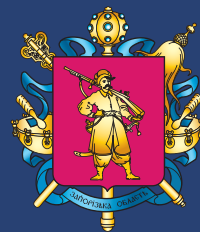


# Запорожье



## ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ФОРУМ

Том 1

17 - 21 мая 2011 г.

# ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ФОРУМ

Том 1

17-21 мая  
ЗАПОРОЖЬЕ  
КОЗАК-ПАЛАЦ



## Организаторы:



*Запорожский областной совет*



*Запорожская областная государственная администрация*



*Запорожская торгово-промышленная палата*



*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*



*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины*



*НТУ «Харьковский политехнический институт»*



*Украинский НИИ технологии машиностроения*



*Запорожский национальный технический университет*



*Национальная металлургическая академия Украины*



*Ассоциация технологов-машиностроителей Украины*



*Ассоциация литейщиков Украины*



*Запорожский институт экономики и информационных технологий*

*Шановні учасники, гості та організатори  
запорізького промислового форуму!*

Від імені Міністерства промислової політики України щиро вітаю всіх із початком роботи XIX Міжнародної спеціалізованої виставки «Машинобудування. Металургія - 2011», VII Міжнародної спеціалізованої виставки «Литво - 2011» та Промислового інвестиційного форуму.

Нам, як членам оргкомітету особливо приємно відзначити, що за роки свого існування ця виставка набула статусу відомого та авторитетного виставкового форуму в Україні і стала значною подією для вітчизняної промисловості. Запорізька виставка має свої традиції, а щорічне успішне її проведення свідчить про конкурентоспроможність промислової галузі, про прагнення наших підприємств до розвитку та вдосконалення технологій.

Вже на протязі 14 років Запоріжжя становиться незмінним місцем зустрічі тисяч промисловців, підприємців, бізнесменів, науковців. Головним завданням такого форуму є створення ефективної площадки для обміну досвідом, залучення інвестицій, ознайомлення з новітніми досягненнями, пошуку нових шляхів у розв'язанні низки проблем у сучасній галузі.

Висловлюю глибоку впевненість, що виставка та заходи, що її супроводжуватимуть, стануть черговим кроком до стабільного та успішного розвитку, насамперед нашої української промисловості. Всім бажаю корисних ділових контактів, цікавих зустрічей та реалізації самих амбітних задумів!

З повагою  
Перший заступник  
Міністра промислової  
політики України



С.В. Сиротюк

*Уважаемые дамы и господа!*

От имени Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины сердечно поздравляю участников, гостей и организаторов с началом работы XIX Международной специализированной выставки «Машиностроение. Металлургия - 2011».

Ежегодно это мероприятие вызывает большую заинтересованность у руководителей и технологов организаций, специализирующихся на выпуске машиностроительной продукции, обработке металлов и изготовлении инструмента. В экспозиции выставки традиционно представлен ассортимент продукции известных торговых марок.

Участие в Международной специализированной выставки «Машиностроение. Металлургия - 2011» дает возможность отечественным специалистам получать информацию о последних технологических новинках, использовать их в своей работе, поднять инновационную активность отраслей экономики, повысить научно-технический потенциал, восприимчивость производства к новым прогрессивным разработкам, повысить эффективность производства и качество продукции.

Одним из главных мероприятий выставки станет Международный форум «Инновационные материалы и технологии в машиностроении и металлургии», где ученые и практики смогут поделиться друг с другом достижениями, оценить перспективы своих разработок.

Сердечно желаю всем участникам, гостям и организаторам XIX Международной специализированной выставки «Машиностроение. Металлургия - 2011» плодотворной работы, творческого вдохновения и взаимовыгодных контактов!

С уважением,

директор Института сверхтвердых  
материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины,  
академик НАН Украины



Н.В. Новиков

*Шановні гості та учасники!*

*Запорізька область відома як в Україні, так і далеко за її межами своїм могутнім промисловим потенціалом. Такі індустріальні гіганти, як «Запоріжсталь», «Дніпроспецсталь», «Мотор Січ», «Запорізький автомобілебудівний завод», «Запоріжжкран», «Укрграфіт» та інші формують імідж нашого регіону, як потужного, технологічно розвинутого виробника затребуваної в світі промислової продукції.*

*Президентом України Віктором Федоровичем Януковичем чітко визначено пріоритети розвитку держави: втілення в життя нових реформ, модернізація промисловості, впровадження новітніх технологій та інноваційних проектів, поліпшення інвестиційного клімату та ефективної реалізації економічного потенціалу.*

*В сучасних умовах саме інвестиції та інновації мають стати надійним фундаментом економічного зростання нашої держави.*

*Проведення Запорізькою торгово-промисловою палатою Промислового Інвестиційного Форуму та виставки «Машинобудування. Металургія», безперечно, сприяє розширенню та налагодженню ділових контактів та реалізації перспективних інвестиційно-інноваційних проектів. Такий захід, безсумнівно, дозволить закріпити за нашою державою високе звання повноправного члена світової спільноти третього тисячоліття.*

*Впевнений, нашими спільними зусиллями Запорізький край буде й далі розвиватись та міцніти на благо кожного його мешканця та України в цілому.*

*З щирою повагою,*

*голова Запорізької обласної  
державної адміністрації*



*Б.Ф. Петров*

# ЛИТЬЕ 2011

УДК 621.74  
Л64

**Литье-2011:** Материалы VII Международной научно-практической конференции.  
Том 1.

В сборнике представлены материалы, касающиеся актуальных проблем литейного и металлургического производства: получение, обработка и структурообразование сплавов; новые методы, прогрессивные технологии и оборудование; автоматизация, компьютеризация и методы контроля технологических процессов; литье композиционных материалов; технология формовочного и стержневого производства, покрытия.

Материалы предназначены для инженерно-технических работников металлургических и машиностроительных предприятий и научно-исследовательских институтов.

Печатается по решению Ученого совета Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины.

За достоверность информации, изложенной в материалах тезисов, несут ответственность их авторы.

Редакторы: О.И. Пономаренко, С.В. Гнилоскуренко

© Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Акимов О.В.**, – д.т.н., проф., зав. каф. Национального технического университета "ХПИ", г. Харьков
- Богдан А.В.** – науч. сотр. Физико-технологического института металлов и сплавов Национальной академии Украины, Киев
- Бубликов В.Б.** – д.т.н., ст.н. сотр., зав. отдел. Физико-технологического института металлов и сплавов Национальной академии Украины, Киев
- Грабченко А.В.** – д.т.н., проф. зав. каф. Национального технического университета «ХПИ», г. Харьков
- Гресс А.В.** – д.т.н., проф., зав. каф. Днепродзержинского государственного технического университета, г. Днепродзержинск
- Гутько Ю.И.** – д.т.н., проф., зав. каф. Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, г. Луганск
- Заблоцкий В.К.** – д.т.н., проф., зав. каф. Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск
- Затуловский А.С.** – д.т.н., ст.н. сотр., зав. отдел. Физико-технологического института металлов и сплавов Национальной академии Украины, г. Киев
- Клименко С.И.** – директор департамента литейного производства Минпромполитики Украины, г. Киев
- Кухарь В.И.** – исполнительный директор АЛУ Украины, Физико-технологического института металлов и сплавов Национальной академии Украины, г. Киев
- Лунев В. В.** – д.т.н., проф., директор института, зав. каф. Запорожского государственного технического университета, г. Запорожье
- Лысенко Т.В.** – д.т.н., проф., зав. каф. Одесского национального политехнического университета, г. Одесса
- Могилатенко В.Г.** – д.т.н., проф., зав. каф. Национального технического университета Украины «К.П.И.», г. Киев
- Пономаренко О.И.** – д.т.н., проф. Национальный технический университет «ХПИ», вице-президент Ассоциации литейщиков Украины, г. Харьков
- Сабирзянов Т.Г.** – д.т.н., проф., зав. каф. Кировоградского национального технического университета, г. Кировоград

- Ткач В.В.** – проф., декан Криворожского технического университета, г. Кривой Рог
- Товажнянский Л. Л.** – д.т.н., проф., ректор Национального технического университета «ХПИ», г. Харьков
- Троцан А.И.** – д.т.н., проф., зав. каф. Приазовского государственного технического университета, г. Мариуполь
- Фесенко А.Н.** – к.т.н., доц., первый проректор Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск
- Хричиков В.Е.** – д.т.н., проф., зав. каф. Национальной металлургической академии Украины, г. Днепропетровск
- Шинский О. И.** – д.т.н., проф., зам. директора Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины, Президент Ассоциации литейщиков Украины, г. Киев

## СОДЕРЖАНИЕ

## Получение, обработка и структурообразование сплавов

## СОДЕРЖАНИЕ

**Л.А. Адаменко, А.Ю. Калашникова, Л.Х. Иванова.** ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ИЗНОСОСТОЙКОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**С.И. Адамчук, Г.А. Бялик, В.В. Наумик, В.В. Лунёв, О.С. Омельченко.** СПОСОБ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА МЕДИ ОТ КИСЛОРОДА

**О.В. Акимов, С.Б. Таран, А.П. Марченко.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО ЧВГ ДЛЯ ПОРШНЕЙ ДВС

**О.В. Акімов, О.А. Чибічик.** МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ І ВИГОТОВЛЕННЯ КОРОТКОЗАМКНУТОГО ЛИТОГО РОТОРА ДЛЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

**В.И. Алёхин, О.В. Акимов.** ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ УСАДОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ НА НДС ПОРШНЯ ВАЗ 21083

**Е.Г. Афгандиянц, О.А. Пеликан, В.П. Лихошва, Л.М. Клименко, Д.В. Глушков.** ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

**Ю.Д. Бачинский, В.Б. Бубликов, В.П. Латенко, В.В. Суменкова, Е.П. Нестерук.** ОСОБЕННОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧУГУНА ФЕРРОСИЛИЦИЕМ

