

ISSN 0235-5884

CASTING PROCESSES

# ПРОЦЕСИ ЛІТТЯ

2 <sup>2019</sup>  
(134)



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Найдек В. Л.** главный редактор, акад. НАН Украины, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Дубоделов В. И.** зам. главного редактора, акад. НАН Украины, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Пригунова А. Г.** д-р техн. наук, зав. отделом, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Котлярский Ф. М.** отв. секретарь, д-р техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Мысик Р. К.** д-р техн. наук, проф., Уральский государственный политехнический университет (УПИ), Екатеринбург
- Смирнов А. Н.** д-р техн. наук, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Тарасевич Н. И.** д-р техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Шинский О. И.** д-р техн. наук, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Гнилокурченко С. В.** зав. редакцией, канд. техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
- Эльдарханов А. С.** акад. РЭА, научный центр «Новейшие материалы и технологии», Москва

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 12258-1142ПР от 30.01.07

Учредители: Национальная академия наук Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

Издатель: Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

Рекомендовано к печати Ученым советом Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов. Ответственность за достоверность представленных результатов несут авторы статей. За рекламную информацию отвечают рекламодатели

Адрес издателя и редакции: 03142, Киев-142, бул. Вернадского, 34/1  
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины  
Тел.: 424-04-10; факс: 424-35-15, E-mail: proclit@ptima.kiev.ua  
Internet: <http://www.ptima.kiev.ua>

---

Редактор, корректор **О. Н. Блануца**

Компьютерный набор, верстка **Л. Л. Усенко**

Оригинал-макет для прямого репродуцирования изготовлен редакцией журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитъе»

---

Підписано до друку 02.04.2019. Формат 70x108/16.

Ум. друк. арк. 9,4. Обл.-вид. арк. 8,0. Тираж 165 прим. Зам.

Віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України  
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01004

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 544 від 27.07.2001

## ЗМІСТ

### НОВІ МЕТОДИ ТА ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ

- НУРАДИНОВ А. С., НОГОВІЦІН О. В., НУРАДИНОВ І. А. Шляхи інтенсифікації теплообмінних процесів в кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок. . . . . 3
- ЛУК'ЯНЕНКО І. В. Особливості технологічного процесу виготовлення двошарових чавунних виливків з диференційованими властивостями. . . . . 15

### ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМИ

- СВИНОРОЄВ Ю. О. Інноваційні технології на основі використання нових екологічно безпечних в'язучих матеріалів для підприємств ливарної галузі. . . . . 21
- ДОРОШЕНКО В. С. Реалізація внутрішніх резервів піщаної форми методами подвійного використання модельно-формувальних матеріалів у ливарних процесах. 35

### НОВІ ЛИТІ МАТЕРІАЛИ

- ВЕРХОВЛЮК А. М., РУСАКОВ П. В., ЛАХНЕНКО В. Л., ПЕТРОВСЬКИЙ Р. В., ЧЕРВОНІЙ І. Ф. Процес одержання вторинних кольорових сплавів з використанням індукційної плавки. . . . . 40
- АФТАНДІЛЯНЦ Є. Г., ЛИХОШВА В. П. Оптимізація хімічних складів біметалевих виливків. . . . . 49
- ЛАДОХІН С. В. До питання про стан ливарної технології виробництва титану в Україні. . . . . 55
- КРИВОШЕЄВ В. А., КАЛІНІН В. Т., МЕНЯЙЛО О. В., СЕЛІВЕРСТОВ В. Ю., ДОЦЕНКО Ю. В., МУСІЄНКО І. О., ФРОЛОВ Е. А. Комплексна технологія отримання якісних відливок машинобудівного і металургійного призначення. . . . . 65
- БУБЛИКОВ В. Б., БАЧИНСЬКИЙ Ю. Д., ЯСИНСЬКИЙ О. О. Спеціальні високоміцні чавуни з підвищеним комплексом механічних властивостей. . . . . 73
- КВАСНИЦЬКА Ю. Г., ТАРАСЕВИЧ М. І., МАКСЮТА І. І., ТОКАРЄВА О. О., МИХНЯН О. В., МЯЛЬНИЦА Г. П. Використання розрахункових методик при створенні нових легуючих комплексів жароміцних сплавів для деталей ГТД. . . . . 79

### ХРОНІКА. ІНФОРМАЦІЯ

- Нарівський Анатолій Васильович (до 75-річчя від дня народження). . . . . 88
- Дубодєлов Віктор Іванович (до 80-річчя від дня народження). . . . . 89

## CONTENTS

### NEW METHODS AND ADVANCED TECHNOLOGY FOR FOUNDRY

- NURADINOV A. S. et al. Ways to Intensify Heat Exchange Processes in the Mold of a Continuous Casting Machine . . . . . 3
- LUKIANENKO I. V. Features of the Technological Process of Manufacturing Two-layer Cast Iron Castings with Differentiated Properties. . . . . 15

### PROBLEMS OF MOULD TECHNOLOGY

- SVINOROEV Yu. A. Innovative Technology Based on the Use of New Environmentally Friendly Binding Materials for the Foundry Industry. . . . . 21
- DOROSHENKO V. S. Realization of Internal Reserves of Sand Form by Dual Use of Model-Forming Materials in Foundry. . . . . 35

### NEW CASTING MATERIALS

- VERKHOVLYUK A. M. et al. The Process of Obtaining Secondary Non-Ferrous Alloys Using Induction Melting . . . . . 40
- AFTANDILYANTS Y. G. et al. Optimization of chemical composition of Bimetallic Casting. . . . 49
- LADOKHIN S. V. On the Present Situation with Casting Technology of Titanium in Ukraine. . . . . 55
- KRIVOSHEEV V. A. et al. Complex Technology of Obtaining Qualitative Castings of Machine-Building and Metallurgical Purpose . . . . . 65
- BUBLIKOV V. B. et al. Special Ductile Cast Irons with Increased Complex of Mechanical Properties . . . . . 73
- KVASNYTSKA I. G. et al. The Use of Computational Methods for Creating New Alloying Complexes of High-Temperature Alloys for GTE Parts. . . . . 79

### CHRONICLE

- Narivskiy Anatoliy Vasilevich (on the occasion of his 75<sup>th</sup> to birthday). . . . . 88
- Viktor Ivanovich Dubodelov (on the occasion of his 80<sup>th</sup> to birthday). . . . . 89

УДК 536.24:66.065.5

**А. С. Нурадинов**, д-р техн. наук, ведущ. науч. сотр., e-mail: nla\_73@ukr.net

**А. В. Ноговицын**, д-р техн. наук, зам. директора,

e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

**И. А. Нурадинов**, ведущ. инженер, e-mail: inuradinov@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

*Методом физического моделирования изучены процессы теплообмена между затвердевающим металлом и кристаллизатором машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) при непрерывной разливке стали. Установлены закономерности изменения количества тепла, передаваемого от жидкого металла к затвердевшей корке, от поверхности заготовки к стенке кристаллизатора и от нее к охлаждающей воде. Предложены практические рекомендации для повышения эффективности теплоотдачи для указанных стадий передачи тепла от затвердевающего металла к охлаждающей воде.*

**Ключевые слова:** кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), теплообмен, газовый зазор, вибрация, искусственная шероховатость, коэффициент теплоотдачи, количество тепла.

Изучение процессов тепло- и массообмена является одним из важнейших направлений современной науки и знание закономерностей их протекания имеет большое практическое значение, в том числе для металлургических технологий. К примеру, при непрерывной разливке стали особо важными становятся вопросы интенсификации тепло- и массообменных процессов в кристаллизаторе МНЛЗ, потому что от них зависят и качество литых заготовок, и производительность процесса. В связи с этим, создание новых, более надежных методов расчета теплообменных процессов в кристаллизаторе является актуальной проблемой. Для данного конкретного случая наиболее надежным методом исследований является лабораторный эксперимент, который проводился авторами на эксклюзивных установках индивидуального изготовления.

В общем виде процесс отвода тепла от жидкой стали к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ можно представить как процесс, состоящий из различных стадий теплопередачи (рис. 1) [1]. В таком случае общее количество тепла ( $Q$ ), передаваемого охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ, можно определить по формуле [2]:

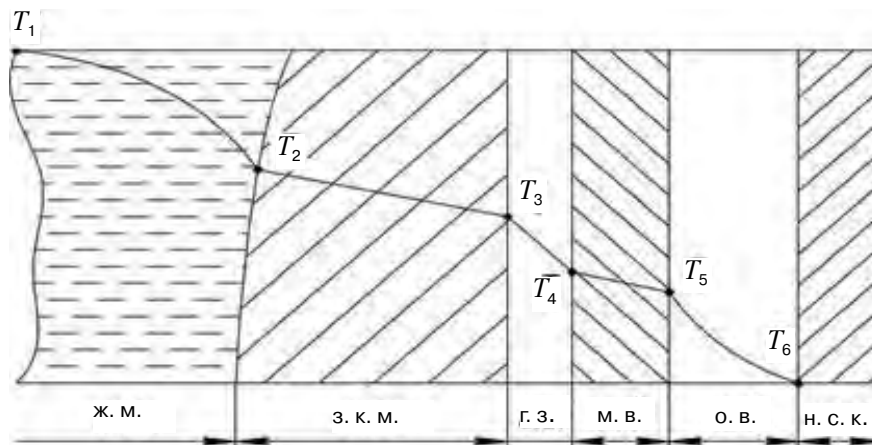


Рис. 1. Схема передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ: ж. м. – жидкий металл; з. к. м. – затвердевшая корка металла; г. з. – газовый зазор; м. в. – медная втулка кристаллизатора; о. в. – охлаждающая вода; н. с. к. – наружная стенка кристаллизатора;  $T_1$  – температура жидкого металла;  $T_2$  и  $T_3$  – температуры внутренней и наружной поверхностей затвердевшей корки;  $T_4$  и  $T_5$  – температуры внутренней и наружной поверхностей медной втулки кристаллизатора;  $T_6$  – температуры наружной стенки кристаллизатора

$$Q = q \cdot F \cdot \tau, \tag{1}$$

где  $q$  – плотность теплового потока;  $F$  – площадь поверхности теплообмена;  $\tau$  – время пребывания металла в кристаллизаторе.

Плотность теплового потока ( $q$ ), если рассматривать все стадии передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде, можно выразить формулой [1]:

$$q = \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{в}}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}, \tag{2}$$

где  $T_{\text{кр}}$  – средняя температура жидкого металла в кристаллизаторе и  $T_{\text{в}}$  – температура охлаждающей воды;  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$  – термические сопротивления отдельных стадий процесса теплопередачи, а именно:  $R_1 = 1/\alpha_c$  – теплоотдачи от жидкого металла к затвердевшей корке ( $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи жидкого металла);  $R_2 = \xi/\lambda$  – теплопроводности затвердевшей корки металла ( $\xi$  – толщина корки металла,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности металла);  $R_3 = 1/\alpha_r$  – теплопередачи через газовую прослойку между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора ( $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи газовой прослойки);  $R_4 = \delta/\lambda_r$  – теплопроводности медной стенки кристаллизатора ( $\delta$  – толщина медной стенки,  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности меди);  $R_5 = 1/\alpha_{\text{в}}$  – теплоотдачи от медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде ( $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи охлаждающей воды).

Тогда выражение (1) примет следующий вид:

$$Q = \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{в}}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} \cdot F \cdot \tau. \tag{3}$$

Из (3) следует, что для увеличения количества тепла, отводимого охлаждающей водой в кристаллизаторе, необходимо снизить термические сопротивления на каждой стадии передачи тепла. Так, термическое сопротивление затвердевшей

корки металла зависит только от теплофизических свойств марки стали и, соответственно, снизить его невозможно, а термическим сопротивлением медной стенки кристаллизатора можно пренебречь из-за незначительности его величины, которая составляет не более 3 % от общего термического сопротивления [3]. Остальными стадиями передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде можно управлять различными приемами внешнего физического воздействия, что будет рассмотрено ниже, отдельно для каждой стадии.

*Теплоотдача от жидкого металла к затвердевшей корке.* В расчетах теплообмена при движении жидких металлов вдоль вертикального фронта затвердевания пользуются критериальным уравнением С. С. Кутателадзе, которое включает следующие параметры [2]:

$$Nu = 0,42 \left( \frac{Wh}{a} \right)^{0,65}, \quad (4)$$

где  $Nu = \alpha \cdot l / \lambda$  – критерий Нуссельта;  $W$  – скорость конвекции металла;  $h$  – высота фронта затвердевания (в нашем случае – высота кристаллизатора);  $a$  – коэффициент температуропроводности расплава.

При заданных значениях геометрических размеров кристаллизатора и теплофизических характеристиках стали, величина критерия Нуссельта и, соответственно, интенсивность теплопередачи к затвердевшей корке будет зависеть от скорости конвекции расплава металла вдоль фронта кристаллизации:

$$Nu = 0,42 \left( \frac{Wh}{a} \right)^{0,65} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad \text{или} \quad \alpha \sim W^{0,65}. \quad (5)$$

То есть, увеличивая скорость движения затвердевающего металла в кристаллизаторе, можно повысить теплоотдачу расплава к затвердевшей корке. В наших исследованиях в качестве инструмента, с помощью которого усиливается перемешивания жидкого металла, использована вибрация с частотой  $\nu = 0-100$  Гц и амплитудой  $A = 0-2,5$  мм [4, 5].

Количество тепла, передаваемого от жидкого металла к затвердевшей корке, приблизительно определяли по следующей формуле [2]:

$$Q_c = \alpha_c \cdot (T_{кр} - T_{нк}) \cdot F \cdot \tau, \quad (6)$$

где  $T_{нк}$  – температура поверхности затвердевшей корки.

На рис. 2 показан характер изменения количества тепла, передаваемого жидким металлом затвердевшей корке, в среднем сечении кристаллизатора в зависимости от условий эксперимента. Видно, что вибрация вызывает существенное увеличение количества передаваемого тепла.

Интенсификация теплоотдачи от жидкого металла к затвердевшей корке под действием вибрации обусловлено тем, что она вызывает вынужденное движение расплава, к примеру, для частоты  $\nu = 100$  Гц и амплитуды  $A = 2,5$  мм, со скоростью около 0,25 м/с. Средняя скорость естественной конвекции жидкой стали, по данным различных авторов [3], равна 0,02–0,05 м/с. В этом случае соотношение критериев Нуссельта для вынужденной и естественной конвекций будет иметь следующий вид:

$$\frac{Nu_{\text{виб}}}{Nu_{\text{кон}}} = \left( \frac{0,25}{0,05} \right)^{0,65} \approx 2,5 \quad (7)$$

Из соотношения (7) становится понятной роль вибрации в интенсификации передачи тепла от жидкого металла к затвердевшей корке.

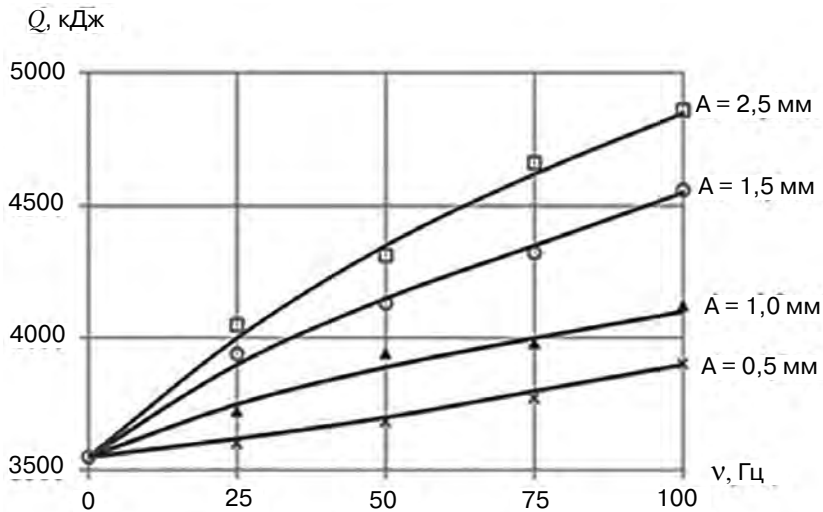


Рис. 2. Характер изменения количества тепла, передаваемого затвердевшей корке металла

Параметры теплообмена между жидким металлом и затвердевшей коркой, определенные прямыми замерами и рассчитанные по зависимостям (5 и 6), сведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Параметры теплообмена между жидким металлом и затвердевшей коркой**

| Параметр теплообмена                                    | Параметры вибрации |               |               |                |
|---|--------------------|---------------|---------------|----------------|
|   | $\nu = 0$ Гц       | $\nu = 50$ Гц | $\nu = 75$ Гц | $\nu = 100$ Гц |
|   | $A = 0$ мм         | $A = 1,5$ мм  | $A = 2,0$ мм  | $A = 2,5$ мм   |
| $T_{кр}, ^\circ\text{C}$                                | 1560               |               |               |                |
| $T_{пк}, ^\circ\text{C}$                                | 780                | 870           | 940           | 1050           |
| $\alpha_c, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ | 1755               | 2544          | 2912          | 3650           |
| $Q_c, \text{кДж}$                                       | 3550               | 4550          | 4680          | 4825           |

Из анализа табл. 1 видно, что вибрация повышает температуру поверхности затвердевшей корки ( $T_{пк}$ ). Безусловно, это связано с повышением коэффициента теплоотдачи жидкого металла ( $\alpha_c$ ) и, как следствие, ростом количества тепла ( $Q$ ), которое передается от расплава к затвердевшей корке. При оптимальных параметрах вибрации коэффициент теплоотдачи возрастает более 2 раз, а количество передаваемого тепла – до 35 %.

*Теплопередача через газовую прослойку между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора.* Если рассматривать теплообмен между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора как теплопередачу от более горячей поверхности к менее горячей, то полное количество тепла  $Q_r$ , проходящее через газовый зазор между ними, равно [3]:

$$Q_r = Q_c + Q_d, \quad (8)$$



где  $Q_{\Gamma}$  – количество тепла, передаваемое теплопроводностью и конвекцией;  $Q_{\text{л}}$  – количество тепла, передаваемое лучеиспусканием.

Учитывая, что количество тепла, передаваемое лучеиспусканием  $Q_{\text{л}}$  в условиях эксперимента не меняется и оно незначительно по сравнению с  $Q_{\Gamma}$ , им можно пренебречь. Тогда тепло, проходящее через газовый зазор за определенный промежуток времени, можно определить по формуле (6), которая для этой стадии теплопередачи будет иметь вид:

$$Q_{\Gamma} = \alpha_{\Gamma} \cdot (T_{\text{ПК}} - T_{\text{МВ}}) \cdot F_{\text{ПК}} \cdot \tau, \quad (9)$$

где  $\alpha_{\Gamma}$  – коэффициент теплопередачи через газовый зазор;  $F_{\text{ПК}}$  – площадь поверхности заготовки в кристаллизаторе;  $T_{\text{МВ}}$  – температура внутренней поверхности стенки кристаллизатора.

С другой стороны, количество тепла, полученное внутренней стенкой кристаллизатора ( $Q_{\text{СК}}$ ) за то же время, можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{СК}} = m \cdot C \cdot (T_{\text{СК}} - T_{\text{СН}}), \quad (10)$$

где  $m$  – масса стенки кристаллизатора, воспринимающей тепло;  $C$  – удельная теплоемкость материала стенки;  $T_{\text{СК}}$  и  $T_{\text{СН}}$  – конечная и начальная температуры стенки, воспринимающей тепло.

Если не учитывать потери тепла на лучеиспускание через открытую поверхность заготовки, то тепло, проходящее через газовый зазор  $Q_{\Gamma}$ , и тепло, полученное внутренней стенкой кристаллизатора  $Q_{\text{СК}}$ , согласно закону сохранения количества теплоты, должны быть равны между собой. Тогда, решая совместно уравнения (9) и (10), можно определить коэффициент теплопередачи через газовый зазор между поверхностями

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{m \cdot C \cdot (T_{\text{СК}} - T_{\text{СН}})}{(T_{\text{СК}} - T_{\text{СН}}) \cdot F_{\text{ПК}} \cdot \tau}. \quad (11)$$

В данных исследованиях задача состояла в интенсификации теплопередачи через газовый зазор между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора, что было сделано авторами при помощи вибрации [6–8]. Об интенсивности теплопередачи через газовый зазор между двумя поверхностями можно судить по градиенту температур по толщине газового зазора между поверхностями (рис. 3). Из кривых изменения температур поверхностей теплообмена с начальными температурами 405 и 15 °С, соответственно, видно, что градиент температур существенно зависит от толщины зазора (сравните кривые 1, 1' и 2, 2'). Незначительное увеличение толщины зазора между поверхностями существенно ослабляет теплообменный процесс между ними, что наглядно видно из сравнения кривых 2, 2' (рис. 3). Даже к 15-й минуте процесса этот перепад температур составляет 150 °С, что говорит о серьезном термическом сопротивлении газовой прослойки между ними.

В условиях воздействия вибрации на кристаллизатор градиент температур по сечению газового зазора существенно уменьшается (сравните кривые 2, 2' и 3, 3', рис. 3), что свидетельствует об интенсификации теплообменных процессов между поверхностями. Если в контрольном эксперименте перепад температур между поверхностями к 15-й минуте составлял 150 °С, то под действием вибрации – всего 45 °С, что говорит о снижении термического сопротивления газовой прослойки. Подобный характер температурные кривые имели и для вариантов, когда толщина газового зазора составляла 0,3; 1,0; 1,5 и 2,0 мм.

Расчетные значения количества тепла, передаваемого через газовый зазор между поверхностями, представлены на рис. 4. Естественно, максимальное количество тепла передается к холодной поверхности при контактном теплообмене,

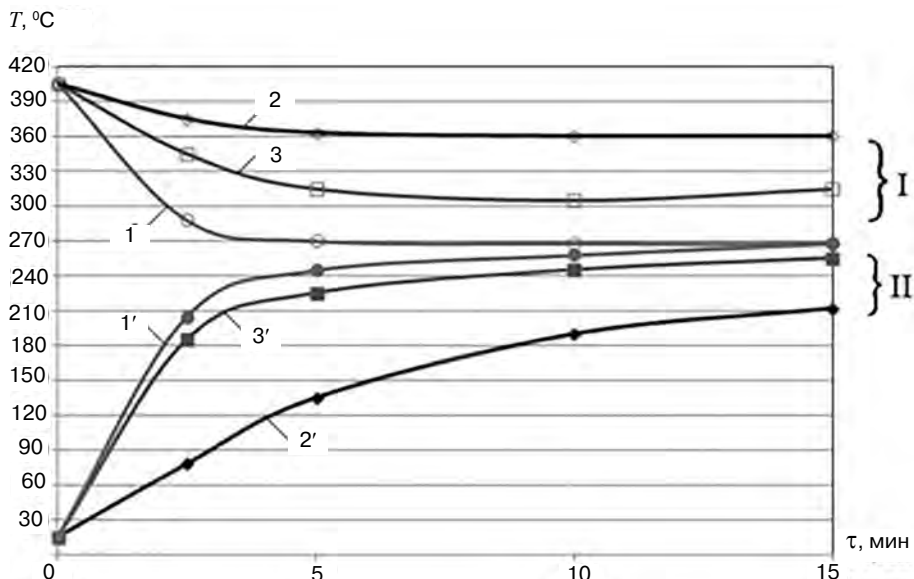


Рис. 3. Температурные кривые охлаждения (I) и прогрева (II) поверхностей: 1, 1' –  $\delta = 0$ ; 2, 2' –  $\delta = 0,6$  мм; 3, 3' –  $\delta = 0,6$  мм с вибрацией

который, как известно, зависит от качества соприкасающихся поверхностей (то есть их шероховатости и прямолинейности). При увеличении толщины зазора между поверхностями от 0 до 1 мм количество передаваемого тепла резко снижается (кривая 1, рис. 4).

Существенное воздействие на передаваемое через газовый зазор тепло оказывает вибрация (кривые 2 и 3, рис. 4). Механизм воздействия вибрации, по мнению авторов, обусловлен двумя факторами: уменьшением толщины зазора под действием сил виброимпульса и изменением динамики движения газов в нем. Из данного рисунка видна явная зависимость эффективности воздействия вибрации на

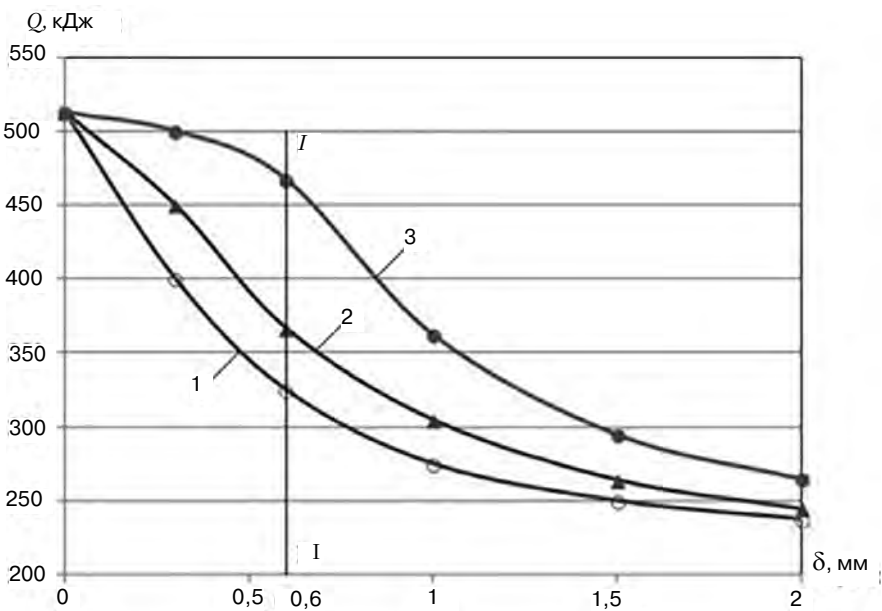


Рис. 4. Зависимость количества тепла, передаваемого через газовый зазор: 1 – без вибрации; 2 – при действии вибрации с ограничителями; 3 – при действии вибрации без ограничителей; параметры вибрации:  $A = 0,6$  мм;  $\nu = 60$  Гц

теплопередачу от толщины зазора, при этом максимальный эффект получен, когда амплитуда виброимпульса равна толщине зазора между поверхностями (вертикаль I-I, рис. 4). Важный вывод из рис. 4 заключается в том, что основным критерием при подборе оптимальных параметров вибрации для интенсификации теплообменных процессов между двумя поверхностями является равенство значений толщины газового зазора между ними и амплитуды вибрации.

Основные параметры теплообмена между поверхностями, рассчитанные по зависимостям (10, 11) к 10-й минуте процесса (то есть в момент наступления теплового равновесия между ними), сведены в табл. 2, из которой видно, что независимо от толщины зазора вибрация уменьшает перепад температур ( $\Delta T_r$ ) по сечению газовой прослойки между поверхностями и, наоборот, усиливает темп роста температуры поверхности ( $\Delta T_2$ ), воспринимающей тепло. При этом существенно повышается коэффициент теплопередачи ( $\alpha_r$ ) через газовый зазор (до 4,8 раза) и, как следствие, увеличивается количество тепла ( $Q_r$ ), которое передается от более горячей поверхности к холодной (до 42 %).

**Таблица 2**  
**Параметры теплообменного процесса между поверхностями**

| Параметр теплообмена   | Толщина зазора $\delta$ , мм |                    |                   |                   |                   |
|--|------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|  | 0                            | 0,3                | 0,6               | 1,0               | 1,5               |
| $\Delta T_r = T_1 - T_2, ^\circ\text{C}$   | $\frac{22^*}{22}$            | $\frac{151}{36}$   | $\frac{178}{52}$  | $\frac{228}{60}$  | $\frac{252}{214}$ |
| $\Delta T_2 = T_{2к} - T_{2н}, ^\circ\text{C}$   | $\frac{259}{259}$            | $\frac{183}{248}$  | $\frac{168}{239}$ | $\frac{135}{177}$ | $\frac{125}{141}$ |
| $\alpha_r = \frac{m \cdot C \cdot (T_{ск} - T_{сн})}{(T_{ск} - T_{сн}) \cdot F_{ПК} \cdot \tau} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ | $\frac{1400}{1400}$          | $\frac{750}{1060}$ | $\frac{113}{551}$ | $\frac{71}{132}$  | $\frac{60}{79}$   |
| $Q_{ск} = m \cdot C \cdot (T_{ск} - T_{сн}), \text{кДж}$   | $\frac{528}{528}$            | $\frac{373}{506}$  | $\frac{343}{488}$ | $\frac{275}{361}$ | $\frac{255}{288}$ |

\*Примечание: числитель – без вибрации; знаменатель – с вибрацией:  $A = 0,6$  мм;  $\nu = 60$  Гц

### Теплоотдача с поверхности медной втулки кристаллизатора к охлаждающей воде.

Для интенсификации теплоотдачи с поверхности медной втулки кристаллизатора к охлаждающей воде нами использованы различные приемы: наведение искусственной шероховатости и ребер на поверхности теплообмена [9–12]. Для всех рассмотренных вариантов количество отводимого тепла в той или иной степени увеличивается, при этом наибольший эффект получается для поверхности с искусственной шероховатостью (рис. 5). Если рост количества отводимого водой тепла при продольных и винтообразных ребрах обусловлен элементарным увеличением площади теплообмена (согласно выражения (6)), то механизм интенсификации теплообменных процессов при искусственной шероховатости связан со структурой приграничного гидродинамического слоя.

Из теории пограничного слоя известно, что при набегании потока жидкости или газа на гладкую поверхность, на ней формируется приграничный гидродинамический слой с различной структурой по направлению течения и сечению (рис. 6) [1, 13].

При малых значениях числа Рейнольдса ( $Re < 2 \cdot 5 \cdot 10^5$ ) режим движения жидкости в приграничном слое имеет ламинарный характер (рис. 6, часть А), а при  $Re \geq 2 \cdot 5 \cdot 10^5$  – турбулентный (рис. 6, часть В). Длина перехода от ламинарного режима к турбулентному ( $X_{кр.}$ ) тем меньше, чем больше скорость движения жидкости. Для скоростей движения воды в кристаллизаторах МНЛЗ (от 10 до 12 м/с) ламинарный слой в потоке жидкости практически отсутствует. Даже в турбулентном слое всегда присутствует тонкий пристеночный вязкий подслой (рис. 6, область I), который существенным образом влияет на теплопередачу между поверхностью и жидкостью.

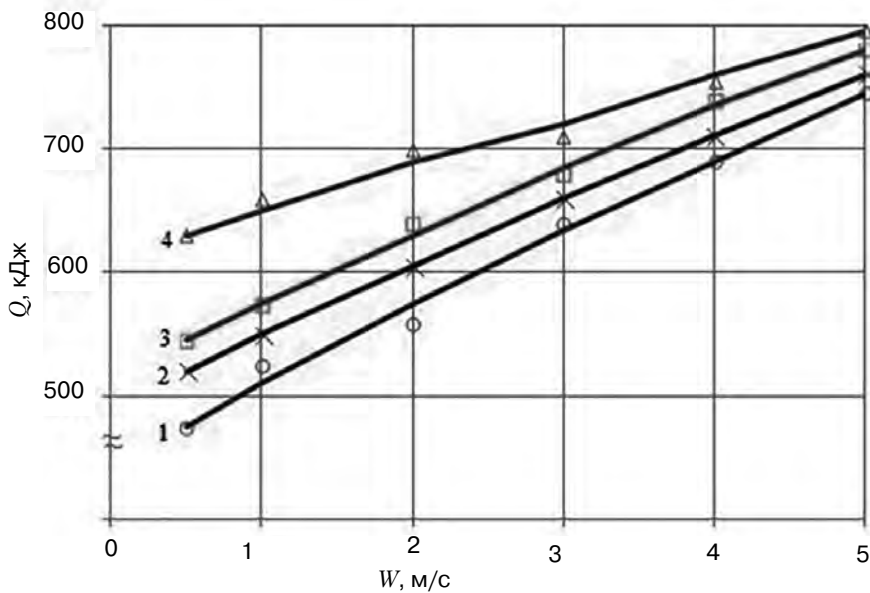


Рис. 5. Зависимость количества тепла, отводимого в кристаллизаторе охлаждающей водой: 1 – стандартная гладкая втулка; 2 – втулка с продольными ребрами; 3 – втулка с винтовыми ребрами; 4 – втулка с искусственной шероховатостью

Толщину турбулентного приграничного слоя можно определить из следующей зависимости [14, 15]:

$$\delta_T = \frac{0,37 \cdot X}{Re^{0,3}}, \quad (12)$$

где  $X$  – расстояние от точки набегания потока жидкости на поверхность.

По данным различных источников, толщина вязкого подслоя составляет около 0,01 части от общей толщины турбулентного слоя [14, 15]. Из формулы (12) следует, что с удалением от верхней кромки кристаллизатора толщина турбулентного слоя увеличивается, соответственно, увеличивается и толщина вязкого подслоя.

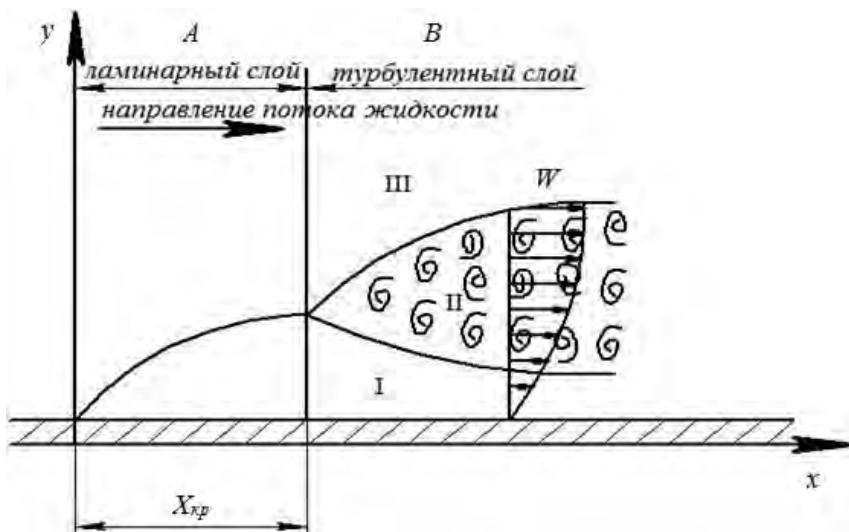


Рис. 6. Структура приграничного гидродинамического слоя потока воды

Если структуру турбулентного приграничного слоя рассматривать с позиции теплообмена между поверхностью и набегающей жидкостью, то можно заключить, что в вязком подслое (рис. 6, область I) тепло передается теплопроводностью, а в турбулентном подслое (рис. 6, область II) – конвекцией. Следовательно, в общем переносе тепла лимитирующей стадией является теплопередача теплопроводностью в вязком (ламинарном) подслое. Тогда коэффициент теплоотдачи ( $\alpha_v$ ) от поверхности теплообмена к потоку жидкости можно определить из следующего выражения:

$$\alpha_v = \frac{\lambda}{\delta_{в.п.}}, \quad (13)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность жидкости (воды);  $\delta_{в.п.} = 0,01 \delta_T$  – толщина подслоя.

Из формулы (13) следует, что для усиления отвода тепла от поверхности теплообмена к набегающей жидкости необходимо разрушить вязкий подслой или уменьшить его толщину.

Механизм повышения интенсивности теплоотдачи при искусственной шероховатости поверхности контакта заключается в том, что при набегании потока жидкости на выступ за ним образуется вихрь, который разрушает структуру вязкого подслоя, турбулизируя его (рис. 7). В результате этого при неизменной скорости движения жидкости вязкий подслой уменьшается по толщине или полностью разрушается, что способствует повышению коэффициента теплоотдачи без увеличения гидравлических потерь.

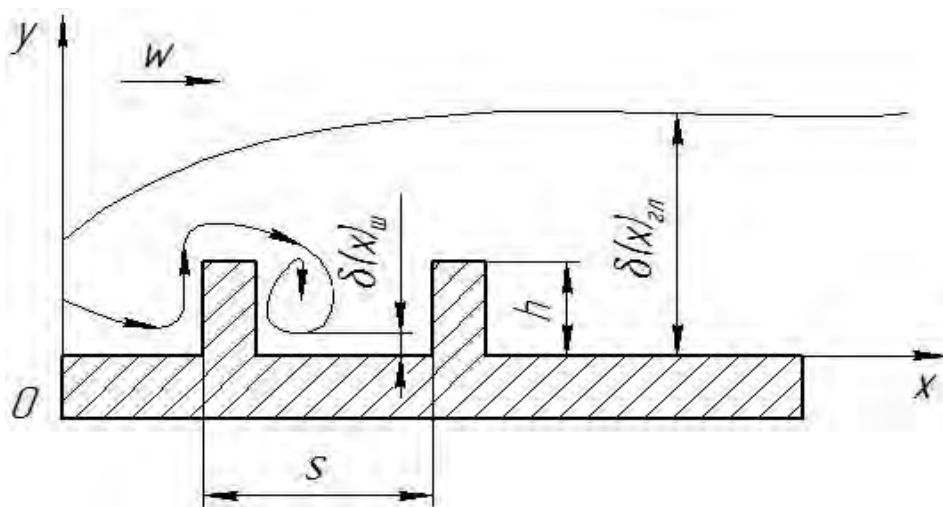


Рис. 7. Структура гидродинамического пограничного слоя при наличии искусственной шероховатости (выступов)

Чтобы шероховатость на поверхности теплообмена не сопровождалась увеличением гидравлических потерь, необходимо обеспечить следующие условия: высота выступа не должна превышать толщину вязкого подслоя в гидродинамическом пограничном слое; вихрь, который возникает за выступом, должен прекратить свое существование до встречи со следующим выступом (рис. 7), в противном случае он будет переходить в ядро потока и приведет к дополнительным гидравлическим потерям.

Полученные результаты показывают, что использованные приемы действительно повышают теплообмен между внутренней стенкой кристаллизатора и охлаждающей водой (табл. 3). Из рассмотренных приемов наибольший эффект получен для поверхности теплообмена с искусственной шероховатостью ( $n_{Q_{max}} = 1,29$ ), то есть количество отводимого тепла увеличивается до 29 %, в то время как для ребристых поверхностей оно повышается максимум от 6 до 11 % в зависимости от типа ребер.

**Параметры теплообмена между охлаждающей водой и кристаллизатором в зависимости от формы теплоотводящей поверхности**

| W, м/с | $\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К |       | Q, кДж |       |       |       | $n_q$ |       |       |
|--------|---------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | г. п.                           | и. ш. | г. п.  | и. ш. | п. р. | в. р. | и. ш. | п. р. | в. р. |
| 0,5    | 1843                            | 2378  | 492,8  | 635,7 | 525,4 | 546,2 | 1,29  | 1,06  | 1,11  |
| 1,0    | 2463                            | 3054  | 539,5  | 668,4 | 549,7 | 566,6 | 1,24  | 1,02  | 1,05  |
| 2,0    | 3331                            | 4031  | 564,5  | 694,1 | 593,5 | 618,4 | 1,21  | 1,05  | 1,09  |
| 3,0    | 3987                            | 4505  | 631,5  | 715,0 | 643,2 | 663,5 | 1,13  | 1,02  | 1,05  |
| 4,0    | 4546                            | 4909  | 694,2  | 752,8 | 700,0 | 716,5 | 1,08  | 1,01  | 1,03  |
| 5,0    | 5052                            | 5305  | 737,7  | 778,3 | 747,5 | 760,2 | 1,05  | 1,01  | 1,03  |

Условные обозначения: г. п. – гладкая поверхность; и. ш. – искусственная шероховатость; п. р. – продольные ребра; в. р. – винтообразные ребра

Таким образом, экспериментально доказано, что, используя различные приемы, можно интенсифицировать теплопередачу от жидкого металла к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ. Совершенно очевидно, что интенсификация теплоотдачи от жидкого металла к затвердевшей корке под действием вибрации обусловлена ростом скорости перемешивания затвердевающего расплава. А усиление теплообменных процессов между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора обусловлено, во-первых, изменением характера и скорости движения газов в зазоре и, во-вторых, периодическим сокращением расстояния между ними под действием сил виброимпульса. Механизм интенсификации теплоотдачи от медной втулки кристаллизатора к охлаждающей воде при искусственной шероховатости ее поверхности связан со структурой приграничного гидродинамического слоя. При набегании потока жидкости на выступ за ним образуется вихрь, который разрушает структуру вязкого подслоя, турбулизируя его, в результате теплопередача теплопроводностью переходит в конвективный теплоотвод.

