

УДК 621.74.045

В. С. Дорошенко*

Физико-технологичний інститут металлов и сплавов НАН України, Київ

СТРУКТУРА ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЯДА ОСОБЕННОСТЕЙ И ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Рассмотрены структура, результаты исследований и технологических разработок в области литья металла по ледяным моделям с использованием ряда особенностей и наблюдаемых в природе явлений. Приведены примеры конденсации влаги из газообразного состояния и модели художественных отливок при их крупносерийном изготовлении.

Ключевые слова: ледяная модель, песчаная форма, криотехнология, отливка, литье по газифицируемым моделям, литье по выплавляемым моделям.

Розглянуто структуру, підсумки досліджень і технологічних розробок в області лиття металу за крижаними моделями з використанням ряду особливостей і явищ, що спостерігаються в природі. Наведено приклади конденсації вологи з газового стану та моделі художніх виливків при їх крупносерійному виробництві.

Ключові слова: крижана модель, піщана форма, криотехнологія, виливок, лиття за моделями, що газифікуються, лиття за моделями, що витоплюються.

The structure, results in metal casting research and technological development on ice patterns using a variety of features and phenomena observed in nature are described. Examples of condensation from the gaseous state, and the patterns of artistic castings in their large-scale manufacture are given.

Keywords: ice pattern, sand casting, criotechnology, casting, lost foam casting, investment casting.

Загрязнение окружающей среды чаще всего происходит материалами, чуждыми земной биосфере. Криотехнологии формовки разрабатываются для решения задач экологизации и снижения ресурсоемкости процессов точного литья. Способ литья по ледяным моделям (ЛЛМ) служит примером малоотходных процессов литья металла по разовым моделям без применения органических материалов в соответствии с идеей наследования циклических природных процессов. При модельно-формовочных операциях по ледяным моделям (ЛМ) агрегатные переходы воды: – из жидкого в твердое при замораживании ЛМ, – опять в жидкое при плавлении ЛМ для удаления из литейной формы, – а затем испарение влаги при сушке песчаной формы в совокупности подобны кругообороту воды в природе.

*Работа выполнена под рук. проф. Шинского О. И.

Проблемы технологии формы

Развитие холодильной техники, сделавшее холод доступным в больших масштабах с широкими возможностями использования низких температур для различных процессов, включая агрегатные изменения вещества, способствует развитию криотехнологии. Когда мы видим в продуктовых супермаркетах многометровые ряды морозильных шкафов и бонет с замороженными продуктами размерами от горошины до мясной туши, то это дает основание полагать, что таких же размеров и температуры ЛМ можно производить в цехе ЛЛМ.

Задачей статьи является показать структуру проведенных исследований в области разработки технологии ЛЛМ с использованием природных явлений и отличие по ряду принципиальных особенностей этой технологии от традиционных формовочных процессов.

На рис. 1 показана схема структуры исследований и технологических разработок в области изготовления ЛМ в опытно-промышленном производстве. Методы расчета технологических характеристик получения ЛМ [1, 2] как теоретических основ технологии замораживания в пресс-форме водных композиций (ВК), были разработаны адаптацией классических теоретических положений академика А. В. Лыкова.

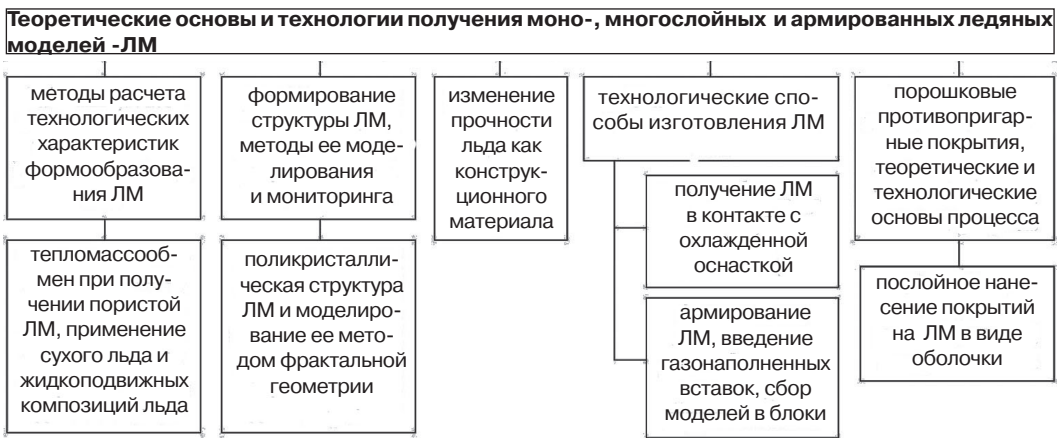


Рис. 1. Структура исследований и технологических разработок в области производства ЛМ