**Д.М. Беленький, Н.С. Пионтковская.** ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОФЛЮСОВОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СТРУЙНОМ ЗАМЕШИВАНИИ РАФИНИРУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ

**Б.М. Бойченко, К.Г. Низяев, А.Н. Стоянов, Л.С. Молчанов, С.А. Ткач.** ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОГНЕУПОРОВ ДЛЯ СТАЛЕЛИТЕЙНЫХ АГРЕГАТОВ

**Б.М. Бойченко, Є.В. Синегін, О.М. Стоянов, К.Г. Нізяєв.** ІНОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФУТЕРІВКИ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ

**Г.П. Борисов, В.Ю. Шейгам, Н.П. Исайчева, А.И. Семенченко, А.Н. Недужий, А.Г. Вернидуб.** ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Г.П. Борисов, В.Ю. Шейгам, Н.П. Исайчева, А.И. Семенченко, А.Н. Недужий, А.Г. Вернидуб.** ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Г.П. Борисов, А.И. Хоменко\*, А.А. Хоменко\*, В.Ю. Шейгам, Н.П. Исайчева.** ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА

**В.Б. Бубликов.** ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА И СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

**В.Б. Бубликов, А.А. Ясинский, Л.Н. Сыропоршнев\*, Д.Н. Берчук,**

**И.В. Киришун, Н.П. Моисеева, В.Н. Талько.** ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ

**Г.А. Бялик, С. И. Адамчук, Е. С. Сидоренко.** РАЦИОНАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА В ИНДУКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

**М. М. Ворон, Н.И. Левицкий.** ВОЗМОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti-AL В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКИ

**В.Г. Герасименко, Т. О. Широких.** ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ІНОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ЯКІСНОЇ БЕЗПЕРЕРВНО ЛИТОЇ ЗАГОТІВКИ ЗА ДОПОМОГОЮ «М'ЯКОГО» ОБТИСКУ ПРИ ЇЇ ТВЕРДІННІ

**В.А. Гладких, В. Ф. Лысенко, А. В. Рубан.** РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАРГАНЦЕВЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЛИТЕЙНЫХ СТАЛЕЙ

**В. А. Гладких, В. Ф. Лысенко, А. В. Рубан.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА, ТЕМПЕРАТУРНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ РАЗЛИВКИ НА КАЧЕСТВО СЛИТКА СПЛАВА

**А.С. Гладков, Н.И. Левицкий, Т.В. Лапшук, Е.А. Матвиец, М.Ю. Смирнов.** РАФИНИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКИ

**С.В. Гнилокуренок.** МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОАЛЮМИНИЯ ИЗ РАСПЛАВА

**В. П. Головаченко, Г. П. Борисов, В. М. Дука, А. Г. Вернидуб.** НОВЫЙ СПОСОБ ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

**А. В. Гресс, С. А. Стороженко.** О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОДИФУЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ МЕТАЛЛА В ЛИТЕЙНЫХ КОВШАХ

**Ю.И. Гутько, Н.А. Тараненко.** МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОДЕЛЕЙ ИЗ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

**И.В. Дервянко.** ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРБИДА КРЕМНИЯ

**В. С. Дорошенко, Ю.Н. Иванов.** ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПЕСЧАНОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ, ПОЛУЧЕННОЙ ПОКРИО-ВАКУУМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**В. С. Дорошенко, В. П. Кравченко.** О СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК В КОНТАКТЕ СО ЛЬДОМ

**В. С. Дорошенко, І. О. Шинський.** ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ ПІД ГАЗОВИМ ТИСКОМ

**Ю. В. Доценко, В. Ю. Селиверстов.** ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ПЕРЕПЛАВА ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

**А. П. Еременко, А. А. Свиженко.** УЛУЧШЕНИЕ ВЫБИВАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕКОВЫХ СМЕСЕЙ

**В. Г. Ефимова, Г. В. Ефимов, В.М. Симановский.** МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОГНЕУПОРОВ

**А. В. Жаданос, О. Н. Кукушкин.** РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ

**Н. О. Жижкіна, Ю. І. Гутько, А. І. Малик.** МОДИФІКУВАННЯ МАСИВНИХ ЧАВУНИХ ВИЛИВКІВ

**Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан.** ОДНОТЕМПЕРАТУРНЫЙ МЕТОД БЕСКОНТАКТНОЙ СПЕКТРАЛЬНО-КОМПЕНСАЦИОННОЙ МНОГОЦВЕТОВОЙ ПИРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

**Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан.** СПЕКТРАЛЬНО-КОМПЕНСАЦИОННАЯ МНОГОЦВЕТОВАЯ ПИРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМ ВВЕДЕНИЕМ ПОПРАВКИ

**Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан, Н. Ф. Зубенина.** НОВЫЙ МЕТОД МНОГОЦВЕТОВОЙ ПИРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЗАИМНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕРМОКОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

**Л. Ф. Жуков, А. Л. Гончаров.** ПЕРИОДИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

**Л. Ф. Жуков, А. Л. Гончаров, Э. В. Захарченко.** ЭКСПРЕССНЫЙ КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ГРАФИТА В ЧУГУНЕ

**Л. Ф. Жуков, А. Л. Гончаров, Э. В. Захарченко, В. В. Батальянец, Г. О. Антонов.** ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

**Л. Ф. Жуков, В. В. Дроздовский, В. Н. Гордин.** НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВОВ В ПОТОКЕ ИЛИ СТРУЕ НА СЛИВЕ ИЛИ ВЫПУСКЕ ИЗ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ И ВАГРАНОК

**Л. Ф. Жуков, Э. В. Захарченко, А. Л. Гончаров, Е. А. Сиренко.** ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ЧУГУНОВ И ДРУГИХ ЛИТЫХ СПЛАВОВ

**Л. Ф. Жуков, Н. Ф. Зубенина.** КОНТРОЛИРУЕМЫЕ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЛАВКИ, МИКСЕРОВАНИЯ И РАЗЛИВКИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

**Л. Ф. Жуков, М. И. Смирнов, А. В. Богдан.** НЕПРЕРЫВНЫЙ СВЕТОВОДНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

**А. С. Затуловский, Е. В. Миронова, Е. А. Набока.** ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ЛИТЬЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ КОКИЛЯ

**З. А. Ивченко, В. В. Лунёв.** ВЛИЯНИЕ ВЕЩЕСТВ-ПРИМЕСЕЙ И РАЗМЕРА МИКРОЗЕРНА НА ПЛАСТИЧНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ5Л (ВТ5Л-МС)

**Н. В. Игнатов, Е. Е. Вылупко.** СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ

**А. Ю. Калашникова, Л. Х. Иванова.** РОЗРОБКА СКЛАДУ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З ВИСОКОЮ УДАРОСТІЙКІСТЮ

**Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова.** РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ОКАТЫШЕЙ

**Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова.** ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО УГЛЕРОДА В ОКАТЫШАХ В УСЛОВИЯХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНО-ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ

**Д. А. Ковалёв, Н. Д. Ванюкова, А. Ю. Худяков, М. Н. Бойко.** АНАЛИЗ РАБОТЫ ОБЖИГОВОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЖИМА ИНТЕНСИВНОЙ СУШКИ

**Д. А. Ковалёв, А. П. Поповская, Н. Д. Ванюкова, М. В. Ягольник.** РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ БРИКЕТОВ МЕТОДОМ ВИБРОПРЕССОВАНИЯ

**Д. С. Козак, В. Б. Бубликов, Л. А. Зеленая.** СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИЛИКОКАЛЬЦИЕМ

**А. А. Кондрат, В. Т. Калинин.** ПРИМЕНЕНИЕ БРИКЕТИРОВАННЫХ УЛЬТРА- И НАНОДИСПЕРСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ОТЛИВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Ф. М. Коглярский, И. В. Хвостенко.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

**В. П. Кравченко, В. С. Дорошенко.** КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И МНОЖЕСТВО (ОБЛАСТЬ) ВОРОНОГО

**Н. Н. Кузьменко, Л. Д. Кулак, Н. И. Левицкий\*, Т. В. Лапшук\*, Е. А. Матвиец\*.** ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Ti-Al-Si

**Ю. Ю. Ладарева, О. И. Шинский, А. И. Рыбицкий.** ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИСТИРОЛЬНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ

**С. В. Ладохин, В. А. Тутык.** ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПЛАВКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУШЕК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**Н. И. Левицкий, Е. А. Матвиец, Т. В. Лапшук, М. П. Кругленко.** ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti-Al-Nb С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ НИОБИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКИ

**В. В. Лунев, А. С. Амельченко, В. В. Васильев.** ПЕРСПЕКТИВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

**Т. В. Лысенко, Д. А. Желдубовский, И. И. Становская.** СИНХРОНИЗАЦИЯ СОСТАВНЫХ СОБЫТИЙ В СИСТЕМЕ «ОТЛИВКА – ПЕСЧАНАЯ ЛИТЕЙНАЯ ФОРМА»

**А. Г. Малявин.** ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КАМНЕЛИТЫХ ФТОРФЛОГОПИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

**В. А. Мамишев.** ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ ПРОФИЛЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ КОРКОВОЙ ЗОНЫ

**В. А. Мамишев, О. И. Шинский, Л. А. Соколовская.** ВЗАИМОСВЯЗЬ КИНЕТИКИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ С ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОЛЯМИ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

**М. О. Матвеева, Б. В. Климович, В. В. Климович.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВКИ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛА РАБОЧЕГО СЛОЯ ВАЛКОВ

**Л. А. Матвеева\*, В. В. Лашнева\*\*, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая.** НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЕ ПОКРЫТИЕ НА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ

**М. О. Матвеева, А. А. Макарова, Б. В. Климович.** ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ МАРГАНЦЕМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФИТА В ЧУГУНАХ

**В. Л. Найдек, В. Н. Костяков, А. А. Волошин.** ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПЛАЗМЕННО-ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