### Список литературы

1. Дымнич А. Х., Троянский А. А. Вопросы теплообмена в сталеплавильных процессах. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – 582 с.
2. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 414 с.
3. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
4. Нурадинов А. С. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок // Литейщик России. – 2006. – № 7. – С. 34–37.
5. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Таранов Е. Д. Теплообменные процессы при формировании НЛЗ в поле упругих колебаний // Сталь. – 2006. – № 6. – С. 51–52.
6. Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С., Саипова Л. Х-А., Нурадинов И. А. Интенсификация теплообмена через газовый зазор в кристаллизаторе МНЛЗ // Сталь. – 2016. – № 4. – С. 8–11.
7. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Дымнич А. Х. и др. Способ оптимизации тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ // Процессы литья. – 2016. – № 2. – С. 42–51.
8. Нурадинов А. С., Уздиева Н. С., Ахтаев С. С.-С. и др. Методика определения коэффициента теплопередачи через газовый зазор в кристаллизаторе МНЛЗ // Грозненский естественно-научный бюллетень. – 2016. – № 2. – С. 65–70.
9. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Уздиева Н. С. и др. Скорость движения теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ как фактор интенсификации теплообменных процессов в нем // Сталь. – 2017. – № 3. – С. 19–21.
10. Нурадинов А. С., Ноговицын А. В., Нурадинов И. А. и др. Методика определения коэффициента теплоотдачи теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ // Процессы литья. – 2017. – № 2. – С. 45–52.

11. Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С., Ахтаев С. С.-С. и др. Интенсификация теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ // Сталь. – 2017. – № 5. – С. 21–25.
12. Нурадинов А. С., Ноговицын А. В., Нурадинов И. А. и др. Влияние формы поверхности теплообмена на эффективность тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ // Процессы литья. – 2017. – № 3. – С. 43–51.
13. Скворцов А. А., Акименко А. Д., Ульянов В. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. – М.: Metallurgiya, 1991. – 216 с.
14. Боршанский В. М., Кутателадзе С. С., Новиков И. И. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976. – 146 с.
15. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

Поступила 09.01.2019

### References

1. Dymnich, A. H., Troyanskiy, A. A. (2009) Issues of heat and mass transfer in steelmaking processes. Donetsk: DVNZ «DonNTU», 582 s. [in Russian].
2. Kutateladze, S. S. (1979) Fundamentals of the theory of heat transfer. Moscow: Atomizdat, 414 s. [in Russian].
3. Yefimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (2004) Technologies of modern metallurgy. Moscow: Novyye tekhnologii, 784 s.[in Russian].
4. Nuradinov, A. S. (2006) Heat exchange processes in the formation of continuously cast billets. Liteyshchik Rossii, no. 7, pp. 34–37 [in Russian].
5. Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., Taranov, E. D. (2006) Heat exchange processes in the formation of continuous castings in the field of elastic oscillations. Stal, no. 6, pp. 51–52 [in Russian].
6. Eldarkhanov, A. S., Nuradinov, A. S., Saipova, L.H-A. et al. (2016) Intensification of heat transfer through the gas gap in the crystallizer of the CCM. Stal, no. 4, pp. 8–11 [in Russian].
7. Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., Dymnich, A. H. et al. (2016) Intensification of heat transfer through the gas gap in the crystallizer of the CCM. Protsessy litya, no. 2, pp. 42–51 [in Russian].
8. Nuradinov, A. S., Uzdiyeva, N. S., Akhtayev, S. S.-S. et al. (2016) Method of determining the heat transfer coefficient through the gas gap in the mold of the CCM. Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten, no. 2, pp. 65–70 [in Russian].
9. Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., Uzdiyeva, N. S. et al. (2017) The speed of the coolant in the mold caster as a factor of intensification of heat exchange processes in it. Stal, no. 3, pp. 19–21 [in Russian].
10. Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A. et al. (2017) Method of determining the heat transfer coefficient of the coolant in the mold of the CCM. Protsessy litya, no. 2, pp. 45–52 [in Russian].
11. Eldarkhanov, A. S., Nuradinov, A. S., Akhtayev, S. S.-S. et al. (2017) Intensification of heat transfer in the crystallizer of the CCM. Stal, no. 5, pp. 21–25 [in Russian].
12. Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A. et al. (2017) The influence of the shape of the heat exchange surface on the efficiency of the thermal operation of the CCM. Protsessy litya, no. 3, pp. 43–51 [in Russian].
13. Skvortsov, A. A., Akimenko, A. D., Ulyanov, V. A. (1991) The impact of external influences on the process of forming ingots and billets. Moscow: Metallurgiya, 216 s.[in Russian].
14. Borshanskiy, V. M., Kutateladze, S. S., Novikov, I. I. (1976) Liquid metal coolants. Moscow: Atomizdat, 146 s.[in Russian].
15. Kutateladze, S. S., Styrikovich, M. A. (1976)Hydrodynamics of gas-liquid systems. Moscow: Energiya, 296 s.[in Russian].

Received 09.01.2019

**А. С. Нурадінов**, д-р техн. наук, провідн. наук. співр., e-mail: nla\_73@ukr.net

**О. В. Ноговіцин**, д-р техн. наук, заст. директора,

e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

**І. А. Нурадінов**, провідн. інженер, e-mail: inuradinov@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

## **ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В КРИСТАЛІЗАТОРІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТІВОК**

*Методом фізичного моделювання вивчено процеси теплообміну між металом, що твердне, і кристалізатором машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) при безперервному розливанні сталі. Встановлено закономірності зміни кількості тепла, що передається від рідкого металу до затверділої кірки, від поверхні заготовки до стінки кристалізатора і від неї до охолоджуючої води. Запропоновано практичні рекомендації для підвищення ефективності тепловіддачі для вказаних стадій передачі тепла від металу, що твердіє, до охолоджуючої води.*

**Ключові слова:** кристалізатор машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), теплообмін, газовий зазор, вібрація, штучна шорсткість, коефіцієнт тепловіддачі, кількість тепла.

**A. S. Nuradinov**, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher,

e-mail: nla\_73@ukr.net

**A. V. Nogovitsyn**, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director,

e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

**I. A. Nuradinov**, Leading Engineer, e-mail: inuradinov@gmail.com

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

## **WAYS TO INTENSIFY HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE MOLD OF A CONTINUOUS CASTING MACHINE**

*By the method of physical modeling, the processes of heat transfer between the solidified metal and the caster mold during continuous casting of steel are studied. The laws governing changes in the amount of heat transferred from the liquid metal to the solidified crust, from the surface of the workpiece to the wall of the mold and from it to the cooling water are established. Practical recommendations are proposed for increasing the efficiency of heat transfer for the indicated stages of heat transfer from the solidifying metal to the cooling water.*

**Keywords:** caster mold, heat transfer, gas gap, vibration, artificial roughness, heat transfer coefficient, amount of heat.



**И. В. Лукьяненко**, ассистент, <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>,  
e-mail: [Lukianenkoiv@gmail.com](mailto:Lukianenkoiv@gmail.com)

Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского»,  
Киев

## **ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

*Представлен краткий обзор такого класса конструкционных материалов, как материалы с дифференцированными свойствами, тенденция применения которых в промышленности постоянно возрастает. Приведены их основные свойства, области применения и преимущества при использовании. На основе предложенной технологии получения отливок с дифференцированными свойствами из чугуна проведен анализ параметров технологического процесса. Описаны базовые принципы технологии проведения внутриформенного модифицирования и выбор гранулометрического состава модификатора и общей конфигурации литниковой системы. Представлены условия и результаты проведения эксперимента по отработке технологических параметров процесса получения чугунной двухслойной отливки с дифференцированными свойствами для работы в условиях абразивного износа. Установлены параметры технологического процесса, при которых обеспечивается получение в отливке необходимой микроструктуры и механических свойств, а именно создание таких условий, при которых, после первого этапа заливки в рабочем слое отливки обеспечивается кристаллизация чугуна по метастабильной системе с отбелом, а в остальной части отливки, после второго этапа заливки – по стабильной системе с образованием микроструктуры серого чугуна с включениями графита пластинчатой формы. С помощью металлографического анализа исследованы переходные зоны, которые образуются в местах соединения слоев чугунной отливки, и непосредственно сами слои, а именно их размеры, морфология графитных и цементитных включений, а также металлическая матрица. Установлены механические свойства структурных составляющих, как в переходной зоне, так и в каждом слое по отдельности, а также установлено их количество в этих же частях отливки.*

**Ключевые слова:** абразивный износ, белый чугун, внутриформенное графитизирующее модифицирование, двухслойная чугунная отливка, дифференцированные свойства, литье в песчано-глинистые формы, переходная зона, реакционная камера, серый чугун.

**М**атериалы с дифференцированными свойствами являются важным классом конструкционных материалов, обладающих широким спектром и уникальным сочетанием ценных свойств: прочность, коррозионная стойкость, электро- и теплопроводность, жаропрочность, износостойкость и т. п. Эти материалы находят все большее применение в различных отраслях промышленности. Применение металлических композиций с дифференцированными свойствами позволяет не только повысить надежность и долговечность большой номенклатуры деталей и оборудования, но и существенно сократить расход дорогостоящих легирующих элементов, снизить энергоемкость производства и металлоемкость изделий, затраты на техническое обслуживание, производство запчастей и ремонт оборудования. Из таких композиций изготавливают биметаллические или полиметаллические листы, прутки, трубы, детали различной конфигурации различными способами, в том числе и литьем. Особенно актуально применять в качестве способа изготовления деталей с дифференцированными свойствами, которые работают в условиях износа, именно литье. Наиболее распространенным конструкционным материалом в промышленности для производства отливок, работающих в условиях износа, является белый, отбеленный и легируемый чугун, который применяют в рабочем слое деталей такого рода. При этом основу детали делают из этого ма-

териала экономически нецелесообразно [1]. В то же время существуют проблемы, связанные с технологическим процессом получения качественных двухслойных чугуновых отливок, работающих в условиях абразивного износа, и отработкой его параметров.

*Целью данной работы* является отработка технологических параметров процесса получения двухслойных чугуновых отливок с дифференцированными свойствами для работы в условиях износа. Сущность процесса заключается в поэтапной заливке литейной формы чугуном одного химического состава через независимые литниковые системы, одна из которых состоит из реакционной камеры с измельченным модификатором для проведения внутриформенного модифицирования чугуна (Inmold-процесс), что в свою очередь позволяет обеспечить дифференциацию свойств в отливке [2, 3].

Важным фактором при разработке литейной технологии с применением Inmold-процесса является выбор состава и фракции модификатора, а также проектирование литниковой системы, которая, в первую очередь, должна обеспечивать растворение модификатора в потоке чугуна и улавливание продуктов реакции модифицирования расплава чугуна с модификатором. Исследования по установлению этих технологических параметров проводились как зарубежными, так и отечественными учеными [3–5].

По результатам этих исследований установлена необходимость использования сужающейся литниковой системы с центробежным шлакоуловителем, которая увеличивает эффективность улавливания продуктов реакции модифицирования и уменьшает вероятность образования дефектов в отливке [5].

Наилучшие результаты при производстве мелких чугуновых отливок были получены с использованием модификатора, гранулометрический состав которого находится в пределах от 1 до 5 мм [3, 5], что позволяет стабилизировать скорость растворения в пределах от 1,5 до 2 мм/с после окончания примерно одной секунды от начала модифицирования [5].

При размерах частиц модификатора 1 мм и меньше с наличием пылевидной составляющей часть, которая контактирует с жидким чугуном, спекается, а остаток сохраняется в реакционной камере в исходном виде, и лишь незначительная его часть растворяется в потоке чугуна. При использовании модификатора с размерами частиц около 10 мм расплав смачивает весь объем модификатора, который начинает растворяться с задержкой в несколько секунд, достигая скорости растворения от 2 до 3 мм/с, что ограничивает его применение при изготовлении чугуновых отливок массой до 25 кг [5].

В то же время важным фактором при проектировании литниковой системы является взаимное расположение каналов, по которым расплав подводят к реакционной камере и отводят от нее, а также непосредственно форма самой камеры [5, 6].

Для проведения исследований объектом выбрано отливку размерами 240×120×50 мм. Подведение расплава в полость формы осуществляли через две независимые литниковые системы. Первый этап заливки проводили через первую литниковую систему, проходя по которой порция расплава непосредственно попадала в полость формы. На втором этапе по второй литниковой системе расплав попадал в реакционную камеру с модификатором и после модифицирования дозаполнял оставшуюся часть полости литейной формы.

Отработка технологических параметров заключалась в использовании реакционных камер кубической и цилиндрической формы, а также в подводе расплава к торцевым и боковым сторонам отливки (рис. 1).

В качестве исходного материала был выбран чугун с углеродным эквивалентом на уровне 3,1–3,2 %, кристаллизация которого в условиях заливки в сухую песчано-глинистую форму проходит по метастабильной системе в отливках с толщиной сечения от 30 до 50 мм [7]. Для обеспечения получения в отливке слоя чугуна с пластинчатым графитом в реакционную камеру литниковой системы поместили измельченный

графитизирующий модификатор ФС75 с размером фракции от 1 до 5 мм. Дозировку первой порции расплава исходного чугуна проводили ручным ковшом, рабочие размеры которого обеспечивали необходимое количество расплава.

Экспресс-оценку результатов эксперимента проводили визуальным методом по виду макроструктуры излома в верхней и нижней части чугунной отливки в центральном ее сечении. Дополнительную информацию получали, используя металлографический анализ и определяя механические свойства образцов.

Во всех опытах исходный (немодифицированный) чугун кристаллизовался по метастабильной системе с белым крупнокристаллическим изломом. Значительное количество цемента и ледебуритной эвтектики в сочетании с дисперсными продуктами распада первичного аустенита в микроструктуре обеспечивали твердость поверхностей рабочего слоя отливки на уровне от 410 до 450 *HВ*. В результате проведения внутриформенного графитизирующего модифицирования исходного расплава, который заливали на втором этапе через вторую литниковую систему, верхний слой отливки кристаллизовался по стабильной системе с образованием чугуна с пластинчатым графитом в перлитной металлической матрице (рис. 2).

Следует отметить, что образец, представленный на рис. 2, был получен путем заливки с использованием литниковой системы с подводом расплава к торцевым стенкам отливки. Такой подвод, предположительно, частично предотвращал гидродинамическое перемешивание чугунов в процессе заливки литейной формы через вторую литниковую систему и, в итоге, давал более стабильные результаты. В данных условиях эксперимента существенных различий полученных результатов при использовании реакционной камеры кубической или цилиндрической формы не наблюдалось.

Установлено, что в полученных по такой технологии двухслойных чугунных отливках из белого и серого чугуна размер переходной зоны по плоскости контакта между слоями находится в диапазоне от 203 до 503 мкм (рис. 3). При этом сама переходная зона характеризуется отсутствием каких-либо дефектов, отливки

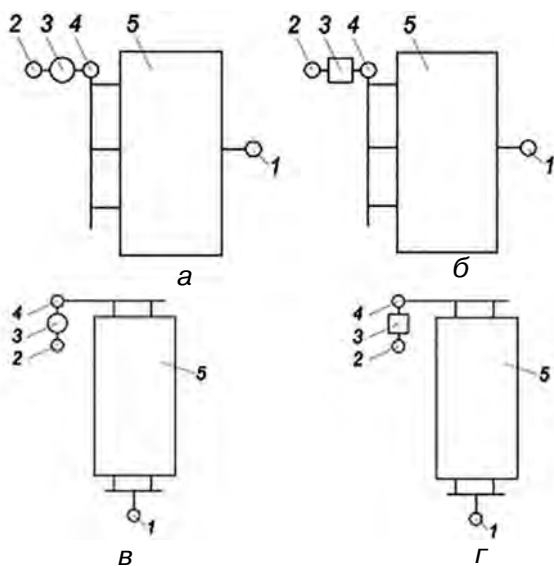


Рис. 1. Схемы технологических вариантов получения отливок с использованием цилиндрической (а, в) и кубической (б, г) реакционных камер при подводе расплава к боковым (а, б) и торцевым (в, г) сторонам отливки: 1 – первая литниковая система; 2 – вторая литниковая система; 3 – реакционная камера; 4 – шлакоуловитель; 5 – отливка

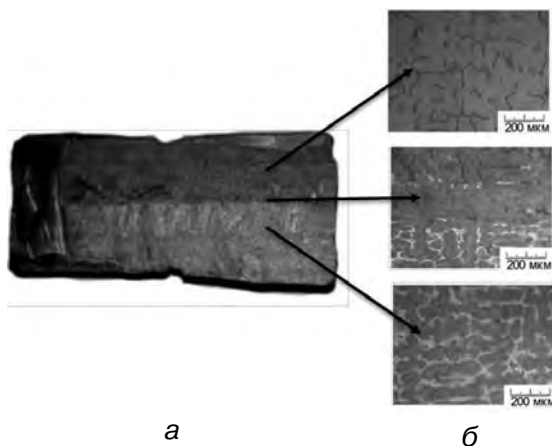


Рис. 2. Общий вид макроструктуры излома (а) и микроструктуры (б) двухслойной чугунной отливки

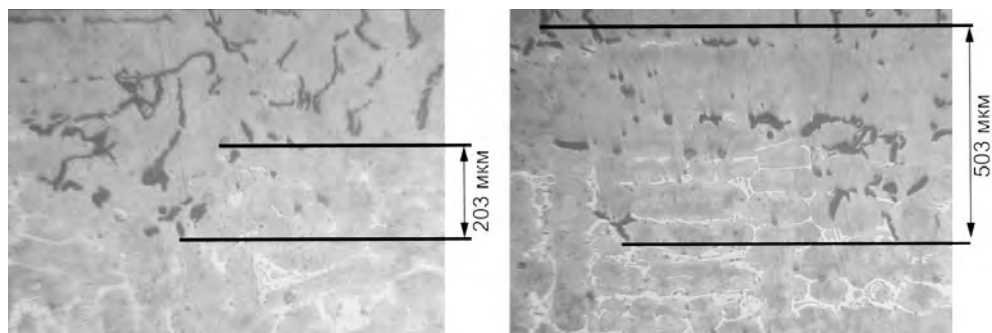


Рис. 3. Микроструктура переходной зоны двухслойной чугуновой отливки

связанных с образованием газовых и усадочных пор, а также оксидных включений, которые возможны в отливках, полученных по этой технологии.

Также в результате проведенных исследований были определены микротвердости отдельных структурных составляющих обоих слоев и переходной зоны отливки, а также проведена их количественная оценка в процентах от занимаемой площади на микрошлифе (рис. 4).

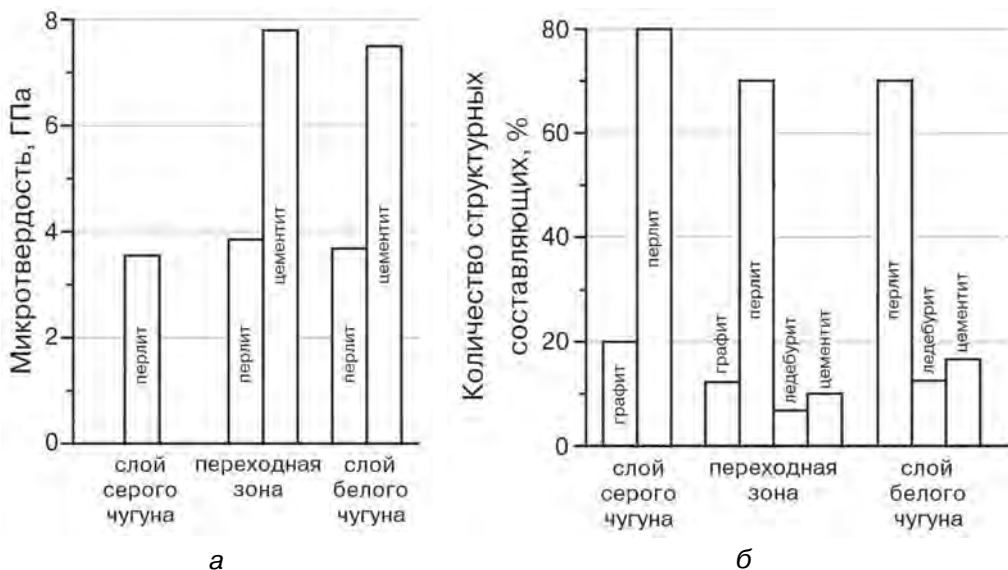


Рис. 4. Микротвердость (а) и количественный анализ структурных составляющих (б) двухслойной чугуновой отливки

### Выводы

Проведена отработка технологических параметров получения чугуновых отливок с дифференцированными свойствами для работы в условиях абразивного износа. Определены механические свойства отливки, микротвердость и количественный состав структурных составляющих. Разница в способе подвода металла незначительна, однако для выбранных условий эксперимента лучше себя зарекомендовал технологический вариант с подводом расплава к торцевым стенкам отливки, при котором наблюдаются более стабильные результаты дифференциации слоев, что положительно влияет на качество полученных отливок и отсутствие в них дефектов, связанных с перемешиванием слоев. Установлено, что применение исследуемой технологии позволяет получать качественные чугуновые отливки без дефектов в области соединения слоев.

**Список литературы**

1. Скляр В. А. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : учеб. пос. / В. А. Скляр. – Донецк : ДонНТУ, 2014. – 224 с.
2. Фесенко М. А. Внутриформенное модифицирование для получения чугунных отливок с дифференцированными структурой и свойствами / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко, В. А. Косячков // Литейное производство. – 2010. – № 1. – С. 7–12.
3. Фесенко М. А. Графитизирующее модифицирование чугуна в литейной форме / М. А. Фесенко, В. А. Косячков, А. Н. Фесенко, И. В. Лукьяненко, Е. В. Фесенко // Металл и литье Украины. – 2015. – № 10 (269). – С. 10–15.
4. Pietrowski S. Influence of reaction chamber shape on cast-iron spheroidization process in-mold / S. Pietrowski // Archives of foundry engineering. – 2010. – Т. 10. – № 1. – С. 115–122.
5. Pokusova M. Gating system for in-mold technology / M. Pokusova, M. Murgas // Archives of foundry. – 2006. – Т. 6. – № 18. – С. 21–26.
6. May Thu Zar Myint. Study on the effect of weight percentage variation and size variation of magnesium ferrosilicon added, gating system design and reaction chamber design on in-mold process / May Thu Zar Myint, Kay Thi Lwin // International journal of materials and metallurgical engineering. – 2008. – Т. 2. – № 12. – С. 377–382.
7. Патент №27681 U 2007 07328, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими властивостями / Фесенко М. А., Косячков В. О. Фесенко А. М. – Заявл. 02.07.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл.№18, 2007.

Поступила 15.03.2019

**References**

1. Skljar, V. A. (2014) Innovative and resource-saving technologies in metallurgy. Doneck: DonNTU [in Russian].
2. Fesenko, M. A., Fesenko, A. N., & Kosjachkov, V. A. (2010). In-mold modification for the production of cast iron castings with differentiated structure and properties. Litejnoe proizvodstvo, Vol. 1, pp. 141–146 [in Russian].
3. Fesenko, M. A., Kosjachkov, V. A., Fesenko, A. N., Lukianenko, I. V., Fesenko, E. V. (2015) In-mold Graphitizing Modification of Cast Iron. Metall i lit'jo Ukrainy, Vol. 10, pp. 10–15 [in Russian].
4. Pietrowski, S. (2010) Influence of reaction chamber shape on cast-iron spheroidization process in-mold. Archives of foundry engineering, Vol. 10, Is. 1, pp. 115–122 [in English].
5. Pokusova, M., Murgas, M. (2006) Gating system for in-mold technology. Archives of foundry, Vol. 6, Is. 18, pp. 21–26 [in English].
6. May Thu Zar Myint & Kay Thi Lwin (2008) Study on the effect of weight percentage variation and size variation of magnesium ferrosilicon added, gating system design and reaction chamber design on in-mold process. International journal of materials and metallurgical engineering, Vol. 2, Is. 12, pp. 377–382 [in English].
7. Fesenko, M. A., Kosjachkov, V. O., Fesenko, A. M. Patent №27681 U 2007 07328, V22D27/00. Method of making castings with differentiated properties. Zajavl. 02.07.2007; opubl. 12.11.2007, Bjul.№18, 2007.

Received 15.03.2019

**I. В. Лук'яненко, асистент, <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>,**

**e-mail: [Lukianenkoiv@gmail.com](mailto:Lukianenkoiv@gmail.com)**

**Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ**

**ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДВОШАРОВИХ ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

*Представлено короткий огляд такого класу конструкційних матеріалів, як матеріали з диференційованими властивостями, тенденція застосування яких в промисловості постійно зростає. Наведено їх основні властивості, області застосування та переваги при використанні. На основі запропонованої технології отримання виливків з диференційованими властивостями з чавуну проведено аналіз параметрів технологічного процесу. Описано базові принципи*

технології проведення внутрішньоформового модифікування і вибір гранулометричного складу модифікатора та загальної конфігурації ливникової системи. Представлено умови і результати проведення експерименту з відпрацювання технологічних параметрів процесу отримання чавунного двошарового виливка з диференційованими властивостями для роботи в умовах абразивного зношування. Встановлено параметри технологічного процесу, при яких забезпечується отримання у виливку необхідної мікроструктури і механічних властивостей, а саме створення таких умов, при яких, після першого етапу заливання, в робочому шарі виливка забезпечується кристалізація чавуну за метастабільною системою з вибіленням, а в іншій частині виливка, після другого етапу заливання, – за стабільною системою з утворенням мікроструктури сірого чавуну з включеннями графіту пластинчастої форми. За допомогою металографічного аналізу досліджено перехідні зони, які утворюються в місцях з'єднання шарів чавунного виливка, і безпосередньо самі шари, а саме їх розміри, морфологію графітних і цементитних включень, а також металеву матрицю. Встановлено механічні властивості структурних складових, як в перехідній зоні, так і в кожному шарі окремо, а також встановлено їх кількість в цих же частинах виливка.

**Ключові слова:** абразивне зношування, білий чавун, внутрішньоформове графітизуюче модифікування, двошаровий чавунний виливок, диференційовані властивості, лиття в піщано-глинясті форми, перехідна зона, реакційна камера, сірий чавун.

**I. V. Lukianenko**, assistant, <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>,  
e-mail: [Lukianenkoiv@gmail.com](mailto:Lukianenkoiv@gmail.com)

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

## FEATURES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING TWO-LAYER CAST IRON CASTINGS WITH DIFFERENTIATED PROPERTIES

*A brief review of the class of construction materials is presented as materials with differentiated properties, the tendency of which in industry is constantly increasing. Their main properties, their areas of application and advantages in use are given. On the basis of the proposed technology for producing castings with differentiated properties from cast iron, an analysis of the process parameters is carried out. The basic principles of the technology of the in mold modification and the choice of the granulometric composition of the modifier and the general configuration of the gating system are described. The conditions and results of the experiment to work out the technological parameters of the process of obtaining a cast-iron two-layer casting with differentiated properties for working in abrasive conditions are presented. The parameters of the technological process are established under which the required microstructure and mechanical properties are obtained in the casting, namely the creation of such conditions under which, after the first casting stage, cast iron crystallizes in a metastable system with chilling in the working casting layer, after the second stage of casting, – in a stable system with the formation of the microstructure of gray iron with inclusions of lamellar graphite. With the help of metallographic analysis, transition zones, which are formed at the junctions of the cast iron layers, and the layers themselves, namely their sizes, the morphology of graphite and cementite inclusions, and the metal matrix, are investigated. The mechanical properties of the structural components were established both in the transition zone and in each layer separately, and their number in the same parts of the casting was also established.*

**Keywords:** abrasive wearing, white cast iron, in mold graphitizing modification, two-layer cast iron casting, differentiated properties, sand-clay mold casting, transition zone, reaction chamber, gray cast iron.

УДК 621.742.22

**Ю. О. Свинороєв**, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [desna.us@yandex.ru](mailto:desna.us@yandex.ru)

Кам'янський технологічний інститут (філія) Південно-Російського державного політехнічного університету (НПІ) ім. М.І. Платова, м. Кам'янськ-Шахтинський, Росія

### ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ В'ЯЖУЧИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ ЛИВАРНОЇ ГАЛУЗІ

Традиційно основною заготовчою базою машинобудівної галузі є ливарне виробництво. На долю його продукції в структурі її потреб припадає від 40 до 60 %, при цьому частка литва, що виробляється у пісчаних разових формах, складає близько 80 %. Такий стан зумовлює важливість та значущість забезпечення відповідної якості ливарної форми та дотримання, за цих умов, екологічної безпеки у ливарному виробництві в цілому. У результаті проведеного дослідження встановили, що в'язучі матеріали є визначальною складовою в процесах литва. Ця складова зумовлює не тільки технологічні можливості процесу виробництва, але й комплекс питань, що виникають на різних етапах його здійснення: собівартість процесу, санітарно-гігієнічні умови праці персоналу ливарного цеху, екологічний стан у місцевості, де розташоване підприємство. Саме в'язучі сполуки є головними джерелами викидів в атмосферу високотоксичних речовин першого і другого класів небезпеки (бензапірен, формальдегід, акролеїн і т. д.). Альтернативою домінуванню синтетичних смол, за сучасних умов розвитку ливарного виробництва, могли б стати лігносульфонатні матеріали: екологічні, недорогі і, що істотно, не схильні до здорожчання, оскільки первинним джерелом їх виробництва служать продукти переробки рослинної сировини – природного поновлюваного ресурсу. На сучасному ринку в'язучих цей клас матеріалів представлений технічними лігносульфонатами (ЛСТ) (ТУ 13-0281036-029-04), проте їх застосування як ливарного в'язучого стримується незадовільністю показників якості (низька в'язуча здатність, нестабільність властивостей, висока гігроскопічність стрижнів і форм, виготовлених на основі ЛСТ) щодо технічних вимог багатьох технологій ливарного виробництва. На основі створених ливарних в'язучих матеріалів розроблено склади стрижньових сумішей, що дозволяють понизити об'єм токсичних газових викидів порівняно з сумішами на основі відомих і широко вживаних в'язучих матеріалів типу КО і УСК в 2,7–14 разів, що дозволило звести вміст шкідливих речовин в газових викидах до рівня гранично допустимих концентрацій (ГДК). Це стало можливим за рахунок використання у складі суміші екологічно чистих в'язучих матеріалів на основі ЛСТ з підвищеними показниками міцності.

**Ключові слова:** ливарна галузь, інноваційні технології, в'язучі матеріали, рослинна сировина, в'язуча спроможність, екологічна безпека, екологічна ефективність.

**Актуальність проблеми.** Ливарне виробництво України в умовах, що склалися, є одним з найбільш перспективних, але поки не оцінених повною мірою, об'єктів інвестування [1, 2]. Відомо, що найбільшою статтею зароблених валютних надходжень України є випуск і експорт металопрокату. Цей показник варіюється в межах 42–44 % від загального об'єму всіх надходжень держави, в той же час одна

тонна будь-якого литва за вартістю еквівалентна 5–7 тоннам металопрокату, що експортується [1, 2, 6]. Об'єми виробництва і споживання литва у світі в 2010–2011 рр. склали близько 89–91 млн т, що у вартісному еквіваленті становило приблизно € 350–370 млрд. Важливо відмітити, що в передкризовий час, у 2007 р. було вироблено загалом 67 млн т литва, тобто ливарне виробництво не тільки не зменшило об'ємів виготовлення продукції, а й навіть зуміло їх наростити [1].

На теперішній час в Україні залишається не вирішеним питання стосовно литва. Адже 1 млн т експортованого литва за вартістю відповідає 5 млн т прокату. Продаючи в п'ять разів меншу кількість продукції, можна отримувати такий же прибуток. Якби Україна експортувала не прокат, а литво, то могла б отримувати прибуток в розмірі € 20 млрд щорічно [1, 2].

Розвиток ливарного виробництва вимагає адекватних технологічних рішень. Нарощуючи виробництво литва, потрібно забезпечити ефективність ливарних технологій, а це в сучасному розумінні не тільки валові економічні показники, але і екологія, безпека праці, ресурсоефективність і різноманітні соціальні аспекти, пов'язані з виробничим процесом.

*Мета дослідження* полягає в пошуку інноваційних рішень в площині використання нових матеріалів на прикладі використання можливостей та практичній розробці ефективних способів підвищення в'язучої спроможності лігносульфонатних матеріалів (ЛСТ) для створення на їх основі нових екологічно безпечних та якісних формувальних в'язучих для використання в ливарних технологіях замість токсичних та недешевих масляних та смоляних матеріалів.

*Викладення змісту дослідження.* Оцінюючи значущість згаданих аспектів, доцільно розглянути найуразливіші елементи технологій литва, а саме, звернути особливу увагу на в'язучі матеріали, які є невід'ємною частиною практично будь-якого технологічного процесу виготовлення литва. Вони, перш за все, є носіями потенційних екологічних небезпек для навколишнього середовища, оскільки на етапах технологічного процесу виділяють найбільш небезпечні токсини (речовини першого і другого класу небезпеки) [9, 10, 14]. Дуже поширені наразі в ливарному виробництві українських підприємств фенольні смоли та масляні в'язучі здебільшого не відповідають вимогам безпеки, а рідке скло дуже часто не задовольняє умовам технологічності, тому доцільно розглянути альтернативні рішення, звернувшись до лігносульфонатних матеріалів як найбільш безпечних з екологічного погляду, технологічних та перспективних в'язучих [11–15]. Найвідомішим представником цього класу матеріалів на підприємствах ливарної галузі є технічні лігносульфонати (ЛСТ).

Все це зумовлює необхідність детальнішого вивчення цього питання в контексті оцінки можливостей використання лігносульфонатних в'язучих матеріалів, що вимагає системного дослідження і аналізу досвіду застосування ЛСТ у ливарному виробництві, виявлення причин, стримуючих їх ширше застосування і пошуку шляхів їх подолання.

В'язучі матеріали в сучасному виробництві є визначальним елементом багатьох технологічних процесів не тільки литва [3, 4, 5, 7, 8]. Вони широко застосовуються у різних галузях промисловості для вирішення багатьох завдань [16–22]: виробництва деревно-стружкових і деревно-волокнистих плит, виготовлення виробів будівельного призначення, брикетування сипких матеріалів, випуск композитів, виготовлення ливарних форм і стрижнів у ливарному виробництві та ін. По суті, в'язучі матеріали – це різновид клеїв, що використовуються для технічних потреб [3, 7, 8, 23].

Використання в'язучих матеріалів в різноманітних технологічних процесах виробництва зумовлено необхідністю вирішення сукупності багатьох питань, що стосуються не тільки техніки і технології, але і економіки, екології, безпеки праці і т. д., що визначають зміст багатогранності проблеми розробки, створення і застосування цього типу матеріалів. Технічний аспект цієї проблеми визначається складністю і різноманітністю процесів, в яких бере участь в'язучий матеріал на етапах свого життєвого циклу, на якому піддається різним діям і зазнає множинних



## Проблеми технології форми

фазових перетворень – від об'ємного рідкого (як правило) стану до газифікації в процесі термодеструкції на етапі заливки форм у ливарному виробництві [24, 25].

На ливарних підприємствах в'язучі матеріали – це визначальний компонент технологічного процесу, від якого залежать кінцеві показники роботи ливарного виробництва (рисунок), а саме: якість литва – безпосередньо від якості ливарної форми і вживаних ливарних стрижнів; технічні і технологічні можливості ливарної технології (складність відливань по геометрії поверхні, по конструкції, за матеріалом – чавун, сталь, кольорові сплави) – безпосередньо від якості і властивостей ливарної форми і вживаних ливарних стрижнів [11, 22, 24]; економічні показники роботи підприємства в цілому, оскільки в структурі собівартості литва вартість в'язучих матеріалів займає одне з провідних місць [7, 11]; санітарно-гігієнічні умови праці в ливарному цеху визначаються саме станом токсикологічних властивостей в'язучих матеріалів [9, 10, 11]; екологічний стан виробництва в цілому визначається видом вживаного в даній технології в'язучого матеріалу, оскільки саме ці матеріали є головним джерелом, що визначає і формує головні погрози навколишньому середовищу за якістю викидів, а це речовини першого і другого класів небезпеки [9, 10, 11, 14, 15].

Перераховане свідчить про значимість в'язучих матеріалів у технологічних процесах ливарного виробництва. Зважаючи на це, для глибшого розуміння актуальності порушеного питання доцільно детальніше розглянути деякі з приведених аспектів.



Схема впливу в'язучих матеріалів, вживаних у ливарному виробництві, на основні аспекти його роботи

*Якість литва* – це комплексний показник, що характеризує відповідність відливаних критеріям якості, вказаних у технологічних регламентах (ТУ, стандарти) на виробництво даного виду литва, як правило, це чистота поверхні відливання і її розмірна точність. Відповідно до доведених і загальновідомих постулатів класиків ливарного виробництва, таких як Берг П. П., Гуляев Б. Б., Куманін І. Б. і Лясс А. М. [3, 25], саме ці показники якості відливань формуються і однозначно зумовлюються параметрами якості ливарної форми. Перш за все, вони визначаються точністю геометрії її робочих поверхонь, податливістю, протипригарними характеристиками, газоутворюючою здатністю і т. д., тобто показниками, які, у свою чергу, забезпечуються якістю в'язучих матеріалів, застосованих при виготовленні піщаної ливарної форми або стрижня. Слід враховувати масштабність застосування подібних технологій в сучасній ливарній індустрії, а саме те, що близько 80 % усіх відливань в Україні проводиться в разових піщаних формах з використанням в'язучих матеріалів, а інша частина технологій у спеціальних способах литва широко застосовують піщані стрижні. Тому масштаби значущості і домінуючої ролі в'язучих матеріалів у забезпеченні якості вироблюваного литва набувають особливого звучання, а проблематика, пов'язана з їх вдосконаленням і розробкою нових в'язучих матеріалів, не перестає бути актуальною у всі часи. Це підтверджується великою кількістю наукових публікацій, присвячених цим питанням [1, 8, 22, 24]. У контексті забезпечення якості литва при застосуванні сумішей на основі ЛСТ, спираючись на величезний накопичений досвід їх використання, можна говорити про їх хорошу технологічність, але істотним недоліком у виробленні якості відливань є низька в'язуча здатність і нестабільність властивостей. Як показано в роботах низки авторів, саме це є головною причиною, через що матеріал обмежений у застосуванні в ливарному виробництві, але є перспективним для розробки, особливо в даний час.

*Технічні і технологічні можливості* ливарної технології, перш за все, технології литва в піщані форми, також багато в чому визначаються показниками якості вживаних в'язучих матеріалів. Саме вони визначають такі показники, як механічна міцність, податливість стрижня або форми, їх стійкість до термічної напруги, гідродинамічних ударів, здатність формувати якісні поверхні і необхідні геометричні форми відливання, що у свою чергу впливає на можливості використання того або іншого виду сплавів, складність конструкції відливання та ін. [7, 24, 25].

Таким чином, важливим є те, що ливарний в'язучий матеріал формує технічні і технологічні можливості та обмеження даного технологічного процесу, а значить розширення технологічних можливостей в'язучих матеріалів за рахунок покращення їх показників якості, що безпосередньо пов'язано з розширенням технологічних можливостей виробництва литва. В зв'язку з цим, актуальним є пошук тих в'язучих матеріалів, які б мали розширений спектр технологічних можливостей та були б більш універсальними і могли застосовуватися для виробництва виливків з різноманітних сплавів з різним рівнем складності при забезпеченні заданої чистоти поверхні. Подібні завдання вирішувалися у низці сучасних робіт, присвячених розширенню технологічних можливостей ЛСТ.

У історичній ретроспективі проблема розробки і створення ефективних в'язучих матеріалів для ливарного виробництва не втрачала своєї актуальності. Про це свідчить безліч наукових праць в цій сфері, які стали наразі класикою технічної літератури з даної проблематики, а саме роботи Берга П. П., Гуляева Б. Б., Лясса А. М., Куманіна І. Б., Жуковського С. С. [2, 4, 5, 11, 25], присвячені різноманітним в'язучим матеріалам, і Дорошенка С. П., Семіка А. П., Васина Ю. П. – висвітлюють безпосередньо лігносульфонатні ливарні в'язучі матеріали [1].

