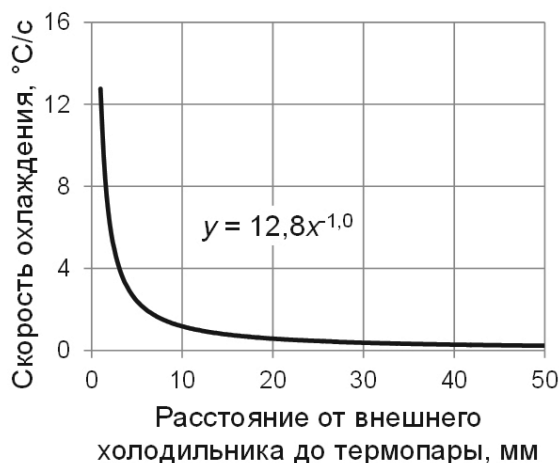
б



в



г



д

Рис. 3. Зависимости скоростей охлаждения в отливках с толщинами стенок: а – 10 мм; б – 20 мм; в – 30 мм; г – 40 мм; д – 50 мм с использованием внешнего холодильника толщиной 10 мм

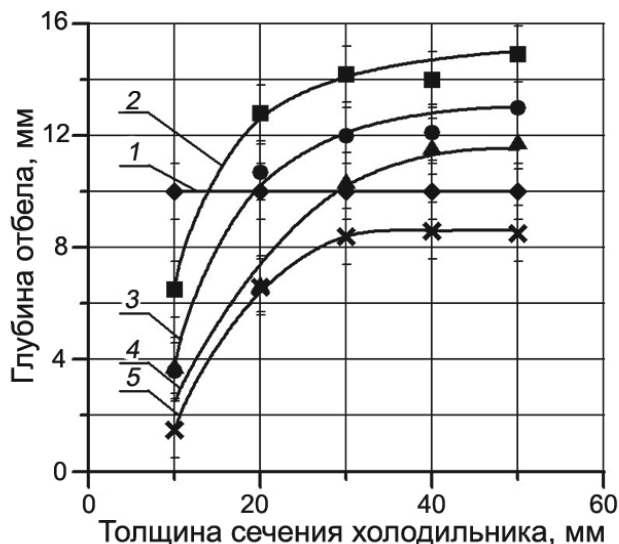


Рис. 4. Влияние толщины сечения холодильника на глубину отбела отливки для отливок толщиной: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм; 5 – 50 мм

Из общего характера изменения кривых охлаждения (рис. 2) можно сделать вывод, что время кристаллизации в точках отливки, в которых были установлены термодары, увеличивается с увеличением расстояния от термодара к внешнему холодильнику. Таким образом, например, для начальных условий моделирования, при которых толщина модели и толщина внешнего холодильника составляла 10 мм, время кристаллизации в точках, в которых было установлено термодары, меняется от 3 с на минимальном расстоянии от внешнего холодильника до 15 с – на максимальном.

Следовательно, при увеличении расстояния от внешнего холодильника до точки отливки, в которой было установлено термодары, увеличивается продолжительность кристаллизации соответствующей точки отливки. Увеличение продолжительности кристаллизации приводит к уменьшению скорости охлаждения, которая, в свою очередь, будет влиять на формирование структуры чугуновой отливки.

Скорость охлаждения в каждой точке отливки, в которой было установлено термодары, определяли по отношению температурного интервала кристаллизации сплава ко времени его кристаллизации. Отдельно для каждого смоделированного варианта приведенным выше способом была вычислена скорость охлаждения в каждой точке, в которой было установлено термодары. По полученным значениям скоростей охлаждения были построены графики их изменения, в зависимости от положения термодар по отношению к внешнему холодильнику, и проведена аппроксимация полученных кривых степенной функцией (рис. 3).

Из анализа литературы [5] установлено, что для чугуна, который был выбран для компьютерного моделирования и исследования, с химическим составом близким к эвтектическому, критическая скорость охлаждения, при достижении и превышении которой происходит кристаллизация с отбелом, составляет 8,3 °С/с. При меньших скоростях охлаждения отливка кристаллизуется по стабильной системе без отбела.

По результатам расчетов, для отливки толщиной 10 мм (рис. 3, а) скорость охлаждения в поперечном

сечении изменяется в пределах от 140 до 20 °С/с. При этом толщина холодильника в пределах от 10 до 50 мм на смену скоростей охлаждения существенно не влияет. Поскольку приведенные скорости охлаждения превышают критическую, то отливка кристаллизуется со сквозным отбелом.