**В. Л. Найдек, В. Н. Костяков, В. Б. Сидак, А. Н. Сушков.** ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ

**В. В. Наумик.** ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВОК

**К. Г. Низяев, Б. М. Бойченко, А. Н. Стоянов.** НОВЕЙШАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ АКТИВНЫМИ РЕАГЕНТАМИ, ВОССТАНОВЛЕННЫМИ В ОБЪЕМЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО РАСПЛАВА В ЗОНЕ ЭЛЕКТРОДУГИ

**В. В. Наумик, В. В. Клочихин, Э. И. Цивирко, В. В. Лунёв.** ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**А. Н. Овчарук, В. К. Руденко, А. Ю. Таран, А. С. Филев.** ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ ЧЕРНОВОЙ МЕДИ ИЗ ОКИСНОЙ РУДЫ

**Ю. С. Паніоты, В. С. Мамешин, А. С. Гриценко, С. В. Журавльова.** ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ПЕРВОРІДНОГО МЕТАЛУ ПРОЦЕСОМ РІДКОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ

**О. И. Пономаренко, В. Ф. Пелих, А. В. Бережная.** ПОЛУЧЕНИЕ СИНТИКОМА В ВАГРАНКЕ

**О. И. Пономаренко, Н. С. Евтушенко, А. В. Бережная.** СТАБИЛИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ОФОС

**О. И. Пономаренко, Т. В. Берлизова.** МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ ДЛЯ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩЕЙ СМЕСИ (ХТС) НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА

**А. Ю. Пройдак.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОФОСФОРА УГЛЕРОДОВОССТАНАВИТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОКАМЫШЕВАТСКОГО ФОСФОРИТА

**А. В. Рабинович, Г. Н. Трегубенко, Ю. А. Бубликов, Г. А. Поляков, А. В. Пучиков, А. А. Катрич, Д. В. Лелеко.** РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С КАРБОНИТРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ДЛЯ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

**А. А. Радченко, А. В. Гальченко.** ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ И ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

**С. И. Репях.** О КОРОБЛЕНИИ ВЫПЛАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК  
**П. В. Русаков.** ДИНАМИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ НАСЫПНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

**В. Ю. Селіворстов, Ю. В. Доценко.** ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ НА РОЗПЛАВ В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ

**А. И. Семенченко, В. М. Дука, Л. К. Шеневидько, А. Г. Вернидуб, И. В. Хвостенко.** ГИДРОЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ РАСПЛАВОВ

**А. И. Семенченко, Л. К. Шеневидько, А. Г. Борисов, И. В. Хвостенко.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРЯМЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

**О. С. Сергієнко, В. В. Луньов, Г. А. Бялік.** ВПЛИВ ГАРЯЧОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ (ГІП) НА РІВНОМІРНІСТЬ РОЗПОДІЛУ  $\gamma'$ -ФАЗИ ТА ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

**Е. В. Середенко.** ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЛИТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ ЗАКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**В. А. Середенко, С. Г. Голубчик.** РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В РАСПЛАВЕ ПРИ КОНТАКТНОМ ПОДВОДЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИТЕЙНОЙ КОВШ

**В. М. Сімановський, Г. Ф. Мьяльница, І. І. Максютя, Ю. Г. Квасницька, А. С. Прутуляк, О. В. Михнян.** ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВІТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД З ОРИЄНТОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ

**В. М. Сімановський, Г. Ф. Мьяльница, І. І. Максютя, Ю. Г. Квасницька, О. В. Михнян.** РАФІНУВАННЯ РОЗПЛАВІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ СПРЯМОВАНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

**Л. А. Соколовская.** ВЛИЯНИЕ ДРОБИ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СЛИТКА В ИЗЛОЖНИЦЕ

**О. В. Соценко, И. Ю. Посыпайко, В. С. Савага.** ИЗНОСОСТОЙКИЕ ЧУГУНЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ И ШНЕКОВЫХ ПРЕССОВ

**О. В. Соценко, И. Ю. Посыпайко, В. С. Савага.** ИЗНОСОСТОЙКИЕ ДЕТАЛИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ

**А. Л. Становский, А. А. Коряченко, И. Н. Щедров.** ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИДЕНТИФИКАТОРЫ НАРУШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**А. А. Стрюченко.** ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРА ПОЛИСТИРОЛА ИЗ ОТХОДОВ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА НА ПРОЧНОСТЬ ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫХ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ

**А. А. Стрюченко, В. С. Дорошенко.** НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЦИКЛИНГА ОТХОДОВ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

**А. К. Тараканов.** РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

**Е. Д. Таранов, \*А. С. Эльдарханов, А. С. Нурадинов.** ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВ

**Л. Р. Тоцкий, А. А. Стрюченко.** РАСТВОРЫ ОТХОДОВ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В ЖИВИЧНОМ СКИПИДАРЕ В КАЧЕСТВЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КАРТИННЫХ ЛАКОВ В ЖИВОПИСИ

**Т. Л. Тринева.** ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ОСНАСТКИ, ИЗГОТОВЛИВАЕМОЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

**А. И. Троцан, В. В. Каверинский, И. Л. Бродецкий.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЛИТОГО МЕТАЛЛА ТУГОПЛАВКИМИ ДИСПЕРСНЫМИ ИНОКУЛЯТОРАМИ С УЧЕТОМ ИХ РАЗБРОСА ПО РАЗМЕРАМ

**В. З. Тыднюк, Н. А. Тараненко.** ПРОЦЕСС ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗА ПРИ ВСПЕНИВАНИИ ПОЛИСТИРОЛА И ИЗГОТОВЛЕНИИ ГАЗИФИЦИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

**В. А. Усенко, В. Н. Ковшов, В. А. Петренко, Р. А. Куприков, С. Е. Сулименко.** ВОПРОСЫ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ РАБОТЫ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ЗОН ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Л. В. Усенко, С. И. Репях, О. В. Соценко.** О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ УДАЛЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТЛИВОК, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЛВМ

**А. Н. Фесенко, М. А. Фесенко.** СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ

**М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко.** УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

**А. С. Филев, И. В. Цветков, А. Н. Овчарук, В. А. Тутык.** ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ВКЛЮЧАЮЩИХ Si3N4 ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СЛИТКОВ СОЛНЕЧНОГО КРЕМНИЯ

**А. В. Хазанов, Л. Х. Иванова.** ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

**А. Ю. Хитько, Л. А. Шапран, Л. Х. Иванова, М. Н. Хитько.** ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТЫХ РОЛИКОВ МНЛЗ

**О. Н. Хорошилов.** ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

**В. Е. Хрычиков, Е. В. Меняйло.** ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАЛИВКИ И СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

**Г. Д. Хуснутдинов, Б. Г. Зеленый.** ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ОБРАБОТКИ ЧУГУНА НИТРИДОМ МАГНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЙ

**И. В. Цветков, М. И. Гасик.** ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ФЕРРОСИЛИЦИЯ НА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

**А. Г. Черныш, В. А. Болух.** ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

**Т. Г. Цір, А. Г. Борисов.** ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ НА МОРФОЛОГІЮ СПЛАВУ

**Т. Г. Цір, В. М. Дука, А. Г. Борисов.** ДІЯ ТЕПЛОГО ПОТОКУ НА МОРФОЛОГІЮ СПЛАВУ

**А. П. Шатрава, В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Л. А. Бондарь.** НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНЫХ МАШИН

**А. И. Шейко, В. А. Клименко.** ОПТИМИЗАЦИЯ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА НАПОЛНИТЕЛЯ ФОРМОВОЧНЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ СМЕСЕЙ

**О. И. Шинский, В. С. Дорошенко.** СУХИЕ ПЕСЧАНЫЕ СМЕСИ, ТВЕРДЕЮЩИЕ ПРИ ПРОПИТКЕ РАСПЛАВОМ МОДЕЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ

**И. В. Шляпин, Г. Ш. Кирия, Л. Х. Иванова.** ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАТВЕРДЕВАЮЩИЙ ЧУГУН

**В. А. Щерецкий, А. С. Затуловский.** РАЗВИТИЕ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 669.14.018

*Л. А. Адаменко, А. Ю. Калашикова, Л. Х. Иванова*  
*Национальная металлургическая академия Украины,*  
*Днепропетровск*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ИЗНОСОСТОЙКОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Высокая легированность стали 110Г13Л обуславливает развитие в отливках транскристаллитной структуры с большим количеством усадочных дефектов, что в определенной степени сказывается на ее механических свойствах и износостойкости.

Уточнение состава осуществляли методом активного эксперимента, основная идея которого заключалась в последовательной реализации небольших серий опытов с целью получения представлений о функции отклика, записываемой в виде:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

где  $y$  – параметр процесса, подлежащий оптимизации;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – факторы, влияющие на изучаемый процесс.

В задачу исследования входило – с помощью определенной математической модели установить направление градиента и значения коэффициентов уравнений регрессии, характеризующих свойства стали при многофакторных комбинациях химического состава.

При планировании эксперимента была выбрана линейная математическая модель (полином первой степени), содержащая информацию о направлении градиента и минимально возможное число коэффициентов при заданном числе факторов. При этом была обеспечена возможность установления факторов на любом, заранее заданном уровне вне зависимости от уровней других факторов.

Построение плана эксперимента сводилось к выбору основного уровня химического состава (из анализа априорной информации), интервалов его варьирования и составления матрицы планирования.

При проведении опытов была реализована полуреплика от полного факторного эксперимента  $2^4$ . Каждый элемент химического состава (углерод, марганец, кремний и фосфор) принимали только два крайних значения – верхний и нижний пределы концентраций. Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в таблице. По результатам механических и эксплуатационных испытаний исследуемых вариантов стали, были вычисле-

ны коэффициенты уравнений регрессии и проверена математическая модель на адекватность.