Темі вдосконалення існуючих в'язучих матеріалів і розробці нового їх стану якості присвячено безліч наукових статей і в даний час. Актуальним, як і раніше, є питання пошуку ефективних технічних рішень по проблемах використання ЛСТ, про що свідчать численні публікації в науковій літературі. Як правило, сучасні статті порушують питання вдосконалення застосування тих або інших в'язучих матеріалів в конкретних техноло-

гічних процесах лиття. Проблематика, пов'язана з лігносульфонатними матеріалами, в роботах українських авторів звучить рідше, оскільки основним виробником ЛСТ є Російська Федерація. Державні кордони створюють «ефект відлякування», проте лігносульфонатні матеріали через величезну кількість їх позитивних якостей, а значить і перспективності, не втратили привабливості і для вітчизняних підприємств. Це означає, що у разі розробки ефективних способів усунення перерахованих обмежень ЛСТ (нестабільності властивостей і низької в'язучої здатності), цей матеріал можна розглядати як сировину для створення потенційно нових ливарних в'язучих матеріалів з новим рівнем споживчих властивостей. Володіння подібними технологіями трансформації властивостей ЛСТ може відкрити можливість купувати, обробляти і продавати їх, але вже як принципово новий ливарний в'язучий матеріал для ливарних і металургійних підприємств. Він може бути затребуваним та конкурентним в тій же Росії, Китаї та Індії, використовуватися на ливарних підприємствах цих країн, тобто можливо експортувати вже новий в'язучий матеріал, створений на основі ЛСТ, до цих країн, як це роблять всі розвинені країни світу.

У даний час через причини економічного характеру інтенсивність дослідницьких робіт в Україні по лігносульфонатній групі матеріалів значно знизилася, хоча проблеми розробки нових високоефективних в'язучих матеріалів є актуальними для України ще більшою мірою, ніж раніше.

Перш за все, це обумовлено впливом двох чинників: по-перше, різке зростання цін на групу в'язучих матеріалів, для яких первинною сировиною служить нафта та її похідні, призвело до того, що стало економічно невигідно використовувати багато традиційно вживаних на ливарних підприємствах України в'язучих матеріалів [7, 22]; по-друге, значне посилення екологічних вимог до виробництва виявило принципову неможливість застосування багатьох традиційних матеріалів унаслідок безпосередньої їх токсичності або токсичності продуктів, що утворюються при їх використанні. Відомо, що через свою природу в'язучі матеріали у багатьох випадках виявляються джерелами найбільш шкідливих викидів у навколишнє середовище, і, як правило, це речовини першого і другого класів небезпеки [9, 10], тобто саме вони є чинником екологічної загрози та зниження потенціалу виробництва за цих умов.

Розглянемо сучасні екологічні вимоги до процесів лиття. Слід зазначити, що екологічний імператив на тлі сучасних тенденцій функціонування і розвитку виробництва набуває все більшого значення.

Технологічні процеси виготовлення виливків характеризуються великим числом операцій, при виконанні яких виділяються пил, аерозолі і гази [10]. Пил та різні гази утворюються при приготуванні і регенерації формувальних і стрижньових сумішей, висушуванні ливарних форм та стрижнів, плавці ливарних сплавів у різних плавильних агрегатах, випуску рідкого металу з печі, позапічної обробці його і заливці у форми, при кристалізуванні виливків, на ділянці вибивки виливків, в процесі обрубання і очищення литва, при підготовці і транспортуванні початкових сипких матеріалів. У повітряному середовищі ливарних цехів, окрім пилу, у великих кількостях знаходяться оксиди вуглецю, вуглекислий і сірчистий гази, азот і його оксиди, водень, аерозолі, що містять особливо токсичні речовини, атмосфера ливарного цеху насичена оксидами заліза і марганцю, парами вуглеводнів і ін. Джерелами забруднень є плавильні агрегати, печі термічної обробки, сушилка для форм, стрижнів і ковшів, безпосередньо ливарні форми і стрижні в процесі їх виготовлення і застосування і т.п. [9].

Одним з критеріїв безпеки є оцінка рівня запахів. На атмосферне повітря доводиться більше 70 % всіх шкідливих викидів ливарного виробництва, при цьому особливо впливають саме елементи технології, що використовують ливарні в'язучі матеріали [10].

При виробництві однієї тонни литва зі сталі і чавуну виділяється близько 50 кг пилу, 250 кг оксидів вуглецю, 1,5–2 кг оксидів сірки і азоту і до 1,5 кг інших шкідливих речовин (фенолу, формальдегіду, ароматичних вуглеводнів, аміаку, ціанідів). У водний

басейн надходить до 3 куб. м стічних вод і вивозиться у відвали до 6 т відпрацьованих формувальних сумішей [10].

Застосування при виготовленні стрижнів і форм органічних в'язучих призводить до значного виділення токсичних газів в процесі сушки і, особливо, при заливці металу. Залежно від виду в'язучого матеріалу, в атмосферу цеху можуть виділятися такі шкідливі речовини як аміак, ацетон, акролеїн, фенол, формальдегід, фурфурол, бензапірен і т. д. [9].

При виготовленні форм і стрижнів з тепловою сушкою і в оснащенні, що нагрівається, забруднення повітряного середовища токсичними компонентами можливо на всіх стадіях технологічного процесу: виготовленні сумішей, при сушці стрижнів і форм, при охолодженні їх після витягання з оснащення [9, 10, 15].

Звертає на себе увагу якість викидів, що утворюються, це речовини другого і першого класів небезпеки [10, 15]:

бензапірен (клас небезпеки – I) – канцерогенна речовина, що викликає генні мутації і ракові захворювання. Утворюється при неповному згоранні масляних ливарних в'язучих матеріалів. Бензапірену властива висока хімічна стійкість і добра розчинність у воді, поступове накопичення у місцях його генерації, де не здійснюється відповідної інтенсивної вентиляції виробничих приміщень;

оксиди азоту (клас небезпеки – II) – подразнюють дихальні шляхи і кровоносні судини;

формальдегід (клас небезпеки – II) – загальноотруйна речовина, що викликає подразнення шкіри і слизової оболонки;

бензол (клас небезпеки – II) – має наркотичну, частково судомну дію на центральну нервову систему; хронічне отруєння може привести до смерті.

фенол (клас небезпеки – II) – сильна отрута, має загальнотоксичну дію, може всмоктуватися в організм людини через шкірні покриви.

Очевидно, що все це в умовах ливарного виробництва формує несприятливий кумулятивний ефект комплексної дії, при якій шкідливий вплив кожного окремого компонента (пилу, газів, температури, вібрації, шуму) різко збільшується [10].

Примітним є показник умовної токсичності різних ливарних в'язучих матеріалів (табл. 1.) [15].

Під умовною токсичністю розуміють об'єм чистого повітря, який необхідно подати у робочу зону ливарного цеху, де йде утворення екологічно небезпечних токсичних речовин, щоб їх знешкодити, розбавивши їх до рівня гранично допустимих концентрацій, що можуть бути безпечними та характеризують стан робочої промислової зони.

Так, за даними низки робіт [9, 10, 15] видно, що лігносульфонатні в'язучі матеріали є найбільш екологічними порівняно з іншими органічними в'язучими матеріалами, причому цей показник характерний для всіх найбільш небезпечних технологічних етапів виробництва литва (виготовлення суміші, сушка, заливка, вибивка – див. табл. 1).

Особливо цей показник ілюструє відносну екологічну чистоту лігносульфонатних матеріалів порівняно з фенолформальдегідними смолами та масляними в'язучими.

Наведені показники умовної токсичності органічних в'язучих матеріалів, що використовуються на ливарних підприємствах (табл. 1), підтверджуються різними інформаційними джерелами протягом останніх десятиліть (табл. 2).

Проведемо оцінку екологічних характеристик нових в'язучих композицій з ЛСТ.

При всій актуальності питання в науковій літературі все ще мало інформації про склад токсичних газівиділень від використання в'язучих матеріалів та сумішей на їх основі, вживаних в технологічних процесах лиття, хоча останнім часом почала з'являтися серйозна довідкова література, присвячена даній проблемі [9, 10], і відповідні наукові роботи [13].

Як було показано, першими в рейтингу забруднювачів навколишнього середовища в машинобудівному виробництві є формувальні і стрижньові відділення ливарних цехів. Причина полягає в тому, що саме на цих технологічних ділянках застосовуються матеріали, що представляють загрозу, як навколишньому середовищу, так і здоров'ю людини [9].

Такий технологічний устрій при нарощуванні виробництва литва неминуче при-

Умовна токсичність органічних в'язучих матеріалів,  
що використовуються на ливарних підприємствах [15]

| Вид органічних в'язучих матеріалів | Марка органічних в'язучих матеріалів                          | Умовна токсичність на один відсоток в'язучого матеріалу в суміші на етапах технології литва: |   |  |
|------------------------------------|---|--|---|--|
|                                    |   | приготування суміші  | структурування – сушка ливарних форм або стрижнів | залівка рідкого металу у ливарну форму |
| Технічні лігносульфонати (ЛСТ)     | ЛСТ марки А: при $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$            | –  | 0,8   | 53,1                                   |
|                                    | ЛСТ марки А: при $T = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$            | –  | 8,5   | –                                      |
| Масляні                            | КО  | –  | 78,6  | 223,2                                  |
|                                    | УСК   | –  | 72,9  | 208,0                                  |
|                                    | СКТ-11  | –  | 18,5  | 102,7                                  |
| Фенолоформальдегідні               | СФ-480  | 1,95   | 218,2   | 516,7                                  |
|                                    | Фенолоспирт   | 1,4  | 70,0  | 494,1                                  |
|                                    | СФ-015  | –  | 235,8   | 947,0                                  |
|                                    | СФ-262  | –  | 82,6  | 1404,0                                 |
| Карбамідоформальдегідні            | КФ-МТ   | –  | 111,0   | 758,8                                  |
|                                    | суміш КФ-МТ та 20%-й розчин сечовини та фенолоспирту (1: 1,5) | –  | 23,9  | 380,6                                  |
|                                    | суміш КФ-МТ та фенолоспирту                                   | –  | 118,4   | 354,3                                  |
| Фенолокарбамідоформальдегідні      | ТОЛ   | 0,44   | 161,4   | 1457,4                                 |
|                                    | ФМЛ   | 0,45   | 146,7   | 1402,0                                 |
| Карбамідо-фуранові                 | КФ-90   | 0,42   | 87,8  | 570,0                                  |
|                                    | Фуритол-107   | 0,416  | 91,5  | 765,2                                  |

веде до серйозних екологічних проблем в Україні, оскільки використання фенольних смол та масляних матеріалів несе потенційні загрози працівникам та довкіллю. Такий стан речей знижує потенціал підприємства, оскільки призводить до додаткових витрат, в той же час використання екологічно чистих в'язучих дозволить кардинально змінити ситуацію, оскільки при цьому з виробництва видаляється джерело витоку та генерування цих шкідливих викидів.

Таблиця 2

**Відображення показників токсичності органічних в'язучих матеріалів у фахових джерелах інформації**

| Рік видання | Джерело інформації  |
|-------------|---|
| 1987        | Литейные связующие в массовом производстве. Каталог / В. Л. Суворов, Р. И. Оглоблина, Е. С. Короваева и др. – Свердловск.: ВНИИ ОТ ВЦСПС, 1987. – 36 с. [15]                                      |
| 2001        | Экология литейного производства / под ред. А. Н. Болдина, С. С. Жуковского, А. Н. Поддубного, А. И. Яковлева, В. Л. Крохотина: Учеб. пособие для вузов. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2001. – 315 с. [9] |
| 2010        | Инженерная экология литейного производства. Учебное пособие /А. Н. Болдин, А. И. Яковлев, С. Д. Тепляков; под общ. ред. А. Н. Болдина. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с. [10]                  |

Очевидно, в умовах складного за практичною реалізацією ливарного виробництва виявляється несприятливий кумулятивний ефект комплексного чинника, при якому шкідлива дія кожного окремого компонента (пилу, газів, температури, вібрації, шуму) різко збільшується, тому ліквідація джерел забруднень покращить такий стан.

Неофіційна статистика по м. Луганську свідчить, що 67 % хронічних захворювань і 89 % онкозахворювань припадає на жителів безпосередньо прилеглих районів, де згруповані ливарні потужності і застосовуються екологічно небезпечні матеріали.

Приведені факти зумовлюють гостру необхідність розробки і застосування в'язучих матеріалів нового покоління, що відрізняються, насамперед, екологічністю. Потреба в таких матеріалах актуальна саме тепер, оскільки відкриваються можливості нарощування виробництва литва (розміщення замовлень з Німеччини і Франції на підприємствах України), що в умовах загальносвітової економічної кризи дасть додаткові робочі місця, підвищить ефективність економіки України, призведе до зростання потенціалу ливарних виробництв. Інакше ці замовлення будуть успішно розміщені в Туреччині або Китаї. Тому невід'ємним елементом успіху у вирішенні вказаної проблеми є розробка і застосування нових екологічно чистих і якісних ливарних способів їх обробки ЛСТ для збільшення їх показників міцності.

З огляду на вищезазначене, доцільно розглянути з точки зору екології представлену розробку, показники газотворності і токсичності запропонованих сумішей. Робота здійснювалася в токсикологічній лабораторії Інституту промислової екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Для експериментів приймалися модельні склади стрижньових сумішей для виробництва чавунного фасонного литва.

Вони моделювали ситуацію сушки стрижнів при 300 °С і заливки розплавленого металу при 1000 °С. Результати проведених досліджень представлено в табл. 3.

Пропоновані склади сумішей (склади 4–6) містять мінімальну кількість КО, яке необхідне для забезпечення її технологічності.

Результати показують, що використання запропонованого складу суміші з пониженим вмістом в'язучих матеріалів, а головне, скороченням застосування головного джерела викидів токсинів – в'язучого КО, призвело до істотного зниження об'ємів валових викидів.

Викиди за всіма показниками скоротилися до рівнів гранично допустимих концентрацій (ГДК) (табл. 4).

Зафіксовано зниження шкідливих викидів по всіх контрольованих компонентах: формальдегіду, акролеїну, окислу вуглецю, сірчистому ангідриду, але головне – бензапін, викид якого перевищував ГДК робочої зони в 4,5 рази, скоротився до рівня ГДК.

Екологічна ефективність була оцінена по скороченню валового викиду кожного з компонентів та приведена в табл. 5.

**Склади ливарних сумішей, що досліджувалися, та їх характеристики міцності**

| Номер складу суміші | Перелік складу компонентів суміші | Кількісний склад сумішей |     |     |     |     |     |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     |                                   | 1                        | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| 1                   | Пісок кварцовий 1К02Б, %          | 100                      | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 2                   | ЛСТ, %                            | 6                        | –   | 4,5 | –   | –   | –   |
| 3                   | ЛСТ– НПАР, %                      | –                        | 6   | –   | 4,5 | 4,0 | 5,0 |
| 4                   | КО, %                             | –                        | –   | 3,5 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 5                   | Міцність при розриві, МПа         | 0,4                      | 2,9 | 1,9 | 2,1 | 1,9 | 2,7 |

Таким чином, в результаті проведеного аналізу встановили, що в'язучі матеріали є визначальним елементом у багатьох технологічних процесах лиття.

Вони мають вирішальне значення у формуванні якості литва, багато в чому визначають його собівартість, технологічні можливості тих або інших ливарних процесів.

Будучи складними по хімічному складу комплексами, що включають потенційно небезпечні речовини, в'язучі матеріали в ливарному виробництві зумовлюють не тільки санітарно-гігієнічні умови праці в ливарних цехах, але і відповідають за якісні характеристики екологічного стану всього виробництва. Саме вони є головним джерелом викидів в атмосферу високотоксичних речовин першого і другого класів небезпеки (бензапірен, формальдегід, акролеїн і т. д.).

Все це в сукупності зумовлює актуальність проблеми пошуку альтернативних рішень – в'язучих матеріалів, які б, забезпечуючи технічно необхідний рівень вимог у даній технології лиття, відповідали вимогам екологічної безпеки, та були б прийнятними за економічними показниками – недорогими, з відсутністю об'єктивних тенденцій до здорожчання.

Такою альтернативою могли б стати лігносульфонатні матеріали: екологічні, недорогі і, що істотно, не схильні до здорожчання, оскільки первинним джерелом їх виробництва служать продукти переробки рослинної сировини – природного поновлюваного ресурсу. На сучасному ринку в'язучих цей клас матеріалів представлено технічними лігносульфонатами (ТУ 13-0281036-029-04), проте їх застосування як ливарного в'язучого в стримується незадовільністю показників якості (низька здатність, що в'яже, нестабільність властивостей, висока гігроскопічність стрижнів і форм виготовлених на основі ЛСТ) щодо технічних вимог багатьох технологій ливарного виробництва.

Суперечність між комплексом перерахованих позитивних характеристик і властивостей ЛСТ, з одного боку, і незадовільність деяких технологічних показників, насамперед характеристик міцності, з іншого – визначає головну проблему їх поширення на підприємствах лиття.

Доцільно пильніше розглянути ЛСТ як об'єкт технології та чинник підвищення потенціалу підприємств ливарної галузі.

Встановлено, що на основі створених ливарних в'язучих матеріалів розроблено склади стрижневих сумішей, що дозволяють знизити об'єм токсичних газових викидів порівняно з сумішами на основі відомих і широко вживаних в'язучих матеріалів типу КО і УСК в 2,7–14 разів, що дозволило звести вміст шкідливих речовин у газових викидах до рівня ГДК.

Це стало можливим за рахунок використання у складі суміші екологічно чистих в'язучих матеріалів на основі ЛСТ з підвищеними показниками міцності.

**Таблиця 4**  
**Характеристики газотворення та токсичності сумішей на основі застосування композицій ЛСТ – НІАР**

| Показники токсичності модельних складів сумішей для виробництва фасонного чавунного литва                                     | Номер складу суміші відповідно до таблиці 3 |                   |                   |                                      |         |         |         |
|---|---|-------------------|-------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|
|   | 1   | 2                 | 3                 | 4                                    | 5       | 6       |         |
| Питома газотворність суміші, см <sup>3</sup> /г %, що контролювалася при 300 та 1000 °С                                       | 300 °С                                      | 1,29              | 1,81              | 1,19                                 | 1,00    | 1,22    |         |
|   | 1000 °С                                     | 2,43              | 2,41              | 4,25                                 | 2,08    | 1,90    |         |
| токсикологічні характеристики досліджених складів в'язучих композицій (токсичність), мг/м <sup>3</sup>                        |   |                   |                   |                                      |         |         |         |
| Токсини   | умови ви-<br>судування                      | 1                 | 2                 | 3                                    | 4       | 5       | 6       |
| Формальдегід (клас небезпеки – 2, ГДК <sub>пр</sub> – 0,5 мг/м <sup>3</sup> ), СН <sub>2</sub> = О                            | 300 °С                                      | 0,190             | 0,193             | 0,819                                | 0,304   | 0,281   | 0,311   |
|   | 1000 °С                                     | –                 | –                 | –                                    | –       | –       | –       |
| Акролейн (клас небезпеки – 2, ГДК <sub>пр</sub> – 0,2 мг/м <sup>3</sup> ), СН <sub>2</sub> = СНСНО                            | 300 °С                                      | 0,07              | 0,09              | 0,69                                 | 0,14    | 0,11    | 0,17    |
|   | 1000 °С                                     | –                 | –                 | –                                    | –       | –       | –       |
| Окис углецю (клас небезпеки – 3, ГДК <sub>пр</sub> – 20 мг/м <sup>3</sup> ), СО   | 300 °С                                      | 1,10              | 1,29              | 23,86                                | 11,25   | 10,29   | 11,22   |
|   | 1000 °С                                     | 6,45              | 6,67              | 48,01                                | 16,82   | 13,13   | 17,00   |
| Сірчистий ангідрид (клас небезпеки – 3, ГДК <sub>пр</sub> – 10 мг/м <sup>3</sup> ), SO <sub>2</sub>                           | 300 °С                                      | –                 | –                 | –                                    | –       | –       | –       |
|   | 1000 °С                                     | 3,2               | 3,2               | 22,7                                 | 6,3     | 6,0     | 6,2     |
| Бензапірен* (клас небезпеки – 1, канцероген, ГДК <sub>пр</sub> – 0,00015 мг/м <sup>3</sup> ), С <sub>20</sub> Н <sub>12</sub> | 300 °С                                      | (не зафік-совано) | (не зафік-совано) | 0,00067 (перевищення ГДК в 4,5 рази) | 0,00007 | 0,00007 | 0,00007 |

Примітка: \* як правило, в робочій зоні ливарних цехів, що використовують у своїх технологічних процесах в'язучий КО, спостерігається 10–15-крат-не перевищення ГДК, що пояснюється ефектом накопичення і більшою генерацією бензапірену внаслідок не тільки процесів сушки стрижнів або форм, але і операцій заливки розплаву рідкого металу і вибивки виливків з форм, що не враховувалося в даному експерименті



**Екологічна ефективність що досягається за рахунок зменшення використання в'язучого КО, що є джерелом токсичних газовиділень при сушці стрижнів**

| Токсини  | Базовий варіант складу суміші (ЛСТ – 4,5, до 4,0 %) | Пропонований варіант складу суміші (ЛСТ – 4,0, до 0,8 %) | Ефективність, зниження викидів, рази |
|--|---|--|--------------------------------------|
| Формальдегід (клас небезпеки – 2, ГДК <sub>рз</sub> – 0,5 мг/м <sup>3</sup> ), CH <sub>2</sub> =O, мг/м <sup>3</sup>                             | 0,83 – перевищення ГДК в 1,66 рази                  | 0,31   | 2,7                                  |
| Акролеїн (клас небезпеки – 2, ГДК <sub>рз</sub> – 0,2 мг/м <sup>3</sup> ), CH <sub>2</sub> =CHCHO, мг/м <sup>3</sup>                             | 0,77 – перевищення ГДК у 3,85 рази                  | 0,14   | 5,5                                  |
| Оксид вуглецю (клас небезпеки – 3, ГДК <sub>рз</sub> – 20 мг/м <sup>3</sup> ), CO, мг/м <sup>3</sup>   | 30,21 – перевищення ГДК в 1,51 рази                 | 10,49  | 2,9                                  |
| Бензапірен (клас небезпеки – 1, канцероген, ГДК <sub>рз</sub> – 0,00015 мг/м <sup>3</sup> ), C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> , мг/м <sup>3</sup> | 0,00098 – перевищення ГДК у 6,53 рази               | 0,00007  | 14                                   |

**Список літератури**

1. Шинский О.И. Экология, техника и экономика литейного производства Украины // Инвестиционный бюллетень 3-го и Международного промышленного инвестиционного форума, Запорожье: изд. Торгово-промышленная палата. 2012. – С. 34–36.
2. Шинский И. О., Шинский О. И. Технология, экономика и экология литейного производства Украины. URL: [http://www.lgm.com.ua/press\\_publications.aspx](http://www.lgm.com.ua/press_publications.aspx).
3. Формовочные процессы / Б. Б. Гуляев, О. А. Корнюшкин, А. В. Кузин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. дтд-ние, 1987. – 264 с.
4. Берг П. П. Формовочные материалы. – М.: Машгиз, 1963. – 408 с.
5. Берг П.П. Формовочные материалы и смеси. – М.: Машиностроение, 1944. – 156 с.
6. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
7. Формовочные материалы и смеси / С. П. Дорошенко, В. П. Авдокушин, К. Русин, И. Мацишек. – К.: Выща шк., 1990; Прага: СНТЛ, 1990. – 415 с.
8. Жуковский С. С. Прочность литейной формы. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
9. Экология литейного производства / под ред. А. Н. Болдина, С. С. Жуковского, А. Н. Поддубного, А.И. Яковлева, В.Л. Крохотина: Учеб. пособие для вузов. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2001. – 315 с.
10. Инженерная экология литейного производства. Учебное пособие / А. Н. Болдин, А. И. Яковлев, С. Д. Тепляков; под общ. ред. А. Н. Болдина. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.
11. Формовочные материалы и технология литейной формы: Справочник / С. С. Жуковский, Г. А. Анисович, Н. И. Давыдов и др.; под общ. ред. С. С. Жуковского. – М.: Машиностроение, 1993. – 432 с.
12. Семик А. П. Формовочные и стержневые смеси со связующими материалами на основе технических лигносульфонатов: дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1987. – 225 с.
13. Евстифеев Е. Н. Разработка малотоксичных связующих материалов и ресурсосберегающих смесей на их основе для усовершенствования технологий изготовления литейных стержней и форм при производстве отливок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Ростов-на Дону, 2007. – 20 с.
14. Платонов Б.Н., Шапошников Ю.К., Маслеева О.В., Степанова М.Н. Предупреждение канцерогенных ситуаций в литейном производстве // Литейное производство. – 1989. – № 2. – С. 26–27.

15. Литейные связующие в массовом производстве. Каталог / Б. Л. Суворов, Р. И. Оглоблина, Е. С. Коравоев и др. – Свердловск.: ВНИИОТ ВЦСПС, 1987. – 36 с.
16. Связующие для производства древесно-стружечных плит. URL: [http://ap50-mebel.at.ua/publ/materialy\\_v\\_mebelnom\\_proizvodstve/chto\\_takoe\\_dsp\\_dvp\\_mdf\\_shpon/4-1-0-3](http://ap50-mebel.at.ua/publ/materialy_v_mebelnom_proizvodstve/chto_takoe_dsp_dvp_mdf_shpon/4-1-0-3).
17. Свинороев Ю. А. Новый связующий материал на основе технических лигносульфонатов для технологии изготовления угольных брикетов // Материалы VI международной научно-практической конференции «Проблемы горного дела и экологии горного производства» 13–14 мая 2011 г., Антрацит. – Донецк: Донбасс, 2011. – С. 174–180.
18. Строительные вяжущие материалы. URL: <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-32/22.htm>.
19. Древесно-полимерные композиты: связующие материалы, армирующие элементы. Проблемы и перспективы. URL: <http://www.dpk-deck.ru/page/sostoyanie-proizvodstva.html>.
20. Эльберт К.И. Использование лигносульфонатов в производстве древесно-стружечных плит // Тезисы доклада 7-й всесоюзной конференции по химии и использованию лигнина. – Рига: Ин-т хим. древесины латвийской ССРС, 1987. – С. 25–26.
21. Агеев А. Я., Мальцев Г. И. Исследование влияния лигносульфонатов на физико-механические показатели асбесто-картона // Тезисы доклада 7-й всесоюзной конференции по химии и использованию лигнина. – Рига: Ин-т хим. древесины латвийской ССРС, 1987. – С. 28–29.
22. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия. Справочник / Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 507с.
23. Берг П. П. Основы учения о формовочных материалах. – М.: Машиностроение, 1948. – 340 с.
24. Михайлов А. М., Бауман Б. В., Благов Б. Н. и др. Литейное производство: учебник для металлургических специальностей вузов. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
25. Аксенов П. Н. Технология литейного производства. – М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1957. – 664 с.

Одержано 23.01.2019

## References

1. Shinsky, O. I. (2012) Ecology, technique and economy of foundry production in Ukraine. Investment newsletter the 3rd International investment and industrial forum, Kiev: Izd. The chamber of Commerce, pp. 34–36 [in Russian].
2. Shinsky I. O., Shinsky O. Technology, economy and ecology of foundry production of Ukraine. URL: [www.lgm.com.ua/press\\_publications.aspx](http://www.lgm.com.ua/press_publications.aspx) [in Russian].
3. Gulyaev, B. B., Gornushkin, O. A., Kuzin, A. V. (1987) Molding processes. L.: Mashinostroenie, 264 p. [in Russian].
4. Berg, P. P. (1963) Molding materials. Moscow: Mashgiz, 408 p. [in Russian].
5. Berg, P. P. (1944) Molding materials and mixtures. Moscow: Mashinostroenie, 156 p. [in Russian].
6. URL: [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua) (State statistics service of Ukraine).
7. Doroshenko, S. P., Avdokushin, V. P., Rusin, K., Matishak, I. (1990) Molding materials and mixtures. K.: Vyshcha shkola; Prague: SNTL, 415 p. [in Russian].
8. Zhukovsky, S. S. (1989) Strength of the mold. Moscow: Mashinostroenie, 288 p. [in Russian].
9. Boldin, A. N., Zhukovsky, S. S., Poddubny, A. N., Yakovlev, A. I., Krokhotin, V. L. (eds) (2001) Ecology foundry. Proc. the manual for high schools. Bryansk: Publishing house of BSTU, 315 p. [in Russian].
10. Boldin, A. N., Yakovlev, I. A., Teplyakov, S. D. (2010) Engineering ecology of foundry. Textbook. Moscow: Mashinostroenie, 352 s. [in Russian].
11. Zhukovskiy, S. S., Anisovich, G. A., Davydov, N. I. et al. (1993) Molding materials and technology mold: Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 432 p. [in Russian].
12. Semik, A. P. (1987) Molding and core mixture with the binder materials on the basis of technical lignosulfonates. Dissertation of doctor of technical sciences. Kiev, 225 p. [in Russian].
13. Evstifeev, E. N. (2007) The development of low-toxic binding materials and energy-saving mixes on their basis for the improvement of manufacturing techniques of foundry cores and molds for castings: avtoref. dys. ... doct. tech. nauk: Rostov-on-don, 20 p. [in Russian].
14. Platonov, B. N., Shaposhnikov, Yu. K., Masleeva, O. V., Stepanova, M. N. (1989) Prevention of carcinogenic situations in foundry. Foundry, no. 2, p. 26–27 [in Russian].

15. *Suvorov, B. L., Ogloblina, R. I., Karavaev, E. S. et al.* (1987) Casting binders in mass production. Sverdlovsk.: VNIOT ALL, 36 p. [in Russian].
16. Binders for manufacturing wood chipboards. URL: ap50-mebel.at.ua/publ/materialy\_v\_mebelnom\_proizvodstve/chto\_takoe\_dsp\_dvp\_mdf\_shpon/4-1-0-3.
17. *Svinarov, Y. A.* (2011) New binding material based on technical lignosulfonates for manufacture of coal briquettes. Proceedings of the VI international scientific and practical conference «Problems of mining and mining ecology» 13–14 may 2011, Anthracite. Donetsk: Donbass, p. 174–180 [in Russian].
18. Building binders. URL: www.bibliotekar.ru/spravochnik-32/22.htm.
19. Wood-polymer composites: bonding materials, reinforcing elements. Problems and prospects. URL: www.dpk-deck.ru/page/sostoyanie-proizvodstva.html.
20. *Elbert, K. I.* (1987) The use of lignosulfonates in the production of chipboards. Theses of the report of the 7th all-Union conference on chemistry and use of lignin. Riga: I-t chem of wood of the Latvian USSR, pp. 25–26 [in Russian].
21. *Ageev, A. I., Maltsev, G. I.* (1987) Investigation of the effect of lignosulfonate on the physical and mechanical properties of asbestos cardboard. Theses of the report of the 7th all-Union conference on chemistry and use of lignin. Riga: I-t chem of wood of the Latvian USSR, pp. 28–29 [in Russian].
22. *Boldin, A. N., Davydov, N. I., Zhukovsky, S. S. et al.* (2006) Casting molding materials. Molding, core mixtures and coatings. Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 507 p. [in Russian].
23. *Berg, P. P.* (1948) Fundamentals of the doctrine of molding materials. Moscow: Mashinostroenie, 340 p. [in Russian].
24. *Mikhailov, M. A., Bauman, B. V., Blagov, B. N. et al.* (1987) Foundry: textbook for metallurgical specialties of universities. 2nd ed., pererab and dop. Moscow: Mashinostroenie, 256 p. [in Russian].
25. *Aksenov, P. N.* (1957) Technology of foundry production. Moscow: GNTI Engineering literature, 664 p. [in Russian].

Received 23.01.2019

**Ю. О. Свинороев**, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [desna.us@yandex.ru](mailto:desna.us@yandex.ru)

Камянский технологический институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М. И. Платова, Камянск-Шахтинский, Россия

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛИТЕЙНОЙ ОТРАСЛИ

Традиционно основной заготовительной базой машиностроительной отрасли является литейное производство. На долю его продукции в структуре ее потребностей приходится от 40 до 60 %, при этом доля литья, получаемого в песчаных разовых формах, составляет около 80 %. Такое положение подчеркивает важность и значимость обеспечения соответствующего качества литейной формы и соблюдения, в этих условиях, экологической безопасности в литейном производстве в целом. В результате проведенного исследования установили, что связующие материалы являются определяющей составляющей в процессах литья. Эта составляющая обуславливает не только технологические возможности процесса производства, но и комплекс вопросов, возникающих на разных этапах его осуществления: себестоимость процесса, санитарно-гигиенические условия труда персонала литейного цеха, экологическое состояние в местности, где расположено предприятие. Именно связующие соединения являются главными источниками выбросов в атмосферу высокотоксичных веществ первого и второго классов опасности (бензапирен, формальдегид, акролеин и т. д.). Альтернативой доминированию синтетических смол, в современных условиях развития литейного производства, могли бы стать лигносульфонатные материалы: экологические, недорогие и, что существенно, не склонные к удорожанию, поскольку первичным источником их производства служат продукты переработки растительного сырья – природного возобновляемого ресурса. На современном рынке связующих этот класс материалов представлен техническими лигносульфонатами (ЛСТ) (ТУ 13-0281036-029-04), однако их применение как литейного связующего сдерживается неудовлетворительностью показателя качества (низкая связующая способность, нестабильность свойств, высокая гигроскопичность стержней и форм, изготовленных на основе ЛСТ) относительно технических требований многих технологий литейного производства. На основе созданных литейных связующих материалов разработаны составы стержневых смесей, позволяющие снизить объем токсичных газовых выбросов по

сравнению со смесями на основе известных и широко применяемых связующих материалов типа КО и УСК в 2,7–14 раз, что позволило понизить содержание вредных веществ в газовых выбросах до уровня предельно допустимых концентраций (ПДК). Это стало возможным за счет использования в составе смеси экологически чистых связующих материалов на основе ЛСТ с повышенными показателями прочности.

**Ключевые слова:** литейная область, инновационные технологии, связующие материалы, растительное сырье, связующая способность, экологическая безопасность, экологическая эффективность.

**Yu. A. SVINOROEV**, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,  
e-mail: [desna.us@yandex.ru](mailto:desna.us@yandex.ru)

Kamensky Technological Institute (branch) of South Russian State Polytechnic University named after M. I. Platova, Kamyansk-Shakhtinskiy, Rossiya

### **INNOVATIVE TECHNOLOGY BASED ON THE USE OF NEW ENVIRONMENTALLY FRIENDLY BINDING MATERIALS FOR THE FOUNDRY INDUSTRY**

*Traditionally the main procurement basis of machine building industry is the foundry. The share of its products in the structure of its needs accounts for 40 to 60 %, while the share of castings produced in sand single forms is about 80 %. This situation determines the importance and significance of ensuring the appropriate quality of the mold and compliance, according to these conditions, environmental safety in the foundry as a whole. As a result of the study it is found that the binding materials is the determining component in the casting process. This component determines not only the technological capabilities of the production process, but also a set of issues arising at different stages of its implementation: the cost of the process, sanitary conditions of work of the personnel of the foundry, ecological state in the area where the enterprise is located. The binding compounds are the main sources of emissions into the atmosphere of highly toxic substances of the first and second classes of danger (benzapyrene, formaldehyde, acrolein and so on). An alternative to the dominance of synthetic resins, in modern conditions of the development of foundry production, there are lignosulfonate materials (LST): environmentally friendly, not expensive and, significantly, are not prone to rise in price, since the primary source of their production are the products of processing of plant raw materials – a natural renewable resource. In today's market of binders, this class of materials is represented by technical lignosulfonates, but their use as a casting binder is not constrained satisfactory quality indicators (low binding capacity, instability of properties, high hygroscopicity of cores and molds made on the basis of LST), with respect to the technical requirements of many technologies of foundry production. On the basis of the created casting binders compositions of core mixtures have been developed to reduce the volume of toxic gas emissions in comparison with mixtures based on known and widely used binders such as КО and УСК in 2,7–14 times, which allowed to introduce the content of harmful substances in gas emissions to the level of maximum allowed concentration. This was made possible by the use of a mixture of environmentally friendly binder materials based on LST with increased strength.*

**Keywords:** foundry industry, innovative technologies, binding materials, vegetable raw materials, binding ability, environmental safety, environmental efficiency.

**В. С. Дорошенко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,  
e-mail: doro55v@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

## **РЕАЛІЗАЦІЯ ВНУТРІШНІХ РЕЗЕРВІВ ПІЩАНОЇ ФОРМИ МЕТОДАМИ ПОДВІЙНОГО ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЬНО- ФОРМУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСАХ**

*Актуальність розвитку технології піщаної форми як важливої складової ливарних процесів обґрунтована тим, що в таких формах виробляють до 80 % тоннажу виливків, включно зі спеціальними видами лиття в такі форми. Потужності обладнання, площі, персонал ливарних цехів на 60–70 % відносяться до процесів формовки, включно із сумішоприготуванням та виготовленням стрижнів. Забруднення «з вини форми» може сягати 80 %. Значний потенціал для розвитку технології ливарної форми має удосконалення процесів лиття металу в форми з сипких піщаних сумішей без в'язучого, зокрема за моделями, що газифікуються. Представлено концепцію удосконалення процесів лиття металу в форми з сипкого піску методом подвійного застосування модельно-формувальних матеріалів та наведено приклади такого застосування. Використання сипких формувальних сумішей для швидкого охолодження виливка, включно з термообробкою, здатне зміцнювати його метал і скорочувати тривалість охолодження виливків у формі, що призводить до збільшення продуктивності ливарних цехів без нарощування кількості опочної оснастки та сипкого наповнювача форми. Способи ізотермічного гартування (аустемперінг) з гарячого стану виключають нагрівання з витримкою для аустенізації виливків із залізобуглецевих сплавів, чим скорочують час і енергоємність отримання продукції з бейнітною структурою і що, по суті, відповідає концепції реалізації внутрішніх резервів як піщаної форми, так і литого металу. Ливарні льодяні моделі не лише придатні до відтворення виливків з високою точністю, але й приймають участь у зміцненні піщаних сумішей по методу холодного тверднення шляхом утворення в них кристалогідратів, а також сприяють екологічності і економічності ливарних процесів шляхом заміни типових органічних модельно-формувальних матеріалів на неорганічні.*

**Ключові слова:** піщана форма, формувальний матеріал, сипкий пісок, ізотермічне гартування, внутрішні резерви, крижані моделі, подвійне використання.

**А**ктуальність розвитку технології піщаної форми як важливої складової ливарних процесів обґрунтована тим, що в таких формах виробляють до 80 % тоннажу виливків, включно зі спеціальними видами лиття, що застосовують піщану форму. Потужності обладнання, площі і персонал типового ливарного цеху на 60–70 % відносяться до процесів формування, включаючи сумішоприготування та виготовлення стрижнів. Забруднення «з вини форми» може сягати до 80 % всіх викидів ливарного цеху.

За умов, що серійний випуск формувального обладнання в Україні зупинено, актуальним напрямком розвитку технології ливарної форми є удосконалення процесів лиття металу в форми з сипких піщаних сумішей без в'язучого, зокрема за моделями, що газифікуються (ЛГМ). У цілому, піщана суміш при ЛГМ складається зі свіжого, оборотного і терморегенованого пісків, її зміцнюють вакуумуванням форми. А формувальне обладнання для ЛГМ (на відміну від громіздкого потужного обладнання для поширених традиційних формувальних процесів) доступне для виготовлення невеликим машинобудівним заводом і загалом не складніше від такого, що на багатьох заводах з виробництва будівельних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та досвіду застосування в ливарних цехах підтверджує переваги ЛГМ: віброущільнення сипкої суміші протягом 1–3 хв., відсутність складного обладнання для формовки і вибивки, багаторазовий обіг суміші та висока точність виливків як для дрібно-, так і крупносерійного виробництва. ФТМС

НАН України має безперечний пріоритет в розробці низки різновидів ЛГМ-процесу, резерви якого розкриті ще не до кінця.