Применение сухого льда – твердого CO_2 в смеси с водным, позволило получить пористые и пустотелые ЛМ, а жидкоподвижной композиции «жидкого льда» – дисперсии до 50 % кристалликов льда в воде, позволило ускорить процесс замораживания модели. Исследование структуры моно-, многослойных и армированных ЛМ рассмотрено в работах [3, 4], а экспресс-метод измерения прочности льда и зависимость прочности на изгиб от температуры – в работе [5]. Среди разработанных способов получения ЛМ преобладают способы литья ВК в охлажденные пресс-формы. Практически все способы литья металла, которых насчитывается порядка сотни, приемлемы для такого литья при производстве ЛМ.

Обладают новизной запатентованные способы применения порошковых красок для нанесения на ЛМ [6]. Теоретические основы процесса составляют операции создания несложных условий появления на поверхности льда электрического положительного заряда при нанесении отрицательно заряженных частиц противопопригарной порошковой краски. Слой краски увлажняли конденсацией на нем влаги из воздуха, стимулируя этот процесс распылением аэрозоля – водно-газовой дисперсии, добавляя в порошок и (или) в аэрозоль связующее и отвердитель в различном сочетании. Для кристаллогидратов (гипса, цемента), добавленных в количестве 10-25 % в порошковую краску, вода является веществом, вызывающим схватывание и твердение слоя такой краски. А также эта холоднотвердеющая краска может наноситься многослойно (до толщины оболочковой формы), с послойным напылением аэрозоля в одном цикле без сушки каждого слоя, как это традиционно выполняется

Проблемы технологии формы

для жидких суспензий, наносимых на воскоподобные выплавляемые модели. Известно, что для окраски традиционных песчаных форм (не считая редкое использование припылов) и разовых моделей применяют практически только жидкие краски, хотя в машиностроении большую часть изделий покрывают порошковой краской.

На рис. 2 показана схема структуры исследований и технологических разработок в области производства оболочковых форм по ЛМ в опытно-промышленном производстве, для чего разработаны новые способы уплотнения сухих формовочных смесей [7] и оптимизация их по гранулометрическому составу [8]. За основу взято уплотнение сухого наполнителя формы при литье по газифицируемым моделям (ЛГМ). Теоретические основы и способы фильтрационной формовки по ЛЛМ описаны в работах [9-13], включая применение оптимальных вариантов разрежения в форме, различных видов теплоносителей для плавления ЛМ, экспериментально определенных пределов глубины пропитки формы и влияние на этот процесс ее температуры.