Для отливок с толщинами стенок 20, 30, 40 и 50 мм (рис. 3, б–д) скорость охлаждения в поперечном сечении изменяется в зависимости от толщины отливки и холодильника. По полученным данным изменения скоростей охлаждения в поперечном сечении отливки и значению критической скорости охлаждения для данного чугуна, было определено глубину, на которую отливка кристаллизуется с отбелом по всем смоделированным вариантам, и установлены зависимости влияния толщины холодильника и отливки на глубину отбела (рис. 4).

Для проверки результатов компьютерного моделирования были проведены исследования, в результате которых были получены отливки, которые сочетают в себе структуру высокопрочного чугуна в материале основы и белого чугуна в его рабочей части.

Анализ результатов исследований показал, что после сфероидизирующего модифицирования исходного чугуна, отливка толщиной 10 мм кристаллизуется монолитной со сквозным отбелом с перлитно-цементитной микроструктурой, среди которых выделяются мелкодисперсные включения графита шаровидной формы.

В сечениях отливок толщиной от 20 до 50 мм наблюдается дифференциация структуры и свойств между их противоположными поверхностями. При этом слой отливки из отбеленного чугуна со стороны внешнего холодильника формируется толщиной около 10 мм. В таких же сечениях отливок со стороны песчано-глинистой формы сплав на толщину 10–40 мм кристаллизовался со светло-серым изломом, характерным для высокопрочного чугуна. Микроструктура чугуна состоит из графита шаровидной формы в перлитно-ферритной металлической матрице, без эвтектических карбидов железа.

Таким образом, результаты, полученные натурными экспериментами, подтверждают результаты моделирования, использование которых позволяет прогнозировать толщину рабочего слоя в отливке для конкретных условий его эксплуатации, тем самым увеличивая ее технический ресурс.

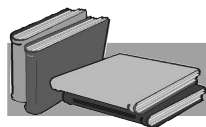
Выводы

Проведено моделирование процессов кристаллизации отливки по технологии изготовления чугуновых отливок с дифференцированными свойствами с использованием внешнего холодильника и метода внутриформенного модифицирования. По результатам моделирования, установлены зависимости влияния технологических факторов процесса литья на кристаллизацию отливки. На примере отдельного материала спрогнозировано образование в отливках с толщинами поперечного сечения от 10 до 50 мм рабочего слоя отбеленного чугуна определенной толщины для его эксплуатации в условиях абразивного

и ударно-абразивного износа, что позволяет обеспечить оптимальный эксплуатационный ресурс отдельно взятых отливок на стадии их изготовления.

Результаты моделирования подтверждены результатами исследования, и установлена их целесо-

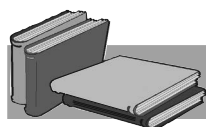
образность при выборе технологических факторов процесса литья.



ЛИТЕРАТУРА

1. Каричковский И.Н., Шинский И.О., Клименко Л.М. Способы повышения технического ресурса, эксплуатационной надежности рабочих органов дробильно-размольного оборудования // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7-8. – С. 56–60.
2. Фесенко М.А. Модифицирование чугуна в литейной форме карбидостабилизирующими добавками // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – 2015. – № 1(34). – С. 88–95.
3. Костенко Г.Д., Пеликан О.А., Костенко Д.Г. Износостойкие биметаллические отливки на основе сплавов железа // *Металл и литье Украины*. – 1998. – № 9-10. – С. 30–33.
4. Фесенко М.А., Фесенко К.В., Верховлюк А.М., Лук'яненко І.В. Спосіб виробництва двохшарових чавунних виливків з робочою зносостійкою та монтажною в'язкою частинами для роботи в умовах ударно-абразивного зносу // *Scientific Journal "ScienceRise"*. – 2016. – № 7/2(24). – С. 34–40.
5. Бубликов В.Б., Ясинский А.А., Сыропоршнев Л.Н., Козак Д.С., Бачинский Ю.Д. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна // *Процессы литья*. – 2009. – № 4. – С. 17–24.