Ниже приведены уравнения регрессии, характеризующие зависимость между составом и свойствами системы С-Мn-Si-P в исследуемых диапазонах многофакторного планирования. Приведены также дисперсии параметра оптимизации ( $S^2\{y\}$ ), дисперсии коэффициентов уравнений регрессии ( $S^2\{b_j\}$ ) с доверительным интервалом значимости коэффициентов ( $\Delta b_j$ ).

Изучаемые факторы	Химический состав, %					Результаты опытов				
	$x_0$	C	Mn	Si	P	$\sigma_{\sigma}$	$\delta$	$\psi$	$\alpha_k$	стойкость, T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Основной уровень		1,15	12,5	0,6	0,065					
Интервал варьиров.		0,15	1,0	0,2	0,035					
Верхний уровень		1,3	13,5	0,8	0,10					
Нижний уровень		1,0	11,5	0,4	0,03					
Кодовое обозначен.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
Опыт №1		-	-	-	-	81,6	45,7	36,0	30,9	659
Опыт №2		+	+	-	-	84,5	40,7	34,3	34,4	630
Опыт №3		+	-	+	-	77,2	24,0	15,0	25,1	600
Опыт №4		-	+	+	-	73,0	25,2	28,4	24,1	500
Опыт №5		+	-	-	+	78,0	24,0	14,6	16,9	450
Опыт №6		-	+	-	+	65,3	13,7	19,1	18,2	445
Опыт №7		-	-	+	+	78,1	25,6	21,7	16,0	412
Опыт №8		+	+	+	+	80,5	19,0	17,0	7,2	364
в $y_1$	77,2	+1,2	+0,92	-0,8	-3,0					
в $y_2$	27,8	-4,7	+1,0	-0,5	-5,7					
в $y_3$	23,3	-6,2	+1,6	-0,83	-1,7					
в $y_4$	21,6	-5,3	+3,3	-0,22	-5,2					
в $y_5$	507,5	-51,0	+28,0	-24,2	-77,2					

$$Y_1(\sigma_{\sigma})=77,2 + 1,2C + 0,92 Mn + 0,8Si + 3,0P;$$

$$S^2\{b_j\} = 44,5; S^2\{y_j\} = 1,42; \Delta b_j = 3,06.$$

$$Y_2(\delta)=27,8 - 4,7C + 1,0Mn - 0,5Si - 5,7P;$$

$$S^2\{b_j\} = 20,9; S^2\{y_j\} = 0,95; \Delta b_j = 2,06.$$

$$Y_3(\psi)=23,3 - 6,2C + 1,6Mn - 0,8Si - 1,7P;$$

$$S^2\{b_j\} = 15,1; S^2\{y_j\} = 0,685; \Delta b_j = 1,75.$$

$$Y_4(\alpha_k)=21,6 - 5,3C + 3,3Mn - 0,22Si - 5,2P;$$

$$S^2\{b_j\} = 10; S^2\{y_j\} = 0,455; \Delta b_j = 1,36.$$

$$Y_5(T)=507,5 - 51,0C + 28,0Mn - 24,2Si - 77,2P;$$

$$S^2\{b_j\} = 5500; S^2\{y_j\} = 183; \Delta b_j = 27,4.$$

Анализ абсолютных значений, доверительных интервалов значимости и знаков коэффициентов уравнений регрессии показал, что из всех элементов состава наибольшее влияние на свойства износостойкой стали оказывали углерод и фосфор.

$$\sigma_{\sigma}=77,2 + 8,0C + 0,92Mn - 4,0Si - 86,0P;$$

$$\delta=27,8 - 31,4C + 1,0Mn - 2,5Si - 163,0P;$$

$$\psi=23,3 - 41,3C + 1,6Mn - 4,1Si - 48,5P;$$

$$\alpha_k=21,6 - 35,4C + 3,3Mn - 1,1Si - 148,7P;$$

$$T=507,5 - 340C + 28Mn - 121Si - 2200P;$$

#### ВЫВОДЫ

1. Влияние фосфора на свойства стали в 5 раз сильнее, чем углерода.
2. Углерод несколько повышает прочность стали, но резко снижает пластичность.
3. Марганец, в исследуемых пределах, незначительно повышает прочность и пластичность.
4. Повышение кремния снижает износостойкость отливок за счет снижения уровня механических свойств стали.

УДК 621.743:669.34

*С. И. Адамчук, Г. А. Бялик, В. В. Наумик, В. В. Лунёв,  
О. С. Омельченко*

*Запорожский национальный технический университет, Запорожье*

## **СПОСОБ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА МЕДИ ОТ КИСЛОРОДА**

Промышленное использование чистой меди, прежде всего, обусловлено её высокими электро- и теплопроводностью. Использование в полной мере перечисленных уникальных свойств меди, подразумевает применение при изготовлении различных деталей чистого исходного материала. Наличие вредных примесей даже в небольших количествах существенно ухудшает комплекс эксплуатационных свойств меди.

Как известно, Украина не располагает собственными природными ресурсами первичной меди, потому, несомненно, актуальным является вопрос усовершенствования технологических процессов, позволяющих получать высококачественные изделия с использованием имеющихся в наличии запасов вторичной меди.

Отходы меди попадают на переработку, как правило, в виде стружки, обрезков проводов, шин обмоток трансформаторов, высадки корпусов мощных диодов и тиристоров, отходов штамповочного производства. Они имеют развитую поверхность, вследствие чего сильно подвержены поверхностному окислению.

Исследование отходов меди показало, что основной вредной примесью в них, как правило, является кислород.

Согласно расчетным данным, при использовании в качестве шихты обрезков проводов содержание кислорода в зависимости от диаметра провода и толщины оксидного слоя может достигать 0,5 % и более.

Эффективным раскислителем меди является углерод. При раскислении углеродом содержание кислорода в меди может быть снижено до уровня 5,2·10<sup>-7</sup> %.

Незначительная растворимость углерода в меди позволяет использовать графит в качестве конструкционного материала для деталей, контактирующих с её расплавом.

Углерод активно окисляется на воздухе, что негативно сказывается на долговечности нагретых до высоких температур графитовых деталей. Существенно повысить ресурс работы этих деталей можно за счёт размещения их в рабочей камере вакуумной плавильной установки.

В случае ведения плавки при остаточном давлении 5·10<sup>-2</sup> мм рт. ст. окисление углерода незначительное и ресурс работы нагретых до высоких температур графитовых деталей, в основном, определяется механическим

износом. Такое давление в рабочей камере установки может быть обеспечено механическими вакуумными насосами, и для снижения содержания кислорода наиболее эффективным является раскисление меди углеродом в вакууме.

Разработан способ рафинирования расплава отходов меди в процессе индукционной тигельной плавки, при котором на дно тигля устанавливается шайба, изготовленная из плотного графита и имеющая определенное количество свободно расположенных отверстий, поверх которой загружается шихта. Отверстия в рафинирующей графитовой шайбе значительно (в 2 – 3 раза) увеличивают её реакционную поверхность.

По мере расплавления медь в жидком состоянии проходит сквозь отверстия в шайбе, быстро раскисляется и скапливается в нижней части тигля. Графитовая шайба, как более лёгкая, в процессе плавки поднимается на поверхность жидкой меди, обогревая зеркало расплава. Это позволяет после отключения индуктора обеспечить направленное затвердевание литой заготовки, и выведение усадочных дефектов в его верхнюю часть.

Шайба может использоваться многократно – порядка 30 – 60 плавков.

За счёт того, что шайба выполнена из плотного графита, исключается загрязнение вакуумной системы, в сравнении с раскислением при помощи измельчённого углеродистого материала.

Рафинирование расплава меди от кислорода при помощи разработанного способа может проводиться как в вакуумных, так и в открытых индукционных печах. Естественно, во втором случае эффективность рафинирования будет гораздо меньшей.

Данный способ также был использован для рафинирования расплава при получении высококачественных медных заготовок методом непрерывного литья.

УДК621.436: 539.3: 621.74

**О. В. Акимов, С. Б. Таран, А. П. Марченко**  
*Национальный технический университет*  
 «Харьковский политехнический институт», Харьков

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО ЧВГ ДЛЯ ПОРШНЕЙ ДВС

Современное двигателестроение нуждается в существенном повышении мощности, топливной экономичности и обеспечении высоких экологических показателей ДВС. Форсирование режимов работы дизельных двигателей приводит к росту механических и термических напряжений и поршень становится наиболее нагруженной деталью двигателя. С ростом нагрузок на поршень возрастают трудности выполнения высоких к ним требований и все более четкими становятся ограниченные возможности традиционной конструкции поршней и их материалов, что приводит к образованию поврежденных поверхности и тела поршня.

В рамках конструкторско-технологической подготовки производства чугунных поршней на кафедре литейного производства НТУ «ХПИ» проводится ряд исследований алюминиевого ЧВГ как наиболее перспективного материала для поршней высокофорсированных дизельных ДВС. При этом много внимания уделяется обеспечению стабильности получения необходимых свойств алюминиевого ЧВГ. Для количественной оценки состояния графита в структуре на свойства использовался коэффициент степени компактности, который учитывает периметр, количество, и площадь графитных включений на 1 мм<sup>2</sup> поверхности шлифа и имеет вид:

$$Q_2 = L_2^2 / 2 N_2 F_2$$

где:  $L_2$ - периметр графитных включений на 1 мм<sup>2</sup> поверхности шлифа;

$N_2$ -количество графитных включений на 1 мм<sup>2</sup> поверхности шлифа;

$F_2$ - площадь графитных включений на 1 мм<sup>2</sup> поверхности шлифа;

Следует отметить, что этот коэффициент очень чувствительный к изменению технологических параметров получения ЧВГ. При одинаковой технологии получения отливок, подобной их толщине стенки и с использованием определенного модификатора  $Q_2$  зависит, прежде всего, от количества вводимого модификатора и времени выдержки металла после ввода последнего. С увеличением количества вводимой лигатуры степень компактности графита увеличивается. При 1,2 % лигатуры ФС30РЗМ30  $Q_2 = 0,28$ . В этом случае в структуре чугуна образуется преимущественно шаровидный графит (около 75 %). Для алюминиевого ЧВГ коэффициент формы должен находиться в пределах  $Q_2 = 0,4-0,5$ . Следовательно, стабильное получение вермикулярного графита определенной дисперсности количество лигатуры должно быть 0,8-

0,9%. При этом необходимо ограничивать выдержку металла до заливки, т.к. после 15-17 минут эффект модифицирования практически исчезает и чугун кристаллизуется с пластинчатой формой графита.