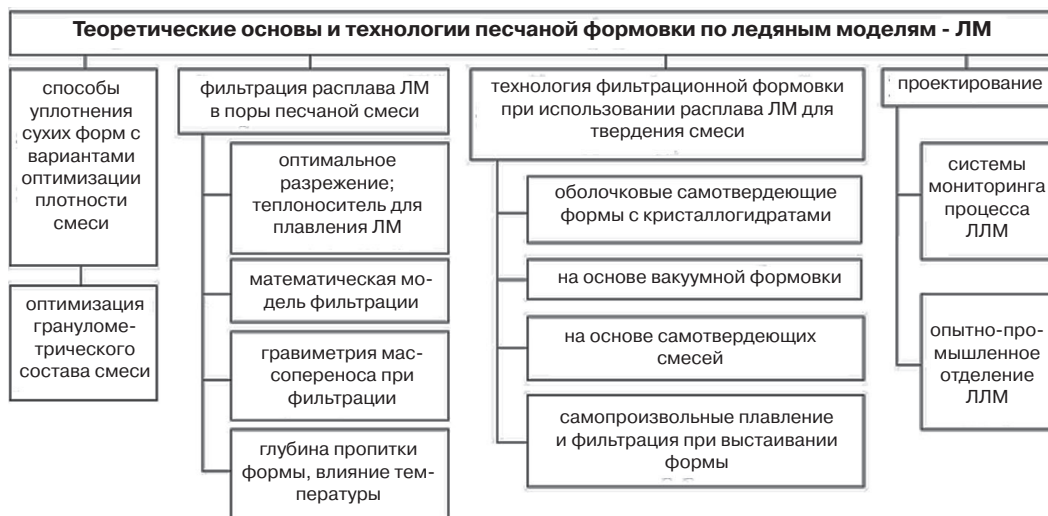


Рис. 2. Структура исследований и технологических разработок в области производства оболочковых форм по ЛМ

Новизна фильтрационной формовки, состоящей в отверждении слоя смеси в результате пропитки ее реагентом, заключается в том, что для фильтрации используют расплав модели (ВК), который в традиционных способах с воскообразными моделями просто выплавляют и удаляют из полости формы. Таким образом, материал модели несет двойную функцию – в твердом виде служит средством формообразования полости формы, а в расплавленном – материалом для отверждения оболочковой формы, пропитывая ее на определенную глубину, обычно до 25 мм. При этом он не менее, чем на порядок дешевле органических воскообразных составов.

Наиболее недорогими и легко регенерируемыми от тепла отливки являются формовочные самотвердеющие смеси с указанными кристаллогидратами [14]. Такие смеси при традиционной формовке применяют в жидкоподвижном виде. А добавление в песчано-цементную смесь после дробления и измельчения этой же отработанной смеси со значительной частью пылевидной фракции, образующейся в результате термодеструкции и механической деформации, ускоряет процесс твердения формы (желательное для ЛЛМ свойство) за счет введения тонкодисперсных частиц, обладающих свойством адсорбировать на своей поверхности кристаллогидраты цемента [15]. В нашем случае, объясняя особенность модели, с одной стороны ЛМ – конструкция, копирующая металлоизделие, а с другой – доза, в расплавленном виде отверждающая контактирующий с ней сухой песок с добавкой порошка водорастворимого и отверждаемого водой связующего. Образно говоря,

Проблемы технологии формы

литейщик имеет разовую модель, которая еще час назад была водой (ВК), а через час, образовав полость формы и растаяв, будет в составе затвердевшей оболочковой формы. На ощупь оболочки не отличаются от гипсо- или цементно-песчаных, полученных из наливных смесей с такими же компонентами, разве что изначально имеют меньшую влажность, толщину и выше газопроницаемость.

Основные характеристики новизны или особенностей технологии ЛЛМ показаны на рис. 3. Они базируются на аналогии с ЛГМ-процессом, в котором продукты модели удаляют фильтрацией сквозь поры формы, но свойства льда и расплав ЛМ используют для получения оболочковой формы несколькими вариантами [12]. Самопроизвольные процессы формовки описаны в работе [14]. В них применяли связующие быстрого схватывания, до появления технологии ЛЛМ обычно используемые в жидкоподвижных смесях высокой влажности, а также воду как слабое связующее для порошковых покрытий, при увлажнении переводящее их в полутвердое состояние. Оптимальный режим виброуплотнения сухой смеси, повышая внутреннее трение сыпучих материалов, способствовал сохранению ее в неподвижном состоянии при опоре на полутвердое и постепенно твердеющее покрытие ЛМ, превращая его в опору при последующей потере опоры со стороны плавящейся модели. Выполняется своего рода эстафета передачи несущей способности от ЛМ (к изначально сыпучим краске и формовочной смеси) через быстрое схватывание порошковой краски, фильтрацию тающей ЛМ с хемосорбцией, схватыванием и твердением формовочной смеси на глубину пропитки расплавом модели или включенного в него реагента.

