



УДК 621.743.074:544.332-971.2
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-36-42

Поступила 22.06.2018
Received 22.06.2018

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛИЗАЦИЕЙ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

Ю. Н. ФАСЕВИЧ, Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: fasevich_yura@tut.by

Фундаментальной целью проводимых исследований является выявление и анализ важных технологических параметров за счет получения характеристик исследуемых теплофизических свойств прибылей, обеспечивающих устойчивый режим наложения гидродинамического давления до начала кристаллизации отливки за счет разогрева прибыльной части взаимосвязанных элементов «литниковая система–отливка» на основе средств обеспечения вычислительных экспериментов с точки зрения управления процессом производства заготовок быстроизнашиваемых деталей.

Ключевые слова. Кристаллизация отливки, теплофизические характеристики, гидродинамическое давление, методика, алгоритм параметров, технологический модуль.

Для цитирования. Фасевич Ю. Н. Разработка методики экспериментальных исследований управления кристаллизацией литых заготовок путем оптимизации теплофизических свойств элементов литниковой системы / Ю. Н. Фасевич, Ф. И. Рудницкий // Литье и металлургия. 2018. Т. 92. № 3. С. 36–42. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-36-42.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES OF CONTROL IN CRYSTALLIZATION OF CASTINGS BY OPTIMIZING THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE ELEMENTS OF THE GATING SYSTEM

Yu. N. FASEVICH, F. I. RUDNITSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
65, Nezavisimosti ave. E-mail: fasevich_yura@tut.by

The fundamental purpose of the proposed research is to identify and analyze important technological parameters by obtaining the characteristics of the studied thermal properties of hot tops, providing a stable mode of applying hydrodynamic pressure before the crystallization of the casting due to the heating of hot top part of the interrelated elements of the «gating system–casting» on the basis of means of providing computational experiments from the point of view of managing the production process of blanks of wearing parts.

Keywords. Casting crystallization, thermophysical characteristics, hydrodynamic pressure, methodology, algorithm of parameters, technological module.

For citation. Fasevich Yu. N., Rudnitsky F. I. Development of methodology of experimental studies of control in crystallization of castings by optimizing the thermophysical properties of the elements of the gating system. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 36–42. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-36-42.

Сложные процессы, происходящие при формировании отливки, требуют разработки достаточно специфического комплекса вычислительных моделей, позволяющих прогнозировать процессы заполнения, затвердевания и распределения механических свойств. Процессом, ответственным за формирование свойств большинства отливок, является кристаллизация, которая происходит в результате зарождения и роста кристаллов в охлаждающемся расплаве. От числа, скорости, формы роста кристаллов и их преимущественной ориентировки в теле отливки зависит ее кристаллическое строение и, следовательно, важнейшие технологические и эксплуатационные свойства.

Качественная и частично количественная картина технологического процесса ясна, для уточнения количественных значений всех исследуемых параметров необходимо разработать методику и дополнительно провести экспериментальные исследования.

Целью экспериментальных исследований является оценка влияния параметров технологии на показатели качества литых заготовок, повышение качества заготовок, приближение их свойств к свойствам быстрорежущей стали. Этого можно добиться на основе оптимизации основных технологических режимов литья на обобщенном использовании расчетных рекомендаций по определению характера изменения гидродинамического давления до начала кристаллизации отливки за счет разогрева прибыльной части взаимосвязанных элементов «литниковая система–отливка»; параметров и характеристик настройки технологического модуля, тепловых и геометрических параметров ЛПС, обеспечивающих выполнение гидродинамических критериев оптимальности и непрерывное питание отливки (заготовки), а также стабильность теплового режима заполнения формы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, провести планирование экспериментов, во-вторых, создать базу экспериментальных данных, а также выполнить анализ полученных данных, оценить технологические режимы для определения их оптимальных значений и разработать серию регрессионных моделей для установления количественной взаимосвязи между показателями качества заготовок и переменными технологическими параметрами процесса их изготовления.