Если оценивать структуру чугуна по ГОСТ344-87 то форма и распределение графита в стандартном ЧВГ и в алюминии ЧВГ практически одинаковые, т.е. там и там форма графита соответствует эталону ВГф2, а его распределение эталону ВГр1, но по количеству включений на единицу площади они существенно отличаются. Поэтому количество включений графита в стандартном ЧВГ соответствует эталону Вг70, а в алюминии ЧВГ – максимальному эталону ВГ100. Количество графитных включений на единицу площади в алюминии ЧВГ в 1,5 - 2 раза больше, чем в стандартном ЧВГ, и степень их компактности также более высокая ( $Q_2 = 0,32$  против  $Q_2 = 0,44$ ).

УДК 621.74

**О. В. Акімов, О. А. Чибічкіч**  
*Національний технічний університет*  
 «Харківський політехнічний інститут», Харків

### МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ І ВИГОТОВЛЕННЯ КОРОТКОЗАМКНУТОГО ЛИТОГО РОТОРА ДЛЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Виробництво електроустаткування в Україні займає одне з провідних місць. Особлива увага приділяється виготовленню двигунів серії АД, оскільки вони використовуються в усіх галузях промисловості. Таке широке застосування вони отримали завдяки своїй конструктивній простоті, порівняно низькій вартості і експлуатаційній надійності.

Останнім часом до експлуатаційних характеристик асинхронних двигунів пред'являються підвищені вимоги, які примушують працювати над удосконаленням, модернізацією і підвищення якості продукції, що випускається.

Основним показником роботи будь-якого електродвигуна є електропровідність. У сучасних асинхронних короткозамкнутих електродвигунах потужністю до 400 кВт головним способом виготовлення обмотки ротора є її заливка алюмінієм. Заливка алюмінієм є прогресивним технологічним процесом, при якому з найменшими витратами праці і матеріалу виходить

готова суцільнолита обмотка, що складається зі стрижнів і короткозамкнутих кілець з відлитими вентиляційними лопатками, які утворюють так звану «білячу клітку».

Під час дослідження встановлено, що єдиною причиною здатної впливати на електропровідність являється неякісна заливка «білячої клітини», яка значно погіршує експлуатаційні характеристики і знижує надійність роторної обмотки.

В результаті заливки можуть виникати такі ливарні дефекти, як недоливи, спаї, газові раковини в стержнях і короткозамкнутих кільцях, пористість, стонсування і обрив стрижнів «білячої клітини» і т.д. Проблема такого високого рівня браку пов'язана із складними умовами кристалізації алюмінієвого сплаву «білячої клітини», які призводять до утворення внутрішніх дефектів і задовільного заповнення пазів ротора.

Оцінюючи основні чинники, що впливають на процес заливки «білячої клітини» встановлено, що на якість заповнення чинять вплив наступні причини, : спосіб заливки, температура нагріву кокілів, переріз паза, температура металу, швидкість заливки, висота ротора, якість шихтовки пакету, конструкція ливарної форми.

Аналізуючи, наведені дані з виготовлення роторної обмотки встановлено, що експлуатаційні характеристики, і основна серед них електропровідність, залежать від якості заливки «білячої клітини». Вирішення проблеми щодо підвищення якості заливки можливо за рахунок:

1. Модернізації конструкції ливникової і вентиляційної систем:
  - для збільшення напору розплаву і запобігання недоливів металу збільшити висоту ливникової чаші;
  - для зменшення переохолодження металу в пазах і усадки по нижньому кільцю в чаші виконати розсікач, який дозволить падаючому з ковша металу і розбивається об розсікач рівномірно розподілятися по всіх живильників;
  - для поліпшення живлення виливки збільшити кількість живильників;
  - для більш інтенсивного виведення газів з форми при заливці, з метою зменшення браку з газових раковин збільшити глибину газовідвідних каналів;
  - сумарна площа вентиляційної системи кокіля повинна бути не менше 1,25 сумарної площі перетину живильників.
2. Оптимізації технологічних режимів заливання:
  - забезпечити чистоту шихтових матеріалів, сумарна кількість домішок заліза і кремнію у хімічному складі не повинен перевищувати 1%, інакше не буде забезпечена необхідна електропровідність, тому що залізо і кремній є шкідливими домішками.
  - запобігти попаданню в розплав неметалічних включень.
  - контролювати температуру нагрівання кокіля перед заливкою, оптимальна температура нагріву ~ 550-650 °С.

Модернізація конструкторсько-технологічних параметрів, зазначених вище, дозволить отримати якісну деталь з підвищеними технічним вимогам.

УДК 621.74:621.436:539.3

*В. И. Алёхин, О. В. Акимов*

*Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Харьков*

### **ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ УСАДОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ НА НДС ПОРШНЯ ВАЗ 21083**

В представленной публикации описана часть цикла исследований кафедры «Литейное производство» НТУ «ХПИ», посвященных проблеме обеспечения надежной работы и технического совершенства литых деталей ДВС. Исследования выполнялись в рамках внедрения методики расчета на усталостную прочность литых деталей ДВС с учетом литейных дислоцированных усадочных дефектов.

В работе исследовано влияние литейных дефектов, возникающих при изготовлении поршней, на усталостную прочность. С использованием универсального расчетного программного комплекса ANSYS проведено моделирование комплексного многоциклового термомеханического нагружения поршня с дислоцированными дефектами усадочного характера.

Для оценки влияния дефектов на величину полей напряжений при термомеханическом нагружении поршня, был проведен численный эксперимент. Для эксперимента использовались следующие данные:

координаты мест дислокации усадочных дефектов, полученные в результате моделирования литейных процессов в пакете программ LVM Flow;

согласно заводским экспериментальным данным, исходя из характера расщепления дефектов в теле поршня, использовались два критических диаметра сфероидальных дефектов - величины полей напряжений, полученные в результате моделирования теплового и напряженно-деформированного состояния поршня без дефектов усадочного характера.

В итоге полнофакторного 24 численного эксперимента были получены следующие результаты:

значения полей напряжений на поверхности каждого из дефектов и определены наибольшие их значения;

наибольшие напряжения при сочетании номинальных размеров дефектов

соответствующих определенном шагу плана эксперимента;

с помощью методики расчета деталей ДВС на усталостную прочность в местах дислокации литейных дефектов, для исследуемых пределов от 0,3 до 1,3 мм, получены значения предельных максимальных напряжений цикла и коэффициентов запаса прочности.

С учетом значений возникающих напряжений, предельных напряжений цикла и коэффициентов запаса прочности выполнена модернизация технических требований и условий производства литых деталей поршней, разработаны и внедрены производственные рекомендации.

УДК 621.74.046:002.61.:620.16

*Е. Г. Афтандилянц, О.А. Пеликан, В.П. Лихошва,  
Л.М. Клименко, Д.В. Глушков*

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

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ**

Отставание технико-экономических показателей отечественного машиностроения от достижений мирового уровня в значительной степени обусловлено изготовлением массовых ответственных литых деталей оборудования из низкокачественных и нерационально легированных железоуглеродистых сплавов вследствие дороговизны и сырьевого дефицита никеля, молибдена, вольфрама, ванадия и ряда других легирующих элементов.

Одним из наиболее перспективных направлений увеличения надежности и долговечности деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного, ударно-абразивного и гидроабразивного изнашивания, а также повышения конкурентоспособности оборудования на мировом рынке является применение биметаллических отливок. Однако даже в пределах одного базового химического состава легирующие элементы могут оказывать различное влияние на свойства биметаллических отливок.

Для достижения благоприятного соотношения высокого уровня эксплуатационных свойств биметаллических отливок и минимального расхода легирующих элементов химический состав металла-основы и рабочего слоя, технологические параметры литья и термической обработки должны

обеспечивать диспергирование всех составляющих структуры, уменьшение первичной и вторичной химической и физической неоднородности отливок. Поэтому значительный теоретический и практический интерес представляет разработка комплексных принципов рационального легирования, изготовления и термической обработки биметаллических отливок для оптимизации процесса их структурообразования и формирования свойств.

С целью разработки физико-математических моделей формирования структуры, свойств и напряженно-деформированного состояния биметаллических отливок проведено моделирование температурных полей и скорости охлаждения биметаллических отливок; установлены количественные закономерности влияния химического состава и температуры на теплоемкость, теплопроводность и плотность сплавов биметаллических пар в твердом и жидком состоянии; определены количественные закономерности термокинетических параметров фазовых превращений металла-основы, рабочего слоя и переходной зоны при затвердевании биметаллических отливок; исследованы закономерности диффузионного распределения элементов между металлом-основой и рабочим слоем биметаллических отливок; установлены температурно-концентрационные параметры диффузии элементов в аустените и феррите многокомпонентных железоуглеродистых сплавов; определены интегральные факторы и закономерности их влияния на микроструктуру биметаллических отливок после термической обработки; изучены закономерности влияния химического состава и технологических параметров литья на развитие напряженно-деформированного состояния в биметаллических отливках; определены количественные закономерности влияния параметров структуры и условий эксплуатации на абразивную износостойкость биметаллических отливок.

На основе разработанных физико-математических моделей созданы методы компьютерного прогнозирования эксплуатационных свойств и оптимизации технологических параметров получения биметаллических отливок. Достоверность и эффективность реализации созданных методов подтверждены опытно-промышленными испытаниями, которые засвидетельствовали 4-х кратное повышение ресурса биметаллических отливок по сравнению с серийными деталями из стали 110Г13Л.