Основные показатели технологической новизны литья по ледяным моделями (ЛЛМ)				
предел прочности на изгиб льда ЛМ 2,5-5,6 МПа при $T = -20 \dots -15 \text{ }^\circ\text{C}$, и выше прочности пенополистирола для ЛГМ не менее, чем в 2 раза. Определение экспресс методом	способ армирования газонаполненных и пустотелых моделей, вставок в них и их литниковые системы, модели с направленной пористостью	модель удаляют фильтрацией в поры литейной формы, расплав ЛМ-реагент, отверждающий оболочку формы. Патент на ХТС с органическими и неорганическими материалами	порошковые противопопригарно-герметизирующие покрытия для ЛМ; послыйным нанесением – оболочковые формы	самопроизвольные процессы схватывания краски, плавления ЛМ, фильтрации, твердения формы и регенерации смеси теплом отливки

Рис. 3. Основные характеристики новизны технологии ЛЛМ

Рассмотрим подробнее нанесение порошкового покрытия (краски) (1-3 слоя) на ЛМ в сравнении с явлениями, наблюдаемыми в природе. Эту операцию сопровождали конденсацией пара из окружающего воздуха на поверхности охлажденного контакта с ЛМ слоя порошка, первоначально удерживаемого на поверхности ЛМ электрическим зарядом. Этот слой в контакте с ЛМ охлаждается до температуры ниже точки росы или точки инея в зависимости от температуры.

Кубический метр воздуха содержит (в зависимости от влажности) 4-25 г водяных паров. Естественную конденсацию пара мы наблюдаем дома на кухне, когда вынимаем из холодильника кастрюлю с блестящей поверхностью, которая сразу запотеваает и становится матовой от водяной пленки. При $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ воздух с влажностью 30, 60 и 90 % имеет соответственно точку росы ($^\circ\text{C}$) $+1,9$; $+12,0$; $+18,3$. Как отмечено выше, ускоряли увлажнение порошкового слоя распылением у его поверхности аэрозоля в капельно-жидкой дисперсной фазе. Если поверхность охлаждена ниже температуры замерзания воды, то при контакте ниже точки инея влага из воздуха осаждается на ней в виде инея (замороженной росы).

Этот вариант способа применяли для получения замороженного покрытия на ЛМ по принципу замороженной формы. Точка инея – температура, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным по отношению к поверхности льда. В природе иней осаждается вследствие десублимации прямо из газообразной фазы в твердые кристаллы, минуя фазу жидкой воды. Для инея самое подходящее место расположения – шероховатая поверхность материала с низкой

теплопроводностью, например, паутина (рис. 4). Если пар из воздуха осажается через жидкую фазу, то получаются наледи, гладкие и «стеклянные» (рис. 5), которые образуются на той же паутине в естественных условиях или при изготовлении ледяных скульптур – сеток. Лед, обладая высокой прочностью, становится несущей



Рис. 4. Осаждение инея на паутине

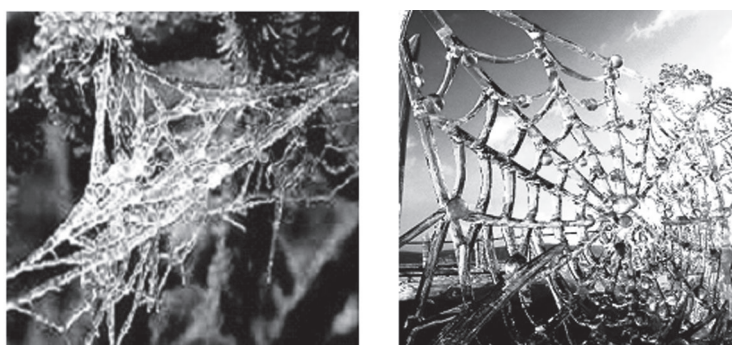


Рис. 5. Образование наледи на паутине

основой, удерживая сетку большого веса. Такой принцип нанесения влаги на порошок, подобный образованию росы, инея или наледей, служит примером применения природных процессов в технологии ЛЛМ для получения твердеющей оболочки в контакте с ЛМ (рис. 6) [16].