На данном этапе принципиальная особенность состоит в том, что исследования проводятся в лабораторных условиях, максимально приближенных к производственным. Для выявления количественных данных о степени влияния тех или иных переменных параметров (факторов) на качество литых заготовок, быстроизнашиваемых деталей из инструментальной стали типа режущих вставок использовали математический метод планирования эксперимента. Существуют два пути оптимизации режимов. Первый – классический регрессионный анализ, базирующийся на результатах пассивного эксперимента, второй – дисперсионный и регрессионный анализы, основанные на планировании эксперимента [1]. В первом случае предполагают, что исследователь наблюдает за неуправляемым процессом или ставит эксперимент, основываясь на удобствах его проведения, во втором – исследователь меняет условия опыта в соответствии с математически обоснованным прогнозом. Он позволяет при минимально возможном числе опытов получить максимальную информацию. В данном конкретном исследовании для оценки качества отливок, изготовленных литьем с наложением гидродинамического давления до начала кристаллизации отливки за счет разогрева прибыльной части системы, будем использовать следующие показатели: шероховатость поверхности (визуально); дефекты в виде неслитин, неспаев, следов соединения струй и потоков; плотность и пористость; механические свойства литых заготовок. Сгруппируем их и выберем способы оценки.

Задача оптимизации технологических режимов решается путем построения модели процесса, в которой каждый переменный показатель исследуемого технологического режима выражается как функция переменных управления [1]:

$$y_j = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где y_j – переменный показатель управления качеством отливки: $j = 1, 2, \dots, m$; x_i – переменный показатель управления технологическим процессом: $i = 1, 2, \dots, n$.

Критерий качества для управления технологическим процессом можно сформировать из пересечения областей, образуемых параметрами технологического режима для каждого показателя качества, где значения этого показателя оптимальны и удовлетворяют предъявляемым требованиям. Опишем его составляющие, учитывая последовательность этапов литья.

1. Критерий формообразования ($K_{\text{форм}}$). Формируется из оценки дефектов и шероховатости поверхности. Характеризует процесс до момента полного формообразования отливки в полости формы. Зависит от скорости заполнения, температуры формы, температуры расплава. Необходимо обеспечить полное заполнение формы жидким расплавом не ниже температуры ликвидус с применением режима наложения гидродинамического давления за счет разогрева прибыльной части системы.

2. Критерий давления ($K_{\text{д}}$). Формируется из оценки плотности, пористости и механических свойств литых заготовок. Характеризует процесс после момента полного формообразования в полости формы. Зависит от продолжительности времени разогрева прибыли, закона его изменения и устойчивости режима наложения гидродинамического давления до начала кристаллизации отливки в форме.

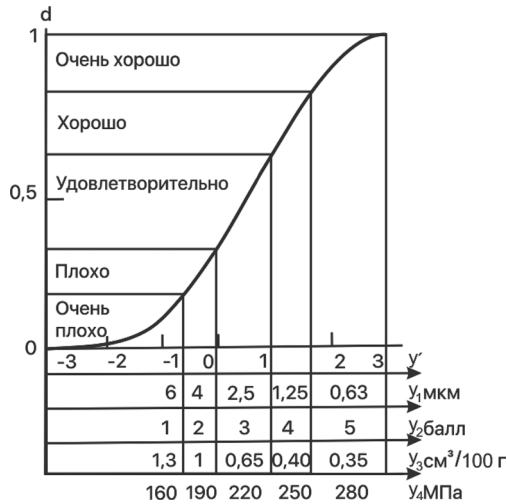


Рис. 1. Шкала желательности для технологического процесса изготовления отливок [2]

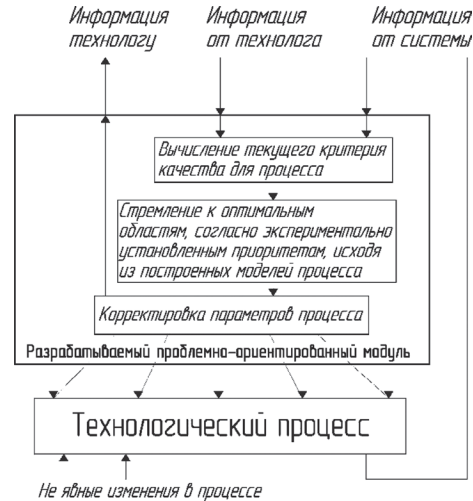


Рис. 2. Общая схема движения и обработки информации в технологическом модуле

3. Общий критерий качества ($K_{кач}$) управления технологическим режимом, есть совокупность критериев формообразования и геометрических характеристик литниково-питающей системы с теплофизическими свойствами прибылей.