УДК 669.275:54-14:538.245

*Ю. Д. Бачинский, В. Б. Бубликов, В. П. Латенко, В. В. Суменкова,  
Е.П. Нестерук*

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

### **ОСОБЕННОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧУГУНА ФЕРРОСИЛИЦИЕМ**

Стабильность структуры и высокий уровень механических и служебных свойств отливок из высокопрочного чугуна достигается применением высококачественных шихтовых материалов, прогрессивных процессов плавки, модификаторов с гарантированным узкоинтервальным содержанием Mg и других модифицирующих элементов, высокоэффективных методов модифицирования, легирования и термической обработки.

Важнейшим показателем уровня технологии и качества тонкостенных чугуновых отливок является отсутствие в их структуре цементитной фазы. Модифицирование управляет формированием структуры и свойств чугуна посредством минимизации величины интервала переохлаждения и увеличения количества центров кристаллизации графита. Важнейшей функцией модифицирования является предотвращение образования цементита в структуре тонкостенных отливок. Это достигается исключением возможности переохлаждения расплава ниже температуры образования метастабильной эвтектики (ледебурита).

Самыми распространенными модификаторами чугуна являются ферросилиций и магниевые лигатуры на основе ферросилиция. Графитизирующий эффект от модифицирования ферросилицием ФС75, изготовленного разными заводами, неодинаков, что объясняется различием в содержании некоторых примесных элементов, являющихся модификаторами чугуна. Наличие в составе ФС75 таких активных модифицирующих элементов как кальций, алюминий, титан, барий и др. может в значительной мере влиять на результативность модифицирования. Основным источником примесных элементов в ФС75 является исходное сырье. При выплавке одновременно с кремнием восстанавливаются и другие элементы, которые входят в состав ферросилиция. Алюминий, кальций, титан, фосфор, магний и некоторые другие вносятся кварцитом и золой коксика. Стальная стружка, которую используют в шихте, и, частично, контактные щеки, которые обычно отливают из сплавов на медной основе, служат основными источниками попадания в ферросилиций хрома, марганца, меди, сурьмы. Кроме природы сырьевых материалов на содержание примесей в ферросилиции также влияет различие в технологических приемах его выплавки и рафинирования.

На ход эвтектической кристаллизации также влияет способ введения модифицирующих добавок в жидкий чугун. Когда металл находится в ковше,

эффект модифицирования теряется со временем. Считается, что выдержка расплава в ковше в течение 5 мин снижает эффективность модифицирования на 50 %. Принципиальное отличие внутриформенного и ковшового методов обработки расплава состоит в том, что в первом случае реализуется эффект позднего модифицирования, когда время между модифицированием и началом кристаллизации отливок сведено к минимуму. Особенно эффективно позднее модифицирование влияет на зарождение и рост графитной фазы. При вводе ферросилиция возникает термическая и химическая неоднородность в расплаве чугуна, образуются микрозоны, обогащенные кремнием. Модифицирующая способность ферросилиция повышается, если в его составе имеется небольшое количество таких активных модифицирующих элементов как Ca, Al, Ba, Sr, Zr, Ce и Mn, способствующих образованию дополнительных центров кристаллизации, что позволяет эффективно управлять формированием графитной фазы, величиной эвтектического переохлаждения, и, в целом, структурой и свойствами чугуновой отливки.

Модифицирование обеспечивает получение в структуре чугуна определенной морфологии графитных включений, предотвращает образование отбела в охлаждающихся с высокой скоростью отливках, повышает технологичность, механические и служебные свойства литых изделий. В последнее время для изготовления небольших литейных форм широко применяются высокопроизводительные автоматические линии с длительностью заливки одной формы примерно 5-10 с. Разрабатываемые применительно к указанным условиям процессы позднего модифицирования должны быть малоинерционными, что ставит задачу создания новых быстрорастворимых модификаторов на основе ферросилиция.

УДК 669.715:621.9.048:66.067

*Д. М. Беленький, Н. С. Пионтковская*

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

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОФЛЮСОВОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СТРУЙНОМ ЗАМЕШИВАНИИ РАФИНИРУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ**

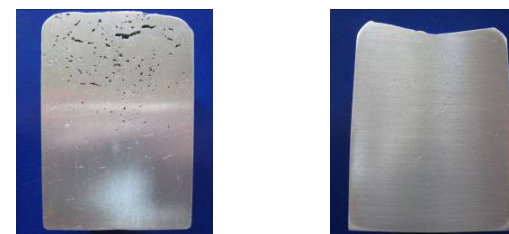
Для очистки алюминиевых сплавов от водорода и твердых неметаллических включений применяют различные методы адсорбционного рафинирования: обработка газами, флюсами, фильтрование расплавов. При этом один

метод, хорошо удаляя водород, в меньшей степени очищает жидкий металл от неметаллических включений (продувка инертными газами), и наоборот (обработка флюсами).

Поэтому для повышения эффективности удаления из алюминиевых сплавов водорода и неметаллических включений наметилась тенденция применения комбинированных методов рафинирования, в том числе одновременная обработка алюминиевых расплавов смесью инертного газа с порошком флюса. Несмотря на высокую эффективность такой технологии, она не получила должного распространения. По всей вероятности, это связано как с нестабильной работой устройства для подготовки газифлюсовой смеси и ввода ее в жидкий металл, так и с подготовкой пылевидного флюса. Для преодоления указанных недостатков, нами разработан метод газифлюсового рафинирования, заключающийся в том, что жидкий флюс замешивают в жидкий металл эжектированием его с поверхности в глубину ванны газовой стужей, истекающей в струйном режиме из погруженного в расплав сопла. Разработке этого метода рафинирования предшествовали исследования на холодной модели, результаты которых изложены в этом сообщении. В качестве модельных жидкостей применили воду (алюминий) и подкрашенный бензин (флюс), несмешивающиеся друг в друге.

Установлено, что когда на поверхности воды нет бензина, газовый факел состоит из основного участка в виде пульсирующей струи конусообразной формы, всплывающего потока пузырьков аргона разного диаметра (максимальный размер пузырьков 3,5мм) и барботажной зоны на поверхности жидкости. Если на поверхности воды находится бензин, картина резко меняется: при определенном расходе аргона в конце основного участка струи появляются множество мельчайших пузырьков диаметром 0,2-0,3мм, максимальный размер пузырьков в барботажной зоне уменьшается до 2,5мм. Предложен механизм, объясняющий увеличение дисперсности газовых пузырьков.

Эффективность разработанного метода рафинирования провели на литейном сплаве АК7, который плавил в печи сопротивления. Жидкий металл обрабатывали продувкой аргона при скорости истечения его из сопла 240-250 м/с и жидким флюсом (NaCl-39%, KCl-50%,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ -6,6%,  $\text{CaF}_2$ -4%) в количестве 0,5 % от массы расплава. Установили, что газифлюсовая обработка позволяет на 43-50 % снизить газосодержание исходного сплава, в 2,3-2,8 раза уменьшить его пористость.



а) б)  
Рисунок 1 – Макроструктура вакуумных проб: исходного (а) металла и после рафинирования (б).

В результате предел прочности литого металла повышается на 12-15 %, пластичность – в 3 раза и более. Учитывая простоту конструкции устройства для реализации разработанной технологии и высокое качество получаемого литого металла, такой процесс рекомендуется для широкого применения в фасоннолитейных цехах алюминиевого литья.

УДК 621.74

*Б. М. Бойченко, К. Г. Низяев, А. Н. Стоянов, Л. С. Молчанов, С. А. Ткач*  
Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

### **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОГНЕУПОРОВ ДЛЯ СТАЛЕЛИТЕЙНЫХ АГРЕГАТОВ**

Современное сталелитейное производство требует применения новых более эффективных огнеупорных материалов. В связи с этим широкое распространение получают огнеупорные композиционные материалы. Их главным отличием от традиционных материалов являются улучшенные эксплуатационные характеристики.

Одним из перспективных методов получения композиционных материалов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Сущность данного метода: в системе, состоящей из смеси порошков химических элементов, локально инициируется экзотермическая реакция синтеза (горения). Выделившееся в результате реакции тепло, благодаря теплопередаче, нагревает соседние слои вещества, возбуждает в них реакцию и приводит к возникновению самораспространяющегося процесса. В таком процессе химическая реакция протекает в узкой зоне, самопроизвольно перемещаю-

шейся по веществу с высокой линейной скоростью.

Огнеупоры, полученные методом СВС-синтеза, в технической литературе получили название СВС-огнеупоров.

Анализ литературных данных позволил определить основные направления в производстве и применении СВС-огнеупоров (Таблица. 1).

Таблица.1 – Свойства и сферы применения СВС-огнеупоров.

Разновидность материала	Свойства материала			Сферы применения
	Температура применения, °С	Прочность, МПа	Пористость, %	
Огнеупорные СВС покрытия	от 1290 до 2000	от 18,5 до 31,5	от 14,0 до 20,0	Защита огнеупоров
Кладочный СВС-состав Гамма – 3ХП	900 – 1770	15*	н/д	Соединение огнеупорных изделий
Керамика на основе муллитовых структур прессованная литая	до 1800 до 1500	15-25 >	13 - 16 20 - 30	Строительная и огнеупорная стойкая к химически агрессивным средам керамика
Композитные огнеупоры на основе: BN BN – TiB <sub>2</sub>	до 2000 до 2000	80 85	н/д н/д	Высокоустойчивые огнеупоры для агрессивных сред и высоких температур
Жаростойкие пористые СВС-бетоны	от 1200 до 1400	от 5,0 до 1,7	65 - 75	Теплозащитные материалы

\* – для кладочных СВС-составов приведен предел прочности сцепления с огнеупором, МПа; н/д – нет данных.

Наиболее перспективными для применения в сталелитейной промышленности являются огнеупорные соединения на основе BN и TiB<sub>2</sub>.