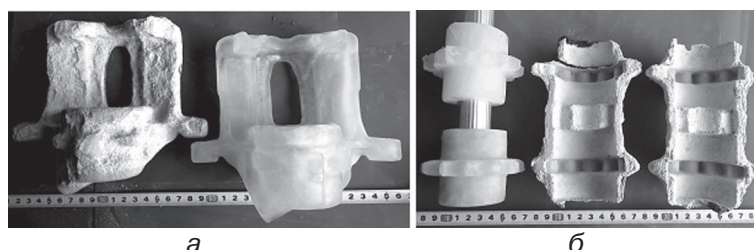


Рис. 6. Примеры крио-процессов: нанесение порошкового покрытия на модель «суппорта» (а) и полученной по модели «звездочка», распиленной двухместной оболочки из 3-х слоев такого покрытия (б)

Процесс ЛЛМ пока опробован лишь в опытно-промышленном производстве, и расширению его применения препятствуют, в основном, трудности смены стереотипов. В частности, это связано с рядом нетрадиционных для литейщиков вопросов, среди которых – «как обеспечить крупносерийное производство моделей?». Между тем, уже имеется пример отработки изготовления ледяных скульптур в больших

Проблемы технологии формы

количествах. Согласно репортажа в Интернете [17] показано, как летом 2014 г. бразильский скульптор Н. Азеведо одноразово разместила 5000 фигурок мужчин и женщин из льда на лестнице площади Чемберлена в Бирмингеме, Англия (рис. 7). Акция служила напоминанием о погибших в Первой мировой войне. Ледяные фигуры, посаженные на ступеньках, таяли на солнце, а вода стекала по ступенькам, как бы изображая кровь убитых людей. Скульптор провела уже десяток таких акций в разных городах мира – выставление на воздухе тысяч ледяных скульптур в ознаменование исторических или экологических событий. Поставка скульптур, очевидно, производилась в ларях, подобных для поставки пищевого мороженого.

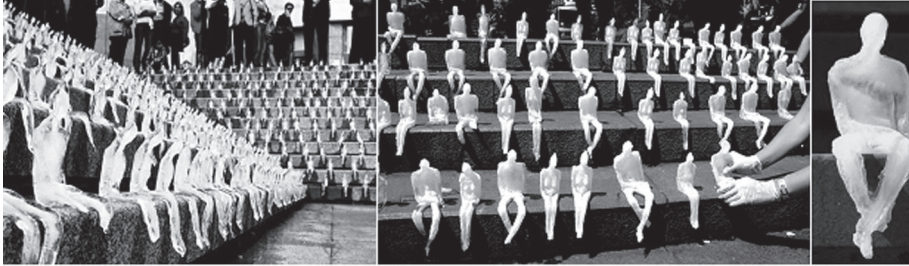


Рис. 7. 5000 ледяных скульптур, выставленных на лестнице в Бирмингеме

Обычно на производство 1 т льда в блоках расход электроэнергии составляет до 100 кВт·ч. Замораживание ЛМ на 1 т отливок массой 1 кг из железоуглеродистых сплавов требует до 50 кВт·ч электроэнергии. Модели состоят из воды более чем на 95 %. Возможность получения оболочковой формы путем послойного нанесения на ледяную модель порошкового покрытия и (или) фильтрации расплава модели сквозь насыпную песчаную смесь с кристаллогидратами вовлекает в формовочные процессы два сравнительно новых физико-химических механизма, сокращающих формовку по сравнению с действующими процессами литья по разовым моделям. На рис. 8 показаны примеры художественных ЛМ примерно такого же размера, как фигурки Н. Азеведо, включая ЛМ барельефа Мефистофеля, выполненной путем



Рис. 8. ЛМ, выполненные в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАНУ

снятия копии с каслинской отливки (по технологии «форма-модель изо льда разной солености» и, соответственно, разной температуры плавления).

Таким образом, в статье рассмотрены структура, результаты исследований и технологических разработок по ЛЛМ с использованием ряда особенностей и наблюдаемых в природе явлений. Вовлечение обширного массива междисциплинарных знаний из области криологии в литейно-металлургическое производство как технологического использования науки в качестве производительного ресурса неизбежно даст высокотехнологические способы получения отливок [12-14] при поэтапном совершенствовании процессов точного литья.