Получение необходимого качества заготовок будет достигаться стремлением к попаданию в область пересечения областей в виде обобщенного отклика (табл. 1) на основе шкалы желательности [2], образуемых параметрами технологического процесса для каждого показателя качества.

Введем шкалу желательности для управления технологическим режимом (рис. 1).

Таблица 1. Стандартные отметки на шкале желательности

Желательность	Отметка на шкале желательности
Очень хорошо	1,00–0,80
Хорошо	0,80–0,63
Удовлетворительно	0,63–0,37
Плохо	0,37–0,20
Очень плохо	0,20–0,00

На основе данной шкалы можно преобразовать частные отклики в экспериментальные функции желательности и построить обобщенный показатель D , названный Харрингтоном «обобщенной функцией желательности» [2], т. е. переходить от d к D предлагается по формуле:

$$D = \sqrt[4]{\prod_{u=1}^4 d_u} .$$

Обобщенная функция желательности является единым и универсальным показателем качества исследуемого технологического режима и ее можно использовать в качестве критерия оптимизации:

$$K_{кач} = D \rightarrow 1,$$

т. е. в нашем случае это и есть общий критерий качества, основываясь на котором можно уточнить и предложить общую схему движения и обработки информации в разрабатываемом модуле (рис. 2).

Так как количество переменных факторов технологического процесса велико, то провести полный факторный эксперимент 2^4 представляется затруднительным из-за большого числа трудоемких необходимых экспериментов, поэтому воспользуемся методикой проведения дробно-факторного эксперимента.

Нахождение модели методом дробно-факторного эксперимента состоит из следующих этапов [3]: планирование и проведение эксперимента; проверка однородности выборочных дисперсий; получение математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии; проверка адекватности математического описания.

Назначим уровни варьирования параметров технологического процесса (табл. 2) исходя из возможностей обеспечения их реализации на основании анализа имеющихся сведений и стремления свести к минимуму число проводимых экспериментов.

Т а б л и ц а 2. Уровни варьирования параметров

Параметр	Наименование параметра	Уровень варьирования параметра
x_1	Температура заливаемого расплава, °С	1750, 1850
x_2	Температура формы, °С	20
x_3	Разрежение в полости формы, кПа	7 либо отсутствует
x_5	Скорость заполнения, мм/с	24,50

Диапазоны и уровни варьирования переменных технологических параметров подобраны таким образом, чтобы любое сочетание их могло быть реализовано в данной системе с учетом сформированного математического программного алгоритма технологического модуля.

Составим матрицу планирования эксперимента [4]. В табл. 3 приведена матрица планирования эксперимента с четырьмя переменными показателями управления качеством отливки для изменяющихся показателей управления технологическим процессом y_1, y_2, y_3 и y_4 с использованием метода дробно-факторного эксперимента. Она представляет собой 1/16 реплику от полно-факторного эксперимента 2^4 , что дает возможность сократить число опытов.

Т а б л и ц а 3. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Факторы (переменные технологические параметры)			
	x_1	x_2	x_3	x_5
1	+	+	+	+
2	+			
3			+	
4		+		+

П р и м е ч а н и е. Минимальному значению фактора соответствует (-), максимальному – (+).

Матрица задана генерирующими соотношениями

$$x_5 = x_1x_3,$$

для которых имеем следующие определяющие контрасты:

$$1 = x_1x_2, 1 = x_1x_3x_5, 1 = x_2x_3, 1 = x_1x_2x_3.$$

Обобщающий определяющий контраст:

$$1 = x_1x_2 = x_1x_3x_5 = x_2x_3 = x_1x_2x_3 = x_2x_3x_5 = x_1x_3 = x_3 = x_1x_2x_5 = x_2x_5 = x_1 = x_5 = x_1 = x_2 = x_3x_5 = x_1x_2x_3x_5.$$

Такой обобщающий контраст получен в результате попарного перемножения исходных факторов, затем умножения по три и четыре.