В полупромышленной лаборатории кафедры металлургии стали НМетАУ были выполнены исследования по определению технологических характеристик композиционных огнеупоров на основе данных соединений (Таблица.

2). Определение воздействия шлаковой и металлической фаз на огнеупорные материалы проводили по известной методике – тигельным методом сравнительной оценки.

Сравнение технологических параметров показало превосходство композиционных огнеупорных материалов над традиционными.

Применение СВС-огнеупоров, содержащих BN и TiB<sub>2</sub>, позволит увеличить стойкость футеровки на 10 – 50%, производительность и срок эксплуатации сталелитейных агрегатов.

Таблица. 2 – Сравнение технологических характеристик композиционных огнеупоров с традиционными.

Характеристика	Композиционные огнеупоры на основе		Магнетитовые огнеупоры
	BN	BN-TiB <sub>2</sub>	
Огнеупорность, °С	2000	2000	2000
Предел прочности, МПа	65	59	50
Износ материала при взаимодействии со шлаковой фазой*, мм	1,44	2,75	3,00
Износ материала при взаимодействии с металлической фазой**, мм	1,02	1,83	2,00
Открытая пористость, %	1,425	1,796	15

\* – температура шлакового расплава (химический состав %: CaO – 45,83; SiO<sub>2</sub> – 17,36; MgO – 11,25; MnO – 6,47; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,75; Fe<sub>общ</sub> – 9,15) 1450 – 1460°С;

\*\* – температура металлического расплава (Ст. 3 ПС) 1550 – 1560°С.

УДК 621.74

*Б. М. Бойченко, Є. В. Синегін, О. М. Стоянов, К. Г. Нізяєв*  
 Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ

### ІНОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФУТЕРІВКИ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ

На сьогодні в Україні дуже гостро стоїть проблема стійкості вогнетривкої футерівки металургійних агрегатів і зокрема сталерозливних ковшів. Так, стійкість футерівки вітчизняних ковшів з використання їх на агрегаті «ковш-піч» складає близько 60–90 наливів, тим часом як у ближньому зарубіжжі (Польща) цей показник сягає 180–280 наливів. Це досягається шляхом вдосконалення технологічних режимів виготовлення, експлуатації сталерозливних ковшів і різноманітними способами викладки футерівки.

Тому очевидно є проблема підвищення стійкості футерівки сталерозливних ковшів на революційно новий рівень, що дасть змогу збільшити конкурентоспроможність вітчизняних металургійних підприємств.

Запропонований метод є новим і раніше не розглядався. Його суть полягає у створенні за допомогою зовнішнього джерела електричного струму різниці потенціалів між рідким шлаковим розплавом і вогнетривом. При цьому на межі вогнетрив-шлак внаслідок специфічної адсорбції відбувається накопичення іонів певного знаку, які утворюють подвійний електронний шар (п.е.ш.). Якісний і кількісний склад цього п.е.ш. можна змінювати шляхом змінення відповідно знаку і величини електричного потенціалу, який підводиться до вогнетриву.

Створення наведеного методу стало можливим здебільшого завдяки появі у складі магнезійних вогнетривів вуглецю у вигляді графіту (що грає роль антиоксиданту і демпферу, що компенсує термічні напруження), здатного проводити електричний струм. Тому можливим стало створення електричного кола, елементами якого є вогнетрив і рідкий шлак, що за іонною теорією будови шлакових розплавів також здатий проводити електричний струм.

Для підтвердження висунутої теорії було розроблено методику, зібрано експериментальну установку і проведено експеримент метою якого було довести утворення п.е.ш. при підведенні електричного потенціалу і визначення оптимальних для його створення умов (сила струму і різниця потенціалів).

До складу установки входили: піч Таммана, трансформатор для отримання постійного струму, штатив для занурення електродів, хромель-алюмелева термопара, периклазовуглецева цеглина з отворами для шлаку, електроди з вольфрамового сплаву, з'єднувальні дроти.

Підведення струму до цеглини здійснювалося зверху за допомогою неру-

хомо закріпленого вольфрамового дроту. Вольфрамовий електрод, що занурювався у шлак, закріплювався в спеціальному штативі, розміщеному біля печі. Вимірювання температури у печі під час експерименту здійснювалося за допомогою хромель-алюмелевої термопари.

Шлак було обрано таким чином, щоб він мав водночас достатню електропровідність і хімічний склад подібний до ковшового шлаку при позапичній обробці.

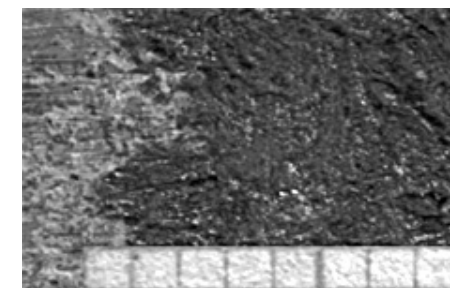
Таблиця – Хімічний склад і фізичні характеристики шлаку

Хімічний склад шлаку, мас. %			Електропровідність с	Температура плавлення, °С
CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO		
45,0	38,33	16,67	9,011	1230

В ході експерименту було проведено серію дослідів при різних значеннях сили струму і різниці потенціалів. Отримані зразки вогнетривів з зоною, що була просякнута шлаком було розпилено, відшліфовано і зроблено цифрові знімки зрізу цеглини з роздільною здатністю 2400 dpi (малюнок).



а



б

а – зображення зрізу цеглини; б – збільшене зображення зони просякнення  $\times 6,25$

Рисунок – Зображення дослідних зразків

Проаналізувавши експериментальні дані було встановлено помітне зменшення зон вогнетриву зруйнованої і просякнутої шлаком при підведенні до вогнетриву негативного потенціалу (утворення катіонного п.е.ш.), що відповідає теорії. Адже відомо, що саме аніони кисню ( $O^{2-}$ ) зумовлюють руй-

нування вогнетриву, а п.е.ш. цьому перешкоджає. Також помітна тенденція до зменшення зони просякнутої шлаком при збільшенні різниці потенціалів і зменшенні сили струму. Це також відповідає теорії, оскільки збільшення різниці потенціалів призводить до збільшення напруженості електричного поля п.е.ш., а зменшення сили струму уповільнює масообмінні процеси на межі вогнетрив-шлак, які є причиною руйнування вогнетриву.

У перспективі планується визначення оптимальних значень сили струму і напруги, а також встановлення термодинамічних особливостей утворення хімічних сполук на межі вогнетрив-шлак під впливом електричного потенціалу.

УДК 621.762

*Г. П. Борисов, А. И. Хоменко\*, А. А. Хоменко\*,  
В. Ю. Шейгам, Н. П. Исайчева*

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

*\*Институт проблем материаловедения НАН Украины  
им. И.М.Францевича, Киев*

#### **ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА**

Исследование внутренней структуры потоков при заполнении металлом формы, а также зарождение и развитие процесса перемешивания металла в тигле механическими мешалками проводится, как правило, методом моделирования на прозрачных жидкостях с применением «светового ножа». В качестве модельной жидкости чаще всего используют воду, а в качестве индикаторов потока – обезжиренную алюминиевую пудру или шарики полистирола, плотность и размеры которых подбирают в соответствии с решаемыми задачами.

Характер и направление потоков фиксируют на фото- или видеограммах. Снимки представляют собой белые треки следов от движения индикаторов потока на темном фоне. Качественный и количественный анализ полученных изображений производят, как правило, визуалью, что связано с большой трудоемкостью и некоторыми искажениями показателей субъективного характера.

Подобные задачи на современном уровне решаются в материаловедении общепризнанными методиками анализа изображения шлифа. В работе сделана попытка применения данной методики при исследовании методом моделирования процесса перемешивания в тигле с использованием механи-

ческих мешалок. С одной стороны, эта задача может упрощаться одинаковой формой и размерами частиц, а, с другой, может усложняться их взаимной экранировкой, что проявляется в большей степени при использовании в качестве индикаторов потока алюминиевой пудры. Иными словами, если отношение площади, занимаемой на изображении шлифа частицами одной фазы, к общей площади изображения в соответствии с принципом Кавальери - Акера – Глаголева может служить оценкой объемной доли данной фазы и использоваться для стереологической реконструкции, то применение отношения суммарной площади изображений частиц, взвешенных в жидкости, к анализу внутренней структуры, может привести к определенной погрешности. Однако, в нашем случае, используя в качестве индикаторов шарики полистирола с объемной долей частиц менее 0.1, существует достаточно простое приближенное соотношение, позволяющее оценить эффект экранирования [1]

$$M_A = \frac{3}{2} V_V \left( \frac{\delta}{D} \right) N_A$$

где  $M_A$  - число невидимых проекций частиц,  $N_A$  - число видимых проекций частиц,  $V_V$  - объемная доля частиц,  $D$  - диаметр частицы  $\delta$  - толщина пленки или фольги (применительно к данному случаю - толщина слоя жидкости, содержащей вовлеченные в поток частицы). Площадь изображения, оцениваемая при анализе как занимаемая частицами, определяется числом видимых частиц (реальная объемная доля частиц), диаметр каждой из которых и толщина слоя жидкости известны по условиям моделирования. Таким образом, для исследования внутренней структуры потока можно воспользоваться количественными результатами анализа изображения, внося поправку на эффект экранирования.

В эксперименте по моделированию процесса перемешивания при помощи различных типов мешалок полученные изображения обрабатывали с помощью программы автоматизированного анализа изображений АМИС [2]. Полученные результаты позволили найти параболические зависимости временных характеристик мешалки от скорости вращения и уровня погружения рабочего органа и аппроксимировать их простыми аналитическими зависимостями с высокой точностью (погрешность аппроксимации не более  $10^{-12}$ ).