Список литературы

1. *Дорошенко В. С.* Методы расчета технологических параметров замораживания ледяных моделей для литья в песчаную форму / В. С. Дорошенко, В. П. Кравченко // *Металл и литье Украины.* – 2008. – №1-2. – С. 49-52.
2. *Дорошенко В. С.* Получение ледяной литейной модели в контакте с охлажденной оснасткой / В. С. Дорошенко, В. П. Кравченко // *Металл и литье Украины.* – 2009. – № 6. – С. 4-7.
3. *Дорошенко В. С.* Структура литейной ледяной модели с точки зрения теории фракталов / В. С. Дорошенко, В. П. Кравченко // *Металл и литье Украины.* – 2010. – № 3. – С. 35-37.
4. *Doroshenko V. S.* Formation of the Ice Casting Pattern Structure and Methods of Its Modeling / V. S. Doroshenko, V. P. Kravchenko, O. V. Mul // *Boundary Field Problems and Computer Simulation.* – 2012. – Vol. 51. Riga: RTU. – P. 37-42.
5. *Дорошенко В. С.* Предпосылки создания технологии литья по ледяным моделям в вакуумируемых формах / В. С. Дорошенко // *Металл и литье Украины.* – 2009. – № 4-5. – С. 18-23, С. 27-30.
6. *Дорошенко В. С.* Нанесение порошковых красок на ледяные литейные модели, применяемые для получения отливок из металла / В. С. Дорошенко // *Экология и промышленность России.* – 2011. – № 3. – С. 10-13.
7. *Дорошенко В. С.* Газодинамическое уплотнение сухих формовочных наполнителей / В. С. Дорошенко // *Литье и металлургия.* – 2013. – № 2. – С. 15-22.
8. *Дорошенко В. С.* Оптимизация гранулометрического состава сухих сыпучих формовочных смесей / В. С. Дорошенко // *Литье и металлургия.* – 2014. – № 2. – С. 15-19.
9. *Дорошенко В. С.* Литье в оболочковые формы, полученные пропиткой сухого песка связующим / В. С. Дорошенко, О. И. Шинский // *Металл и литье Украины.* – 2009. – № 7-8. – С. 16-22.
10. *Шинский О. И.* Технологические особенности и варианты формовки по ледяным моделям / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко // *Металл и литье Украины.* – 2007. – № 4. – С. 27 – 30.
11. *Дорошенко В. С.* Создание математической модели пропитки поверхностного слоя песка связующим при получении оболочковых форм / В. С. Дорошенко // *Процессы литья.* – 2008. – № 5. – С. 67-77.
12. *Дорошенко В. С.* Многовариантность использования ледяных моделей при литье в песчаные формы // *Металл и литье Украины.* – 2010. – № 12. – С. 17-26.
13. *Дорошенко В. С.* О системе мониторинга процесса литья по ледяным моделям // *Литейное производство.* – 2014. – № 5. – С. 11-16.
14. *Дорошенко В. С.* Материалы, разрушающиеся после выполнения своих функций в формовочных процессах // *Литейное производство.* – 2015. – № 9. – С. 15-17.
15. *Заславская О. М.* Рециклинг в литье по выплавляемым моделям / О. М. Заславская, Л. Н. Сабирова, Д. А. Кольцо // *Вестник ЮУрГУ.* – 2012. – № 39. – С. 137-138.
16. *Дорошенко В. С.* Использование природного явления конденсации влаги для увлажнения твердеющего покрытия ледяных моделей // *Литье. Металлургия. 2016: Материалы XII Международной научно-практич. конференции (24-26.05.2016, г. Запорожье)* / Под ред. Пономаренко О. И. – Запорожье, ЗТПП. – С. 60-62.
17. 5000 маленьких человечков из льда в память о жертвах Первой мировой войны. 07.08.2014. URL: <https://4tololo.ru/content/6368> (дата обращения 8.12.2016).