*Метою цієї публікації є обґрунтування на основі результатів останніх досліджень концепції подвійного використання модельно-формувальних матеріалів для підвищення ресурсоефективності (resource efficiency) ливарних процесів.*

Спробуємо за допомогою образних аналогів описати охолодження металевого виливка, що твердне і охолоджується в піщаній формі після заливання в неї металу. Уявімо, що є будинок із цегли з гарячою піччю (по-перше), і коли цеглини починають сипатися, вони труться об піч і тим самим її охолоджують (по-друге). За аналогією з піщаною ливарною формою (зокрема, виготовленою за ЛГМ-процесом) з гарячим виливком в першому випадку піщана форма з сипкого піску представляє конструкцію ємності для лиття, а в другому – служить піщаним середовищем для конвективного охолодження [1]. Якщо уявімо, що цеглинки стали підстрибувати, битися об піч і її охолоджувати, то це буде аналогією зі створенням псевдозрідженого піщаного шару в контейнерній піщаній формі [2].

Якщо ми гарячий виливок із залізвуглецевого сплаву в аустенітному стані видалимо з сипкої піщаної суміші контейнерної форми, від якої відключено вакуумування, і в порожньому формувальному контейнері проведемо спреєрне гартування (чи гартування методом короткочасного занурення в рідину, або для тонкостінних виливків виконаємо гартування витримкою на повітрі) до температури початку бейнітного перетворення, а потім знову засиплемо (заформуємо) виливок у контейнері нагрітим піском з температурою в інтервалі бейнітного перетворення, то після витримки ми отримаємо виливок з бейнітною структурою металу [3]. В цьому випадку пісок форми слугуватиме середовищем (вже перейшовши з ливарних операцій до термообробки) для витримки виливка в бейнітному інтервалі температур при ізотермічному гартуванні виливка (замість традиційних умов його охолодження в піщаній формі з отриманням в структурі фериту чи перліту) і отримання бейнітної структури, яка, наприклад, для високоміцного чавуну здатна збільшити в 2,0–2,5 рази  $\sigma_b$  і відносне видовження  $\delta$  (%) порівняно з литим станом [4]. При цьому швидке охолодження, як першу стадію ізотермічного гартування, можна провести в псевдозрідженому стані піску тієї ж форми, в якій затвердів виливок, бо такий шар відомий в застосуванні як гартувальне середовище, інтенсивність охолодження якого займає проміжне положення між водою і маслом [5].

По суті, вищезазначене можна назвати ливарно-металургійним чудом, в якому, просто змінивши режим охолодження уже затверділого виливка на режим ізотермічного гартування (austempering), ми можемо реалізувати внутрішні резерви підвищення міцності і зносостійкості з «гарячого» литого стану сталей різних структурних класів і чавунів, у тому числі з отриманням в їх структурі метастабільного аустеніту, що зазнає динамічного деформаційного мартенситного перетворення (ефект самогартування при навантаженні), що описано в монографії [6].

Контейнери для піщаних форм при ЛГМ традиційно виготовляють герметичними для вакуумування форми, що також дозволяє використовувати їх для гартування з застосуванням рідини і сипкого піску безпосередньо на ливарних дільницях [2–4]. Цим самим вони можуть отримати, крім ливарного призначення, також інше застосування – для термообробки з литого стану, про що, зокрема, у вітчизняній технічній літературі з цієї теми раніше не повідомлялось [7, 8].

Також до реалізації «внутрішніх резервів» вакуумованої піщаної форми шляхом «перетворення» її піщаної суміші з конструктивного до охолоджуваного чи нагрівального (при ізотермічній витримці) виливок матеріалу, крім подвійного використання сипкої піщаної суміші, можна віднести можливість подвійного застосування вакууму. Вакуум використовують, по-перше, для зміцнення піщаної форми (замість функції в'язучого в піщаній суміші для традиційної форми); по-друге, для

інтенсивного охолодження виливка шляхом засмоктування в суху піщану суміш дозованої кількості води [1] відповідно до заданих умов охолодження виливка.

Також не лише для формувального, але і для модельного матеріалу реалізовано подвійне застосування з таким різновидом разових ливарних моделей, як льодяні моделі [9]. Традиційно ливарні моделі «переносять» конфігурацію виливка, створюючи відповідну ливарну порожнину в піщаній формі. Але при видаленні моделі із форми методом фільтрації розплаву крізь пори піщаної суміші і її змочуванні може забезпечуватись твердіння цієї суміші за наявності в її складі відповідних порошкових гідратаційних в'язучих, що утворюють кристалогідрати. Таким чином, крижана модель, по-перше, моделює виливок і, по-друге, є носієм матеріалу, що отверджує сипку формувальну піщану суміш аналогічно холодно-тверднучій суміші (ХТС). Це дає змогу застосовувати переваги формування сипкими сумішами, що аналогічні за властивістю плинності зазначеним вище для ЛГМ, і виготовити оболонкову форму з ХТС [9].

Подвійне застосування сипких піщаних сумішей для швидкого охолодження виливка здатне (в тому числі, за режимами термообробки) зміцнювати його метал і скорочувати тривалість охолодження виливків у формі; останнє збільшує продуктивність ливарних цехів без нарощування кількості опочної оснастки і наповнювача форми [9]. Вказані вище методи гартування з литого стану (з видаленням із форми виливка червоного кольору практично відразу після його затвердіння) виключають додаткове, притаманне типовим методам термообробки, нагрівання для аустенізації виливків і скорочують час та енергоємність отримання продукції з бейнітною структурою (оми-наючи перлітне перетворення), що, по суті, відповідає концепції спільної реалізації внутрішніх резервів як піщаної форми, так і литого металу.

Льодяні моделі, крім здатності до високої точності відтворення виливків і можливості зміцнення піщаних сумішей шляхом утворення в них кристалогідратів (по методу ХТС), також сприяють екологічності і економічності ливарних процесів шляхом заміни типових органічних модельно-формувальних матеріалів на неорганічні [9].

### Список літератури

1. Дорошенко В. С. Регулирование охлаждения отливки в вакуумируемой форме фильтрацией хладагентов и движением частиц песка // Литейное производство. – 2013. – № 10. – С. 32–37.
2. Дорошенко В. С., Клименко С. И., Калужный П. Б. Интенсификация теплоотвода при охлаждении отливок в литейной форме с сыпучим наполнителем методом его псевдооживления // Металл и литье Украины. – 2016. – № 6. – С. 22–26.
3. Дорошенко В. С. Возможности литья чугуна с шаровидным графитом по газифицируемым моделям с изотермической закалкой оливок // Литейное производство. – 2017. – № 11. – С. 7–14.
4. Дорошенко В. С. Предпосылки встраивания термообработки в процесс литья высокопрочного чугуна по газифицируемым моделям // Металл и литье Украины. – 2017. – № 6–7. – С. 10–16.
5. Гуляев А. П. Металловедение. 6-е изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
6. Малинов Л. С., Малышева И. Е. Абразивная износостойкость сплавов с метастабильным аустенитом: монография. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2018. – 189 с.
7. Найдек В. Л., Гаврилюк В. П., Неижко И. Г. Бейнитный высокопрочный чугун. – К., 2008. – 140 с.
8. Волощенко С. М. Створення наукових засад структуроутворення в високоміцному чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.01. – Київ, 2018. – 40 с.
9. Дорошенко В. С. Теоретичні і технологічні основи отримання піщаних форм із сухого дисперсного наповнювача для виробництва легковагих литих конструкцій: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.16.04. – Київ, 2018. – 37 с.

Поступила 10.12.2018

References

1. Doroshenko, V.S. (2013) Regulation of casting cooling in evacuated mold by filtration of coolants and movement of sand particles. Liteynoe proizvodstvo, no. 10, pp. 32–37 [in Russian].
2. Doroshenko, V. S., Klimenko, S. I., Kalyuzhnyi, P. B. (2016) Intensification of heat removal during cooling of castings in a mold with a bulk filler using the fluidization method. Metall i lite Ukrainyi, no. 6, pp. 22–26 [in Russian].
3. Doroshenko, V. S. (2017) Possibilities of casting nodular cast iron according to Lost Foam Casting process with austempering of castings. Liteynoe proizvodstvo, no. 11, pp. 7–14 [in Russian].
4. Doroshenko, V. S. (2017) Prerequisites for the incorporation of heat treatment into the process of casting high-strength cast iron according to gasified patterns. Metall i lite Ukrainyi, no. 67, pp. 10–16 [in Russian].
5. Gulyaev, A. P. (1986) Metal science. 6-e izd. M.: Metallurgiya, 544 p. [in Russian].
6. Malinov, L. S., Malyisheva, I. E. (2018) Abrasive wear resistance of alloys with metastable austenite: monograph. Mariupol: GVUZ «PGTU», 189 p. [in Russian].
7. Naydek, V. L., Gavrilyuk, V. P., Neizhko, I. G. (2008) Bainite ductile cast iron. K., 140 p. [in Russian].
8. Voloshchenko, S. M. (2018) Creation of Scientific Foundations of structure formation in high resistant pig iron for increasing endurance and durability of replaceable parts for agricultural equipment and transport: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.02.01. Kyiv, 40 p. [in Ukrainian].
9. Doroshenko, V. S. (2018) Theoretical and technological foundations for the production of sand molds from dry dispersion fillers for the production of lightweight cast structures: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.16.04, Kyiv, 37 p. [in Ukrainian].

Received 10.12.2018

**В. С. Дорошенко**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: doro55v@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

**РЕАЛИЗАЦИЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЕРВОВ ПЕСЧАНОЙ ФОРМЫ  
МЕТОДАМИ ДВОЙНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МОДЕЛЬНО-ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССАХ**

Актуальность развития технологии песчаной формы как важной составляющей литейных процессов обоснована тем, что в таких формах производят до 80 % тоннажа отливок, включая специальные виды литья в такие формы. Мощности оборудования, площади и персонал литейных цехов на 60–70 % относятся к процессам формовки, включая смесеприготовление и изготовление стержней. Загрязнение «по вине формы» может достигать 80 %. Значительный потенциал для развития технологии литейной формы имеет усовершенствование процессов литья металла в формы из сыпучих песчаных смесей без связующего, в частности, по газифицируемому моделям. Представлена концепция совершенствования процессов литья металла в форме из сыпучего песка методом двойного применения модельно-формовочных материалов, и приведены примеры такого применения. Использование сыпучих формовочных смесей для быстрого охлаждения отливки, включая термообработку, позволяет упрочнить ее металл и сократить продолжительность охлаждения отливок в форме, что приводит к увеличению производительности литейных цехов без наращивания количества опочной оснастки и наполнителя формы. Способы изотермической закалки (аустемперинг) с горячего состояния отливок из железоуглеродистых сплавов исключают нагрев и выдержку для их аустенизации, что сокращает время и энергоемкость получения продукции с бейнитной структурой, а также, по сути, соответствует концепции реализации внутренних резервов как песчаной формы, так и литого металла. Литейные ледяные модели не только пригодны для воспроизводства отливок с высокой точностью, но и принимают участие в упрочнении песчаных смесей по методу холодного твердения путем образования в них кристаллогидратов, а также способствуют экологичности и экономичности литейных процессов путем замены обычных органических модельно-формовочных материалов на неорганические.

**Ключевые слова:** песчаная форма, формовочный материал, сыпучий песок, изотермическая закалка, внутренние резервы, ледяные модели, двойное использование.



**V. S. Doroshenko**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,  
e-mail: doro55v@gmail.com

Phisico-Tehnological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

### REALIZATION OF INTERNAL RESERVES OF SAND FORM BY DUAL USE OF MODEL-FORMING MATERIALS IN FOUNDRY

*The urgency of the development of the technology of sand mold, as an important component of foundry processes, is based on the fact that in such molds produce up to 80 % of the tonnage of castings, including special types of casting in such molds. The capacity of the equipment, area and personnel of foundries on 60–70 % relate to the molding processes, including mixing and core manufacturing. Pollution due to fault mold can reach 80 %. Significant potential for the development of molding technology is the improvement of the processes of casting metal into molds from loose sandy mixtures without binder, in particular, in the Lost Foam Casting process. The concept of improving the processes of casting metal in the mold of granular sand using the dual use of pattern and molding materials is presented, and examples of such an application are given. The use of loose molding compounds for rapid cooling of the casting, including heat treatment, makes it possible to strengthen its metal and shorten the duration of cooling of castings in the mold, which leads to an increase in the productivity of foundries without increasing the number of tooling and mold filler. Methods of isothermal quenching (austempering) from a hot state of castings from iron-carbon alloys exclude heating and aging for their austenization, which reduces the time and energy consumption of obtaining products with a bainitic structure, and also, in fact, corresponds to the concept of the implementation of internal reserves of both sand mold and cast metal. Casting ice patterns are not only suitable for the reproduction of castings with high accuracy, but also take part in the hardening of sand mixtures by the method of cold hardening by forming crystalline hydrates in them, and also contribute to the environmental and efficiency of foundry processes by replacing conventional organic pattern and molding materials with inorganic ones.*

**Keywords:** sand mold, molding material, isothermal hardening, austempering, internal reserves, icy patterns, dual use, Lost Foam Casting.

### Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объём статьи — не более **10 стр.**, рисунков — не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов — формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.

---

# НОВЫЕ ЛИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.365.5:661.665.2

**А. М. Верховлюк\***, д-р техн. наук, зам. директора,  
e-mail: vam@ptima.kiev.ua

**П. В. Русаков\***, канд. техн. наук, e-mail: prmarus@ukr.net

**В. Л. Лахненко\***, канд. техн. наук, ученый секретарь,  
e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua

**Р. В. Петровский\***, аспирант, e-mail: ruslan.p@galcat.com

**И. Ф. Червоний**, д-р техн. наук, проф., e-mail: rot44@yandex.ru

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ

*Рассмотрена конструкция печи, которая позволяет осуществлять плавку, дисперсный помол тугоплавких соединений, а также в режиме помольной экстракции отделять тяжелые металлы, содержащиеся в стеклах отработанных электронных приборов и различных видах хрустальных стекол. Ее также можно использовать для получения композиционных материалов путем проведения в печи операций расплавления, измельчения и смешивания отдельных ингредиентов. При этом электродинамический реактор способен осуществлять регенерацию металлов из окислительных соединений, находящихся в скрапе, шлаках, тяжелых стеклах и других материалах, которые сложно перерабатывать с использованием индукционных тигельных печей.*

**Ключевые слова:** индукционные печи, тигель, шихтовые материалы, электрическая энергия, тяжелые металлы.

**В** машиностроительной промышленности достаточно распространены плавильные агрегаты, известные как индукционные тигельные печи [1–4]. Их применяют в литейных цехах для выплавки, рафинирования и модифицирования металлов и сплавов. Типовые конструкции индукционных тигельных печей имеют огнеупорный тигель, в который загружают шихтовые материалы для осуществления процессов термического воздействия на шихту и выплавки металла. Тигель помещают внутри электрической катушки, которая служит индуктором высокочастотного электромагнитного поля, и для ее питания используют электрический генератор. Ток, протекающий по катушке, нагревает тигель и шихтовые материалы в середине тигля.

Благодаря эффективному преобразованию электрической энергии в тепло, индукционные тигельные печи более привлекательны по сравнению с другими плавильными агрегатами и имеют более высокий коэффициент полезного действия

(КПД). Индукционные тигельные печи обеспечивают простоту управления процессом плавки, короткое время приготовления расплавов и гарантируют высокую производительность. С их появлением существенно расширились технологические возможности литейного производства, повысилась качество выплавляемого металла, а также уменьшилось количество загрязняющих выбросов в окружающую среду. Индукционные тигельные печи имеют высокий КПД в режиме плавки лома и приготовления металлических расплавов, однако их использование становится менее эффективным при переработке оксидных материалов, шлама, пыли, скрапа. Также эти агрегаты не совсем приемлемы для обработки расплавов неметаллическими порошками, которые содержат частицы наноразмерного модификатора.

Наряду с индукционными тигельными печами распространение получили также конструкции индукционных канальных печей, которые обеспечивают более высокий КПД в процессах, связанных с переплавкой металлов [5–7]. Они не требуют предварительного преобразования электрической энергии в ток высокой частоты, поэтому значительно упрощается их силовая электрическая часть и повышается уровень безопасности для обслуживающего персонала. Однако, в эксплуатации они требуют проведения дополнительных процедур для запуска и обеспечения стабильного режима функционирования. Также, для старта канальных печей необходимо дополнительное оборудование, которое обеспечивает приготовление и заливку расплава в рабочие каналы перед началом работы. Проведенный анализ технических возможностей индукционных печей показал, что они наиболее эффективны в процессах переплавки лома и приготовления металлических сплавов, однако в металлургии существуют другие проблемы, для решения которых применение вышеуказанных технических устройств не гарантирует эффективного достижения результата.

Задача утилизации свинцового стекла и извлечения из него тяжелых металлов является одной из проблем, которая требует создания специального оборудования. Начало третьего тысячелетия приблизило конец эры кинескопов, и на смену им пришли более совершенные жидкокристаллические мониторы и плазменные дисплеи. По отдельным оценкам ежегодно в индустриально развитых странах выбрасывается в лом от нескольких тысяч до одного миллиона мониторов и телевизоров, а общее количество устаревшей техники, еще сохраняющейся в домах жителей, может исчисляться миллионами. Прогнозируется, что поток этого «электронного мусора» иссякнет лишь через 15–25 лет. Отработанные кинескопы могут создавать проблемы для окружающей среды, так как при их пребывании на свалках происходит выщелачивание свинца и других тяжелых металлов в грунтовые воды [8]. Как показали результаты исследований, проведенные ведущими исследовательскими центрами, разработанные технологии и оборудование для добычи свинца из расплавов стеклянной массы характеризуются значительной энергоемкостью и не обеспечивают достаточной эффективности процессов осаждения свинца, что в первую очередь вызвано высокой вязкостью стеклянных расплавов [9–11].

Исследуя указанную проблему, ученые института «Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences» предложили извлекать свинец из стекла восстановительной реакцией [12, 13]. Ключевым фактором этого метода является возможность осуществления процесса удаления свинца из стекла при более низких температурах в реакционной камере.

Работа в данном направлении проводилась также сотрудниками «PANASONIC IP MAN CORP», которые предложили для экстракции свинца нагревательную камеру с мешалкой, в которой обеспечивают процесс регенерации свинца при температуре ниже температуры плавления стекла [14]. Однако, показанные в [13, 14] конструкции устройств недостаточно эффективны для экстракции свинца, и они нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

В связи с этим *целью данной работы* является создание многофункционального устройства, имеющего возможности проведения процессов нагрева, плавления, измельчения твердых частиц материала, функции смешивания и приготовления

из них жидко-твердых взвесей, а также позволяющего осуществлять раздельный отбор и транспортировку получаемых продуктов с выходных портов устройства.

Поставленная цель достигается тем, что плавильная печь для обработки дисперсионных расплавов содержит емкость для обработки сырья, связанную с питающим трансформатором. На концах трубного колена выполнена загрузочная камера и шлаковый желоб, имеющие смежную стенку, которая обеспечивает контакт между концами трубы и формирует вторичный замкнутый виток питающего трансформатора. В средней зоне трубного колена сформированы реакционная камера и сливной патрубок. Внутреннее пространство реакционной камеры находится в зазорах узла магнитодинамических жерновов, состоящего, по меньшей мере, из двух электромагнитов постоянного тока. Последние включены последовательно таким образом, что создают в поперечном направлении пространства реакционной камеры смежно расположенные и противоположно направленные пучки магнитной индукции. В зоне стыковки сливного патрубка с трубным коленом установлен статор. Узел магнитодинамических жерновов собран из двух или большего количества постоянных магнитов, установленных вдоль реакционной камеры так, что они создают в поперечном направлении пространства реакционной камеры смежно расположенные и противоположно направленные пучки магнитной индукции. Он может состоять из объединенных в последовательные электрические пары регулируемых электромагнитов постоянного тока и дополнительно установленных постоянных магнитов.

Как показано на рис. 1, 2, конструкция плавильной печи для обработки дисперсионных расплавов содержит емкость С100 для обработки сырья В101, которая выполнена в форме трубного колена 1 из электропроводящего материала. Труба протянута через магнитопровод 2, который является частью силового трансформатора 3. На магнитопроводе установлена электрическая катушка 4, которая выполняет функцию первичной обмотки трансформатора 3 (Т100). Трубное колено 1 содержит несколько последовательно расположенных зон, предназначенных для выполнения ряда технологических операций при прохождении в трубе обрабатываемого сырья. На левом входном конце трубного колена образована загрузочная камера 5, которая предназначена для приема сырья В101. В качестве сырьевого материала может быть использована шихта, включая металлический лом, шлаки, свинцовое стекло, абразивную пыль, отходы гальванического производства и пластины электрических аккумуляторных батарей, подлежащих утилизации. Шихта может также включать и другие ингредиенты в соответствии с заданным регламентом технологического процесса.

На правом выходном конце трубного колена сформирован шлаковый желоб 6, который обеспечивает выпуск из печи переработанных шлаков. Загрузочная камера 5 и шлаковый желоб 6 имеют смежную стенку 7, которая обеспечивает электрический контакт между концами трубы и формирует вторичный замкнутый виток питающего трансформатора Т100.

В средней зоне трубного колена сформирована реакционная камера 8, входящая в зазоры узла размольных магнитодинамических жерновов, конструктивно обозначенных на рис. 1 как MS9. Данный узел предназначен для генерирования магнитного потока в реакционной камере и создания силовых нагрузок в сырьевом материале. Узел MS9 состоит из двух магнитодинамических жерновов ЭМ1, ЭМ2, которые имеют конструкцию электромагнитов постоянного тока. Катушки электромагнитов подключаются к регулятору постоянного тока DCR (DC Regulator) путем последовательного соединения, как показано на рис. 3.

Для возможности формирования противоположно направленных сил катушки электромагнитов постоянного тока включены последовательно таким образом, что они могут формировать в поперечном направлении пространства реакционной камеры смежно расположенные и противоположно направленные пучки магнитной индукции, которые при взаимодействии с магнитным потоком от тока во вторичном контуре обеспечивают генерирование внутри обрабатываемого сырьевого матери-

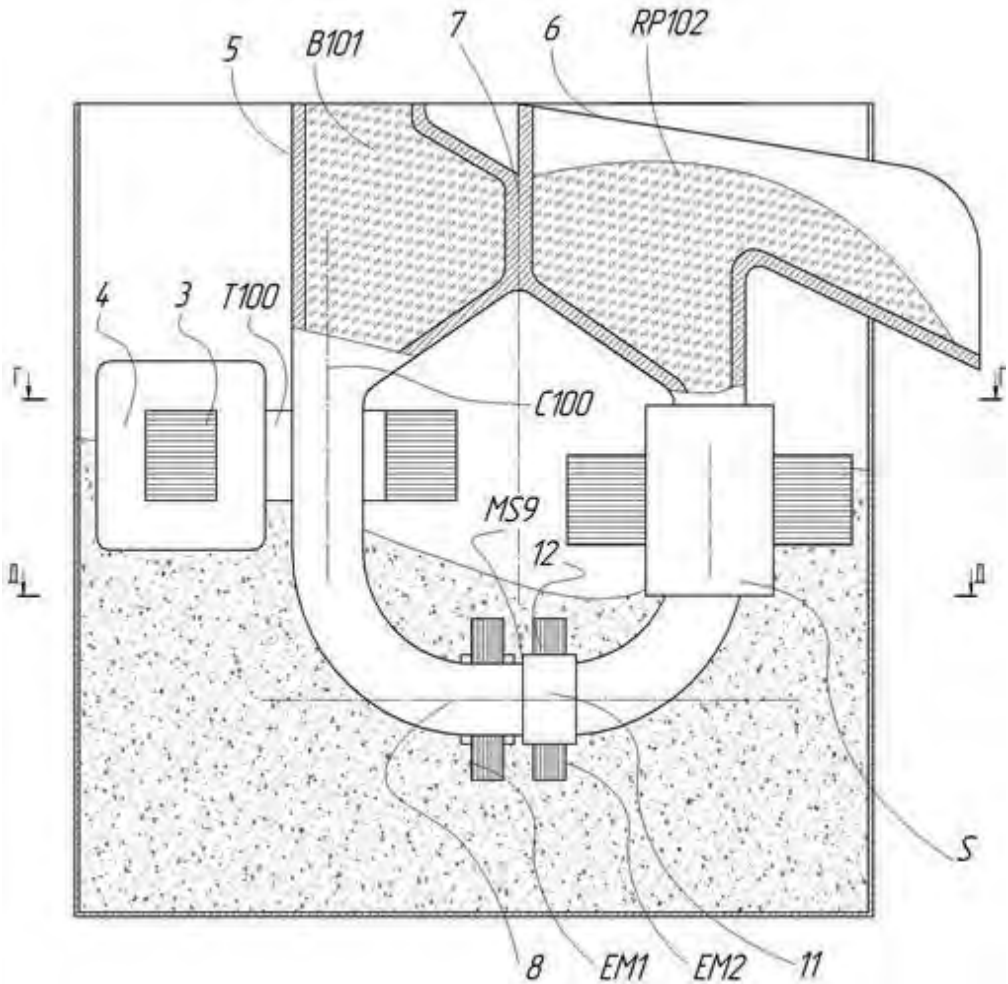


Рис. 1. Общий вид плавильной печи для обработки дисперсионных расплавов

ала ряда размольных сил  $F$ , которые, в свою очередь, приводят к взаимодействию между собой частиц твердого материала в расплавленной среде.

Как показано на рис. 4, два пучка магнитной индукции при взаимодействии с током во вторичном контуре обеспечивают генерацию в сырьевом материале двух размольных сил  $F_1$  и  $F_2$ . Они действуют так, что образуют в реакционной камере область встречных столкновений, обозначенных как «Collision area», в которой происходит ударное взаимодействие твердых частиц, их измельчение и помол.

Количество узлов MS9 и, соответственно, количество электромагнитов постоянного тока устанавливают в зависимости от заданной производительности оборудования и конструктивных размеров трубного колена. Большее количество узлов MS9 вводят для повышения мощности реактора, и их число рассчитывают, исходя из характеристик перерабатываемого сырья, а также с учетом заданных качественных показателей получаемых из нее продуктов.

Основными конструктивными деталями, из которых состоят вибраторы, входящие в узел MS9 (рис. 1, 2), являются электрическая катушка 9 и магнитопровод 10. Для удобства управления процессами возбуждения размольных сил  $F$  при переработке сырья электрические катушки магнитодинамических жерновов соединяются между собой последовательно и подключаются к регулятору постоянного напряжения. Следовательно, при наличии в устройстве большого количества магнитодинамических

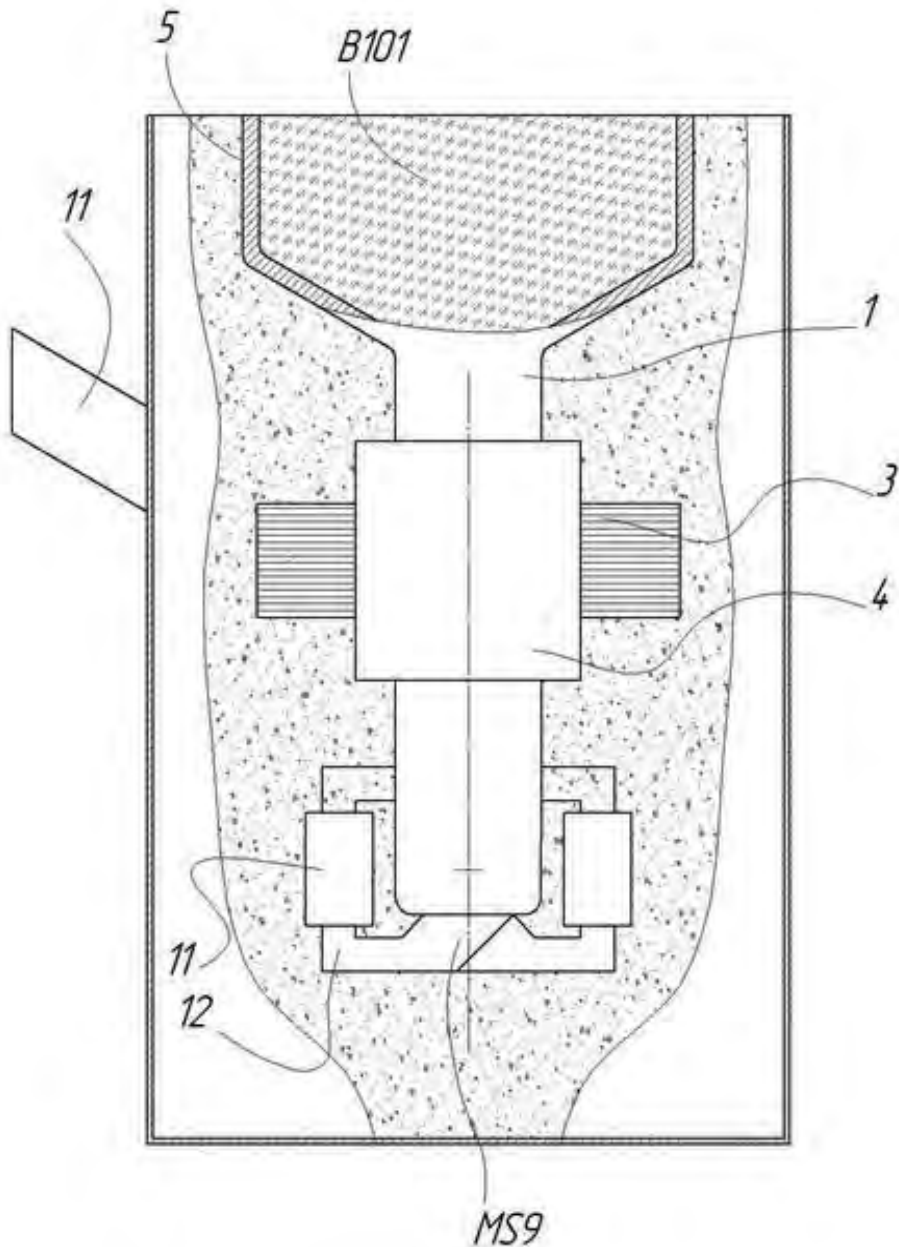


Рис. 2. Схема плавильной печи для обработки дисперсионных расплавов

жерновов, подключенных к регулятору постоянного напряжения (DC Regulator), упрощается регулировка силы тока, протекающего по катушкам 11 и, соответственно, обеспечивается гибкость и легкость управления генерированием размольных сил.

В целом, при наличии группы магнитодинамических вибраторов, пучки магнитной индукции  $B$  будут взаимодействовать с переменным током  $I$ , так что в электропроводящей среде будет генерироваться группа размольных сил  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_{i-1}, F_i$ , количество которых будет соответствовать количеству  $i$  установленных магнитодинамических вибраторов, взаимодействующих с пространством реакционной камеры. При этом каждая из отдельно взятых размольных сил  $F_i$  представляет электродинамическую силу, а ее величина определяется характером взаимодействия тока в потоке электропроводящей сырья с пучком магнитной индукции на участке длиной  $l$ , который пронизывает пучок магнитной индукции:

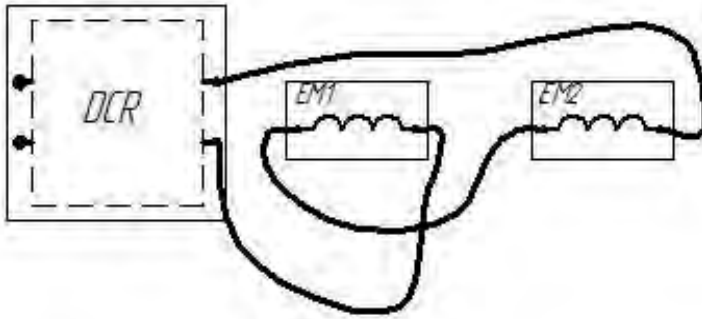


Рис. 3. Схема электрического соединения двух магнитодинамических вибраторов с регулятором постоянного тока

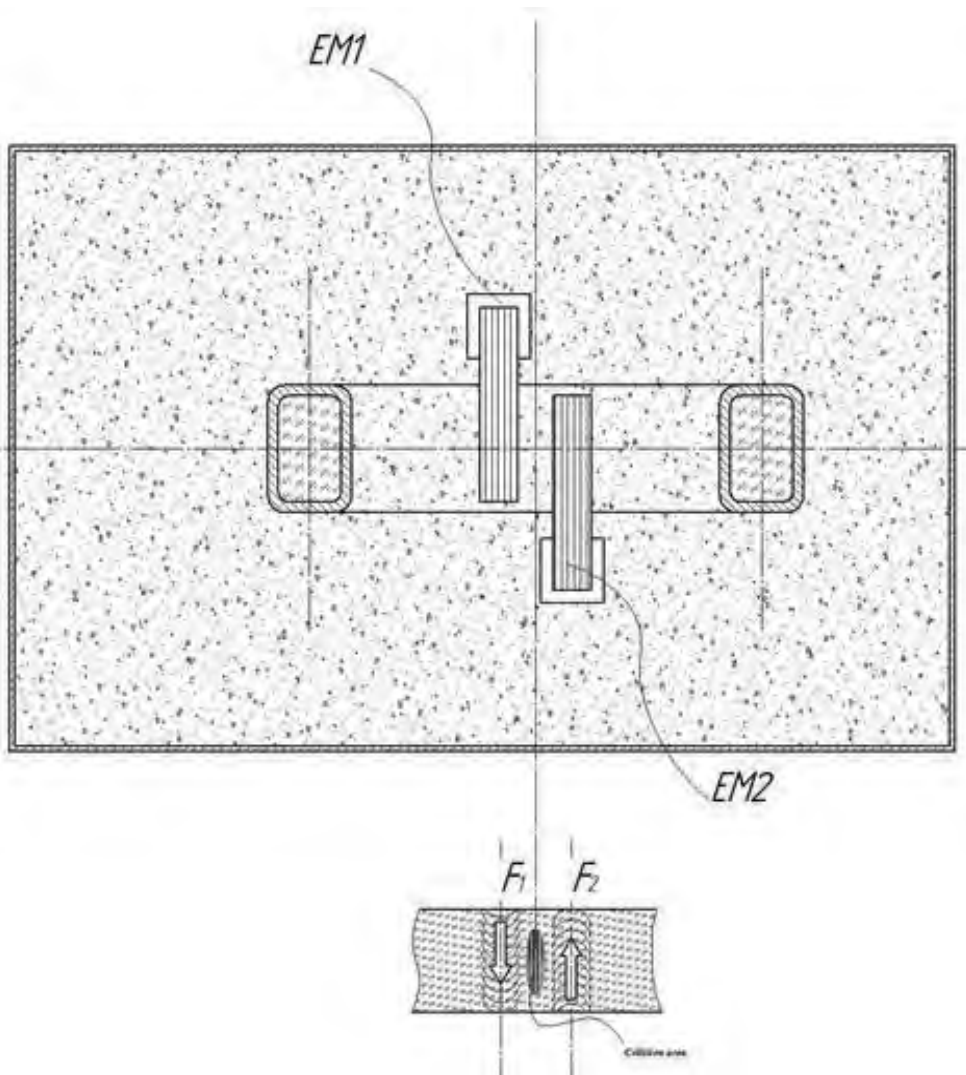


Рис. 4. Узел магнитодинамических вибраторов, состоящий из двух электромагнитов, и схема формирования активной зоны при взаимодействии двух сил

$$\vec{F}_i = \vec{B}_i \vec{I}l.$$

Для проведения отдельных технологических процессов магнитодинамические жернова могут состоять не только из электромагнитов постоянного тока, но они также могут быть собраны из постоянных магнитов, изготовленных из сплавов, имеющих магнитные свойства. Так, на рис. 5 показан вид плавильной печи с установленными на ней двумя подковообразными магнитами М1 и М2. Кроме подковообразных магнитов могут применяться плоские постоянные магниты, которые устанавливаются таким образом, чтобы они были способны генерировать встречно параллельные пучки магнитной индукции.

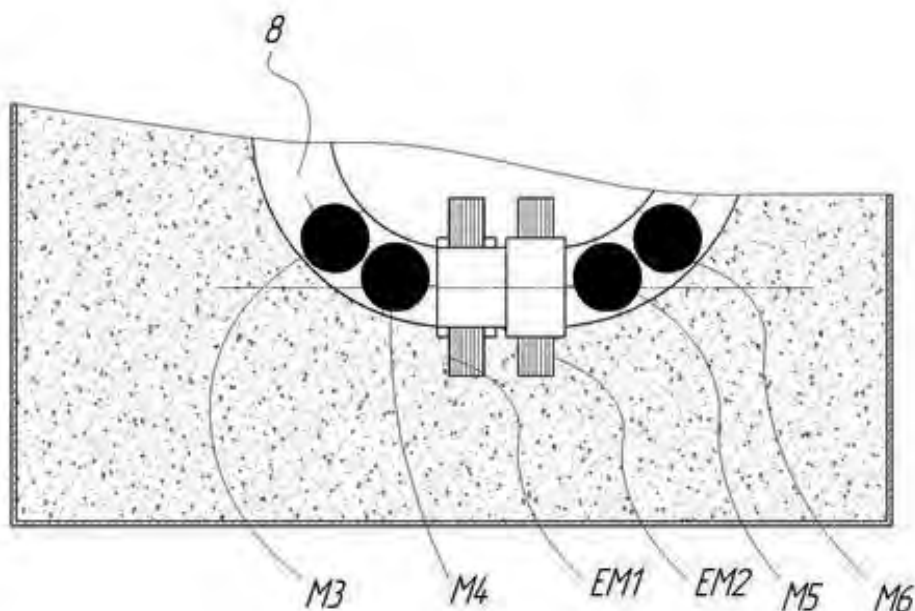


Рис. 5. Узел магнитодинамических вибраторов, состоящий из комбинации двух электромагнитов и четырех постоянных магнитов, установленных в зоне реакционной камеры

В качестве примера на рис. 5 показан узел реакционной камеры 8 с установленными двумя жерновами на базе электромагнитов постоянного тока ЭМ1, ЭМ2 и четырьмя жерновами на базе постоянных магнитов М3, М4 М5, М6. Вместе они обеспечивают последовательное возбуждение цепи областей встречных столкновений как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

При подключении электрического питания на силовой трансформатор Т100 и магнитодинамический вибратор начинается процесс разогрева емкости С100, и вместе с ней разогревается сырье В101, которое загружено в емкость. После перехода части сырья, находящегося в реакционной камере, в жидкое состояние начинается интенсивная обработка сырья магнитодинамическими вибраторами. Твердые куски сырья, находящиеся в жидкой фазе, сталкиваются, трутся и измельчаются. Расплавленный металл оседает на дно емкости и в процессе обработки сырьевого материала постепенно накапливается так, что образует столб жидкого расплава.

Шлак, освобождающийся от металлических частиц, всплывает и удаляется через шлаковый желоб 6. Процесс переработки сырьевого материала в печи может носить



непрерывный характер: в загрузочную камеру 5 подается сырьевой материал, а выпуск переработанных шлаков RP102 (рис. 1) осуществляется через шлаковый желоб 6. Периодически в процессе накопления жидкого металла в средней зоне трубного колена проводится его выпуск через сливной патрубок 11, для чего периодически включают статор S.

Например, при переработке отходов, содержащих свинец, основным сырьем для его получения является отработанные пластины аккумуляторных батарей, а также хрустальное стекло, которое содержится в кинескопах мониторов, телевизоров и рентгеновских трубках. Утилизация сырья, содержащего оксиды свинца, позволяет защитить окружающую среду от вредных веществ и предотвратить токсическое заражение почвы.

Такая переработка предусматривает проведение вначале восстановительной плавки лома, состоящего из сухих пластин аккумуляторных батарей. По мере накопления в реакционной камере «болота» из расплавленного свинца добавляют бой свинцового стекла, смешанного с добавками, содержащими углерод. При этом протекают два процесса восстановления и экстракции Pb из частиц стекла в жидком свинцовом болоте. Реакции протекают в энергосберегающем режиме без расплавления частиц стекла. Физическое воздействие магнитодинамических жерновов приводит к столкновению частиц стекла, температурных расширений и раскалывания. Шлак выпускают во внешний отстойник, из которого он идет на дальнейшую переработку.