Если всеми коэффициентами взаимодействия, начиная с тройных, можно пренебречь, то коэффициенты будут совместными оценками:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{35},$$

$$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{15},$$

$$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{15},$$

$$b_5 \rightarrow \beta_5 + \beta_{13}.$$

Разрешающая способность такой реплики чрезвычайно мала, так как каждый линейный эффект определяется совместно с тремя парными взаимодействиями. Такой репликой можно пользоваться только в том случае, если все парные взаимодействия равны нулю. В большинстве случаев, начиная исследования процесса, трудно предсказать будут эффекты взаимодействия или нет. Поэтому необходимо наметить план дальнейших экспериментов согласно разработанной методике для случая, если парные эффекты значимы и поиск оптимальных условий будет неэффективным.

Матрицу планирования для этой реплики можно получить из первой реплики, изменив в ней все знаки на обратные. Такая реплика задается генерирующим соотношением

$$x_5 = -x_1x_3.$$

В обобщающем определяющем контрасте все двойные и тройные произведения оказываются со знаком минус, поэтому в совместных оценках для линейных эффектов не будет парных взаимодействий со знаком плюс. Усредняя результаты вычислений для таких двух реплик, можно получить отдельные оценки для всех линейных эффектов.

При проектировании системы управления приходится решать одну из сложных задач разработки, а именно задачу оптимального распределения функций системы между аппаратными средствами и программным обеспечением. Решение этой задачи осложняется тем, что взаимосвязь и взаимовлияние аппаратных средств и программного обеспечения претерпевают постоянные изменения.

В настоящее время наибольшее распространение получил методологический прием, при котором весь цикл рассматривается как последовательность трех фаз:

- анализ задачи и выбор аппаратных средств системы;
- разработка прикладного программного обеспечения;
- комплексирование аппаратных средств и программного обеспечения.

Законы функционирования технологического оборудования полностью определяются прикладной программой, иными словами, специализация системы управления осуществляется путем разработки прикладных программ, алгоритмов согласования и связи системы с датчиками и исполнительными механизмами в каждом конкретном случае. Такие этапы разработки математически сформированного программного алгоритма технологического модуля, как обоснование принципиальной схемы, проектирование ЛПС, требуют принятия согласованных решений.

При обработке лабораторных данных, как показали самые первые попытки использования технологических элементов литниковой системы с теплофизическими свойствами прибылей, обеспечивающих устойчивый режим наложения гидродинамического давления до начала кристаллизации отливки на простую по конфигурации и размерам форму, технологическая форма должна быть приведена в соответствие с возможностями технологического режима и содержать специальные ЛПС для создания давления в достаточно широких температурных и временных интервалах.

Оценку степени влияния места подвода металла и режима заливки литейной формы на температурное поле в затвердевающем металле проводили на технологических пробах с размерами: длина – 200 мм, диаметр – 8,5–9,0 мм. Формы собирали из стержней, изготавливаемых из жидкостекольной смеси, отверждаемой по CO_2 -процессу, и окрашивали быстросохнущей противопопригарной краской.

Выбор конкретного типа огнеупорной основы и связующих для формовочных смесей, вида, конфигурации и различных вариантов сочетаний литниковой системы с теплофизическими свойствами прибылей обусловлен технологическими параметрами процесса кристаллизации отливки в области, где проводили эксперименты, с целью усовершенствования и удешевления технологического и производственного процесса получения опытных литых заготовок, улучшения их качества, увеличения выхода годного металла.

При выполнении экспериментов использовали следующие материалы.

1. Формовочные смеси:

- смесь № 1: основа – кварцевый песок; связующее – жидкое стекло (6,5 мас.%); способ отверждения – CO_2 -процесс;
- смесь № 2: основа – кварцевый песок; связующее – жидкое стекло (3,0 мас.%); способ отверждения – CO_2 -процесс.

2. Теплоизоляционные материалы:

- теплоизоляционные (экзотермические) элементы (ЭкВ-2) [5]: диаметр – 180 мм, высота – 300 мм, толщина стенки – 18 мм;
- химический состав элементов: С – 4,5%; Al_2O_3 – 56,3; SiO_2 – 36,9; Fe_2O_3 – 90,8; CaO – 0,6; MnO – 3,4; Na_2O – 3,4; K_2O – 0,58; F – 3,3; $\text{Al}_{\text{акт}}$ – 20,4%.