References

1. Doroshenko V. S. (2008) Metodi rascheta tehnologicheskikh parametrov zamorazhivaniya ledyanykh modeley dlya litja v peschanuju formu [*Methods of calculation of technological parameters of freezing ice patterns for sand casting*]. Metall i lite Ukrainy, no.1-2, pp. 49-52. [in Russian].
2. Doroshenko V. S. (2009) Poluchenie ledyanoy litejno modeli v kontakte s ohlazhdennoj osnastkoj [*Production of ice foundry patterns in contact with the snap-cooled*]. Metall i lite Ukrainy, no. 6, pp. 4-7. [in Russian].
3. Doroshenko V. S. (2010) Struktura litejnoy ledjanoy modeli s tochki zrenija teorii fraktalov [*Structure foundry ice pattern from the point of view of the theory of fractals*]. // Metall i lite Ukrainy, no. 3, pp. 35-37. [in Russian].
4. Doroshenko V. S. (2012) Formation of the Ice Casting Pattern Structure and Methods of Its Modeling // Boundary Field Problems and Computer Simulation. Vol. 51. Riga: RTU, pp. 37-42.
5. Doroshenko V. S. (2009) Predposilki sozdaniya tehnologii litya po ledjanyim modeljam v vakuumiruemih formah [*Background of the casting technology for ice patterns in airless molds*]. Metall i lite Ukrainy, no. 4-5, pp. 18-23, pp. 27-30. [in Russian].
6. Doroshenko V. S. (2011) Nanesenie poroshkovykh krasok na ledjanyje litejnyje modeli, primenjajemye dlja poluchenija otlivok iz metalla [*Powder paints on the ice foundry patterns used for metal casting*]. // Ekologiya i promyshlennost Rossii no. 3. pp. 10-13. [in Russian].
7. Doroshenko V. S. (2013) Gazodinamicheskoe uplotnenie suhikh formovocnykh napolnitelej [*Gas-dynamic seal dry molding fillers*]. Lite i metallurgija, no. 2, pp. 15-22. [in Russian].
8. Doroshenko V. S. (2014) Optimizatsija granulometricheskogo sostava suhikh syipuchih formovocnykh smesej [*Optimization of particle size distribution of dry bulk molding compounds*]. Lite i metallurgija, no. 2, pp. 15-19. [in Russian].
9. Doroshenko V. S. (2009) Lite v obolochkovye formji, poluchennyye propitkoj suhogo peska svjazujuschim [*Casting into the shell molds obtained by impregnating dry sand binder*]. Metall i lite Ukrainy, no. 7-8, pp. 16-22. [in Russian].
10. Shinskiy O. I. (2007) Tehnologicheskie osobennosti i varianty formovki po ledjanyim modeljam [*Technological features and options for shaping ice pattern*]. Metall i lite Ukrainy, no. 4, pp. 27-30. [in Russian].
11. Doroshenko V. S. (2008) Sozdanie matematicheskoy modeli propitki poverhnostnogo sloja peska svjazujuschim pri poluchenii obolochkovykh form [*Creating a mathematical model of the impregnation of the surface layer of sand binder in the preparation of shell molds*]. Protsessy litja, no. 5, pp. 67-77. [in Russian].
12. Doroshenko V. S. (2010) Mnogovariantnost' ispol'zovaniya ledjanykh modeley pri lite v peschanie formy [*Multivariate use ice patterns for sand metal casting*]. Metall i lite Ukrainy, no.12, pp.17-26. [in Russian].
13. Doroshenko V. S. (2014) O sisteme monitoringa protsessa litja po ledjanyim modeljam. [*Casting system monitoring process on ice foundry patterns*]. Litejnoe proizvodstvo, no. 5, pp. 11-16. [in Russian].
14. Doroshenko V. S. (2015) Materialy, razrushajuschiesja posle vypolnenija svoih funktsij v formovocnykh protsessah [*Materials collapsing after performing its functions in the molding processes*]. Litejnoe proizvodstvo, no. 9, pp. 15-17. [in Russian].
15. Zaslavskaja O. M. (2012) Retsikling v lite po vyplavljaemym modeljam. [*Recycling in investment casting*]. Vestnik YuUrGu, no 39, pp. 137-138. [in Russian].
16. Doroshenko V. S. (2016) Ispolzovanie prirodnoho javlenija kondensatsii vlagi dlya uvlazhnenija tvrdej uschego pokrytija ledjanykh modeley [*Using the natural phenomenon of condensation of moisture hardening coating of ice patterns*]. Lit'e. Metallurgija. Materialji XII Mezhdunarodnoj nauchno-praktich. konferentsii (24-26.05.2016, g. Zaporozhe). ZTPP, pp. 60-62. [in Russian].
17. 5000 malenkih chelovechkov iz l'da v pamjat o zhertvah Pervoj mirovoj vojny. 07.08.2014. [*5000 little men from the ice in the memory of the victims of the First World War*] URL: <https://4tololo.ru/content/6368> (data obrascheniya 8.12.2016).

Поступила 09.12.2016.