Очищенный свинец разливается в формы, куда также добавляется каустическая сода. Этот компонент позволяет окончательно избавиться от примесей, оставшихся в свинце после проведенных очисток: свинец будет иметь повышенный уровень чистоты.

Такая утилизация в комплексной технологии переработки пластин свинцовых аккумуляторов и экстракции свинца из стекла кинескопов и рентгеновских трубок позволяет нейтрализовать все их вредные компоненты, не нанося при этом экологический ущерб окружающей среде.

## References

1. Mohand N. Jawad , Jabir K. Tahir and Sattar I. Musa (2008) Design and Application of Medium Frequency Coreless Induction Melting Furnace for Aluminum. Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, Issue 6, pp. 440–442 [in English].
2. Pat. CN105043097 (A). Energysaving steel housing stove. 2015.11.11, nomer zayavki: CN20151342991 20150619. MPK: F27B14/02; F27B14/06; F27B14/08; F27B14/14.
3. Pat. KR100266858 (B1) – Induction furnace having a modular induction coil assembly 2000-09-15, nomer zayavki: KR19930028271 19931217, MPK: F27B3/00.
4. Pat. JP2004108666 (A) 2004-04-08 – Crucible-Shaped Induction Furnace, nomer zayavki JP20020272489 20020919. MPK: 27B14/08; F27D27/00; H05B6/18; H05B6/24.
5. Pat. WO2017009811 (A1) 2017-01-19 – Channel Type Induction Furnace, nomer zayavki WO2016B54249 20160715. MPK: F27B14/06; F27B14/08; F27D1/04; F27D11/06; F27D27/00.
6. Pat. GB2144527 (A) 1985-03-06 – Cnannel Type Induction Furnace, nomer zayavki GB19840016441 19840628 .MPK: B22D35/00; H05B6/16; H05B6/20. (IPC1-7): F27B14/08; F27D11/06.
7. Pat. RU2185583 (C2) 2002-07-20 – Channel Type Insuction Furnace, nomer zayavki RU20000110705 20000428. MPK: F27B14/08; F27D11/06.
8. Materuals Recovery From Waste Cathode Ray Tubes (CRTS) Project code: GLA15-006 Published by: The Waste & Resources Action Programme The Old Academy, 21 Horse Fair, Banbury, Oxon OX16 0AH, www.wrap.org.uk, WRAP Business Helpline: March 2004.
9. Report Prepared Byicer For Dti, AUGUST 2003 GW-12.10-130: New Approach To Cathode Ray Tube (CRT) RECYCLING.
10. Kang, H. Y., Schoenung, J. M. (2005 ) Electronic waste recycling: A review of US infrastructure and technology options. Resou.r Conserva.t Recycl, Vol. 45, pp. 368–400 [in English].
11. Feasibility of lead extraction from waste Cathode-Ray-Tubes (CRT) funnel glass through a lead smelting process: Waste Management, Vol. 57, November 2016, pp. 198–206 [in English].
12. Extraction of metallic lead from cathode ray tube (CRT) funnel glass by thermal reduction with metallic iron. Environmental Science and Technology, Vol. 47, no. 17, pp. 9972–9978, 2013. [in English].
13. Pat. US2015232962 (A1) 2015-08-20 – Method Fot Recovering Lead From Lead-Containing

Discarded Electronic Waste Cathode Ray Tube Glass, nomer zayavki US201214428517 20121017 MPK, C22B1/24; C22B13/02; C22B7/00.

14. Pat. JP2016130335 (A) 2016-07-21 – Method And Appartus For Separating Lead Fron Ead Glass, nomer zayavki JP20150004356 20150113 MPK: B09B3/00; C22B13/02; C22B5/10; C22B7/00.

Received 10.01.2019

**A. М. Верховлюк\***, д-р техн. наук, заст. директора, e-mail: vam@ptima.kiev.ua

**П. В. Русаков\***, канд. техн. наук, e-mail: prmarus@ukr.net

**В. Л. Лахненко\***, канд. техн. наук, вч. секретар, e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua

**Р. В. Петровський\***, аспірант, e-mail: ruslan.p@galcat.com

**І. Ф. Червоний**, д-р техн. наук, проф., e-mail: rot44@yandex.ru

\*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

### ПРОЦЕС ОДЕРЖАННЯ ВТОРИННИХ КОЛЬОРОВИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЛАВКИ

*Розглянуто проблеми переробки вторинних відходів кольорових металів з використанням індукційної плавки. Показано нову конструкцію печі, що дозволяє здійснювати плавку, дисперсний помел тугоплавких сполук, а також в режимі помольної екстракції відокремлювати важкі метали, які містяться в стеклах відпрацьованих електронних приладів і різних видах кристалевих стекол. Нова конструкція печі також ефективна для формування композиційних матеріалів і проведення операцій розплавлення, подрібнення і змішування окремих інгредієнтів. Функціональні можливості нового плавильного апарату дозволяють здійснювати регенерацію металів з окисних сполук, що знаходяться в скрапі, шлаках, важких стеклах та інших матеріалах, які складно переробляти з використанням високочастотних індукційних тигельних печей.*

**Ключові слова:** індукційна плавка, канална піч, тигель, шихтові матеріали, важкі метали.

**A. M. Verkhovlyuk\***, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director, e-mail: vam@ptima.kiev.ua

**P. V. Rusakov\***, Candidate of Engineering Sciences, e-mail: prmarus@ukr.net

**V. L. Lakhnenko\***, Candidate of Engineering Sciences, Scientific Secretary, e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua

**P. V. Petrovskiy\***, Postgraduate Student, e-mail: ruslan.p@galcat.com

**I. F. Chervonyy**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., e-mail: rot44@yandex.ru

\*Phisico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

### THE PROCESS OF OBTAINING SECONDARY NON-FERROUS ALLOYS USING INDUCTION MELTING

*The issues of recycling non-ferrous metal waste using induction melting are considered. A new design of the furnace is shown, which allows melting, dispersed grinding of refractory compounds, as well as in the mode of grinding extraction to separate heavy metals contained in the glasses of used electronic devices and various types of crystal glasses. The new furnace design is also effective for obtaining composite materials and carrying out operations for melting, grinding and mixing individual ingredients. The functionality of the smelting apparatus allows the regeneration of metals from oxide compounds found in scrap, slag, heavy glass, and other materials that are difficult to process using high-frequency induction crucible furnaces.*

**Keywords:** induction melting, channel furnace, crucible, charge materials, heavy metals.

**Е. Г. Афтандилянц**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,

e-mail: aftyev@hotmail.com

**В. П. Лихошва\***, д-р техн. наук, проф., зав. отделом,

e-mail: plazer\_v@mail.ru

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК

*На основе анализа процесса формирования соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя биметаллических отливок установлено, что качественное соединение при заливке жидкого чугуна на твердую стальную основу, расположенную в литейной форме, происходит в случае, когда температура заливки чугуна меньше температуры солидус стали. Учитывая, что температуры заливки чугуна и солидус стали зависят от их химического состава, установили количественные закономерности влияния химического состава на эти характеристики. В качестве интегрального параметра химического состава стали и чугуна использовали их углеродный эквивалент. Установлены количественные закономерности влияния углеродного эквивалента на температуры солидус стали и ликвидус чугуна, а также заливки чугуна. Приведены условия получения качественного диффузионного соединения чугунного рабочего слоя и стальной основы и пример определения оптимальных химических составов стальной основы и чугунного рабочего слоя при изготовлении биметаллических молотков. Показано, что при оптимизации химических составов биметаллических отливок прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя увеличивается в 1,8–2,4 раза по сравнению с неоптимизированными по химическому составу биметаллическими отливками.*

**Ключевые слова:** биметаллические отливки, основа, рабочий слой, сталь, чугун, углеродный эквивалент, температура, солидус, ликвидус, заливка, прочность.

**П**роблема экономии высоколегированных сталей и сплавов, увеличение ресурса работы машин и межремонтных сроков работы, непрерывно действующих комплексов оборудования, работающих в условиях абразивного износа и ударных нагрузок, всегда актуальна. В условиях дефицита в стране хрома, молибдена, ванадия, никеля и других металлических элементов литье в конструкциях машин является практически единственным решением при создании изделий с комплексом дифференцированных и специальных свойств. Оптимизация химических составов основы и рабочего слоя биметаллических отливок имеет большое значение для производства экономно легированных высококачественных деталей оборудования, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания и ударных нагрузок.

Из многочисленных способов получения биметаллических отливок наиболее распространенными в практике литейного производства является одновременная или последовательная заливка жидких сплавов в литейную форму с перегородкой; последовательная заливка в форму жидких сплавов; намораживание металла из расплава на твердую заготовку; заливка жидкого металла на твердую заготовку, предварительно расположенную в литейной форме и другие [1].

Из перечисленных способов наиболее технологичным и распространенным методом является заливка жидкого металла на твердую основу, расположенную в литейной форме. В качестве основы, как правило, используют углеродистую или низколегированную сталь, а в качестве рабочего слоя – высоколегированный износостойкий чугун. Однако при таком методе производства соотношение между химическим составом и температурой затвердевания стали и заливки износостойкого легированного чугуна не регламентированы.

Это не дает возможность гарантировать качество биметаллических отливок, поскольку в случае, когда температура заливки износостойкого легированного чугуна превышает температуру затвердевания стали, происходит ее расплавление и контактная зона формируется в условиях перемешивания расплавов в плоскости их контакта. При затвердевании такого контакта образуются усадочные дефекты (поры, рыхлость, раковины и трещины), что снижает прочность соединения основания и рабочего слоя и, как следствие, ресурс биметаллических отливок, например, рабочих органов дробилок. Кроме того, в результате несбалансированного соотношения химического состава стали и чугуна увеличивается расход дефицитных и дорогих материалов.

Поэтому представляет интерес исследовать возможность оптимизации химических составов основы и рабочего слоя биметаллических отливок при заливке жидкого металла на твердую основу.

Качественное диффузионное соединение стальной основы и чугунного рабочего слоя (взаимное проникновение, в результате диффузии, атомов материала основы и рабочего слоя друг в друга) биметаллических отливок происходит в результате контакта затвердевшей, после заливки, стальной основы с чугунным рабочим слоем в процессе его формирования после заливки. При этом прочность диффузионного слоя, которая определяется межатомными силами связи материала, образовавшегося в результате диффузии, должна быть изотропной по поверхности контакта, что повышает надежность работы биметаллических отливок.

Однако надежное соединение рабочего слоя и основы с помощью диффузионного слоя является необходимым, но недостаточным условием для получения высококачественных биметаллических отливок, поскольку существенное влияние на их работоспособность оказывает материал основы и рабочего слоя.

По своему функциональному назначению биметаллические отливки, например, рабочие органы дробилок, должны сочетать высокую твердость, износостойкость, теплостойкость рабочих слоев с конструкционной прочностью, ударной вязкостью, пластичностью материала основы. Для обеспечения высокой износостойкости и прочности материалы основы и рабочего слоя должны иметь высокий уровень теплопроводности, сопротивления сжатию, изгибу, сдвигу, срезу, смятию, устойчивости к коррозии, а также высокую и равномерную твердость при отсутствии хрупкости, небольшое отличие коэффициентов теплового расширения и стабильную макро- и микроструктуру основы и рабочего слоя.

В работах [2, 3] установлены пределы химических составов сталей и чугунов, обеспечивающих высокий уровень вышеупомянутых свойств. Содержание элементов (%мас.) в сталях должно быть в пределах от 0,2 до 0,4 углерода; 0,15–0,9 кремния; 0,25–1,4 марганца; 0,20–2,5 хрома; 0,1–1,0 никеля; до 0,025 серы; до 0,02 фосфора, а в чугунах – 2,3–3,3 углерода; 0,5–0,75 кремния; 0,5–5,0 марганца; 11,0–24,0 хрома; до 2,4 молибдена; до 0,04 серы; до 0,05 фосфора.

Интегральным показателем химического состава железоуглеродистых сплавов является углеродный эквивалент, который для вышеприведенного содержания элементов составляет для стали ( $C_{\text{экв}}^{\text{ст}}$ ) [4] от 0,3 до 1,2 %, а для чугуна ( $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ ) [5] от 3,0 до 4,6 %.

Высококачественное диффузное соединение чугунного рабочего слоя и стальной основы, то есть формирование диффузного переходного слоя без пор, трещин усадочных и других дефектов происходит в том случае, когда жидкий чугун заливается на твердую основу при температуре ( $t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}$ ) ниже температуры окончания твердения стальной основы, то есть температуры солидус стали ( $t_{\text{сол}}^{\text{ст}}$ ):

$$t_{\text{сол}}^{\text{ст}} > t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}. \quad (1)$$

Результаты исследований показали, что зависимости температуры солидус стали ( $t_{\text{сол}}^{\text{ст}}$ ) и ликвидус чугуна ( $t_{\text{ликв}}^{\text{чуг}}$ ) от углеродного эквивалента имеют следующий вид:

$$t_{\text{сол}}^{\text{ст}} = 1498 - 55,96 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{ст}}, \text{ } ^\circ\text{C}; r = 0,909; \quad (2)$$

$$t_{\text{ликв}}^{\text{чуг}} = 1462 - 47,94 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}, \text{ } ^\circ\text{C}; r = 0,987; \quad (3)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции;  $C_{\text{экв}}^{\text{ст}}$  и  $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$  – углеродные эквиваленты стали и чугуна, соответственно.

Согласно результатам работы [6], оптимальная температура заливки легированных чугунов в литейной формы должна быть на 140–160 °С больше его температуры ликвидус, а максимальный перегрев расплава чугуна, при заливке в литейные формы, должен быть не более 160 °С.

С учетом уравнения (3), определили, что зависимость оптимальной температуры заливки чугуна рабочего слоя ( $t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}$ ) от его химического состава имеет следующий вид.

$$t_{\text{зал}}^{\text{чуг}} = 1622 - 47,94 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4)$$

С учетом формул 1–4 определили, что для качественного диффузионного соединения чугунного рабочего слоя и стальной основы необходимо выполнение следующего соотношения:

$$C_{\text{экв}}^{\text{чуг}} > 2,59 + 1,17 \cdot C_{\text{экв}}^{\text{ст}}. \quad (5)$$

Соотношение (5) дает возможность при известном значении температуры солидус стальной основы ( $t_{\text{сол}}^{\text{ст}}$ ) путем варьирования значениями углеродного эквивалента чугуна ( $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ ) и температурой заливки чугуна ( $t_{\text{зал}}^{\text{чуг}}$ ) определить их оптимальные параметры для получения качественного диффузионного соединения чугунного рабочего слоя и стальной основы биметаллических отливок.

Для проверки вышеприведенных положений изготовили отливки биметаллических молотков дробилок и определили прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя. Внешний вид и размеры отливок показаны на рис. 1. Прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя определяли как усилие разрушения при растяжении отливок, с нанесенными на их переходной диффузионный слой двусторонних надрезов длиной 20 мм, радиусом 1 мм, на разрывной машине ЦДМУ-30Т.

В индукционной печи ИСТ-016 выплавляли сталь и перед заливкой определяли ее химический состав. Сталь содержала (в %мас.) 0,33 углерода; 0,65 кремния; 0,9 марганца; 1,3 хрома; 0,5 никеля; 0,025 серы; 0,02 фосфора.

По формуле, приведенной в работе [4], рассчитывали углеродный эквивалент стали ( $C_{\text{экв}}^{\text{ст}} = 0,78 \%$ ), а по формуле (2) – температуру солидус стали  $t_{\text{сол}}^{\text{ст}} = 1454 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

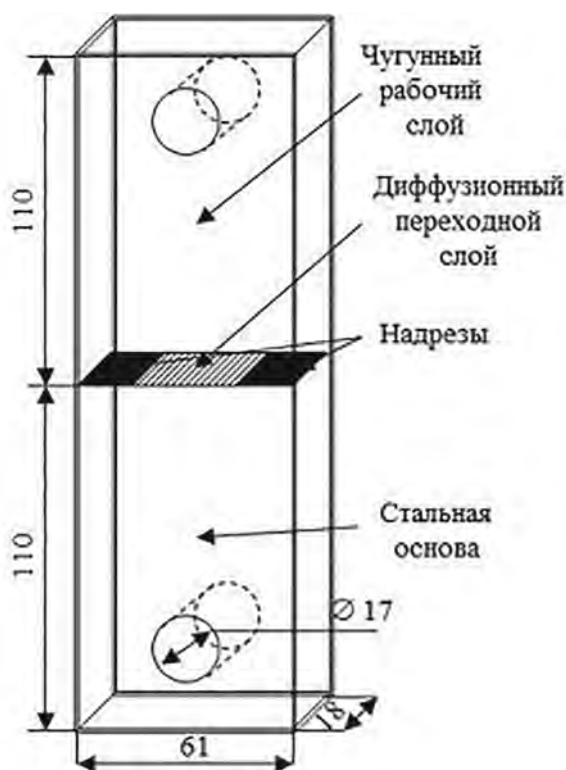


Рис. 1. Размеры биметаллических молотков дробилок для испытаний на прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя

Температура 1454 °С является максимальной температурой заливки чугуно-го рабочего слоя, в данном случае, согласно которой максимальный углеродный эквивалент чугуна ( $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ ), рассчитанный по формуле (4), равен 3,5 %. То есть все химические составы легированных износостойких чугунов, для которых значение углеродных эквивалентов будут в пределах от 3,5 до 4,6 %, могут применяться в качестве материала рабочего слоя (рис. 2).

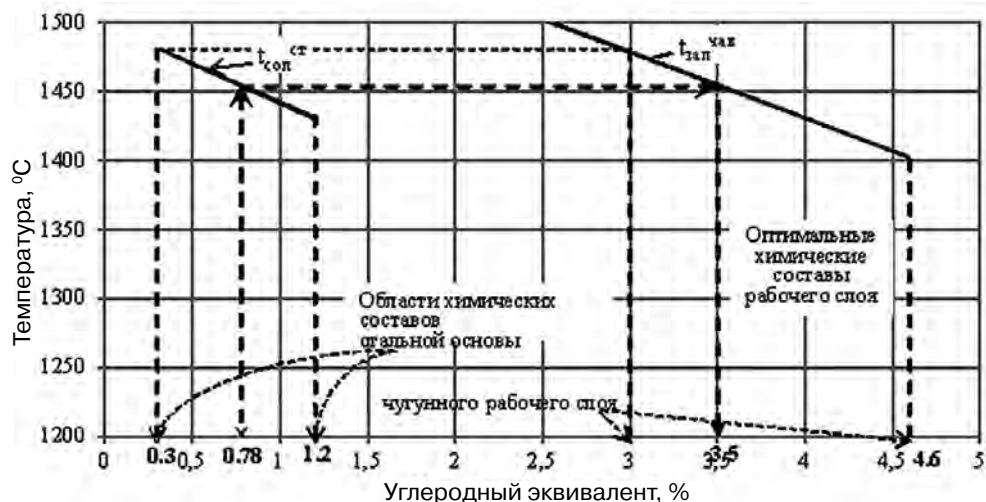


Рис. 2. Области химических составов стальной основы и чугуна рабочего слоя, которые используются при изготовлении биметаллических отливок и пример определения оптимальных химических составов чугуна рабочего слоя при заданном химическом составе стальной основы ( $C_{\text{экв}}^{\text{ст}} = 0,78 \%$ )

Химический состав чугунов, которые одновременно со сталью выплавляли в другой индукционной печи, приведен в таблице.

### Химический состав и углеродные эквиваленты $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ чугунов, температура их заливки $t_{\text{звл}}^{\text{чуг}}$ и усилия разрушения ( $P$ ) биметаллических молотков

| Номер состава | Содержание элементов, %мас. |     |     |    |       |      |     | $C_{\text{экв}}^{\text{чуг}}$ % | $t_{\text{звл}}^{\text{чуг}}$ , °С | $P$ , кг |
|---------------|-----------------------------|-----|-----|----|-------|------|-----|---------------------------------|------------------------------------|----------|
|               | C                           | Si  | Mn  | Cr | S     | P    | Mo  |                                 |                                    |          |
| 1             | 3,2                         | 0,7 | 3,9 | 15 | 0,03  | 0,05 | 0,8 | 4,07                            | 1427                               | 3924     |
| 2             | 3                           | 0,7 | 5,2 | 18 | 0,03  | 0,05 | 0   | 3,98                            | 1431                               | 3764     |
| 3             | 3                           | 0,7 | 5   | 15 | 0,03  | 0,05 | 0,4 | 3,84                            | 1438                               | 3816     |
| 4             | 2,4                         | 1   | 1   | 19 | 0,025 | 0,05 | 0   | 3,65                            | 1447                               | 3326     |
| 5             | 2,6                         | 0,4 | 0,5 | 11 | 0,03  | 0,05 | 1,4 | 3,28                            | 1465                               | 1875     |
| 6             | 2,4                         | 0,4 | 4,8 | 12 | 0,03  | 0,05 | 0,2 | 3,00                            | 1478                               | 1647     |

После заливки стали в литейную форму, на открытую поверхность стальной основы подавали флюс, на который заливали чугун, выплавленный в другой индукционной печи. Испытания биметаллических молотков на растяжение проводили после термической обработки.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что при оптимизации химических составов биметаллических отливок (чугуны № 1–4) прочность соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя увеличивается в 1,8–2,4 раза по сравнению с неоптимизированными по химическому составу биметаллическими отливками (чугуны № 5, 6).

### Выводы

Результаты выполненных исследований показали, что при изготовлении биметаллических отливок путем заливки жидкого металла на твердую основу, оптимизация химического состава стальной основы и чугунного рабочего слоя является существенным резервом повышения их качества. Установлено, что высококачественное соединение чугунного рабочего слоя и стальной основы происходит в случае, когда жидкий чугун заливается на твердую основу при температуре ниже температуры солидус стали. Оптимизация химического состава стальной основы и чугунного рабочего слоя приводит к увеличению прочности соединения стальной основы и чугунного рабочего слоя в 1,8–2,4 раза по сравнению с прочностью неоптимизированных по химическому составу биметаллических отливок.

### Список литературы

1. Костенко Г. Д. Основы процессов получения биметаллических отливок. – К.: Знание, 1990. – 19 с.
2. Афтандилянц Е. Г. Термокинетические параметры формирования структуры биметаллических отливок / Е. Г. Афтандилянц, О. А. Пеликан, В. П. Лихошва, Л. М. Клименко // Процессы литья. – 2011. – № 6. – С. 40–49.
3. Афтандилянц Е. Г. Закономерности формирования абразивной износостойкости биметаллических отливок / Е. Г. Афтандилянц, О. А. Пеликан, В. П. Лихошва, В. В. Ширяев, Д. В. Глушков, Л. М. Клименко // Металл и литье Украины. – 2012. – № 7. – С. 34–37.
4. ГОСТ 27772-88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия: ГОСТ 27772-88. [Введен в действие от 1989-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 56 с. – (Государственный стандарт Союза ССР)
5. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. – М., Л.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
6. Справочник по чугуному литью / Под ред. Н. Гиршовича. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 758 с.

Поступила 27.12.2018

### References

1. Kostenko, G. D. (1990) Process basics of obtaining bimetallic castings. Kiev: Znanie [in Russian].
2. Aftandiliants, E. G., Pelikan, O. A., Lihoshva, V. P., & Klimenko, L. M. (2011) The thermokinetic parameters of structure forming of the bimetallic castings. *Processy lit'ia*, no. 6, pp. 40–49 [in Russian]
3. Aftandiliants, E. G., Pelikan, O. A., Lihoshva, V. P., Shirjaev, V. V., Glushkov, D. V., & Klimenko, L. M. (2012) Regularities of Formation of Abrasive Wear Resistance of the Bimetallic Castings. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7, pp. 34–37 [in Russian].
4. Structural steel structure rolled products. General specifications. (1988) HOST 27772-88 from 01 January 1989. Moscow: Gosudarstvennyj standart Sojuza SSR [in Russian].
5. Girshovich, N. G. (1966) Crystallization and properties of cast iron in castings. M., L.: Mashinostroenie [in Russian].
6. Girshovich, N. (Eds.) (1978) Leningrad: Mashinostroenie, 758 p.

Received 27.12.2018

**Є. Г. Афтанділянц**, д-р техн. наук, ст. наук. співр, e-mail: [aftyev@hotmail.com](mailto:aftyev@hotmail.com)

**В. П. Лихошва**, д-р. техн. наук, зав. відділом, e-mail: [plazer\\_v@mail.ru](mailto:plazer_v@mail.ru)

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

### ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНИХ СКЛАДІВ БІМЕТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ

На основі аналізу процесу формування з'єднання сталеві основи та чавунного робочого шару біметалевих виливків встановлено, що якісне з'єднання при заливці рідкого чавуну на тверду сталеву основу, що розташована в ливарній формі, відбувається у випадку, коли температура заливання чавуну менше температури солідус сталі. Враховуючи, що температури заливання чавуну та солідус сталі залежать від їх хімічного складу, встановили кількісні закономірності впливу хімічного складу на ці характеристики. У якості інтегрального параметру хімічного складу сталі та чавуну використовували їх вуглецевий еквівалент. Встановлено кількісні закономірності впливу вуглецевого еквіваленту на температури солідус сталі та ліквідус чавуну, а також заливання чавуну. Наведено умови отримання якісного дифузійного з'єднання чавунного робочого шару і сталеві основи та приклад визначення оптимальних хімічних складів сталеві основи та чавунного робочого шару при виготовленні біметалевих молотків. Показано, що при оптимізації хімічних складів біметалевих виливків міцність з'єднання сталеві основи та чавунного робочого шару збільшується в 1,8–2,4 рази в порівнянні з неоптимізованими за хімічним складом біметалевими виливками.

**Ключові слова:** біметалеві виливки, основа, робочий шар, сталь, чавун, вуглецевий еквівалент, температура, солідус, ліквідус, заливання, міцність.

**Y.G. Aftandilyants**, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher,

e-mail: [aftyev@hotmail.com](mailto:aftyev@hotmail.com)

**V.P. Lihoshva**, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department,

e-mail: [plazer\\_v@mail.ru](mailto:plazer_v@mail.ru)

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

### OPTIMIZATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF BIMETALLIC CASTINGS

Based on the analysis of the formation of the compound of the steel base and the cast-iron working layer of bimetallic castings, it has been established that a high-quality compound, when liquid iron is poured on solid steel base located in the mold, occurs when cast iron temperature is less than the temperature of steel solidification. Taking into account that the cast iron pouring and steel solidus temperatures are depended from their chemical composition, quantitative regularities of the chemical composition influence on these characteristics are established. Carbon equivalent was taken as integral parameter of the steel and cast iron chemical composition. Quantitative regularities are established of influence of the carbon equivalent on the temperatures of solidus steel and liquidus cast iron, as well as pouring of cast iron. The conditions are given of obtaining a qualitative diffusion compound of a cast-iron working layer and a steel base and an example of determining the optimal chemical compositions of a steel base and a cast-iron working layer in the manufacture of bimetallic hammer. It is shown that strength of the connection between the steel base and the cast iron working layer increases in 1.8–2.4 times for optimizing the chemical compositions of bimetallic castings, in comparison with the bimetallic castings with not optimized chemical composition.

**Key words:** bimetallic castings, base, working layer, steel, cast iron, carbon equivalent, temperature, solidus, liquidus, pouring, strength.



**С. В. Ладохин**, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,  
e-mail: e\_luch@ptima.kiev.ua

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## К ВОПРОСУ О СОСТОЯНИИ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНА В УКРАИНЕ

*Выполнен сравнительный анализ состояния производства титана в России и Украине. Рассмотрены пути усовершенствования технологии и модернизации оборудования для получения многокомпонентных титановых сплавов для отечественного литейного производства.*

**Ключевые слова:** титан, сплавы, электронно-лучевая плавка, вакуумно-дуговая плавка, литье, установка, электронно-лучевая пушка, гарнисажный тигель.

В газете «Зеркало недели» (№ 17 от 12 мая 2018 г.) была опубликована статья Б. Соболева «Стокгольмский синдром украинского титана», в которой дана негативная оценка состояния титановой отрасли в Украине. Неудовлетворительное состояние этой отрасли обусловлено, по мнению автора, ошибочными отношениями с Россией относительно проблемы производства титана. Б. Соболев указывает на целесообразность создания собственного замкнутого цикла производства титановой продукции, включая получение слитков, проката, изделий кузнечно-прессовой и механической обработки, но не затрагивает вопросов, связанных с получением титанового литья, являющегося составной частью такой продукции. Это подтолкнуло автора провести сравнительный анализ состояния металлургического и литейного производства титана в России и Украине и дать оценку работам по литью титана в нашей стране за последнее время.

Говоря о России, следует иметь в виду, что в настоящее время эта страна является крупнейшим в мире производителем титанового проката – до 30 тыс. т. в год и более. При этом, как и во всех других странах – производителях титана, это производство основано на переплаве титановой губки, получаемой методом Кролла, в слитки с использованием вакуумно-дуговой плавки (ВДП). Б. Соболев обращает внимание на то, что основной производитель титановых слитков корпорация «ВСМПО-Ависма», по мнению ее директора М. Воеводина, благодаря освоению производства готовых кузнечно-прессовых и механически обрабатываемых изделий из титана, превращается из металлургического в машиностроительное предприятие.

Однако такое предприятие не может считаться в полном смысле машиностроительным, поскольку на нем отсутствует литейное производство, являющееся основой заготовительной базы машиностроительного предприятия. В России этот недостаток компенсируется наличием специализированных мощных литейных предприятий, таких как ОАО «Балашихинский литейно-механический завод» и ОАО «Зеленодольский завод им. А. М. Горького», способных производить широкую номенклатуру титанового литья с максимальной массой отливок до 2,5 т. Получение расплава титана для литья также осуществляется за счет использования ВДП, в данном случае гарнисажной (ВДГП).

В отличие от России в, нашей стране титановые слитки получают с использованием электронно-лучевой плавки (ЭЛП). В настоящее время в Киеве функционируют три предприятия, производящие титановые слитки – ООО «МК Антарес» (~ 5 тыс. т. слитков в год), НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (~ 3 тыс. т.), ООО «Стратегия БМ» (до одной тыс. т.). Использование электронно-лучевой плавки, первоначально обусловленное отсутствием в стране технологии ВДП титана, в

дальнейшем оказалось принципиально важным, поскольку ЭЛП, уступая ВДП по некоторым технико-экономическим показателям, является более эффективной технологией с точки зрения рафинирования металла. Другое важное преимущество ЭЛП перед ВДП состоит в возможности практически полной переработки отходов титана (скрапа, стружки, обрезки и др.), что для титанового производства имеет большое значение, учитывая специфику образования таких отходов. Именно стремлением обеспечить переработку отходов объясняется использование ЭЛП в странах, имеющих титановое производство. Отметим, что хотя работам по ЭЛП титана уделяется достаточно серьезное внимание во многих странах, лидерство в этом вопросе занимает наша страна, в которой освоено производство слитков как из отходов, так и из губки. По вопросам ЭЛП титана и титановых сплавов публикуется большое количество статей, но в целом состояние научно-исследовательских и технологических разработок в этой области систематизировано и обобщено в известных монографиях украинских специалистов [1–3].

К сожалению, в отличие от ЭЛП с производством слитков, проблеме титанового литья должного внимания в Украине не уделялось. В настоящее время такое литье в ограниченном объеме производится только на ОАО «Мотор Сич» (г. Запорожье), а в виде опытных партий – во ФТИМС НАН Украины и на ГП «Цирконий» (г. Каменское), на котором основное внимание традиционно уделялось литью циркония. Отметим, что на ОАО «Мотор Сич» получение титанового литья осуществляется по технологии, которая применяется в России, то есть с выплавкой сплавов в вакуумно-дуговых литейных (гарнисажных) печах. В отличие от этого, ФТИМС НАН Украины и ГП «Цирконий» титановое литье производят с использованием электронно-лучевой гарнисажной плавки (ЭЛГП) с электромагнитным перемешиванием расплава (ЭМП).

Технология ЭЛГП-ЭМП является отечественной разработкой. Работа в этом направлении проводилась ФТИМС НАН Украины специально для плавки и литья тугоплавких металлов и сплавов, в первую очередь, титановых. Состояние исследований и разработок по ЭЛГП-ЭМП за период до 2005 г. систематизировано и обобщено в монографии [4].

*Целью настоящей статьи* является рассмотрение полученных с указанного времени результатов по плавке и литью многокомпонентных сложнолегированных титановых сплавов, представляющих наибольший интерес для машиностроения. Анализ проводится по вопросам, касающимся как собственно технологии выплавки сплавов, так и используемого для этого оборудования.

*Усовершенствование технологии ЭЛГП-ЭМП.* Хотя технологические особенности электронно-лучевой гарнисажной плавки с электромагнитным перемешиванием расплава тугоплавких металлов и сплавов, в том числе титановых, достаточно подробно рассмотрены в работе [4], в ней применительно к выплавке многокомпонентных сплавов не в полной мере освещены вопросы подготовки шихтовых материалов к плавке, завалки (загрузки) их в тигель и введения в сплав легирующих элементов с высокой упругостью пара, которые при ЭЛГП-ЭМП существенно отличаются от применяемых, например, при вакуумно-дуговой или плазменной плавках.

Что касается подготовки шихтовых материалов, то это отличие состоит, в основном, в использовании так называемых «съемных гарнисажей». На рис. 1 приведены фотографии нескольких таких съемных гарнисажей из разных титановых сплавов для тиглей, как со сливным носком, так и с донным сливом.

Съемные гарнисажи представляют собой формируемые из расплава выплавляемого сплава оболочки, затвердевающие на стенках и днище тигля, благодаря интенсивному охлаждению расплава. Применение съемных гарнисажей оказалось особенно эффективным средством обеспечения более стабильного состава именно сложнолегированных сплавов, в том числе получаемых с использованием отходов производства [5].

Завалка шихты в тигель является технологической операцией, которая оказывает

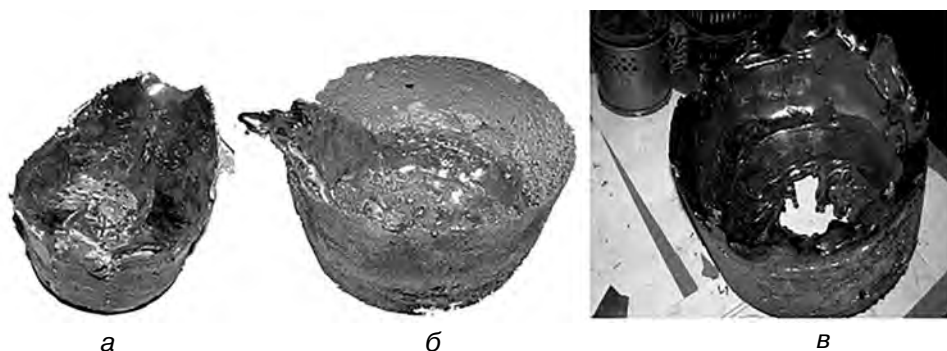


Рис. 1. Съемные гарнисажи: *а* – сплав ВТ20, тигель диаметром 135 мм со сливным носком; *б* – сплав ВТ5, тигель диаметром 260 мм со сливными носком; *в* – сплав ВТ1-0, тигель диаметром 285 мм со сливным отверстием в днище

влияние на проведение последующего процесса плавки, хотя и менее заметное, чем, например, в случае индукционной плавки. При индукционной плавке плотность заполнения рабочего объема тигля должна составлять не менее 0,8, в то время для гарнисажной плавки эта характеристика может быть существенно меньшей. Относительно непосредственно завалки шихтовых материалов в тигель при ЭЛГМ-ЭМП можно отметить, что на практике применяются различные ее варианты. Возможные схемы укладки материалов приведены на рис. 2.

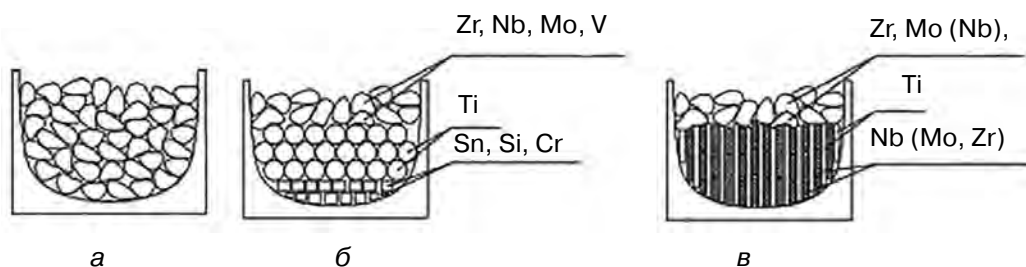


Рис. 2. Схемы укладки шихтовых материалов в тигле (объяснения см. в тексте)

Наиболее простым и, как представляется, логичным является вариант, при котором обеспечивается равномерное смешение отдельных составляющих компонентов шихты, прошедших предварительную очистку и дробление на фракции, удобные для смешения (рис. 2, *а*). Такой подход использовался с самого начала развития технологии ЭЛГП-ЭМП и является общепризнанным, широко используемым также в практике получения слитков титановых сплавов в металлургических электронно-лучевых установках [2]. Недостатком рассматриваемой схемы является необходимость ввода в шихту избыточного количества легкоиспаряющихся легирующих элементов для компенсации их потерь с целью обеспечения попадания в заданный состав. Описанный вариант шихтовки был использован при выплавке ряда серийных титановых сплавов, достаточно подробно рассмотренных в [4]. В качестве примера в табл. 1 приведены результаты изучения свойств сплавов ВТ6, ВТ20, ВТ3-1 и ВТ23, целью проведения которых было получение сравнительных данных о механических свойствах сплавов электронно-лучевой выплавки и деформированных сплавов ВДП.

Плавки проводили в тигле диаметром 295 мм с комбинированной донно-боковой системой ЭМП, обогрев осуществляли термокатодной пушкой. В качестве шихты использовали отходы литейного производства с добавлением (при необходимости) стружки этих же сплавов, что позволило исключить необходимость подшихтовки легирующими элементами, в том числе алюминием. Условия проведения плавки были такими: максимальная мощность электронно-лучевого нагрева – 70 кВт, общая

Таблица 1

Механические свойства титановых сплавов различных методов выплавки

| Сплав | Металл | Свойства         |                      |              |            |            |           |
|-------|--------|------------------|----------------------|--------------|------------|------------|-----------|
|       |        | $\sigma_n$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\Psi$ , % | KCU, кДж/м | НВ, МПа   |
| BT6   | ЭЛГП   | 960              | 880                  | 8            | 18         | 350        | –         |
|       | ВДП    | 850–1070         | –                    | 6            | 20         | 300        | –         |
| BT20  | ЭЛГП   | 980–1030         | 850–870              | 8–11         | 15–24      | 410–480    | 3100–3300 |
|       | ВДП    | 1000–1100        | –                    | 10–13        | 20–36      | –          | –         |
| BT3-1 | ЭЛГП   | 1080–1100        | 880–890              | 7–15         | 12–24      | 340–360    | 3300–3520 |
|       | ВДП    | 1000–1200        | –                    | 10           | 30         | 300        | 2690–3630 |
| BT23  | ЭЛГП   | 1130–1150        | 820–870              | 3–7          | 6–12       | 250–260    | 3500–3700 |
|       | ВДП    | 1100             | 1000                 | 14           | –          | –          | –         |

продолжительность плавки – 20–28 мин, давление остаточных газов в плавильной камере – 0,013–0,13 Па, диаметр фокального пятна – 20–25 мм, продолжительность электромагнитного перемешивания – 12–15 мин. Масса сливаемого расплава составляла 4,2–4,6 кг. Расплав сливали в металлические формы с получением цилиндрических заготовок диаметром 10–50 мм. Образцы для изучения свойств изготавливали из центральной части заготовок. Металл ВДП представлял собой прутки.

Полученные данные свидетельствуют, что свойства сплавов электронно-лучевой выплавки в литом состоянии не уступают свойствам деформированного металла ВДП (при отсутствии литейных дефектов).