При выборе конфигурации, габаритных размеров, а следовательно, и массы опытной заготовки и ее количества в форме для исследования теплофизических свойств смесей с учетом емкости среднечастотной индукционной плавильной печи (50 кг) и наличия в лаборатории готовой модельно-опочной оснастки руководствовались требованиями к условиям протекания процесса затвердевания стали и прогрева формы. При изготовлении литых заготовок используются различные методы литья. Выбор того или иного технологического процесса заготовок инструмента определяется, главным образом, экономичностью процесса получения форм [6].

При выборе места подвода металла в форму и конструкции литниковой системы необходимо учитывать то, что металл должен поступать в форму плавно, без удара в ее стенки и стержни, с заданной ско-

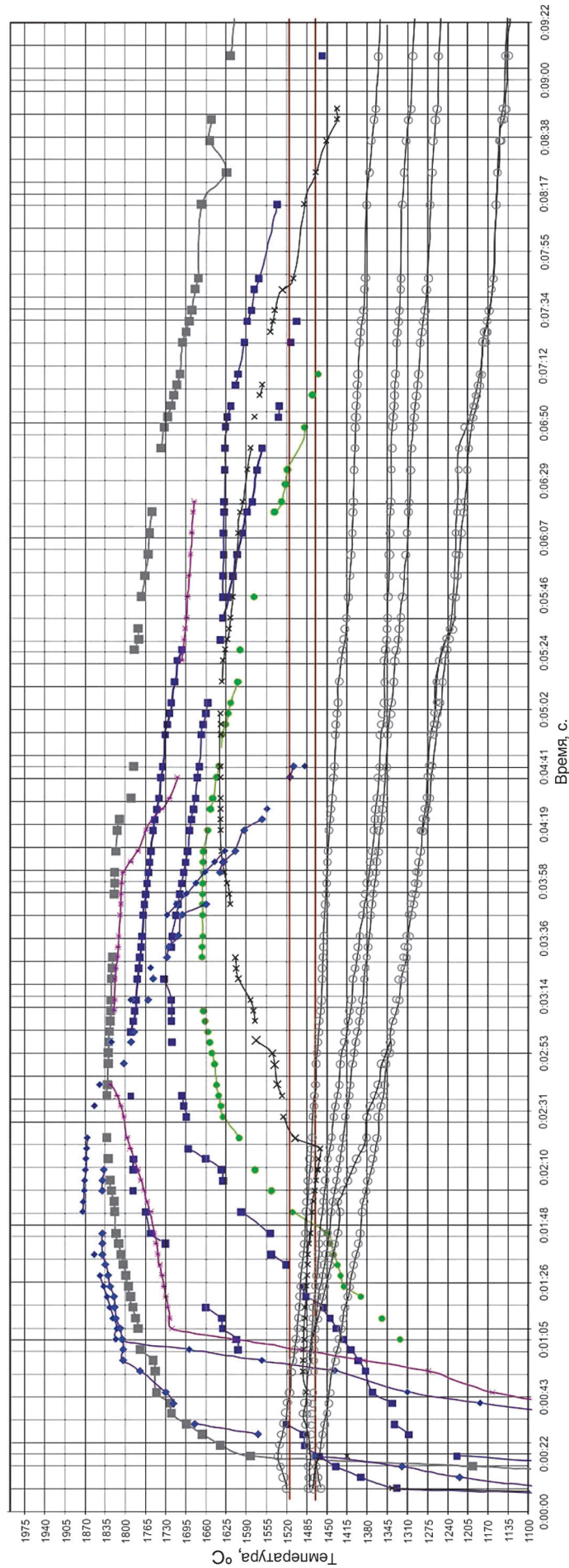


Рис. 3. Температурные поля в кристаллизующемся металле за счет разогрева прибыльной части системы «литниковая система-отливка»