Поступила 18.02.2019



REFERENCES

1. Karichkovsky, P.N., Shinsky, I.O., Klymenko, L.M. (2009). Methods of increasing of the technical resource, operation reliability of the working parts of crushing-and-milling equipment. *Metall i lit'e Ukrainy*. no. 7–8, pp. 56–60 [in Russian].
2. Fesenko, M.A. (2015). Inmold cast iron modification with carbide stabilizing additives. *Visnyk Donbas'koi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii. Herald of the Donbass State Engineering Academy*, no. 1 (34), pp. 88–95 [in Russian].
3. Kostenko, G.D., Pelikan, O.A., Kostenko, D.G. (1998). Wear-resistant bimetallic castings based on iron alloys. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9–10, pp. 30–33 [in Russian].
4. Fesenko, M.A., Fesenko, K.V., Verhovliuk, A.M., Luk'ianenko, I.V. (2016). Method of production of two-layer cast-iron castings with working durability and mounting binder parts for use in shock-abrasive wear. *Scientific Journal "ScienceRise"*, no. 7/2 (24), pp. 34–40 [in Ukrainian].
5. Bublikov, V.B., Yasinskii, A.A., Syroporshnev, L.N., Kozak, D.S., Bachinskii, Yu.D. (2009). Influence of silicon content and cooling rate on chill formation in castings from high-strength cast iron modified in a ladle. *Casting processes*, no. 4, pp. 17–24 [in Russian].

Received 18.02.2019

Анотація

І.В. Лук'яненко, асистент, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, ResearcherID: J-7294-2017

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Дослідження процесів диференціації структури чавунних виливків методом комп'ютерного моделювання

Представлено основні варіанти підвищення експлуатаційного ресурсу деталей високонавантажених робочих органів машин і механізмів подрібнення, розмелювання та іншої обробки мінеральної сировини, що працюють в умовах абразивного та ударно-абразивного зносу, і шляхи поліпшення технологій їх виготовлення, які ґрунтуються на використанні властивостей такого класу матеріалів, як біметали. Показано ефективність застосування сучасних методів комп'ютерного моделювання процесів кристалізації виливків. Встановлено можливість використання даних, отриманих засобами комп'ютерного моделювання, для визначення швидкостей охолодження в будь-якій точці виливка. На прикладі високоміцного чавуну з кулястою формою графіту, отриманого шляхом сфероїдизувального модифікування в реакційній камері ливарної форми, з відомою критичною швидкістю охолодження, перевищення якої

призводить до зміни шляху його кристалізації зі стабільної системи на метастабільну і, як наслідок, до відбілу, виконано розрахунки, які дозволяють прогнозувати глибину відбіленого шару чавунного виливка в залежності від заданих технологічних факторів процесу лиття. Дано пояснення, що використання отриманих даних моделювання та розрахунків може бути застосовано для задання необхідної глибини робочого відбіленого шару чавунних деталей на етапі їхнього виготовлення, що, в свою чергу, забезпечить отримання більш оптимізованих експлуатаційних властивостей. У роботі показано результати експериментальних досліджень технології одержання виливків, які поєднують в собі структуру високоміцного чавуну в матеріалі основи і білого чавуну в їхній робочій частині. Проведено порівняння результатів цих досліджень з результатами комп'ютерного моделювання та розрахунків, яке підтверджує їх збіжність.

Ключові слова

Біметалеві виливки, абразивний та ударно-абразивний знос, двошарові чавунні виливки, лиття в піщано-глинисті форми, комп'ютерне моделювання, крива охолодження, зовнішній холодильник, глибина вибілення, високоміцний чавун, критична швидкість охолодження.

Summary

I.V. Lukianenko, assistant, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, ResearcherID: J-7294-2017

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Study of processes of structure differentiation of cast-iron castings by computer simulation

The main options for improving the operational life of parts of high-loaded working bodies of machines and mechanisms of grinding and other processing of mineral raw materials, working in conditions of abrasive and impact-abrasive wear and ways to improve their production technologies are presented, which are based on using properties of such a class of materials as bimetals. The effectiveness of the use of modern methods of computer simulation of castings crystallization is shown. The possibility of using data obtained by computer simulation to determine the cooling rate at any point of the casting has been established. Using the example of high-strength cast iron with spherical shape of graphite, obtained by spheroidizing modification in the reaction chamber of a mold with a known critical cooling rate, exceeding of which leads to a change in its crystallization path from a stable system to a metastable and, as a result, to chilling, calculations are made that allow us to predict the depth of the chilled cast iron layer, depending on the given technological factors of the casting process. An explanation is given that the use of the obtained data of modeling and calculations can be applied to specify the required depth of the working chilled layer of cast iron parts at the stage of their production, which, in turn, will provide more optimized performance properties. The paper shows the results of experimental studies of the technology for producing castings, which combine the structure of high-strength cast iron in the base material and white cast iron in their working part. A comparison of the results of these studies with the results of computer simulation and calculations is made, which confirms their convergence.

Keywords

Bimetallic castings, abrasive and impact-abrasive wear, two-layer cast iron castings, green sand mold casting, computer simulation, cooling curve, external chiller, chill depth, high-strength cast iron, critical cooling rate.