Все последующие плавки проводили в тигле диаметром 260 мм с боковой системой ЭМП, обогрев осуществляли термокатодной пушкой. Условия проведения плавки были следующими: максимальная мощность электронно-лучевого нагрева – 70–90 кВт, продолжительность плавки – 20–30 мин., давление остаточных газов в плавильной камере – 0,13–0,65 Па, продолжительность электромагнитного перемешивания – 12–18 мин. Исползованные методы шихтовки позволяют обеспечить достаточно жесткий нагрев на начальной стадии процесса, а ввод алюминия в расплав проводили за 2–3 мин. до его слива из тигля. Слив расплава проводили в графитовую форму диаметром 65 мм и высотой 400 мм. Масса сливаемого расплава – 6–8 кг.

В практике ЭЛГП последнего времени обычным является получение сложнолегированных сплавов различного состава, содержащих несколько тугоплавких элементов (ниобий, молибден, цирконий, ванадий) и несколько сравнительно легкоплавких (кремний, олово, железо). Для выплавки таких сплавов оказалось целесообразным размещать легкоплавкие шихтовые материалы на дне съемного гарнисажа, а тугоплавкие – сверху основной титановой шихты, как это показано на рис. 2, б. При таком размещении компонентов тугоплавкие материалы сплавляются непосредственно электронным лучом и расплавляют размещенный ниже титан, а образующийся расплав титана вместе с тугоплавкими элементами затем расплавляет легкоплавкие материалы. Благодаря электромагнитному перемешиванию образующегося расплава, обеспечиваются как интенсификация растворения в нем отдельных компонентов шихты, так и равномерное распределение элементов в расплаве. Таким образом были получены сплавы ( $\alpha+\beta$ )-класса, состав которых приведен в табл. 2. В качестве шихты в плавках применяли титановую губку ТГ110, отходы листопрокатного производства титана BT1-0, алюминий марки А-99, йодидный цирконий, ниобий и молибден (в виде прессованных штабиков и листов толщиной 0,5–1,0 мм), олово (в виде прутков и дроби), кремний марки Кр-1, ванадий марки ВиМ, хром металлический Х99А.

В приведенных в табл. 2 данных обращает на себя внимание заметное отклонение содержания молибдена в сплаве Т1008 от рассчитанного. Это объясняется тем, что молибден был завален в тигель в виде достаточно массивных кусков, которые не успели полностью расплавиться до расплавления титана, в результате чего молибден осел в донные слои ванны. Это указывает на необходимость вводить такие

Таблица 2

Химический состав титановых сплавов

| Сплав  | Содержание элементов, %мас. |          |         |          |          |           |         |
|--------|-----------------------------|----------|---------|----------|----------|-----------|---------|
|        | Al                          | Sn       | Zr      | Mo       | Nb       | Si        | V       |
| T1100  | 6,0/7,1                     | 2,7/2,66 | 4,0/4,6 | 0,4/0,37 | –        | 0,4/0,37  | –       |
| IM1834 | 5,5/6,06                    | 4,0/3,3  | 4,0/4,7 | 0,4/0,12 | 1,0/1,02 | 0,35/0,41 | –       |
| T1008  | 6,06/6,7                    | 3,5/3,46 | 6,0/6,8 | 4,0/0,47 | 5,5/4,98 | 0,35/0,57 | 2,0/2,1 |

Примечание: Ti–основа, числитель – рассчитанное значение, знаменатель – полученное содержание

тугоплавкие и высокоплотные материалы в шихту возможно в мелком виде для предупреждения их оседания.

Более сложным для выплавки многокомпонентного сплава представляется случай, если содержание какого-либо тугоплавкого элемента существенно превышает обычное сравнительно небольшое значение, характерное для подобных сплавов. Примером этого являются так называемые «орто»-сплавы, представляющие собой интерметаллиды типа  $\gamma$ -TiAl с высоким содержанием ниобия [6]. В этом случае шихтовку целесообразно осуществлять таким образом, чтобы в съемном гарнисаже основные компоненты (здесь – титан и ниобий) размещались рядом друг с другом, а не послойно. Пример такого размещения шихтовых материалов приведен на рис. 2, в. При плавке подобной шихты следует обеспечивать расплавление, в первую очередь, более тугоплавкого компонента с дальнейшим обогащением расплава менее тугоплавким. При этом, другие легирующие элементы следует размещать так, как это описано в предыдущем варианте, а алюминий вводить в конце плавки в уже сформированный расплав. Была проведена выплавка таких композиций «орто»-сплавов: 1 – Ti–14,7 Al–7,6 Nb–1,2 Mo–1,4 Zr; 2 – Ti–14,8 Al–21,9 Nb–1,9 Mo–2,1 Zr; 3 – Ti–13,6 Al–24,4 Nb–1,9 Mo–2,1 Zr; 4 – Ti–14,1 Al–27,9 Nb–1,6 Mo–1,5 Zr. В табл. 3 приведены основные показатели выплавки этих сплавов.

Таблица 3

Основные показатели выплавки «орто»-сплавов

| Сплав | Шихта, кг/% |          |           |           |           | Масса, кг |       | Размещение           |
|-------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|----------------------|
|       | Ti          | Al       | Nb        | Mo        | Zr        | шихты     | слива |                      |
| 1     | 5,4/60      | 1,35/15  | 1,98/22   | 0,15/1,66 | 0,13/1,44 | 9,01      | 5,58  | Nb поверх Ti         |
| 2     | 5,3/54      | 1,7/17,5 | 2,45/25   | 0,15/1,5  | 0,16/1,6  | 9,7       | 9,1   | Nb рядом с Ti        |
| 3     | 6,4/57      | 1,9/17   | 2,47/22   | 0,25/2,2  | 0,23/2,1  | 11,3      | 10,1  | Nb рядом с Ti        |
| 4     | 3,32/51     | 1,1/17   | 1,85/28,5 | 0,11/1,7  | 0,12/1,8  | 6,5       | 5,62  | Ti-пластины, Nb-лист |

Приведенное в табл. 3 указание размещения ниобия и титана относительно друг друга позволяет дать оценку целесообразности использования того или иного варианта. Размещение более тугоплавкого ниобия сверху титана (сплав 1) приводит к расплавлению титана до того, как расплавится ниобий. В результате ниобий оседает на дно гарнисажа и в ходе последующей плавки наблюдается дополнительное испарение титана. Размещение титана и циркония рядом друг с другом (сплавы 2 и 3) обеспечивает более стабильное формирование сплава, причем желательно первым расплавлять ниобий с постепенным обогащением расплава титаном. Однако, наи-

более приемлемым вариантом с точки зрения проведения плавки и обеспечения необходимого состава оказалось формирование шихты из титановых пластин – отходов прокатного производства толщиной 3–6 мм и листов ниобия толщиной 1–2 мм. Указанная разница в толщинах материалов способствует их одновременному плавлению при практически одинаковой мощности электронного луча. Что касается других компонентов шихты, а именно циркония и молибдена, то их целесообразно размещать поверх шихты из титана и ниобия. Алюминий удобно вводить в расплав на заключительной стадии плавки.

Указанный выше технологический прием ввода алюминия не в шихту, а в уже сформированный в тигле расплав, является оригинальной разработкой, которая была проведена специально применительно к выплавке сложнелегированного сплава [5]. Использование предлагаемого способа целесообразно, если парциальное давления пара легирующего элемента выше аналогичной характеристики металла-основы. На рис. 3 показаны два возможных варианта такого ввода – путем сплавления электронным лучом с поступлением в расплав в тигле в виде капель и путем погружения в расплав в виде кускового материала. Если легирующий элемент склонен к взрывному испарению при попадании на него электронного луча (таким, например, является хром), то введение его в расплав желательно проводить в оболочке из металла-основы либо из более тугоплавкого легирующего элемента.

Отметим, что ввод легирующих элементов в расплав успешно использовался не

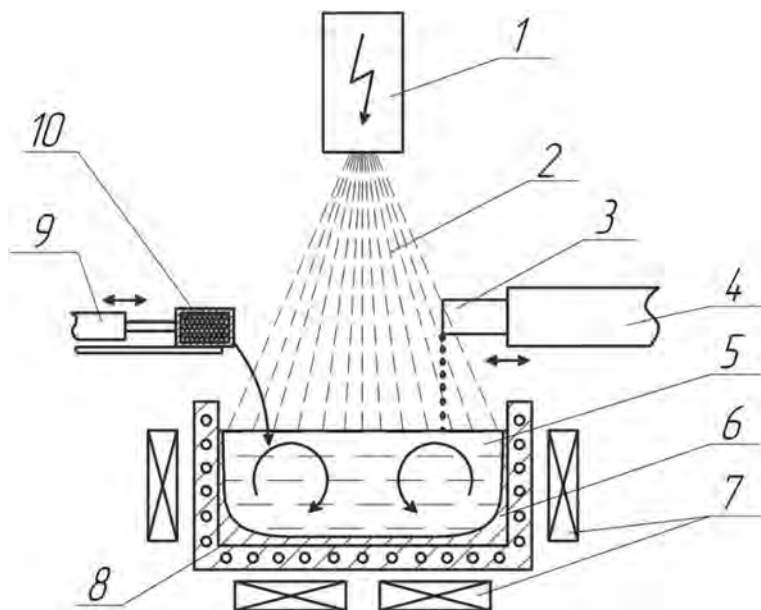


Рис. 3. Способ выплавки сложнелегированного сплава в гарнисажном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава: 1 – электронно-лучевая пушка; 2 – электронный луч; 3 – легирующий элемент; 4 – устройство подачи легирующего элемента; 5 – расплав; 6 – гарнисаж; 7 – система ЭМП тигля; 8 – тигель; 9 – устройство подачи легирующего элемента; 10 – легирующий элемент в капсуле металла-основы

только при выплавке титановых сплавов, но и при гарнисажной плавке сложнелегированных циркониевых сплавов.

*Модернизация оборудования для ЭЛГП-ЭМП.* Несмотря на то, что электронно-лучевая литейная технология рассматривается как перспективное направление получения металлопродукции высокого качества, в том числе титанового литья, на практике эта технология пока не получила достаточно широкого применения. Наряду с указанными в статье Б. Соболева обстоятельствами, обусловленными негативно складывающимися с Россией отношениями в области титанового производства

в целом, это в значительной степени объясняется также высокой стоимостью, сложностью в эксплуатации и низкой производительностью оборудования для электронно-лучевой гарнисажной плавки. Действительно, сравнение с оборудованием для вакуумно-дуговой гарнисажной плавки, являющейся основой современной литейной технологии титана [7], свидетельствует, что данное оборудование по этим показателям заметно уступает.

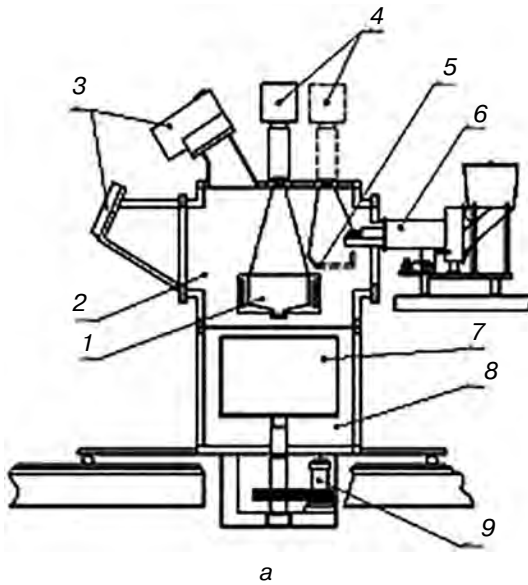
Когда говорят об оборудовании для ЭЛГП, прежде всего, имеют в виду собственно литейные плавильные агрегаты и их основные технологические элементы – плавильно-заливочные тигли и электронно-лучевые пушки. Относительно тиглей и пушек отметим, что предлагаемые в последнее время решения по усовершенствованию их конструктивного исполнения применительно к потребностям ЭЛГП рассмотрены в работах [8, 9]. Поэтому далее кратко рассматриваются только возможные пути усовершенствования собственно плавильных агрегатов.

Разрабатывавшиеся до последнего времени литейные электронно-лучевые плавильные агрегаты характеризовались оснащением высокопроизводительными высоковакуумными насосами, термокатодными электронно-лучевыми пушками и гарнисажными тиглями с системами электромагнитного перемешивания расплава (СЭМП), а также приемными литейными устройствами карусельного типа, обеспечивающими возможность проведения нескольких плавов без разгерметизации плавильного агрегата [4]. В последние годы стала проявляться тенденция перехода к разработке вместо громоздких высоковакуумных агрегатов с термокатодными электронно-лучевыми пушками литейных установок, оснащенных значительно более дешевыми и более простыми в эксплуатации бустерными вакуумными насосами, обеспечивающими проведение плавки в среднем вакууме при осуществлении обогрева пушками высоковольтного тлеющего разряда (ВТР), которые не требуют использования вакуумных насосов. Примером такой установки является приведенные на рис. 4 схема и общие виды агрегата и гарнисажного тигля с СЭМП, которые были разработаны ООО КБ ВМО для фирмы «Yuanda Chengli» (Китай) по исходным данным ФТИМС НАН Украины. Установка предназначена для переработки отходов технического титана с получением центробежнолитых заготовок. Разработанный для этой цели тигель позволяет выплавлять до 50 кг расплава со сливом через отверстие в днище, причем указанная масса расплава в настоящее время является максимально известной для ЭЛГП титана.

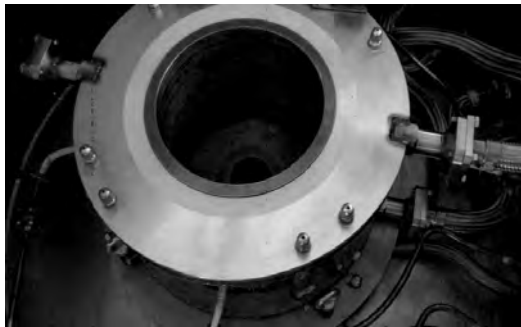
Характерными чертами новых установок для плавки титана являются стремление использовать промежуточные емкости, позволяющие удалять из расплава титана неметаллические включения, и несколько литейных камер, расширяющих технологические возможности. Отметим, что в рассмотренной выше установке также предусматривалось использование промежуточной емкости, но на данном этапе заказчики решили пока это устройство не использовать. На рис. 5 приведена схема электронно-лучевой литейной установки, особенностью которой является наличие промежуточной емкости и двух камер литейных форм [10]. Разработка подобной установки целесообразна с точки зрения получения сложнолегированных и простых по составу сплавов в одном агрегате. Возможность решения этой задачи появилась благодаря созданию гарнисажного тигля с СЭМП, который позволяет проводить выпуск расплава как через сливное отверстие в днище, так и через сливной носок путем наклона тигля. Следует также подчеркнуть, что это первая литейная электронно-лучевая установка, которая разрабатывалась с учетом использования промежуточной емкости, поскольку с самого начала предназначалась для проведения переплава губки.

Возможность использования гарнисажного тигля с СЭМП для получения как литого изделия, так и слитка, позволила предложить электронно-лучевую установку, схема которой приведена на рис. 6 [11].

Особенностью конструктивного исполнения установки является наличие отдельных камер литейных форм и слитка, а также ее оснащение пушками для независимого обогрева тигля и кристаллизатора. Отметим, что создание такой установки в настоящее время представляет интерес не столько для плавки титана, сколько



б



в

Рис. 4. Схема (а) и общий вид установки (б) и плавильно-заливочного тигля (в) фирмы «Yuanda Chengli» (Китай): 1 – тигель; 2 – плавильная камера; 3 – смотровые системы; 4 – пушки ВТР; 5 – промежуточная емкость; 6 – устройство подачи шихты; 7 – блок литейных форм; 8 – камера литейных форм; 9 – центробежное устройство

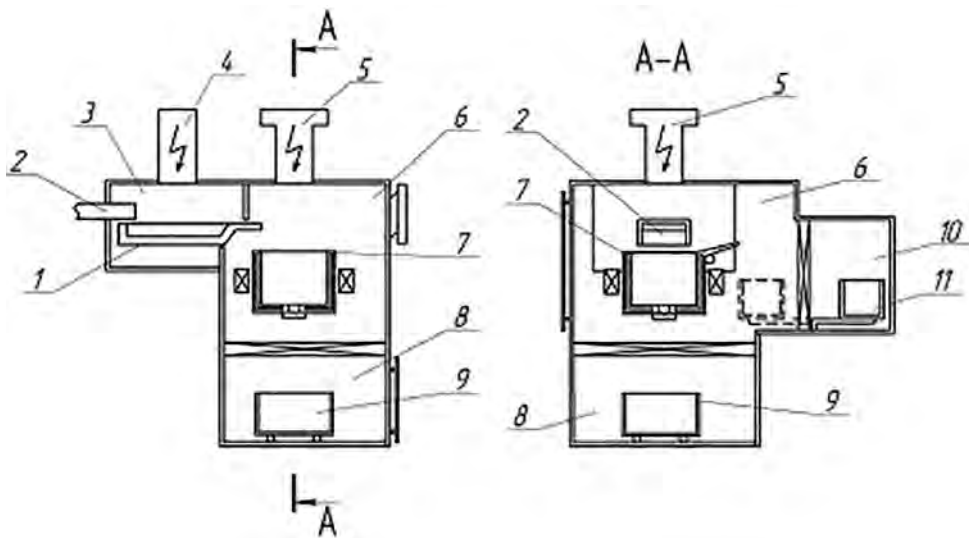


Рис. 5. Схема электронно-лучевой литейной установки с двумя камерами литейных форм: 1 – промежуточная емкость; 2 – устройство завалки шихты; 3 – зона предварительного рафинирования; 4 – пушка ВТР; 5 – термодатодная пушка; 6 – зона окончательного рафинирования; 7 – гарнисажный тигель с системой ЭМП; 8 – камера литейной формы; 9 – литейная форма; 10 – камера литейной формы; 11 – литейная форма



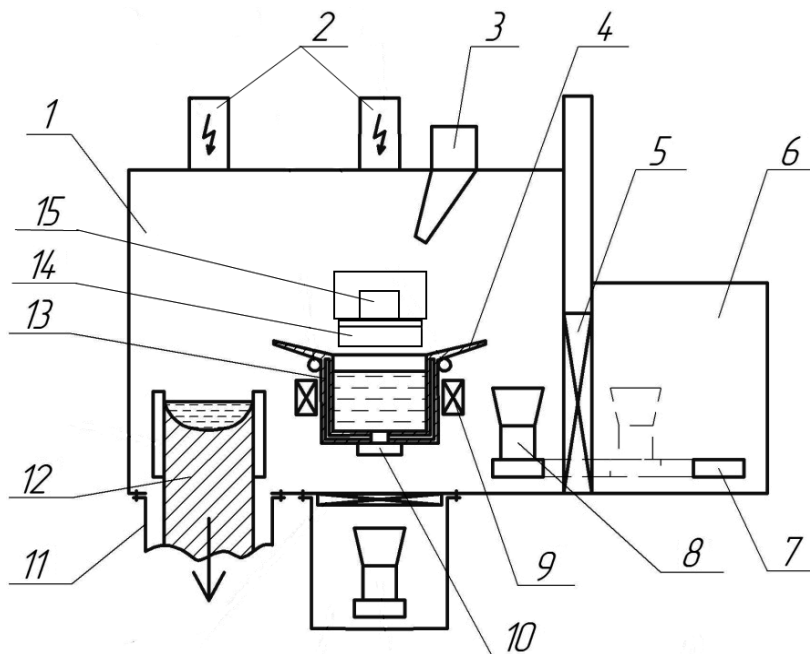


Рис. 6. Схема электронно-лучевой установки для получения слитков и литых изделий: 1 – плавильная камера; 2 – электронно-лучевые пушки; 3 – устройство ввода легирующих элементов; 4 – сливной носок; 5 – вакуумный затвор; 6 – камера литейных форм; 7 – механизм перемещения формы; 8 – литейная форма; 9 – система электромагнитного перемешивания; 10 – крышка сливного отверстия; 11 – камера слитка; 12 – слиток; 13 – гарнисажный тигель; 14 – промежуточная емкость; 15 – устройство подачи шихты

для плавки циркония, поскольку относительно невысокая потребность в изделиях из циркония для нужд отечественного ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) может быть удовлетворена одним плавильно-заливочным агрегатом, то есть отпадает необходимость в создании отдельных установок для получения слитка и литых заготовок.

### Список литературы

1. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 266 с.
2. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г. В. Жук. – К.: Наук. думка, 2006. – 246 с.
3. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высоко-реакционных металлов. – К.: Наук. думка, 2008. – 312 с.
4. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина. – К.: Сталь, 2007. – 626 с.
5. Особенности получения титановых сплавов из отходов производства в электронно-лучевой литейной установке / Н. И. Левицкий, Е. А. Матвиец, Т. В. Лапшук и др. // Процессы литья. – 2013. – № 5. – С. 55–59.
6. Получение сложнoleгированных титановых сплавов методом электронно-лучевой гарнисажной плавки / Н. И. Левицкий, Е. А. Матвиец, Т. В. Лапшук и др. // Металл и литье Украины. – 2012. – № 4. – С. 6–9.
7. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов / А.Л. Андреев, Н.Ф. Аношкин, К.М. Борзецовская и др. – М.: Металлургия, 1978. – 384 с.
8. Выбор конструкции гарнисажных тиглей повышенной емкости для электронно-лучевой плавки титана / А. И. Глухенький, Ю. М. Гореславец, Ю. М. Бондар и др. // Процессы литья. – 2017. – № 4. – С. 58–65.
9. Ладохин С. В. Пути решения проблемы циркония в программе создания ядерно-топливного цикла в Украине // Процессы литья. – 2017. – № 5. – С. 62–71.
10. Ладохин С. В. Электронно-лучевая установка многоцелевого назначения // Металл и литье Украины. – 2014. – № 10. – С. 3–7.

11. Патент України на корисну модель № 108478 «Електронно-променева установка для отримання зливок і литих виробів», МПК С21С5/56. ґ. С.В. Ладохін, Т.В. Лапшук, Є.О. Дрозд. – Опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14 .

Поступила 28.01.2019

### References

1. Paton, B. E., Trigub, N. P., Kozlitin, D. A. et al. (1997) Electron beam melting. K.: Nauk. Dumka, 266 p. [in Russian].
2. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) Electron beam melting of titanium. K.: Nauk. Dumka, 246 p. [in Russian].
3. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2008) Electron beam melting of high temperature and high reactive metals. K.: Nauk. Dumka, 312 p. [in Russian].
4. Ladokhin, S.V. (ed.) Electron beam melting in foundry. K.: Steel, 626 p. [in Russian].
5. Levitsky, N.S., Matviec, E.A., Lapshuk, T.V. et al. (2013) Peculiarity of titanium alloys melting in electron beam installation with the industrial waste use. Protsessyi litya, no. 5, pp. 55–59 [in Russian].
6. Levitsky, N.S., Matviec, E.A., Lapshuk, T.V. et al. (2012) The multicomponent titanium alloys production by electron beam skull melting method. Metall litye Ukrainy, no. 4, pp. 6–9 [in Russian].
7. Andreev, A.L., Anoshkin, N.F., Borzecovskya, K.M. et al. (1978) Titanium alloys melting and casting of titanium alloys. Moscow: Metallurgia, 384 p. [in Russian].
8. Glukhenkiy, A.I., Goreslavac, U.V., Bondsar, U.M. et al. (2017) Design of skull crucibles of high capacity for electron beam melting of titanium. Protsessyi litya, no. 4, pp. 58–65 [in Russian].
9. Ladokhin, S.V. (2017) The ways of zirconium problem decision in the program of nuclear fuel creation in Ukraine. Protsessyi litya, no. 5, pp. 62–71 [in Russian].
10. Ladokhin, S.V. (2014) Electron beam installation of multi-purpose use. Metall litye Ukrainy, no. 10, pp. 3–7 [in Russian].
11. Electron beam installation for ingots and cast parts production. PU № 108478, C21C5/56. Opubl. 25.07.2016. Buyl. № 14.

Received 28.01.2019

**С. В. Ладохін, д-р техн. наук, проф., гол. наук. співр., e-mail: e\_luch@ptima.kiev.ua**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

### ДО ПИТАННЯ ПРО СТАН ЛИВАРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТИТАНУ В УКРАЇНІ

*Проведено порівняльний аналіз стану виробництва титану в Росії та Україні. Розглянуто шляхи вдосконалення технології та модернізації устаткування для одержання багатоконпонентних титанових сплавів для вітчизняного ливарного виробництва.*

**Ключові слова:** титан, сплави, електронно-променева плавка, вакуумно-дугова плавка, литво, установка, електронно-променева гармата, гарнісажний тигель.

**S. V. Ladokhin, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Senior Researcher,**  
e-mail: e\_luch@ptima.kiev.ua

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

### ON THE PRESENT MODERN SITUATION WITH CASTING TECHNOLOGY OF TITANIUM IN UKRAINE

*Brief review of the present situation in Russian and Ukrainian titanium production is fulfilled. The ways of technology improvement and equipment modernization for native multicomponent titanium alloys production are considered.*

**Keywords:** titanium, alloy, electron-beam melting, vacuum-arc melting, casting, installation, electron-beam gun, skull crucible.

УДК 621.74.669.131.622

**В. А. Кривошеев**, канд. техн. наук, почетный проф., д-р философии,  
e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**В. Т. Калинин**, д-р техн. наук, проф., e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**Е. В. Меняйло**, канд. техн. наук, доц., e-mail: elena\_nmetay@bigmir.net

**В. Ю. Селиверстов**, д-р техн. наук, проф., e-mail: seliverstovwy@gmail.com

**Ю. В. Доценко**, канд. техн. наук, доц., e-mail: yvd160574@gmail.com

**И. О. Мусиенко**, аспирант, e-mail: murka@ua.fm

**Э. А. Фролов**, магистр, e-mail: vt.kalinin@gmail.com

Национальная металлургическая академия Украины, Днепр

## КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИВОК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для установления возможности эффективного влияния на качество отливок на всех этапах их производства были исследованы и прошли опытно-промышленную проверку процессы рафинирования доменных чугунов, легирования и наномодифицирования литейных расплавов. Исследования проводили в лабораторных, опытно-промышленных и промышленных условиях при производстве ответственного литья в ряде учреждений и предприятий: НМетАУ, ИЧМ НАНУ, ПАО «МК «Азовсталь», ПАО «Днепропетровский завод прокатных валков», ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», Мелитопольском моторном и Харьковском машиностроительном заводах. Объектом исследований были выбраны наиболее ответственные отливки, широко применяемые в народном хозяйстве: коленчатые валы, цилиндрическое литье, автомобильные отливки из высокопрочного и серого чугунов, прокатные отбеленные и отбеленно-магниевого валки, чугунные сталеразливочные изложницы, мелющие шары и др. Установлены оптимальные параметры технологии производства отливок: применение в шихте низкосернистого чугуна марки ЛР7, легирование литейных расплавов 0,2 % Wили Nb, наномодифицирование карбонитридом титана Ti (CN) для отливок из белого чугуна и карбидом кремния (SiC) – для отливок из серого чугуна, применение паст и припылов, содержащих наноматериалы, для покрытия формы в местах возникновения «горячих трещин» для упрочнения поверхностного слоя кристаллизующейся отливки. Опытно-промышленная проверка комплексной технологии показала, что дополнительное легирование валкового чугуна положительно влияет на перекристаллизацию при 200–300 °С, снижая скорость превращения, что уменьшает вероятность возникновения «волосовидных трещин». При соблюдении рекомендуемых параметров комплексной технологии эксплуатационная стойкость сталеразливочных изложниц увеличилась на 30 %, мелющих шаров – на 20 %, брак валков снизился на 5 %, а брак коленчатых валков и поршней двигателей – на 20 %.

**Ключевые слова:** качество, чугун, рафинирование, модифицирование, прокатные валки, мелющие шары, заводы, нанодисперсные материалы, плавка, индукционная печь, эффективность.

Литейщики постоянно уделяют большое внимание вопросам повышения качества отливок, применяемых в различных областях промышленности. Для этих целей они используют традиционные и усовершенствованные технологии рафинирования литейных доменных чугунов и выплавленных на их основе расплавов, легирования и модифицирования.

Актуальность этих вопросов, особенно в машиностроении, обусловлена большим

количеством литых деталей (до 80 %), применяемых при производстве станков, тракторов, автомобилей и других агрегатов.

В статье авторы обобщили и представили в сокращенном виде результаты своих исследований, а также исследований литейщиков Приднепровского региона Украины, направленных на повышение качества и эксплуатационной стойкости отливок.

Исследования проводились в лабораторных, опытно-промышленных и промышленных условиях при производстве ответственного литья в ряде учреждений и предприятий: НМетАУ, ИЧМ НАНУ, ПАО «МК «Азовсталь», ПАО «Днепропетровский завод прокатных валков», ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», Мелитопольском моторном, Харьковском машиностроительном и Волжском автомобильном заводах. Объектом исследований были выбраны наиболее ответственные отливки, широко применяемые в народном хозяйстве: коленчатые валы, цилиндрическое литье, автомобильные отливки из высокопрочного и серого чугунов, прокатные отбеленные и отбеленно-магниевого валки, чугунные сталеразливочные изложницы, мелющие шары и др. [2–5, 7].

При производстве литой продукции качество отливок формируется в процессе подбора чушкового шихтового чугуна, разработки рациональных режимов проведения плавки, легирования и модифицирования литейных расплавов в печи, ковше или в форме. Для установления возможности эффективного влияния на качество отливок на всех этапах их производства были исследованы и прошли опытно-промышленную проверку процессы рафинирования доменных чушковых чугунов, легирования, модифицирования их расплавов.

Выбрана нижеуказанная методика проведения исследований и промышленной проверки предлагаемой комплексной технологии при производстве ответственного машиностроительного и металлургического литья, включающая следующие этапы:

- применение литейного чушкового рафинированного магния чугуна производства МК «Азовсталь» и Мариупольского металлургического комбината им. «Ильича» по технологии Института черной металлургии НАНУ и исследование его качества [1–2];

- опытно-промышленная проверка технологии применения доменного рафинированного чугуна в шихте при производстве отливок для машиностроения и металлургии: деталей тракторов и автомобилей, прокатных валков, изложниц, мелющих шаров и др. [2–7];

- дополнительное легирование промышленных хромоникелевых валковых расплавов ниобия, вольфрама и исследование их влияния на процессы перекристаллизации чугуна при температурах 300–500 °С (в температурной зоне зарождения «холодных» трещин) [3–4];

- обоснование термодинамической возможности зарождения и развития центров кристаллизации при наномодифицировании литейных расплавов для производства отливок;

- модифицирование чугунных расплавов брикетированными тугоплавкими нанодисперсными порошками на основе TiCN, SiC и других для создания дополнительно искусственных центров кристаллизации при затвердевании отливок в формах [5–6];

- определение влияния процессов рафинирования доменных чушковых чугунов, легирования и наномодифицирования их литейных расплавов на качество и эксплуатационные свойства отливок.

На первом технологическом этапе решался вопрос приобретения качественного доменного рафинированного магния литейного чугуна на МК «Азовсталь» и ММК им. Ильича, который выплавляли из железорудного сырья Криворожского месторождения. Низкое содержание серы ( $\leq 0,005\%$ ) в этом чугуне и чистота по неметаллическим включениям делает его перспективным материалом для применения в шихте при производстве отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, а также ответственных отливок из серого чугуна, чувствительных к наследственным свойствам доменного чугуна [2]. Технические условия предусматривают поставку рафинированного чугуна с повышенными требованиями [2]: содержание серы не более 0,01%; гарантированное содержание углерода, пониженное на 0,1 % против

ГОСТА; отсутствие спели и низкое содержание микропримесей, %: Cr до 0,04; Ti до 0,05; сумма Cr, Ti, V, Al и Pb не более 0,15.

На втором технологическом этапе исследовали влияние рафинированного чугуна на качество отливок машиностроительного и металлургического назначения.

Такой чугун, благодаря высокой чистоте по сере, газам, спели и другим неметаллическим включениям, обеспечивает хорошую отбеливаемость чушек и может быть использован в вальцелитейном производстве. Опробование его было проведено авторами на Днепропетровском и Лутугинском заводах прокатных валков при выплавке металла для отбеленных и отбеленно-магниевого прокатных валков [3–4]. В опытных плавках шихта состояла из низкремнистого рафинированного магнием чугуна и лома валков. Все отлитые валки имели требуемую глубину и хорошее качество отбеленного рабочего слоя, брак отбеленно-магниевого валков по «черным пятнам» снизился на 5,0 %.

При выполнении мероприятий по повышению качества доменного чугуна необходимо уделять должное внимание вопросам присутствия его наследственных свойств. Доменные печи работают на различных рудах, агломерате, коксе и поэтому чугуны имеют различное содержание микропримесей, газов, спели и других неметаллических включений, неконтролируемых обычным химическим анализом. При низкотемпературном переплаве шихты в литейных цехах примеси в значительной степени сохраняются и создают сравнительно устойчивую зародышевую фазу, оказывающую определенное влияние на кристаллизацию и структурообразование чугуна отливок (наследственные свойства).

По данным Вороновой Н. А. и других авторов [2], литейный рафинированный доменный чугун существенно чище обычного и имеет благоприятные наследственные свойства. Этот чугун был опробован на машиностроительных заводах: Харьковском машиностроительном заводе при производстве коленчатых валов тракторных двигателей, что снизило брак на 25 %, на заводе «Русский дизель» при производстве крупных поршней – снижение брака отливок после механической обработки; на Мелитопольском моторном и ВАЗе при производстве деталей из серого чугуна также дало положительный результат.

В последние годы в литейных цехах осуществлена замена вагранок и пламенных печей на индукционные и дуговые электрические печи, в которых технологически возможен процесс рафинирования жидкого чугуна до нужного уровня качества, поэтому вопрос о необходимости сохранения исходных наследственных свойств доменного шихтового чугуна остается актуальным и подкрепляется более новыми технологическими процессами легирования редкими металлами и модифицирования расплавов нанодисперсными порошками на основе тугоплавких соединений. Это позволяет эффективно воздействовать на процессы кристаллизации и перекристаллизации чугуна для повышения качества отливок.

Вопросы легирования чугуновых расплавов для отливки деталей металлургического оборудования, в том числе для прокатных валков, освещены в работах авторов [7, 10, 11]. Исследовано влияние таких легирующих элементов, как ниобий, вольфрам, и других. Однако, в связи с применением для валков текущего производства Cr–Ni чугунов, имеющих высокопрочную структуру бейнитно-мартенситного класса, повышение механических характеристик было незначительным, поэтому основное внимание было уделено исследованию процессов перекристаллизации, в частности, определению температур начала и скорости превращений в области 600–200 °С. При этих температурах во время охлаждения отливки в форме возможно зарождение и развитие так называемых «волосовидных трещин», что может привести к браку отливок. Полученные данные о влиянии перечисленных легирующих элементов на кинетику перекристаллизации могут позволить корректировать эти процессы путем легирования с целью повышения температуры начала и уменьшения скорости превращения, происходящего с приростом объема металла. Рекомендовано легирование валков 0,2W или 0,2 % Nb, способствующих протеканию спокойного процесса перекристаллизации и уменьшают опасность возникновения трещин. Однако, дополнительное

легирование увеличивает себестоимость отливки, что обусловило необходимость проведения исследований по поиску новых технологий для эффективного воздействия на качество отливок. С этой целью исследовано влияние нанодисперсных модификаторов на основе тугоплавких соединений типа TiCN, SiC на процессы зарождения и формирования структуры расплавов чугуна при затвердевании.

Введенные в расплав тугоплавкие наночастицы ( $< 100$  нм) могут рассматриваться как центры кристаллизации, если на их поверхности происходит зарождение первичной фазы, зависящей от размеров и свойств частицы, а также от ее взаимодействия с расплавом. Такое образование (частица – твердая фаза – расплав) будет устойчиво только в том случае, если свободная энергия системы уменьшается или же зависимость  $\Delta F = f(r_0)$  имеет минимум, где  $r_0$  – радиус наноболочки твердой фазы вокруг частицы.

Чем больше термодинамическая устойчивость инокулирующего наномодификатора и чем больше разница температур плавления частиц и чугуна, тем выше эффективность модифицирования. Также имеет значение электронное сродство модификатора и расплава, то есть нерастворимые тугоплавкие частицы должны обладать металлическим типом проводимости. В обобщенном виде для эффективного наномодифицирования необходимы такие тугоплавкие соединения, которые имеют следующие свойства [5,6]: энтальпия образования модифицирующих соединений должна превышать энтальпию образования расплава; температура плавления частиц должна быть выше температуры плавления чугуна; наночастицы должны быть нерастворимы в расплаве и иметь металлический тип проводимости; тугоплавкие частицы должны быть соразмерны с величиной центров кристаллизации; параметры решетки тугоплавких частиц [8] должны соответствовать параметрам решетки кристаллизующейся фазы.

Наиболее удовлетворяют этим требованиям тугоплавкие соединения карбонида титана – TiCN. Карбид кремния (SiC) относится к разлагаемым соединениям ( $\text{SiC} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeSi} + \text{C}$ ) и может быть использован как графитизирующий модификатор либо самостоятельно, либо в комплексе с инокулирующими добавками.

В области нанодисперсного диапазона (10–100 нм) удельная поверхностная энергия нанодисперсной системы (НДС) максимальна, частицы обладают высокой адсорбционной активностью и зарождение кристаллизующейся фазы (наноболочки) на их поверхности имеет высокую вероятность.

Зарождение первичной фазы на наночастицах идет с уменьшением суммарной свободной энергии за счет изменения соотношения объемной и поверхностной составляющей свободной энергии, в то время как образование зародыша в немодифицированном расплаве требует затрат энергии, и только после достижения критического размера рост твердой фазы становится энергетически выгодным. Наличие большой удельной поверхности наночастицы делает процесс зарождения твердой фазы термодинамически выгодным: он идет с выделением энергии (скрытой теплоты кристаллизации).

Твердая фаза, образовавшаяся в расплаве на поверхности частицы, находится в энергетически выгодном состоянии и условие к распаду у таких образований (наноболочек) отсутствует. Такие участки твердой фазы при дальнейшем охлаждении выигрывают в конкурентной борьбе у спонтанно или гетерогенно возникших зародышей. Эти образования достаточно большие, чтобы поглощать друг друга, поэтому размер дендритов (зерен) в отливке из модифицированного наносоединениями сплава определяется количеством частиц: чем их больше, тем мельче дендриты первичного аустенита [8, 9]. Установлено, что размер частицы критических зародышей аустенита при переохлаждении расплава на 10–40 °C составляет 40–10, а для графита – 305–55 нм.

В модифицированном наносоединениями чугуне образование оболочки твердой фазы на наночастице, имеющей большую удельную поверхность, высокую адсорбционную активность и обладающей качествами тугоплавкого модификатора, облегчено и идет с уменьшением суммарной свободной энергии за счет изменения соотношения объемной и поверхностной энергии в пользу объемной. Следовательно, роль на-

ночастиц сводится к созданию при кристаллизации расплава, кроме естественных, дополнительно искусственных центров кристаллизации. Они должны быть соразмерными с критическими зародышами, параметры их решетки должны соответствовать параметрам кристаллической решетки кристаллизующейся фазы и их должно быть достаточное количество для получения в отливке субмикроскопической структуры.

Положительное влияние наномодифицирования на качество отливок было установлено при проведении опытно-промышленных проверок. Показано, что наномодифицирование чугуна способствует ускорению процесса кристаллизации, особенно в поверхностной части отливок, способствует получению мелкозернистой структуры, уменьшению транскристалличности, рассредоточению усадочных дефектов и, как следствие, повышению качества и эксплуатационной стойкости отливок. Эти показатели качества были реализованы при производстве фасонных отливок.

В процессе кристаллизации отливок часто возникает дефект литой структуры «горячая трещина», которая формируется на поверхности отливки в интервале температур ликвидус-солидус в твердожидкой части отливки.