ростью подъема уровня в форме, а также обеспечивать последовательное удаление газов и воздуха из формы. Кроме того, способ подвода металла должен обеспечивать направленное затвердевание заготовки с учетом ее конструкции и свойств сплава, из которого она изготавливается. С использованием противопригарных красок для форм можно устранить риск появления дефектов в виде пригара. Важнейшей проблемой при получении заготовок может стать то, что ХТС обладают высокой газотворной способностью, вследствие этого в отливках весьма вероятно появление брака в виде газовой шероховатости, газовых раковин, газовой пористости. Для организации способов питания и метода выбора, а также для снижения описанных выше дефектов в рамках исследования применяли технологический режим изготовления отливок с использованием технологических элементов литниковой системы с теплофизическими свойствами прибылей. Дефекты по включениям (металлическим и неметаллическим), несоответствию по структуре и ликвации необходимо предусматривать с момента приготовления шихты, плавки и термообработки заготовок.

Для регистрации температурных полей в затвердевающем металле в форме вдоль вертикальной оси формы устанавливали термопары типа ВР 5/20 с толщиной электродов 0,35 мм. Для оценки степени распределения температурных полей в процессе заливки и кристаллизации металла в форме термопары устанавливали на расстоянии 0, 5, 10, 15 мм от поверхности раздела металл – форма с расположением рабочих концов электродов строго в изотермической плоскости отливки. Запись термограмм осуществляли на приборе «Регулятор Сосна 002/ТП1 ХА ТП1» (рис. 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. М.: Наука, 1976.
2. Анисович Г. А. Гидроудар в литейной форме как фактор нарушения направленности затвердевания отливки / Г. А. Анисович, В. Г. Никитин, А. Я. Клековин // Литейное производство. 1984. № 10.
3. Методика определения экономической эффективности автоматизированных систем управления предприятиями и производственными объединениями. М.: Статистика, 1979. 62 с.
4. Глишков Г. М. Теоретические основы автоматического управления металлургическими процессами / Г. М. Глишков, М. Д. Климовицкий. М.: Металлургия, 1985. 304 с.
5. Экзотермическая смесь для разогрева жидкого металла в прибылях при производстве отливок из черных металлов: пат. 21798 Респ. Беларусь, МПК В22D27/06 / Ю. Н. Фасевич, Ю. А. Николаичик, К. В. Кобяков; заявитель Белорусский национальный технический университет. № а 20150371; заявл. 09.07.2015; опубл. 27.12.2017.
6. Кукуй Д. М., Фасевич Ю. Н., Рудницкий Ф. И., Сергиеня Н. Н., Синдель А. С. Разработка технологических решений получения черных и цветных сплавов с использованием среднечастотных индукционных печей // Литье и металлургия. 2014. № 1. С. 9–15.

REFERENCES

1. Adler Ju. P., Markova E. V., Granovskij Ju. V. *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976.
2. Anisovich G. A., Nikitin V. G., Klekovin A. Ja. *Gidroudar v litejnoj forme kak faktor narushenija napravlenosti zatverdevanija otlivki* [Hydroburst in the mold as a factor of distortion of the solidification direction of the casting]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1984, no. 10.
3. *Metodika opredelenija jekonomicheskoj jeffektivnosti avtomatizirovannyh sistem upravlenija predpriyatijami i proizvodstvennyimi obedinenijami* [The method of determining the economic efficiency of automated control systems for enterprises and production associations]. Moscow, Statistika Publ., 1979, 62 p.
4. Glinkov G. M., Klimovicki M. D. *Teoreticheskie osnovy avtomaticheskogo upravlenija metallurgicheskimi processami* [Theoretical basis of automatic control of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985, 304 p.
5. Fasevich Ju. N., Nikolajchik Ju. A., Kobjakov K. V. *Jekzotermicheskaja smes' dlja razogreva zhidkogo metalla v pribyljah pri proizvodstve otlivok iz chernyh metallov* [Exothermic mixture for heating molten metal in profits during the production of castings from ferrous metals]. Patent RB, no. 21798.
6. Kukuj D. M., Fasevich Ju. N., Rudnickij F. I., Sergienja N. N., Sindel' A. S. *Razrabotka tehnologicheskikh reshenij poluchenija chernyh i cvetnyh splavov s ispol'zovaniem srednechastotnyh indukcijonnyh pechej* [Development of technological solutions for the production of ferrous and non-ferrous alloys using medium-frequency induction furnaces]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 1, pp. 9–15.