Причиной этого может быть торможение линейной (объемной) усадки или меньшая толщина затвердевшего слоя металла на выступающей части литейной формы по сравнению с остальной частью отливки. Последнее обусловлено замедлением теплоотвода через выступающую часть литейной формы. Кроме того, острый угол является концентратором напряжений. Поэтому во всех отливках технологи выполняют радиусы скругления, но устранить образование горячих трещин не всегда удается. Для предупреждения формирования горячей трещины выступающую часть формы выполняют из хромомagneзитовой формовочной смеси, которая имеет большую теплоаккумулирующую способность по сравнению с песчано-глинистой сухой формой. Вероятность образования горячих трещин снижается, но полностью устранить этот вид брака не удается.

Поэтому для предупреждения возникновения горячих трещин на выступающей части литейной формы необходимо создавать мелкозернистую макроструктуру сплава только в поверхностном слое этой части литого изделия. Достаточно использовать поверхностное внутриформенное модифицирование ультрадисперсными частицами, применяя для этого пасты и припылы рабочих поверхностей формы, на которых возможно появление горячих трещин в отливках. Несмотря на меньшую толщину затвердевшего металла у выступающей части литейной формы, мелкозернистая макроструктура будет иметь большую прочность по сравнению с участком отливки, который затвердел на плоской поверхности и имеет большую толщину. Учитывая высокую стоимость ультрадисперсных модификаторов, которые производятся в высокочастотных плазмохимических установках, минимальный их расход при нанесении в виде припыла на поверхность формы позволяет внедрить эту технологию при производстве фасонных отливок.

Опытно-промышленная проверка комплексных технологических мероприятий для повышения качества доменного литейного чугуна и его расплавов при производстве отливок машиностроительного и металлургического назначения показала, что эксплуатационная стойкость сталеразливочных изложниц повышается на 30 %, мелющих шаров – на 20 %, брак валков по «черным пятнам» уменьшился на 5 %, брак коленчатых валов, поршней двигателей и других отливок для автомобилей снизился на 25 %.

Таким образом, рафинирование доменного чугуна позволяет получать его высокую чистоту по сере, газам, спели и другим неметаллическим включениям, что делает его перспективным шихтовым материалом при производстве качественных литейных расплавов и отливок.

Установлена целесообразность воздействия на расплавы легирующих и наномодифицирующих компонентов с целью управления процессами кристаллизации и структурообразования, позволяющими улучшать качество материала отливок и их эксплуатационные свойства.

### Выводы

- Показатели качества чушкового литейного чугуна производства МК «Азовсталь» по технологии Института черной металлургии НАН Украины дают основание для использования его при производстве ответственных отливок машиностроительного и

металлургического назначения. Брак коленчатых валов, поршней двигателей, отливок для автомобилей и багерных насосов снизился на 25 %, прокатных отбеленно-магние-вых валков – на 5 %, сталеразливочных изложниц на 20 %, мелющих шаров на 25 %.

- Рекомендовано улучшение качества литейных расплавов и отливок из этого чугуна путем легирования 0,2 Nb или 0,2 % W и модифицирования нанодисперсными частицами на основе тугоплавких соединений TiCN и SiC в количестве 0,005–0,015 %.

- Легирование прокатных хромоникелевых валков 0,2 % Nb или W способствует протеканию спокойного процесса перекристаллизации при температурах 400–500 °С, что ускоряет процесс релаксации возникающих в отливке при охлаждении напряжений и снижает опасность образования «волосовидных трещин».

- Определена роль наномодифицирования железоуглеродистых сплавов в создании при кристаллизации, кроме естественных, дополнительно искусственных центров зарождения первичной фазы.

- Рекомендовано для устранения опасности возникновения «горячих трещин» в отливке у выступающей части литейной формы наносить припылы и пасты из ультрадисперсных или наночастиц, которые обеспечат формирование мелкозернистой структуры и повышение прочности отливок только в поверхностном слое этой части литого изделия, по сравнению с участком отливки, который затвердел на плоской поверхности и имеет большую толщину.

### Список литературы

1. Шевченко А. Ф. Изучение закономерностей вдувания гранулированного магния в жидкий чугун через фурмы погружения с различным профилем канала / А. Ф. Шевченко, А. Н. Мальков, В. А. Кривошеев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1982. – № 31. – С. 11–12.
2. Воронова Н. А. Качество доменного литейного чугуна и пути его повышения / Н. А. Воронова, О. А. Могилевцев, Г. Н. Штейн. – Киев: УНИИ НТИ. – 1972.
3. Рудницкий Л. С. Рациональное использование доменных чугунов при литье прокатных валков / Л. С. Рудницкий, В. А. Кривошеев, В. Т. Калинин, А. Н. Филипчик // *Литейное производство*. – 1990. – № 8. – С. 3–4.
4. Кривошеев В. А. Сравнительное исследование качественных показателей специальных доменных чугунов, используемых в вальцелитейном производстве / В. А. Кривошеев, Л. С. Рудницкий, В. Т. Калинин, Г. С. Петров // *Теория и практика металлургии*. – 2000. – № 6. – С. 24–25.
5. Калинин В. Т. Перспективы применения ультра- и нанодисперсных модификаторов для повышения качества чугунного литья / В. Т. Калинин, В. Е. Хрычиков, В. А. Кривошеев // *Процессы литья*. – Киев: ФТИМС НАН Украины. – 2005. – № 1. – С. 29–33.
6. Калинин В. Т. Прогрессивные технологии комплексного легирования и модифицирования чугунов для литья деталей горно-металлургического оборудования / В. Т. Калинин, В. Е. Хрычиков, В. А. Кривошеев, В. Ю. Селиверстов, Ю. В. Доценко, А. А. Кондрат // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 1. – С. 51–54.
7. Кривошеев В. А. Влияние легирующих элементов на кинетику превращения аустенита в хромоникелевых валковых чугунах / В. А. Кривошеев, В. Т. Калинин, Л. Т. Калинина, А. Н. Филипчик // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1984. – № 7. – С. 58–60.
8. Котельников Р. Б. Особо тугоплавкие элементы и соединения / Р. Б. Котельников, С. Н. Башлыков. – М.: Металлургия, 1989. – 410 с.
9. Гаврилин И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов / И. В. Гаврилин. – Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2000. – 260 с.
10. Хрычиков В. Е. Повышение эксплуатационной стойкости мелющих шаров при модифицировании исходного расплава чугуна брикетированными наномодификаторами / В. Е. Хрычиков, В. Т. Калинин, Н. В. Сусло, В. А. Кривошеев, Е. В. Меняйло // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 1. – С. 53–56.
11. Кривошеев В. А. Технологические особенности производства отливок металлургического назначения повышенной эксплуатационной стойкости с использованием рафинированного доменного чугуна и наномодификаторов / В. А. Кривошеев, В. Т. Калинин, Е. В. Меняйло, В. Е. Хрычиков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 3. – С. 37–41.

Поступила 13.02.2019



### References

1. *Shevchenko, A. F., Malkov, A. N., Krivosheev, V. A.* (1982) Study of the patterns of injection of granulated magnesium into liquid iron through lance tuyeres with a different channel profile. *Metallurgical and mining industry*, no. 31, pp. 11–12 [in Russian].
2. *Voronova, N. A., Mogilevtsev, O. A., Shteyn, G. N.* (1972) Quality of blast furnace cast iron and ways to increase it. K.: UNII NTI [in Russian].
3. *Rudnitsky, L. S., Krivosheev, V. A., Kalinin, V. T., Filipchik, A. N.* (1990) Rational use of blast furnaces in casting rolls. *Foundry*, no. 8, pp. 3–4 [in Russian].
4. *Krivosheev, V. A., Rudnitsky, L. S., Kalinin, V. T., Petrov, G. S.* (2000) Comparative study of the quality indicators of special domain cast irons used in valceliteyny production. *Theory and Practice Metallurgist*, no. 6, pp. 24–25 [in Russian].
5. *Kalinin, V. T., Khrychikov, V. Ye., Krivosheev, V. A.* (2005) Prospects for the use of ultra- and nanodispersed modifiers to improve the quality of iron casting. *Casting processes*, no. 1, pp. 29–33 [in Russian].
6. *Kalinin, V. T., Khrychikov, V. E., Krivosheev, V. A., Seliverstov, V. Yu., Dotsenko, Yu. V., Kondrat, A. A.* (2010) Advanced technologies of complex doping and modification of cast irons for casting parts of mining and smelting equipment. *Metallurgical and mining industry*, no. 1, pp. 51–54 [in Russian].
7. *Krivosheev, V. A., Kalinin, V. T., Kalinina, L. T., Filipchik, A. N.* (1984) Influence of alloying elements on the kinetics of austenite transformation into nickel-chrome rolling iron. *Metallurgy and heat treatment of metals*, no. 7, pp. 58–60 [in Russian].
8. *Kotelnikov, R. B., Bashlykov, S. N.* (1989) Particularly refractory elements and compounds. Moscow: Metallurgy, 410p. [in Russian].
9. *Gavrilin, I. V.* (2000) Melting and crystallization of metals and alloys. Vladimir: Vladimir State. un-t, 260p. [in Russian].
10. *Khrychikov, V. E., Kalinin, V. T., Suslo, N. V., Krivosheev, V. A., Menailo, E. V.* (2016) Improving the operational durability of grinding balls when modifying the initial cast iron melt with briquetted nanomodifiers. *Metallurgical and mining industry*, no. 1, pp. 53–56 [in Russian].
11. *Krivosheev, V. A., Kalinin, V. T., Menailo, E. V., Khrychikov, V. E.* (2017) Technological features of the production of castings for metallurgical purposes with enhanced operational durability using refined blast-iron and nanomodifiers. *Metallurgical and mining industry*, no. 3, pp. 37–41 [in Russian].

Received 13.02.2019

**В. А. Кривошеєв**, канд. техн. наук., почесний проф., д-р філософії,  
e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**В. Т. Калінін**, д-р техн. наук, проф., e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**О. В. Меньяїло**, канд. техн. наук, доц., e-mail: elena\_nmetay@bigmir.net

**В. Ю. Селіверстов**, д-р техн. наук, проф., e-mail: seliverstowy@gmail.com

**Ю. В. Доценко**, канд. техн. наук, доц., e-mail: yvd160574@gmail.com

**І. О Мусієнко**, аспірант, e-mail: murka@ua.fm

**Е. А. Фролов**, магістр, e-mail: vt.kalinin@gmail.com

Національна металургійна академія України, Дніпро

### КОМПЛЕКСНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ЯКІСНИХ ВИЛИВКІВ МАШИНОБУДІВНОГО І МЕТАЛУРГІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Для встановлення можливості ефективного впливу на якість виливків на всіх етапах їх виробництва були досліджені і пройшли дослідно-промислово перевірку процеси рафінування доменних чавунів, легування і наномодифікування ливарних сплавів. Дослідження проводили в лабораторних, дослідно-промислових і промислових умовах при виробництві відповідального литва в низці установ і підприємств: НМетАУ, ІЧМ НАНУ, ПАТ «МК «Азовсталь», ПАТ «Дніпропетровський завод прокатних валків», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»,

## Новые литые материалы

Мелітопольському моторному і Харківському машинобудівному заводах. Об'єктом досліджень було обрано найбільш відповідальні виливки, що широко застосовуються в народному господарстві: колінчаті вали, циліндрове литво, автомобільні виливки з високоміцного і сірого чавунів, прокатні відбілені і відбілені магнієві валки, чавунні сталерозливні виливниці, кулі, що мелють, та ін. Встановлено оптимальні параметри технології виробництва виливків: застосування в шихті низькосірчистого чавуну марки ЛР7, легування ливарних розплавів 0,2 % W або Nb, наномодифікування карбонітридом титану Ti (CN) для виливків з білого чавуну і карбідом кремнію (SiC) – для виливків з сірого чавуну, застосування паст і припилив, що містять наноматеріали, для покриття форми в місцях виникнення «гарячих тріщин» для зміцнення поверхневого шару у процесі кристалізації виливка. Дослідно-промислова перевірка комплексної технології показала, що додаткове легування валкового чавуну позитивно впливає на перекристалізацію при 200–300 °С, зменшення швидкості перетворення, що зменшує ймовірність виникнення «волосоподібних тріщин». При дотриманні рекомендованих параметрів комплексної технології експлуатаційна стійкість сталерозливних виливниць збільшилася на 30 %, куль, що мелють – на 20 %, брак валків знизився на 5 %, а брак колінчастих валів і поршнів двигунів – на 20 %.

**Ключові слова:** якість, чавун, рафінування, модифікування, прокатні валки, кулі, що мелють, заводи, нанодисперсні матеріали, плавка, індукційна піч, ефективність.

**V. A. Krivosheev**, Candidate of Engineering Sciences, Honorary Professor, Ph.D.,  
e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**V. T. Kalinin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**E. V. Menyaylo**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
e-mail: elena\_nmetay@bigmir.net

**V. Yu. Seliverstov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: seliverstovvy@gmail.com

**Y. V. Dotsenko**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
e-mail: yvd160574@gmail.com

**I. O. Musiienko**, Postgraduate Student, e-mail: murka@ua.fm

**E. A. Frolov**, Master, e-mail: vt.kalinin@gmail.com

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro

### COMPLEX TECHNOLOGY OF OBTAINING QUALITATIVE CASTINGS OF MACHINE-BUILDING AND METALLURGICAL PURPOSE

To establish the possibility of an effective influence on the quality of castings at all stages of their production, the processes of blast furnace casting, alloying and nano-modification of casting melts were examined and tested. Investigation of a number of institutions and enterprises: NMetAU, IFM NASU, PJSC MK Azovstal, PJSC Dnipropetrovsk Rolling Roll Plant, PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rig, Melitopol Motor and Kharkov machine-building plants. The most responsible castings were widely used in the national economy: crankshafts, cylinder castings, automotive castings of high-strength and gray cast iron, rolled chilled and chilled-magnesium rolls, cast-iron casting molds, grinding balls etc. The optimal parameters of the casting production technology were established: use in the mixture of low-sulfur iron brand ЛР7, alloying of casting melts with 0.2 % W or Nb, nano-modification with titanium carbonitride Ti(CN) for white iron castings and silicon carbide (SiC) – for gray iron castings, applying paste and highly dispersed material, containing nanomaterials, to cover the form in the places of occurrence of «hot cracks» for hardening the surface layer of the crystallized casting. An experimental industrial verification of complex technologies shows that during recrystallization at 200–300 °С, the rate of transformation decreases, which reduces the likelihood of «hair-like cracks». At observance of the recommended parameters of the integrated technology, operational durability is increased by 30 %, small balls – by 20 %, roll rejects decreased by 5 %, crankshaft and piston engines reject – by 20 %.

**Keywords:** quality, cast iron, refining, modification, mill rolls, grinding balls, plants, nanodispersed materials, smelting, induction furnace, efficiency.

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом,  
e-mail: otdel.vch@gmail.com

**Ю. Д. Бачинский**, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: 909\_bach@ukr.net

**А. А. Ясинский**, науч. сотр., e-mail: alexyasinskyi@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ С ПОВЫШЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом признан в мире уникальным многофункциональным материалом для изделий самого ответственного назначения во многих отраслях промышленности. Он имеет благоприятное сочетание прочностных показателей и обладает высокими литейными свойствами (высокая жидкотекучесть, низкие усадка и склонность к образованию трещин), которые позволяют изготавливать любые по геометрической сложности и массе отливки. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на дальнейшее повышение технологических, механических и эксплуатационных свойств высокопрочного чугуна и качества производимых литых изделий. Для повышения прочностных показателей и придания специальных свойств (износостойкости, ударостойкости, сопротивления усталостному разрушению и др.) высокопрочный чугун легируют. Широко применяется легирование никелем и медью – элементами, упрочняющими твердый раствор, способствующими перлитизации металлической основы и в то же время не образующими карбидов в чугуне. Для повышения пластичности проводят гомогенизирующий отжиг. В статье приводятся данные об изменении механических свойств нелегированного и легированных никелем или медью высокопрочных чугунов в зависимости от температуры выгрузки отливок из термической печи для охлаждения на воздухе после гомогенизирующего отжига. Определен и проанализирован характер изменения временного сопротивления при разрыве, условного предела текучести и относительного удлинения высокопрочного чугуна в отливках. Более высокие показатели прочности получены при температурах выгрузки отливок от 770 до 810 °С. В результате проведенных исследований установлены технологические параметры получения высокопрочного чугуна с повышенным комплексом механических свойств.

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, шаровидный графит, комплексный модификатор, легирование, медь, никель, гомогенизирующий отжиг, перлит, временное сопротивление при разрыве, относительное удлинение.

Для изготовления ряда деталей современной техники требуются высокопрочные чугуны с временным сопротивлением при разрыве  $\sigma_B = 550\text{--}600$  МПа и относительным удлинением  $\delta = 10\text{--}15$  %. Поэтому возникает необходимость разработки специальных марок со значительно более высокими показателями прочности и пластичности, по сравнению с ВЧ450-5 или ВЧ500-7 (ДСТУ3925-99) с ферритно-перлитной металлической основой, занимающих по показателям механических свойств промежуточное положение между регламентируемыми стандартом марками высокопрочных чугунов ферритного и перлитного классов [1, 2]. Указанные более высокие механические свойства могут быть достигнуты при металлической основе, состоящей из находящихся в определенном соотношении количеств феррита и перлита, или при ферритной металлической основе, упрочненной легированием [3–6].

Получение высокопрочного чугуна с заданным соотношением феррит/перлит в литом состоянии затруднено даже в случае однотипных отливок, кристаллизация которых проходит при небольшом температурном градиенте. Вследствие высокой

степени неоднородности структуры, а также влияния ряда других факторов, величина относительного удлинения высокопрочного чугуна в литом состоянии рассеивается в широком диапазоне и далеко не всегда достигает требуемого уровня 10–15 %. Эффективное повышение прочности ферритного высокопрочного чугуна может быть достигнуто путем упрочнения пластичной матрицы легированием медью, никелем и другими элементами. Повысить пластичность за счет уменьшения неоднородности структуры в микрообъемах позволяет гомогенизирующий отжиг.

*Целью настоящей работы* являлось определение перспективных технологических решений, обеспечивающих получение высокопрочного чугуна с  $\sigma_B = 550\text{--}600$  МПа и  $\delta = 10\text{--}15$  %.

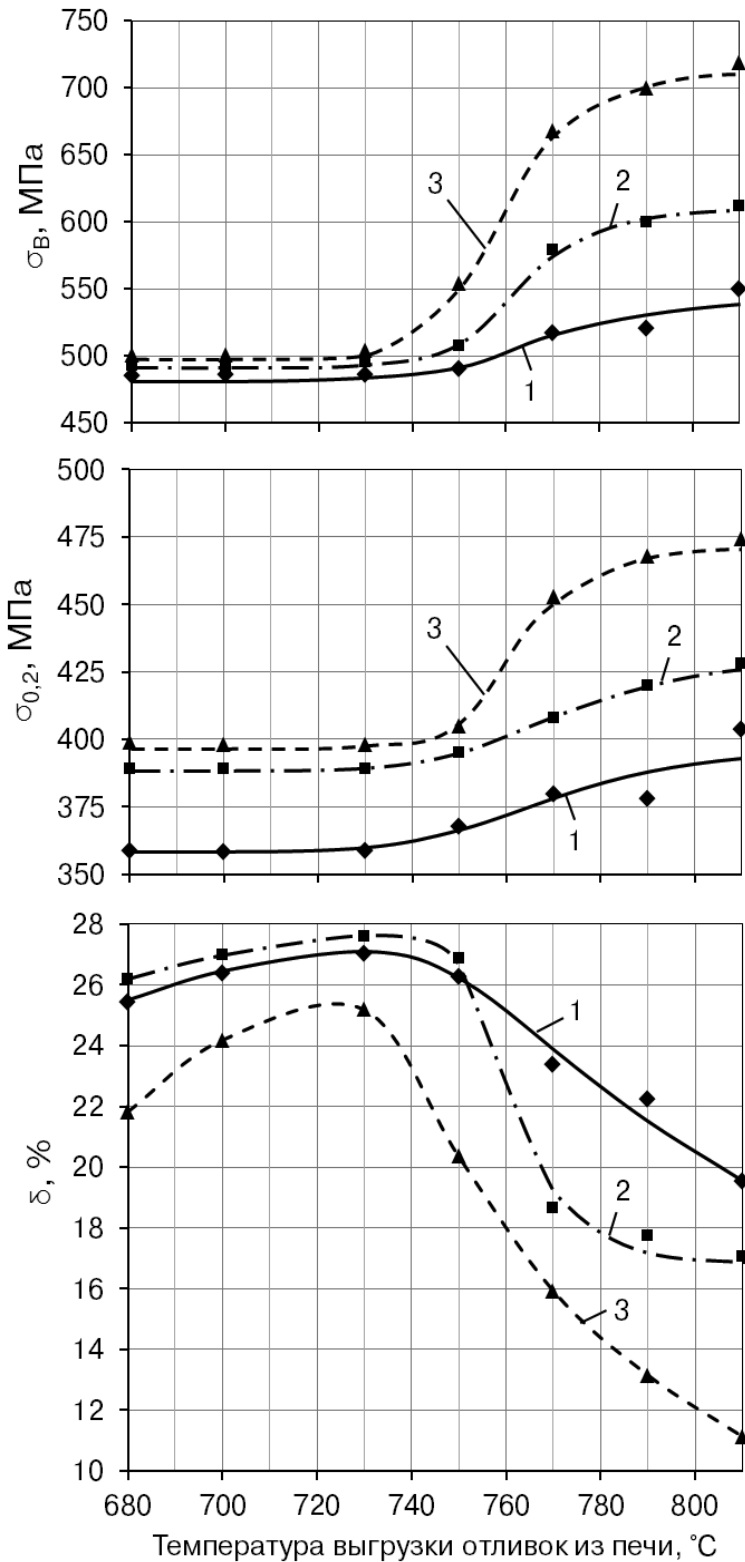
Чугун выплавляли в электропечи ИСТ-0,16 из шихты, состоящей из чушкового литейного чугуна марки ЛР6, рафинированного продувкой магнием, с содержанием 0,011–0,014 % серы и 0,060–0,072 % фосфора. Модифицирование проводили комплексным модификатором ЖКМК-4РБа в количестве 2,2 %. Для изучения влияния режимов термической обработки на механические свойства высокопрочного чугуна были отлиты три комплекта клиновидных проб толщиной у основания 15 мм и массой 4,85 кг каждая. Каждый комплект состоял из 8 одинаковых проб, расположенных последовательно в один ряд в литейной форме.

Первый комплект проб отливали из нелегированного высокопрочного чугуна, а второй и третий – из того же чугуна, но легированного 0,5 % меди или 0,5 % никеля, соответственно. Каждый комплект отливок загружали в термическую печь отдельным рядом. Термообработку проводили по следующему режиму: нагрев в печи до 860 °С, выдержка 2 часа, охлаждение с печью при средней скорости 27 °С/час. Начиная с 810 °С, по мере снижения температуры, через каждые 20 °С производили выдержку в течение 45 мин и затем выгрузку из печи для охлаждения на воздухе по одной клиновидной пробе от каждого из трех исследуемых вариантов состава высокопрочного чугуна.

Особенность проведенного исследования заключалась в том, что в результате переплава рафинированного чушкового чугуна марки ЛР6 и модифицирования комплексным модификатором, содержащим наряду с магнием и кремнием дополнительные высокоэффективные модифицирующие элементы (кальций, РЗМ, барий), получен высококачественный высокопрочный чугун с низким содержанием серы и других вредных примесей. Структура металлической основы нелегированного и легированного никелем высокопрочных чугунов в литом состоянии была практически ферритной. А в высокопрочном чугуне, легированном медью, количество перлита составляло ~20 %. Это обусловило благоприятное соотношение прочностных и пластических свойств исследуемых чугунов уже в литом состоянии (см. таблицу). В литом состоянии легирование 0,5 % Ni незначительно повысило прочностные показатели ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) и несколько снизило относительное удлинение ( $\delta$ ). Значительно эффективнее проявляется легирование 0,5 % Cu, в результате которого  $\sigma_B$  высокопрочного чугуна увеличивается с 500 до 595 МПа,  $\sigma_{0,2}$  – с 365 до 420 МПа при снижении  $\delta$  с 23,4 до 17,0 %.

### Количество перлита в металлической основе и механические свойства исследованных высокопрочных чугунов в литом состоянии

| Вид высокопрочного чугуна | Количество перлита, % | Механические свойства |                      |              |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
|                           |                       | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| Нелегированный            | 3                     | 500                   | 365                  | 23,4         |
| Легированный 0,5 % никеля | 6                     | 505                   | 376                  | 20,5         |
| Легированный 0,5 % меди   | 20                    | 595                   | 420                  | 17,2         |



Влияние температуры выгрузки отливок из печи после отжига на механические свойства нелегированного (1) и легированного 0,5 % Ni (2) или 0,5 % Cu (3) высокопрочного чугуна

Количество образовавшегося перлита, степень его дисперсности и некоторые другие особенности структуры исследованных чугунов определили наблюдаемый характер изменения механических свойств от температуры выгрузки отливок из термической печи для охлаждения на воздухе в интервале температур от 810 до 730 °С. Прочностные показатели ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) снижаются, а относительное удлинение увеличивается (см. рисунок).

При охлаждении с температур ниже критических, когда металлическая основа становится ферритной, значения прочностных показателей исследованных чугунов отличаются незначительно. Относительное удлинение по мере снижения температуры выгрузки из печи увеличивается, достигая максимума при 730 °С, и в дальнейшем несколько снижается.

Значительное повышение прочностных показателей достигается при выгрузке отливок из термической печи в интервале температур от 810 до 770 °С. Механические свойства легированного никелем высокопрочного чугуна находятся в пределах:  $\sigma_B = 580\text{--}610$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 410\text{--}435$  МПа,  $\delta = 17\text{--}19$  %. В легированном медью высокопрочном чугуне прочностные показатели значительно выше ( $\sigma_B = 670\text{--}720$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 450\text{--}475$  МПа при  $\delta = 11\text{--}16$  %), что с учетом значительно меньшей стоимости меди, по сравнению с никелем, позволяет рекомендовать ее для упрочняющего легирования высокопрочного чугуна.

В результате проведенного исследования установлены закономерности изменения механических свойств нелегированного и легированных (0,5 % Ni или 0,5 % Cu) высокопрочных чугунов в зависимости от температуры выгрузки отливок из термической печи для охлаждения на воздухе после проведения гомогенизирующего отжига.

### Выводы

Применение высококачественного расплава и модифицирование его комплексным модификатором, содержащим наряду с магнием и кремнием такие высокоэффективные модифицирующие элементы как кальций, барий, РЗМ, позволяет непосредственно в литом состоянии получать высокопрочный чугун ферритного класса с высокими показателями прочности и пластичности. Дополнительное повышение прочностных характеристик в литом состоянии обеспечивает легирование медью. Влияние легирующих элементов на повышение прочностных характеристик усиливается в результате проведения гомогенизирующего отжига с выгрузкой отливок из печи в интервале температур 770–810 °С. Легирование 0,5 % никеля может обеспечить получение высокопрочного чугуна с временным сопротивлением при разрыве  $\sigma_B = 550\text{--}600$  МПа и относительным удлинением  $\delta \geq 15$  %. А легирование 0,5 % меди может обеспечить получение более высокой прочности ( $\sigma_B = 650\text{--}700$  МПа) при относительном удлинении  $\delta \geq 10$  %.

### Список литературы

1. *Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher.* Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application // International Journal of Metalcasting. – April 2014: Vol. 8. – Issue 2. – pp. 35–40.
2. *Schoenborn S., Kaufmann H., Sonsino C. M., Heim R.* Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 101. – pp. 440–449.
3. *Gonzaga R. A.* Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons // Materials Science & Engineering A. – 2013. – Vol. 567. – pp. 1–8.
4. *Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев Л. Н., Бачинский Ю. Д., Козак Д. С.* Медь в высокопрочном чугуне // Процессы литья. – 2010. – № 3. – С. 46–57.
5. *Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев Л. Н., Берчук Д. Н., Киришун И. В.* Влияние никеля на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна // Процессы литья. – 2011. – № 2. – С. 24–34.
6. *Glavas Z., Strkalj A., Stojakovic A.* The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons // Metallurgija. – 2016. – Vol. 55. – № 3. – pp. 293–296.

Поступила 14.02.2019

## References

1. *Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher* (2014) Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application. *International Journal of Metal-casting*, April, Vol. 8, Issue 2, pp. 35–40 [in English].
2. *Schoenborn, S., Kaufmann, H., Sonsino, C. M., Heim, R.* (2015) Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications. *Procedia Engineering*, Vol. 101, pp. 440–449 [in English].
3. *Gonzaga, R. A.* (2013) Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science & Engineering A*, vol. 567, pp. 1–8 [in English].
4. *Bublikov, V. B. et al.* (2010) Copper in high-strength cast iron. *Protsessy litya*, no. 3, pp. 46–57 [in Russian].
5. *Bublikov, V. B. et al.* (2011) Influence of nickel on the structure and mechanical properties of castings made of high-strength cast iron. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 24–34 [in Russian].
6. *Glavas, Z., Strkalj, A., Stojakovic, A.* (2016) The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons. *Metalurgija*, vol. 55, no. 3, pp. 293–296 [in English].

Received 14.02.2019

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,  
e-mail: [otdel.vch@gmail.com](mailto:otdel.vch@gmail.com)

**Ю. Д. Бачинський**, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: [909\\_bach@ukr.net](mailto:909_bach@ukr.net)

**О. О. Ясинський**, наук. співр., e-mail: [alexyasinskyi@gmail.com](mailto:alexyasinskyi@gmail.com)

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

## СПЕЦІАЛЬНІ ВИСОКОМІЦНІ ЧАВУНИ З ПІДВИЩЕНИМ КОМПЛЕКСОМ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Високоміцний чавун з кулястим графітом визнаний в світі унікальним багатофункціональним матеріалом для виробів найвідповідальнішого призначення в багатьох галузях промисловості. Він має сприятливе поєднання показників міцності і володіє високими ливарними властивостями (висока рідкоплинність, низькі усадка і схильність до утворення тріщин), які дозволяють виготовляти виливки будь-якої геометричної складності і маси. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на подальше підвищення технологічних, механічних і експлуатаційних властивостей високоміцного чавуну і якості виготовлених литих виробів. Для підвищення показників міцності і надання спеціальних властивостей (зносостійкості, ударостійкості, опору втомному руйнуванню і ін.) високоміцний чавун легують. Широко застосовується легування нікелем і міддю – елементами, які зміцнюють твердий розчин, сприяють перлітизації металевої основи і в той же час не утворюють карбідів в чавуні. Для підвищення пластичності проводять гомогенізуючий відпал. В статті наведені дані про зміну механічних властивостей нелегованого і легованих нікелем або міддю високоміцних чавунів в залежності від температури вивантаження виливків з термічної печі для охолодження на повітрі після гомогенізуючого відпалу. Визначено і проаналізовано характер зміни тимчасового опору при розтягуванні, умовної границі плинності і відносного подовження високоміцного чавуну у виливках. Більш високі показники міцності отримані при температурах вивантаження виливків від 770 до 810 °С. В результаті проведених досліджень встановлені технологічні параметри отримання високоміцного чавуну з підвищеним комплексом механічних властивостей.

**Ключові слова:** високоміцний чавун, кулястий графіт, комплексний модифікатор, легування, мідь, нікель, гомогенізуючий відпал, перліт, тимчасовий опір при розтягуванні, відносне подовження.

**V. B. Bublikov**, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Department Chair, e-mail: [otdel.vch@gmail.com](mailto:otdel.vch@gmail.com)

**Yu. D. Bachynskyi**, Candidate of Technical Sciences, Research Fellow, e-mail: [909\\_bach@ukr.net](mailto:909_bach@ukr.net)

**O. O. Yasynskyi**, Research Fellow, e-mail: [alexyasinskyi@gmail.com](mailto:alexyasinskyi@gmail.com)

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv

**SPECIAL DUCTILE CAST IRONS WITH INCREASED COMPLEX OF MECHANICAL PROPERTIES**

Ductile cast iron with spheroidal graphite is acknowledged in the world as a unique multifunctional material for products of the most important purpose in many industries. It has a favorable combination of strength characteristics and high casting properties (high fluidity, low shrinkage and crack formation tendency), which allow to produce castings of any geometric complexity and weight. Therefore, research aimed at further improving of ductile cast iron technological, mechanical and operational properties and quality of cast products made of it is relevant. For increasing of strength characteristics and giving of special properties (wear resistance, impact resistance, resistance to fatigue failure, etc.) ductile cast iron is subjected for alloying. Widely used is alloying with nickel and copper which are elements that strengthen the solid solution, promote perlite formation in the metal base and at the same time do not form carbides in cast iron. Homogenizing annealing is carried out for plasticity increasing. Data about mechanical properties change of unalloyed and alloyed with nickel or copper ductile cast irons depending on castings discharge temperature from a thermal furnace for air cooling after homogenizing annealing is presented in the article. The nature of ductile irons tensile strength, yield strength and elongation changes in the castings are identified and analyzed. Higher strength values were obtained at casting discharge temperatures from 770 to 810 °C. As a result of the research, the technological parameters of ductile cast iron obtaining with increased complex of mechanical properties were established.

**Keywords:** ductile cast iron, spheroidal graphite, complex modifier, alloying, copper, nickel, homogenizing annealing, pearlite, tensile strength, elongation.

**ВНИМАНИЕ!**

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 10,000 грн.

**Расценки на размещение рекламы  
(цены приведены в гривнах)**

| Размещение                                       | Рекламная площадь | Стоимость, грн. |
|--|-------------------|-----------------|
| <b>Рекламные блоки в текстовой части журнала</b> |                   |                 |
| Цветные  | 1/2 страницы      | 900             |
|  | 1/3 страницы      | 600             |
|  | 1/4 страницы      | 300             |
| Черно-белые                                      | 1/2 страницы      | 550             |
|  | 1/3 страницы      | 380             |
|  | 1/4 страницы      | 200             |
| <b>Цветная реклама на обложке</b>                |                   |                 |
| Третья страница обложки                          | 1 страница        | 2800            |
|  | 1/2 страницы      | 1400            |
|  | 1/4 страницы      | 700             |
| Четвертая страница обложки                       | 1 страница        | 3100            |
|  | 1/2 страницы      | 1550            |
|  | 1/3 страницы      | 1000            |

**При повторном размещении рекламы - скидка 15 %**

Наш адрес: **Украина, 03142, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

**телефоны: (044) 424-04-10, 424-12-50**

**факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua**



**Ю. Г. Квасницька**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,

*e-mail: kvasnytska@ptima.kiev.ua*

**М. І. Тарасевич**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,

*e-mail: nit@ptima.kiev.ua*

**І. І. Максюта**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

**О. О. Токарева**, гол. електронник

**О. В. Михнян**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., *e-mail: mixnyan@ukr.net*

**Г. П. Мьяльніца\***, канд. техн. наук, заст. гол. металурга

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

\*ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект», Миколаїв

## **ВИКОРИСТАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДИК ПРИ СТВОРЕННІ НОВИХ ЛЕГУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

Питання створення нових жароміцних корозійностійких сплавів для лопаток стаціонарних і транспортних турбін та технології їх отримання стосуються актуальних проблем галузі вітчизняного машинобудування. В статті представлено результати проведених досліджень, пов'язаних з оптимізацією легуючого комплексу на базі серійного жароміцного корозійностійкого сплаву типу ХН60КВТЮМ. До основних компонентів багатокомпонентного сплаву на Ni–Co–Cr-аустенітній основі з карбідним та інтерметалідним типом зміцнення за рахунок утворення дисперсних часток так званої  $\gamma'$ -фази автори додають тугоплавкі елементи тантал та реній. Згідно експериментальних досліджень, вони є елементами, які завдяки їх фізико-хімічним характеристикам мають властивості як ефективних зміцнювачів аустенітного твердого розчину (реній), так і активних утворювачів карбідної і  $\gamma'$ -фази (тантал). Застосування розрахункових методик з отриманням лінійних регресійних рівнянь та комп'ютерних програм для оптимізації співвідношення кількісного складу елементів, поряд з класичним металофізичним відбором зразків проведенням експериментальних плавок, дало змогу прогнозувати рівень експлуатаційних характеристик та оцінювати фазово-структурну стабільність матеріалу в процесі довготривалої експлуатації лопаток турбін. З метою мінімізації кількості дослідів використано метод факторного експерименту та отримано лінійні повні моделі. Таким чином, лінійний регресійний аналіз показав якісний вплив елементів, які розглядаються, і підтвердив дані літературного огляду. Поряд з використанням методики розрахунків за лінійним регресійним аналізом проведено також оптимізацію системи легування згідно методики прогнозування структурної стабільності за допомогою комп'ютерних програм за методом PHACOMP і комп'ютерної програми SPACE. При застосуванні цієї програми враховувались дані про кінетику виділення крихких фаз в залежності від часу та температури експлуатації литих лопаток, особливості структурних перетворень в процесі їх довготривалої експлуатації. Методика, яка була апробована раніше на промислових марках сплавів ЧС70-ВІ, ЧС88У-ВІ, ЧС-104, дала змогу значно скоротити як період розробки нового дослідного сплаву на базі марки СМ-88У, додатково легованого танталом та ренієм, так і значно обмежити необхідні обсяги експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** нікелеві жароміцні сплави, реній, тантал, лопатка ГТД, структурна стабільність сплаву.

При виборі жароміцних сплавів для виготовлення та надійної експлуатації в екстремальних умовах таких литих деталей, як робочі лопатки газотурбодвигунів (ГТД), необхідно визначитися з головними критеріями, за якими проводиться оцінювання нових матеріалів. Згідно проведеному науково-патентному аналізу та з урахуванням зазначеного сертифікаційними документами рівня основних експлуатаційних характеристик конкретного типу агрегату, авторами в якості основних критеріїв були обрані жароміцність, корозійна стійкість, фазово-структурна стабільність і технологічні властивості сплаву.

За базовий склад хімічних компонентів нового сплаву, що розроблено, був обраний сертифікований жароміцний сплав CM88Y [1], в легуючий комплекс якого додатково вводили тугоплавкі елементи. Згідно літературних даних і експериментальних досліджень авторів [2, 3], вони є елементами, які ефективно зміцнюють аустенітний твердий розчин  $\gamma$ -фази (реній) і активно сприяють утворенню карбідної і  $\gamma'$ -фази (тантал), що призводить до підвищення жароміцності. Висока температура плавлення, збільшений у порівнянні з нікелем атомний радіус та вплив на фазово-структурні перетворення при введенні цих елементів у сплави, сприяє суттєвому збільшенню жароміцності. Слід зазначити, що в сплавах, що містять реній і тантал та інші тугоплавкі елементи (хром, титан, молібден, вольфрам, ніобій), в умовах експлуатації може спостерігатися утворення окрихчучих топологічно щільноупакованих фаз (ТЩУ-фаз), що негативно впливають на рівень жароміцності. Виходячи з цього, фазово-структурна стабільність матеріалу буде визначатися як загальним сумарним вмістом тугоплавких елементів легуючого комплексу, так і їх співвідношенням [2–4]. При комплексному легуванні композиції тугоплавкими металами слід враховувати також їх коефіцієнти ліквідації, особливо при отриманні сплавів з орієнтованою структурою. Так, введення до складу сплаву елементів, що підвищують різницю щільності основного розплаву і ліквату (Al, Ti, Nb та ін.) та тугоплавких елементів (W, Re, Mo та ін.) може сприяти утворенню поверхневих дефектів ліквідаційного походження в процесі спрямованої кристалізації, особливо при відносно низьких швидкостях кристалізації.

Слід зауважити, що значно знижувати вміст або виключати з метою недопущення виділення ТЩУ-фаз такі елементи, як молібден, вольфрам, ніобій нераціонально, так як кожен з них контролює певною мірою фазово-структурні процеси. Так, молібден, будучи зміцнювачем твердого розчину, вносить істотний внесок у зміну параметра ґратки  $\gamma$ -твердого розчину і, як наслідок, морфологію зміцнюючої вторинної  $\gamma'$ -фази, роблячи її кубічною, і цим сприяючи високому опору повзучості жароміцних сплавів [4].

З усіх елементів легуючого комплексу, що входять в жароміцні сплави розглянутого типу, найбільшу розчинність в  $\gamma$ -фазі і найменшу в  $\gamma'$ -фазі має реній, у якого коефіцієнт розподілу легуючих елементів між  $\gamma'$ - і  $\gamma$ -фазами  $K / K_c = 0,1$  [5].

Емпірично доведено, що підвищення концентрації легуючих елементів з великими атомними радіусами надає більш істотний вплив на зміну параметра решітки  $\gamma$ -фази, ніж  $\gamma'$ -фази, причому, оскільки реній і тантал мають атомний радіус більший, ніж нікель (співвідношення для ренію 1,063), вони позитивно впливають на невідповідність періодів кристалічних решіток  $\gamma$ - і  $\gamma'$ -фаз (так званий місфіт  $-\Delta a_{\gamma-\gamma'} = (a_{\gamma} - a_{\gamma'})/a_{\gamma}$ ), що є визначальним чинником тривалої міцності полі- і монокристалів жароміцних сплавів при високих температурах. Володіючи найменшим коефіцієнтом дифузії в нікелі, реній також гальмує процеси коагуляції зміцнюючої  $\gamma'$ -фази, тим самим підвищуючи її термічну стабільність. Крім того, і реній, і тантал сприяють підвищенню температури розчинення  $\gamma'$ -фази і температури солідус, що звужує інтервал кристалізації і, як правило, позитивно позначається на жароміцності, особливо в стані спрямованої кристалізації (СК) [5–7].

Слід особливо відзначити, що введення в сплав ренію і танталу дає можливість для підвищення довготривалої міцності знизити вміст хрому, оскільки ці елементи підвищують опір високотемпературній сольовій корозії як визначального параметру жароміцного корозійностійкого сплаву [6].

Аналіз патентної та науково-технічної літератури дозволив здійснити первинне доекспериментальне ранжування легуючих елементів згідно із ступенем їх впливу на комплекс фізико-механічних властивостей (міцність, пластичність, твердість) сплавів. Для встановлення функціональних взаємозв'язків «склад сплаву – властивості» на базі літературних та експериментальних досліджень було використано створений банк даних, який містить хімічний склад, властивості та технологічні особливості одержання та обробки серійних та експериментальних сплавів, що виробляються як за кордоном, так і вітчизняними підприємствами.

Виходячи з вищезазначеного, метою представленої роботи було проведення

вибору складу легуючих елементів сплаву типу СМ88У [1] додатковим введенням ренію і танталу для підвищення структурної стабільності сплаву в цілому за рахунок зменшення дифузійного проникнення елементів та підтримання високої стійкості до високотемпературної корозії завдяки формуванню більш стійкої окалини.

Для розрахунків складу легуючих елементів жароміцних корозійностійких сплавів для ГТД був застосований попередній досвід розробки сплавів [2, 3]. При цьому використано багатofакторну схему проведення експериментів, згідно з якою ефективність впливу будь-якого фактору (кількість введеного додатково легуючого елементу) визначається згідно з результатами усіх дослідів, тобто оцінюється комплексно. Визначено основний склад композиції з таким складом інгредієнтів на основі марки СМ88У (%мас.): Ni (осн.) – 0,05 С–12,75 Cr–3,5 Al–2,05 Ti–7,15 Co–1,15 Mo–6,3 W–0,3 Nb–0,04 Zr–0,5 Fe. На першому етапі під час оптимізації за базовий (основний) склад з незмінною кількістю інгредієнтів взято композицію, в яку, з метою підвищення експлуатаційних характеристик, вводили реній.

На етапі відбору найбільш перспективних систем легування поряд з класичним металофізичним підходом до вибору оптимального складу було проведено вивчення окремого впливу елемента на основний базовий комплекс з застосуванням лінійного регресійного аналізу [8]. В якості параметрів оптимізації вибрано експериментально визначені: об'ємний вміст зміцнюючої  $\gamma'$ -фази та швидкість корозії, яка визначена в експериментальному розчині 75 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 25 % NaCl при температурі 900 °С протягом 100 год.

При побудові регресійних моделей були прийняті наступні означення: X1 – вміст вуглецю; X2 – вміст хрому; X3 – вміст титану; X4 – вміст ренію; Y1 – корозійна стійкість (втрата маси); Y2 – швидкість корозії; Y3 – об'ємний вміст  $\gamma'$ -фази (табл. 1).

**Таблица 1**  
**Вихідні параметри для отримання лінійних регресійних рівнянь**

| Варіант | Вміст елементів, %мас. |      |     |     | Характеристики сплаву                                      |                  |
|---------|------------------------|------|-----|-----|--|------------------|
|         | С                      | Cr   | Ti  | Re  | Показник швидкості корозії<br>LgcorrosRate (СМ88У = 0,115) | $\gamma'$ , %ат. |
|         | X1                     | X2   | X3  | X4  | Y1   | Y2               |
| 1       | 0,03                   | 12,4 | 2,4 | 3,8 | -0,24  | 52               |
| 2       | 0,10                   | 12,4 | 2,4 | 3,5 | -0,30  | 51               |
| 3       | 0,10                   | 10,0 | 2,4 | 4,1 | -0,14  | 49               |
| 4       | 0,10                   | 11,0 | 2,4 | 4,0 | -0,34  | 52               |
| 5       | 0,10                   | 10,0 | 2,4 | 3,9 | -0,40  | 54               |
| 6       | 0,10                   | 10,0 | 3,2 | 4,1 | -0,30  | 57               |
| 7       | 0,10                   | 10,0 | 3,0 | 3,5 | -0,37  | 56               |

Обробка даних табл. 1 дозволила одержати наступні лінійні моделі:

$$Y1 = 1,52 - 0,0376815 \cdot Cr - 0,219755 \cdot Ti - 0,185562 \cdot Re \quad (1)$$

$$R^2 = 97,9276 \%$$

$$Y2 = 16,7844 - 39,5125 \cdot C + 9,47215 \cdot Ti + 3,33362 \cdot Re \quad (2)$$

$$R^2 = 99,1566 \%$$

Вважаючи на відсутність достовірної варіації незалежних параметрів, за рівнянням першого порядку можна оцінити тільки якісний вплив масового вмісту елементів на вибрані характеристики сплаву. Так, на корозійні властивості (Y1) найбільше впливає хром, при збільшенні вмісту хрому цей показник зменшується, тобто підвищуються

корозійні властивості сплаву. Виходячи з рівняння (1), реній також позитивно впливає на корозійні властивості дослідного сплаву. Реній і титан позитивно впливають на кількість зміцнюючої  $\gamma'$ -фази ( $Y_2$ ), при збільшенні їх вмісту у сплаві об'єм  $\gamma'$ -фази збільшується. З рівнянь видно, що вуглець знижує кількість  $\gamma'$ -фази. Це підтверджує аналіз літератури та досвід попередніх досліджень, так як вуглець вводиться у ЖС для зміцнення границь зерен (утворення карбідів). Вплив вуглецю на корозійну стійкість сплаву практично не спостерігається.

Таким чином, лінійний регресійний аналіз показав якісний вплив елементів, які розглядаються, і підтвердив дані літературного огляду [4–6].

Практика використання нікелевих жароміцних сплавів для литих деталей ГТД показала, що важливим параметром забезпечення їх підвищених міцнісних та пластичних характеристик є стабільність фазового складу в процесі заданого часу роботи. Тому оцінку структурної стабільності відповідальних деталей ГТД та прогнозування утворення в них крихких фаз (топологічно щільноупакованих (ТЩУ) фаз:  $\sigma$ -;  $\mu$ -фази) необхідно проводити на стадії розробки нових композицій [9–11].

При цьому необхідно врахувати загальні напрямки легування нікелевих сплавів, які володіють високою корозійною стійкістю та жароміцністю. Тому в даній роботі поряд з використанням методики розрахунків за лінійним регресійним аналізом проведена також оптимізація системи легування по методиці прогнозування структурної стабільності за допомогою методу PHACOMP [10, 11].

Цей метод отримав найбільш широке розповсюдження для оцінки фазової стабільності жароміцних сплавів розглянутого класу, тому що заснований на практичному використанні відомого ефекту:  $\sigma$ -фаза є інтерметалідною сполукою і утворюється з аустенітної матриці в інтервалі хімічного складу сплавів, що характеризуються визначеними значеннями концентрацій електронних вакансій  $N_v$  (число електронних вакансій матриці за вирахуванням частки елементів, які входять в карбіди та бориди). Розрахунок  $N_v$  для забезпечення структурної стабільності ЖС проводився, виходячи з його хімічного складу. Розрахунок  $N_v$ , визначений за допомогою рівнянь, які закладені в комп'ютерну програму, враховує як вплив нових легуючих елементів, особливості структурних перетворень в процесі експлуатації виробів з ЖС, так і кінетику виділення крихких фаз в залежності від часу та температури [9–11].

Визначення концентрації електронних вакансій потребує встановлення фаз, які утворюються в сплавах, також послідовності, в якій вони формуються в  $\gamma$ -матриці. Послідовність така: утворення боридів ( $\text{Mo}_{0,5}\text{Ti}_{0,15}\text{Cr}_{0,25}\text{Ni}_{0,1}\text{B}_2$ ), утворення карбідів (монокарбідів  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{NbC}$ ,  $\text{TiC}$ ; комплексних карбідів  $\text{Me}_6\text{C}$ ,  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ ) та утворення зміцнюючої  $\gamma'$ -фази ( $\text{Ni}_{0,88}\text{Co}_{0,08}\text{Cr}_{0,04}$ )<sub>3</sub> ( $\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{V}$ ). Після розгляду цих реакцій визначають склад залишкової матриці. Він дозволяє розрахувати число електронних вакансій.

Після цього, для досягнення необхідного рівня жароміцності в розрахунках враховували кількість легуючих елементів, які формують загальний обсяг  $\gamma'$ -фази (об'єм за %мас.), а також корегували склад тугоплавких елементів з коефіцієнтом розподілу  $\kappa_{\text{эф}} > 1$ .

З розрахунків складу  $\gamma$ -матриці дослідного сплаву після тривалої роботи матеріалу ( $\geq 500$ – $5000$  год) визначають значення середнього числа електронних вакансій  $N_v$ . При цьому приймають, що кожний елемент, який входить в аустенітну матрицю, характеризується своїм постійним значенням  $N_{vi}$ , а сплав після тривалого старіння знаходиться у стані рівноваги і всі очікувані в ньому фази утворилися, а  $N_v$  є лінійною функцією складу матриці. Блок-схему алгоритму розрахунків за методом PHACOMP представлено в роботі [12].

Розрахунки проводили в два етапи: знаходили склади зміцнюючих фаз ( $\gamma'$ -фази, карбідів, боридів) з подальшим їх відніманням від загального складу сплаву з метою визначення складу залишкового аустеніту ( $\gamma$ ); знаходили середню кількість електронних вакансій для твердого розчину  $N_v$ , враховуючи склад залишкового аустеніту.

Використовували наступний порядок розрахунку складу наявних фаз, враховуючи фізико-хімічні процеси утворення фаз та визначаючи склад сплаву в атомних

відсотках: до концентрації алюмінію, титану, ніобію, вольфраму, танталу, ренію (сумарно), що залишилися після виділення карбідів, додаємо хром, вміст якого становить ~ 3 % в атомних відсотках; з урахуванням потрібної кількості нікелю це призводить до утворення  $\gamma'$ -фази –  $Ni_3(Al, Nb, Ti, Cr)$ ; потім визначається загальна сума з подальшим відніманням від повного складу сплаву. Остаточний склад аустеніту (матриці) приймається за 100 %; отриманий склад матриці використовується для розрахунку середньої кількості електронних вакансій згідно формули:

$$N_{v\text{сер.}} = \sum_{i=1}^n m_i (N_v)_i,$$

де  $N_{v\text{сер.}}$  – середня кількість електронних вакансій для сплаву;  $m_i$  – атомна частка даного елемента;  $N_v$  – кількість електронних вакансій даного елемента;  $n$  – число елементів в матриці.

Для жароміцних корозійностійких сплавів показник схильності до утворення  $\sigma$ -фази  $N_{v\text{сер.}}$  не повинен перевищувати 2,4 [13].

Слід зазначити, що світовими виробниками і дослідниками жароміцних сплавів розроблено комп'ютерні програми, які дозволяють отримати дані, що зв'язують хімічний склад ЖС, параметри структури з фізико-механічними властивостями та службовими характеристиками [13–15]. Розробка сплавів за допомогою таких розрахунків дозволяє з мінімальними затратами визначити граничний рівень легуючих елементів для заданого рівня експлуатаційних характеристик жароміцних сплавів. Тобто не потрібно проводити дорогі експерименти по виплавці декількох композицій, дослідження їх фізико-механічних властивостей, в тому числі випробування тривалої міцності протягом 10000 год.

У даній роботі для визначення критичних температур та властивостей дослідних сплавів було використано програму розрахунку SPACE (version 4) (Superalloy Phase Analysis Computation Engineering) [15]. Забезпечення рівня корозійної стійкості визначали за допомогою можливих корозійних втрат з урахуванням впливу всіх легуючих елементів. Було взято п'ять складів дослідних сплавів. Для достовірності та порівняння одержаних результатів їх зіставляли з розрахунками відомого сплаву CM88Y (табл. 2).

**Таблица 2**

### Хімічний склад запропонованого жароміцного сплаву

| Основні компоненти | Хімічний склад, %мас. |                                 |       |       |       |       |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                    | Аналог                | Запропонований жароміцний сплав |       |       |       |       |
|                    |                       | CM88Y                           | 1     | 2     | 3     | 4     |
| C                  | 0,07                  | 0,05                            | 0,05  | 0,05  | 0,04  | 0,05  |
| Cr                 | 15,8                  | 12,75                           | 12,75 | 12,75 | 12,30 | 12,75 |
| Co                 | 11,7                  | 7,15                            | 7,15  | 7,15  | 7,15  | 7,15  |
| Mo                 | 1,96                  | 1,15                            | 1,15  | 1,15  | 1,15  | 1,15  |
| W                  | 5,30                  | 6,30                            | 6,30  | 6,30  | 6,30  | 6,30  |
| Al                 | 3,00                  | 3,25                            | 3,25  | 3,25  | 3,25  | 3,25  |
| Ti                 | 4,60                  | 2,20                            | 3,60  | 2,05  | 2,05  | 2,05  |
| Nb                 | 0,15                  | 0,30                            | 0,30  | 0,30  | 0,30  | 0,30  |
| Hf                 | 0,3                   | ≤ 0,1                           | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 |
| Ta                 | –                     | 2,75                            | 2,75  | 3,30  | 2,75  | 3,30  |
| Re                 | –                     | 4,00                            | 4,00  | 4,00  | 4,00  | 4,00  |
| B                  | 0,09                  | 0,01                            | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  |

В табл. 3 наведено основні характеристики сплавів, які одержано в результаті розрахунків. Видно, що для всіх дослідних сплавів показник  $N_{\text{сер}} < 2,4$ . Це означає, що сплави, які досліджувались, не схильні до утворення  $\sigma$ -фази, яка негативно впливає на структурну стабільність жароміцних сплавів.

**Таблиця 3**

**Характеристики дослідних сплавів**

| Характеристики сплаву   | 1      | 2      | 3      | 4          | 5      | CM88Y  |
|---|--------|--------|--------|------------|--------|--------|
| Кількість електронних вакансій, $N_{\text{сер}}$                          | 2,27   | 2,29   | 2,32   | 2,27       | 2,30   | 2,35   |
| Об'єм $\gamma'$ -фази у структурі сплаву, %                               | 45,6   | 50,2   | 45,5   | 45,3       | 44,3   | 43,2   |
| Температура розчинення $\gamma'$ -фази                                    | 1201   | 1130   | 1199   | 1180       | 1152   | 1203   |
| Температура ліквідус, $T_L$ , °C  | 1388   | 1369   | 1388   | 1393       | 1389   | 1358   |
| Температура солідус, $T_S$ , °C   | 1309   | 1284   | 1310   | 1318       | 1310   | 1258   |
| Тривала міцність сплаву, МПа, при 900 °C протягом 100 год, який одержано: | -      | -      | -      | -          | -      | -      |
| рівноосною кристалізацією   | 306    | 291    | 306    | 306        | 302    | 275    |
| спрямованою кристалізацією  | 326    | 323    | 328    | 329        | 321    | 294    |
| Корозійна стійкість за показником втрати маси LgMetalloss                 | -1,608 | -1,896 | -1,490 | 1,533      | -1,678 | -1,372 |
| Швидкість корозії по глибині, LgcorrosRate                                | -0,190 | -0,298 | -0,183 | -<br>0,148 | -0,176 | 0,115  |

**Висновки**

Таким чином, за допомогою розрахункових методик було визначено склад експериментального жароміцного сплаву та прогнозовані основні експлуатаційні властивості, що дало змогу позитивно оцінити можливість використання розробленого сплаву з даним комплексом компонентів в якості перспективного матеріалу для робочих лопаток ГТД при суттєво скороченому масиві дороговартісних експериментів. Показано, що легуючий комплекс, який додатково включає реній і тантал, сприяє зростанню жароміцності за рахунок підвищення рівня критичних температур ( $T_S$ ,  $T_L$ , температура розчинення  $\gamma'$ -фази).

**Список літератури**

1. Specification Z88YF1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88Y. – Technical specifications of «Zorya»-« Mashproekt» GTRPC, 2016.
2. Максютя І. І., Квасницька Ю. Г., Сімановський В. М. Оптимізація складу жароміцного нікелевого сплаву для литих деталей газотурбінних двигунів // Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 4. – С. 43–47.
3. Мьяльница Г. П., Максютя І. І., Квасницька Ю. Г., Михнян О. В. Вибір легуючого комплексу нового корозійностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 2. – С. 29–34.

4. *Кишкин С. Т.* Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (к 100-летию со дня рождения). – М.: Наука, 2006. – 407 с.
5. *Каблов Е. Н.* Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов содержащих рений // Вестник Московского университета, Серия 2. – Химия. – 2005. – Т. 46. – № 3. – С. 155–157.
6. *Агальцова В. О., Колясникова Н. В., Голованенко С. А.* Влияние легирующих элементов на свойства коррозионно-стойких жаропрочных монокристаллических сплавов на никелевой основе // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – № 3. – 1998. – С. 8–10.
7. *Кузнецов В. П., Лесников В. П., Конакова И. П., Попов Н. А., Квасницкая Ю. Г.* Структурные и фазовые превращения в монокристаллическом никелевом сплаве, легированном рением и рутением, в условиях испытаний на длительную прочность // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2015. – № 8. – С. 55–59.
8. *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ / Пер с английского В. П. Носко; под ред. М. Б. Малютова. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
9. *Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Оспенникова О. Г.* Литейные жаропрочные сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – № 6. – URL: <http://viam.ru/public/files/2012/2012-205998.pdf>.
10. *Zhang J.S., Matsugi K., Murata Y. et al.* Evaluation of the Phase Stability of modified IN738LC Alloys with New PHACOMPJ. *Mater. Sci. Lett.* – 1992. – Vol. 11. – no. 8. – pp. 444–448.
11. *Клясс О. В., Крещенко В. А.* Применение методики фазового расчета «PHACOMP» для прогнозирования прочностных свойств и контроля выделения ТПУ-фаз в лопаточных изделиях ГТГ-110 // Сборник статей конференции в ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект». – Николаев, 2004. – С. 91–94.
12. *Жуков А. А., Смирнова О. А.* Оценка эксплуатационной пригодности жаропрочных сплавов для ГТД и ГТУ // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2005. – № 10. – С. 60–66.
13. Пат. 2538054 RU C22C19/05. Жаропрочный сплав на основе никеля для изготовления лопаток газотурбинных установок. Авдюхин С. П., Дуб А. В., Квасницкая Ю. Г., Ковалев Г. Д., Кульмизев А. Е., Лубенец В. П., Скоробагатых В. Н. – Опубл. 10.01.2015.
14. AEROSPACE STANDARD SAE AS5491. Видано 2000-12, перевірено 2002-03.
15. British Standard HR100 Appendix Ais specified in some Material Specifications for wrought nickel base materials (N115 and N118) SPACE version 4 (Superalloy Phase Analysis Computation Engineering).

Одержано 20.02.2019

## References

1. Specification Z88YF1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88Y. Technical specifications of «Zorya»–« Mashproekt» GTRPC, 2016.
2. *Maksiuta, I. I., Kvasnytska, Yu. H., Simanovskij, V. M.* (2007) Optimizatsiya of the heat-resisting nickel alloy for cast parts of gas turbine engines. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, Vol. 4, pp. 43–47 [in Ukrainian].
3. *Mialnytsia, H. P., Maksiuta, I. I., Kvasnytska, Yu. H., Mihnian, O. V.* (2013) The choice of alloying complex of a new corrosion-resistant alloy for gas nozzle blades. *Metaloznavstvo ta obrobkametaliv*, Vol. 4, pp. 43–47 [in Ukrainian].
4. *Kishkin, S. T.* (2006) Creation, research and application of heat-resistant alloys: Selected Works (to the 100th anniversary of birth). Moscow: Nauka [in Russian].
5. *Kablov, E. N.* (2005) Physico-chemical and technological features of creation of heat resistant alloys containing rhenium. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 2, Himija*, T. 46, Vol. 3, pp. 155–157 [in Russian].
6. *Agal'cova, V. O., Koljasnikova, N. V., Golovanenko, S. A.* (1998) Influence of alloying elements on the properties of corrosion-resistant, heat-resistant, single crystal nickel-based alloys. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, Vol. 3, pp. 8–10 [in Russian].
7. *Kuznecov, V. P., Lesnikov, V. P., Konakova, I. P., Popov, N. A. & Kvasnickaja, Ju. G.* (2015) Structural and phase transformations in a single-crystal nickel alloy doped with rhenium and ruthenium, under conditions of long-term strength testing. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, Vol. 8, pp. 55–59 [in Russian].
8. *Seber, Dzh.* (1980) Linear regression analysis. Per. s angl. V. P. Nosko, pod red. M. B. Maljutova. Moscow: Mir [in Russian].

9. *Petrushin, N. V., Svetlov, I. L., Ospennikova, O. G.* (2012) Foundry superalloys. Vse materialy. Jenciklopedicheskiy spravochnik, Vol. 6 [in Russian].
10. *Zhang, J. S., Matsugi, K., Murata, Y. et al.* (1992) Evaluation of the Phase Stability of modified IN738LC Alloys with New PHACOMP. J. Mater. Sci. Lett., Vol. 11, no. 8, pp. 444–448 [in English].
11. *Kljass, O. V., Kreshhenko, V. A.* (2004) Application of the phase calculation methodology PHACOMP for predicting the strength properties and controlling the release of TPU phases in the GTG-110 blades. Sbornik statej konferencii v GP NPKG «Zorya»–« Mashproekt», pp. 91–94 [in Ukrainian].
12. *Zhukov, A. A., Smirnova, O. A.* (2005) Evaluation of the operational suitability of heat-resistant alloys for gas turbine engines and gas turbines. Aviacionno-kosmicheskajatehnika i tehnologija, Vol. 10, pp. 60–66 [in Russian].
13. Pat. of Russia 2538054. *Avdjuhin, S. P., Dub, A. V., Kvasnickaja, Ju. G., Kovalev, G. D., Kul'mizev, A. E., Lubenec, V. P., Skorobagatyh, V. N.* Nickel-based heat-resistant alloy for the manufacture of gasturbine blades (Opubl. 2015, 10 January).
14. AEROSPACE STANDARD SAE AS5491. Vydano 2000-12, perevireno 2002-03.
15. British Standard HR100 Appendix Ais specified in some Material Specifications for wrought nickel base materials (N115 and N118) SPACE version 4 (Superalloy Phase Analysis Computation Engineering).

Received 20.02.2019

**Ю. Г. Квасницкая**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
e-mail: kvasnytska@ptima.kiev.ua

**Н. И. Тарасевич**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом,  
e-mail: nit@ptima.kiev.ua

**И. И. Максютя**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

**О. О. Токарева**, гл. электронщик

**О. В. Михнян**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: mixnyan@ukr.net

**Г. П. Мьяльница\***, канд. техн. наук, зам. гл. металлурга

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», Николаев

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Вопросы создания новых жаропрочных коррозионностойких сплавов для лопаток стационарных и транспортных турбин, а также технологии их получения, касаются актуальных проблем отрасли отечественного машиностроения. В статье представлены результаты проведенного комплекса исследований, связанного с оптимизацией легирующего комплекса на базе серийного жаропрочного коррозионностойкого сплава типа ХН60КВТЮМ. К основным компонентам многокомпонентного сплава на Ni–Co–Cr-аустенитной основе с карбидным и интерметаллидным типом упрочнения за счет образования дисперсных частиц так называемой  $\gamma'$ -фазы авторы добавили тугоплавкие элементы тантал и рений. Согласно экспериментальным исследованиям, они являются элементами, которые, благодаря их физико-химическим характеристикам, обладают свойствами как эффективных упрочнителей аустенитного твердого раствора (рений), так и активных образователей карбидной и  $\gamma'$ -фазы (тантал). Применение расчетных методик с получением линейных регрессионных уравнений и компьютерных программ для оптимизации соотношения количественного состава элементов, наряду с классическим металлофизическим отбором образцов путем проведения экспериментальных плавок, позволило спрогнозировать уровень эксплуатационных характеристик и оценить фазово-структурную стабильность материала в процессе длительной эксплуатации лопаток турбин. С целью минимизации количества опытов использован метод факторного эксперимента и получены линейные полные модели. Таким образом, линейный регрессионный анализ показал качественное влияние элементов, которые рассматриваются, и подтвердил данные литературного обзора. Наряду с использованием методики расчетов согласно линейному регрессионному анализу, проведена также оптимизация системы



легирования с помощью компьютерной программы по методу PHACOMP и компьютерной программы SPACE. При применении этой программы учитывались данные по кинетике выделения охрупчивающих фаз в зависимости от времени и температуры эксплуатации литых лопаток, особенности структурных преобразований в процессе их длительной эксплуатации. Методика, которая была опробована раньше на промышленных марках сплавов ЧС70-ВИ, ЧС88У-ВИ, ЧС-104, позволила значительно сократить как период разработки нового сплава на базе марки СМ-88У, дополнительно легированного танталом и рением, так и значительно ограничить необходимые объемы экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** никелевые жаропрочные сплавы, рений, тантал, лопатка ГТД, структурная стабильность сплава.

**I. G. Kvasnytska**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,  
e-mail: kvasnytska@ptima.kiev.ua

**N. I. Tarasevich**, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Department, e-mail: nit@ptima.kiev.ua

**I. I. Maksyuta**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

**O. O. Tokareva**, Chief Electronics Engineer

**E. V. Mihnyan**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,  
e-mail: mixnyan@ukr.net

**H. P. Myalnitsa\***, Candidate of Engineering Sciences, Deputy Metallurgist

Phisico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

\*SE SPCG «Zorya» – «Mashproekt»

### THE USE OF COMPUTATIONAL METHODS FOR CREATING NEW ALLOYING COMPLEXES OF HIGH-TEMPERATURE ALLOYS FOR GTE PARTS

The issue of the creation of new heat-resistant corrosion-resistant alloys for blades of stationary and transport turbines and the technology of their obtaining concern the actual problems of the field of domestic machine building. The article presents the results of the conducted studies related to the optimization of the alloying complex on the basis of a series heat-resistant corrosion-resistant alloy of the type XH60KBTЮМ. The authors add refractory elements of tantalum and rhenium to the main ingredients of a multi-component Ni-Co-Cr alloy on an austenitic base with carbide and intermetal type hardening due to the formation of disperse particles of the so-called  $\gamma'$ -phase. According to experimental studies, they are elements that, due to their physic-chemical characteristics, have the properties of both effective austenitic solid solution (rhenium) and active carbide and  $\gamma'$ -phase (tantalum) forming agents. The application of calculation methods to obtain linear regression equations and computer programs to optimize the ratio of the quantitative composition of elements along with the classic metal-physical selection of samples by conducting experimental melts, has made it possible to predict the level of performance characteristics and evaluate the phase-structural stability of the material in the process of long-term operation of turbine blades. In order to minimize the number of experiments, the method of the factor experiment was used and the linear complete models were obtained. Thus, the linear regression analysis showed the qualitative influence of the elements that are considered and confirmed the data of the literary review. Along with using the method of calculations by linear regression analysis, optimization of the system of doping according to the method of forecasting structural stability using computer programs using the method PHACOMP and computer program SPACE. In applying this program, data on the kinetics of the allocation of brittle phases, depending on the time and temperature of the operation of cast blades, and the peculiarities of structural transformations in the process of their long-term exploitation, were taken into account. The technique, which was tested earlier on the industrial brands of the ЧС70-ВИ, ЧС88У-ВИ, ЧС-104, allowed to significantly reduce as a period of development of a new experimental alloy on the basis of mark SM-88У, additionally doped with tantalum and rhenium, also significantly limit the experimental research.

**Keywords:** superalloys, rhenium, tantalum, blades GTE, structural stability of alloy.



## НАРІВСЬКИЙ АНАТОЛІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

(до 75-річчя із дня народження)

Відомий учений-матеріалознавець, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України **Нарівський Анатолій Васильович** народився 13 квітня 1944 р. у с. Виползово Белгородської області (Росія). Після закінчення у 1967 р. Харківського політехнічного інституту працює у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів (до 1996 р. – Інститут проблем лиття) НАН України на інженерних посадах, старшим, провідним і головним науковим співробітником, завідувачем відділу, заступником директора Інституту з наукової роботи, з 2017 р. – директором Інституту. В 1970 р. вступив до аспірантури, у 1977 р. захистив кандидатську, в 2006 р. – докторську дисертації за спеціальністю «Ливарне виробництво». За цією спеціальністю у 1993 р. ВАК присвоїла йому звання старшого наукового співробітника. У 2018 р. його обрано членом-кореспондентом НАН України.

Наукова діяльність А. В. Нарівського спрямована на створення ефективних методів впливу на металеві розплави з метою підвищення якості литих виробів. Він запропонував спосіб обробки сплавів плазмовим струменем, що занурений в розплав, і методики дослідження основних параметрів цього процесу. Під керівництвом та при участі А. В. Нарівського вивчено температурні і гідродинамічні параметри реакційної зони високотемпературного газового струменя, що поступає в глибину металевого розплаву; досліджено вплив плазово-кінетичних дій на масообмінні і фізико-хімічні процеси в рідкому металі, будову розплаву, структуру та міцнісні характеристики закристалізованих сплавів. За результатами цих досліджень створено екологічно чисті процеси глибинної обробки сплавів плазмореагентними середовищами в атмосферних умовах та у вакуумі.

Важливим в діяльності Анатолія Васильовича є забезпечення практичної реалізації одержаних фундаментальних закономірностей фізико-хімічних і фазових перетворення в сплавах, які відбуваються при високотемпературних газореагентних діях на рідкий метал. Ним створено наукові основи принципово нових технологічних процесів, що не мають аналогів у світі. Такі технології дозволяють рафінувати, легувати, модифікувати, армувати сплави і диспергувати структуру в литих заготовках та у виливках за рахунок інтенсифікації процесів тепломасопереносу і синтезу нових фаз в багатокомпонентних металевих системах.

Підтвердженням високого науково-технічного рівня і практичного значення робіт, виконаних А. В. Нарівським, є присудження йому в 2001 р. премії ім. З. І. Некрасова НАН України, а у 2008 р. – Державної премії України в галузі науки і техніки. У 2009 р. він відзначений грамотою Верховної Ради України. У його доробку понад 160 наукових праць, у числі яких дві монографії, 45 авторських свідоцтв та патентів на винахід.

А. В. Нарівський є керівником наукових проектів в рамках державних, академічних та європейських програм. Визначає перспективи та напрямки проведення фундаментальних і прикладних досліджень в Інституті. Відповідає за роботу аспірантури та докторантури при ФТІМС НАН України. Він є заступником голови Вченої ради інституту, членом Спеціалізованої ради по присудженню вчених ступенів кандидата і доктора наук. Активно співпрацює з науково-технічними організаціями Китаю, В'єтнаму, Польщі, Індії, Ірану та інших країн, виступає з науковими доповідями на національних і міжнародних конференціях.

**Дирекція, колектив Інституту та редакція журналу щиро поздоровляють Анатолія Васильовича з ювілеєм і бажають йому міцного здоров'я, творчих сил та успіхів у досягненні нових наукових результатів!**



### **ВИКТОР ИВАНОВИЧ ДУБОДЕЛОВ** (к 80-летию со дня рождения)

16 апреля 2019 года исполняется 80 лет известному ученому в области материаловедения, технологии металлов и прикладной магнитной гидродинамики, академику НАН Украины, доктору технических наук, профессору, заведующему отделом ФТИМС НАН Украины **Виктору Ивановичу Дубоделову**.

По окончании в 1962 г. Харьковского политехнического института, В. И. Дубоделов начал свою трудовую деятельность в Институте литейного производства (сейчас ФТИМС НАН Украины). В это время в Институте под руководством проф. В. П. Полищука группой молодых талантливых специалистов, среди которых был и

В. И. Дубоделов, было основано новое научное направление в материаловедении, связанное с изучением физических механизмов и установлением неизвестных ранее закономерностей получения металлических материалов при наложении электромагнитных полей и использовании магнитогидродинамических (МГД) явлений в комплексе с другими физико-химическими воздействиями на металлические системы в жидком состоянии, в процессе фазовых переходов, при формообразовании и кристаллизации литых заготовок. Эти работы послужили толчком к созданию признанных в Украине и мире научной школы по магнитодинамической обработке металлов и отдела магнитной гидродинамики ФТИМС НАН Украины. В. И. Дубоделов за годы работы в Институте защитил кандидатскую и докторскую диссертации, заведовал лабораторией, был заместителем директора по научной работе, в 1991 г. возглавил научную школу и отдел, обеспечив их дальнейшее развитие, в частности, благодаря успешному выполнению сложных фундаментальных и прикладных научных исследований в рамках государственных, академических и международных программ и проектов.

При непосредственном участии и под руководством В. И. Дубоделова были созданы и внедрены оригинальные МГД-технологии и оборудование для ввода жидких алюминия и ферросплавов в сталь, осуществления комплексной термосиловой и реagentной внепечной обработки литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, в т. ч. высокопрочных многокомпонентных алюминиевых сплавов для нужд высокотехнологичной техники, в частности, авиакосмического комплекса, медных сплавов специального назначения, разработана концепция революционных МГД-технологий получения нового поколения композиционных материалов, впервые в мире создан электромагнитный миксер-дозатор стали, разработаны предпосылки для применения магнитодинамических устройств при непрерывной разливке металлов и сплавов.

В. И. Дубоделов также обеспечил масштабную коммерциализацию и внедрение созданных разработок на ведущих предприятиях в Украине и за рубежом (только за последние годы – в Нидерландах, Республике Корея, Великобритании).

Научная деятельность В. И. Дубоделова отмечена присвоением ему Почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники Украины» (2017 г.), присуждением Государственной премии Украины в области науки и техники (2008 г.), Премии имени З. И. Некрасова НАН Украины (2005 г.).

Результаты научной деятельности В. И. Дубоделова отражены в более чем 450 научных публикациях, в т. ч. 3 монографиях, одном открытии, многочисленных патентах Украины и ведущих стран мира. Он является неизменным участником крупнейших международных конференций по электромагнитной обработке материалов и фундаментальной и прикладной магнитной гидродинамике.

В. И. Дубоделов подготовил 3 докторов и 8 кандидатов наук, преподавал и разработывал учебные курсы и программы для НТУУ «КПИ». Он выполняет большой объем научно-организационной работы, являясь председателем ученого совета ФТИМС НАН Украины и специализированного совета по присуждению ученых степеней при ФТИМС НАН Украины, членом секции Комитета по Государственным премиям Украины в области науки и техники, заместителем председателя Межведомственного научно-технического совета Украины по проблемам внепечной обработки и непрерывной разливки стали, членом редколлегии журналов «Процессы литья» и «Металл и литье Украины».

**Научная общественность и редакционная коллегия журнала «Процессы литья» сердечно поздравляют Виктора Ивановича Дубоделова с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, счастья и новых творческих успехов!**



**FACULTY OF FOUNDRY  
ENGINEERING AGH**

## MAIN ORGANIZER

Faculty of Foundry Engineering AGH University of Science and Technology

## SUBJECT OF CONFERENCE

The subject of the II International Conference of Casting and Materials Engineering ICCME 2019 will be specially devoted to **Automotive Industry**.

The most important issues raised during the conference will be:

### THE FOUNDRY PROCESS:

Crystallization of metals and alloys • Heat treatment • Microstructure of foundry alloys • Mechanization and automation of processes • Robotics • Construction of machinery and equipment • Casting and utility properties • Surface modification • Computer modeling • Rapid prototyping

### ENGINEERING MATERIALS:

Molding materials • Polymeric materials • Refractories • Composite materials • Materials for 3D printing technology • Physical and chemical properties of materials • Metals and alloys • Ceramics • Degradation and corrosion of materials • Analytical methods • Modification of materials • Recycling in foundry and metallurgy

## ORGANIZING COMMITTEE

Chairman:  
RAFAŁ DAŃKO, Dean of Faculty of Foundry Engineering

### Committee members:

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| HALINA KRAWIEC         | BARBARA KALANDYK      |
| MARCIN GÓRNY           | BEATA GRABOWSKA       |
| JAROSŁAW JAKUBSKI      | JANUSZ LELITO         |
| EUGENIUSZ ZIÓŁKOWSKI   | ARTUR BOBROWSKI       |
| MARCIN BRZEZIŃSKI      | DANIEL GURGUL         |
| ALDONA GARBACZ-KLEMPKA | PAWEŁ ŻAK             |
| MICHAŁ SZUCKI          | JOANNA RAMUS          |
| BEATA GRACZ            | ALEKSANDRA GRABARCZYK |

## PLACE OF CONFERENCE

The conference will take place on 15 November 2019 at the Faculty of Foundry Engineering.

30-059 Krakow, Reymonta 23, Building D8, Poland

## IMPORTANT DATES

|            |  |
|------------|--|
| 30.05.2019 | Start of registration for participants of conference                                 |
| 31.07.2019 | Deadline for participant registration and submission of abstracts in English         |
| 14.08.2019 | Deadline for organizers to send information to authors about acceptance of abstracts |
| 31.08.2019 | Deadline for payment of reduced conference fee                                       |
| 22.09.2019 | Full payment of conference fee   |
| 22.09.2019 | Deadline for sending full text of publication  |

## PARTICIPATION COSTS

Conference fee:

|                                      | until 2019-07-30 | after 2019-07-30 |
|--------------------------------------|------------------|------------------|
| Conference fee                       | 200 EUR/ person  | 250 EUR/ person  |
| Conference fee for doctoral students | 150 EUR/ person  | 200 EUR/ person  |

The conference fee includes the costs of attending the conference, conference materials, gala dinner, and snacks during coffee breaks.

The fee does not include accommodations.

Accommodations recommended:

Hotel Novotel Kraków City West <http://www.novotel.com>

Hotel Polonez <http://www.hotel-polonez.pl>

Hotel Krakowiak <http://www.ach.krakow.pl>

## APPLICATION FOR PARTICIPATION

Please send the application form to:  
konferencjajo@agh.edu.pl



## CONFERENCE MATERIALS

All accepted abstracts will be published in the conference materials in both printed and electronic forms.

language of abstracts: **English**  
language of papers: **English**

Articles will be published after a positive review in the JOURNAL OF CASTING & MATERIALS ENGINEERING (JCME).

Please submit texts of articles via the following website:  
<https://journals.agh.edu.pl/jcme>

Please include the following note:  
"ICCME 2019"

publication language: **English**

## CONTACT

AGH University of Science and Technology in Krakow  
Faculty of Foundry Engineering  
30-059 Krakow, Reymonta 23, Building D8

e-mail: [konferencjajo@agh.edu.pl](mailto:konferencjajo@agh.edu.pl)  
phone: +48 12 617 27 01

[www.foundry.agh.edu.pl/iccme-2019/](http://www.foundry.agh.edu.pl/iccme-2019/)



**FACULTY OF FOUNDRY  
ENGINEERING AGH**



**FACULTY OF FOUNDRY  
ENGINEERING AGH**

## INVITATION

The Dean and Council  
of the Faculty of Foundry  
Engineering

would like to invite you to  
participate in the

II International  
Conference  
of Casting and Materials  
Engineering ICCME 2019

"Materials and Technologies  
for Automotive Industry"

15 November 2019