Список литературы

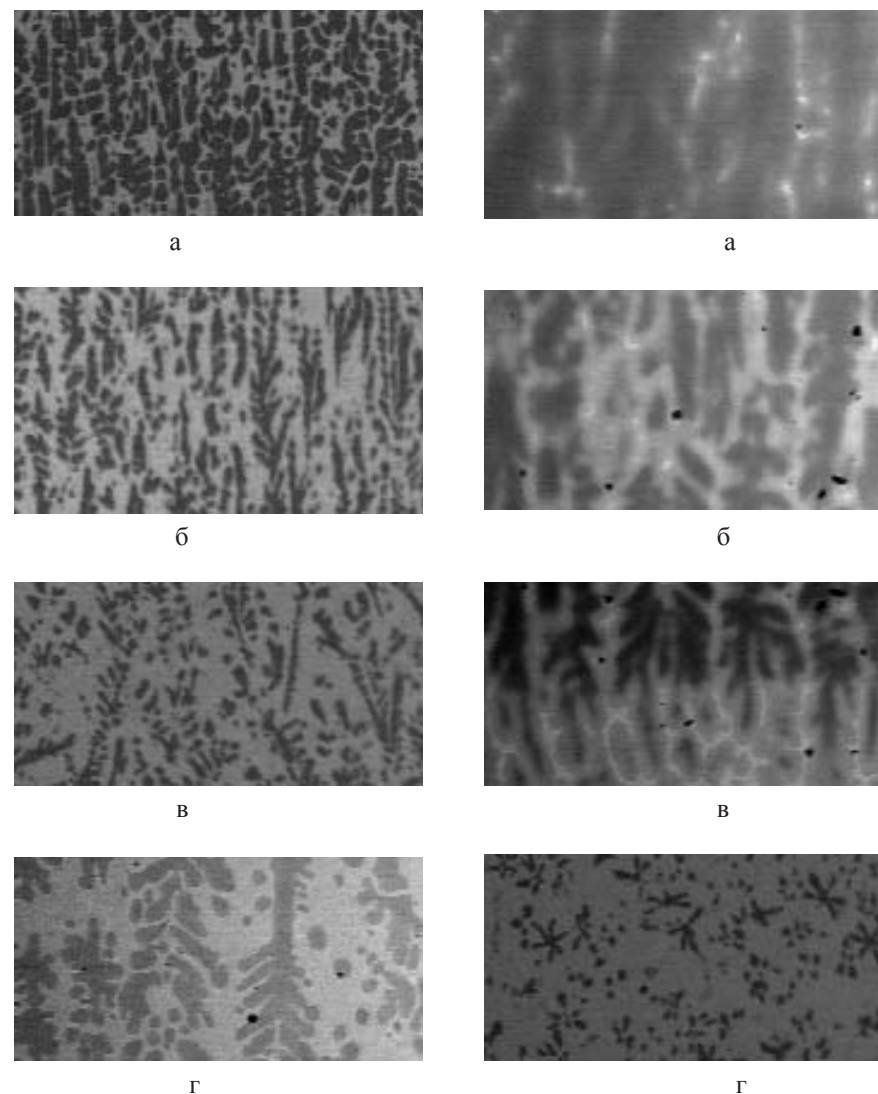
1. Чернявский К.С. Стереология в материаловедении. - М.: Металлургия. - 1977. - 280 с.
2. Хоменко А.И., Хоменко Е.В. Программа автоматизации микроструктурного анализа материалов. - «Порошковая металлургия». - 2007. - №1/2. - С. 122 - 127.

УДК 669.11/15:576.2

*А. Г. Борисов, В. Ю. Шейгам, А. Г. Вернидуб**Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев***РОСТ ДЕНДРИТОВ АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ  
КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ГРАДИЕНТОВ**

Современные технологии рео- и тиксолитья выдвигают определённые требования к форме и размерам первичной фазы частично закристаллизованного сплава. Речь идёт о том, что необходимую жидкотекучесть такого сплава может обеспечить только недендритная морфология. Одним из возможных факторов, ответственных за возникновение такой морфологии, может быть смена преимущественного направления роста дендрита. Так, в литературе приводятся данные о смене преимущественного направления роста для сплава Al–Zn с  $\langle 100 \rangle$  (при концентрации цинка 25 мас%) на  $\langle 110 \rangle$  (при 55 мас%) [1]. На основании этого представляется возможным предположить, что существует некоторая промежуточная концентрация, при которой оба указанных направления являются равноправными, т.е. как такового преимущественного направления не существует вовсе, что, в свою очередь, должно привести к недендритному, «хаотическому» росту. Для поиска такой концентрации были проведены эксперименты, в которых в специальное устройство устанавливались встык два цилиндра из чистых металлов. Образцы цилиндров получали заливкой металла в оболочку из алюминиевой конденсаторной фольги. Для этого фольгу наматывали на соответствующий диаметру образца стержень, а затем полученную оболочку с него снимали. Геометрию и размеры образовавшихся кристаллов в образцах цилиндров регулировали толщиной намотки фольги. Специальное устройство нагревалось до полного расплавления металла образцов и затем печь отключалась, а поверхность алюминия обдувалась для создания направленной кристаллизации. Помимо пары Al–Sn аналогично исследовалась пара Al–Zn (которые практически не смешиваются). Предполагалось увидеть на продольном сечении дендриты алюминия, которые по мере вращивания в область второго компонента изменяют направление своего роста, однако полученные результаты оказались неожиданными.

На рис.1 представлены микроструктуры образца Al–Sn в порядке продвижения от алюминия к олову.



x 40

**Рис.1-** Микроструктуры образцов Al-Sn **Рис.2.** Микроструктуры образцов Al-Zn.

Следует отметить, что никакой заметной границы на месте стыка образцов обнаружено не было. Вместо этого наблюдается прорастание дендритов алюминия в область олова, при этом направленная структура сменяется «равноосной», причём в области, практически прилегающей ко «дну» образ-

ца, наблюдаются кристаллы алюминия гексагональной формы. В принципе, из соображений кристаллографии такие кристаллы могут быть следствием роста в направлении  $\langle 110 \rangle$ .

На рис. 2 представлены микроструктуры образца Al – Zn. В отличие от предыдущего случая в «алюминиевой» части образца наблюдалась скорее ячеистая, чем дендритная структура, а граница на месте стыка выражена ярко. Если в предыдущем случае прорастающие дендриты имели концентрацию алюминия, близкую к 100%, то здесь состав ростовых элементов плавно менялся по мере продвижения. Удивительным представляется тот факт, что внутри ростовых элементов наблюдаются четко очерченные области с другой концентрацией.

Полученные данные являются предварительными и требуют дальнейшего осмысления, однако по нашему мнению они достаточно неожиданны и интересны, чтобы привлечь к ним внимание коллег.

#### Список литературы

1. T. Naxhimali, A. Karma, F. Gonzales, M. Rappaz, "Orientation selection in dendrite evolution", Nature Materials 5, 660-664 (9 July 2006) doi:10.1038/nmat1693 Article

УДК 669.715:66.063

**Г. П. Борисов, В. Ю. Шейгам, Н. П. Исайчева, А. И. Семенченко,  
А. Н. Недужий, А. Г. Вернидуб**  
Физико-технологический институт металлов и сплавов  
НАН Украины, Киев

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Из существующих различных способов перемешивания жидких и частично затвердевших алюминиевых сплавов механическому перемешиванию уделяется особое внимание. Это связано с тем, что перемешивание механическими мешалками не требует дорогостоящего оборудования, характеризуется простотой реализации и надежностью контроля параметров перемешивания. Без особых материальных затрат этот способ вписывается в существующие технологические процессы приготовления сплавов, обеспечивает наименьшую длительность процесса перемешивания и позволяет наиболее эффективно использовать подводимую энергию.

Важнейшим параметром, определяющим производительность процесса

подготовки расплава к заливке, является обеспечение минимального времени перемешивания с достижением при этом высокой степени гомогенизации расплава, в течении которого достигается усреднение состава расплава в требуемых пределах.

Методом гидромоделирования с использованием "светового ножа" проведены исследования длительности процесса перемешивания лопастной, дисковой и турбинной мешалками.

В качестве частиц твердой фазы использовали полистироловые шарики диаметром 0,2 мм в количестве 5-8%. Соотношение плотностей полистирола и модельной жидкости составляло 1,065, что соответствовало соотношению плотностей твердой фазы и жидкого алюминиевого сплава. Размеры модели приняты в масштабе 1:1. Процесс регистрировался с помощью фото- и видеосъемок (цифровая камера Olympus Camedia C-2040ZOOM). Камера сопрягалась с компьютером, что позволяло записывать видеофайлы процесса и производить их дальнейшую обработку. Вращение мешалок контролировалось тахометром Т4-10Р. Мешалки устанавливали на трех различных уровнях в стеклянной емкости для моделирования. Кроме того, для каждого типа мешалки выдерживались три режима скорости ее вращения: 200 об./мин.; 400 об./мин.; 600 об./мин.

В работе приняты следующие временные параметры:

$\tau_1$  – промежуток времени от начала вращения мешалки до начала движения частиц,  $\tau_2$  – время перехода частиц из области под уровнем мешалки в область над мешалкой;  $\tau_3$  – время вовлечения в движение частиц во всем объеме тигля.

Построенные для всех типов мешалок зависимости задействованной площади интенсивного перемешивания от времени перемешивания  $K=f(\tau)$  свидетельствуют о том, что наилучшими показателями по времени вовлечения всего объема жидкости в установившийся режим обладает турбинная мешалка, время начала перемешивания которой в 4-5 раз превосходит лопастную и дисковую, а время вовлечения всего объема жидкости в процесс перемешивания - в 3,5-4,0 раза.

Для турбинной мешалки с отражателями проведена аппроксимация экспериментальных данных, построены графики и выведены формулы, учитывающие временные параметры в зависимости от уровня мешалки и скорости ее вращения.

УДК 621.74.04:669.131.7.061.62

*В. Б. Бубликов*

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

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА И СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА**

Повышение качества отливок и разработка новых технологий, обеспечивающих снижение себестоимости продукции, является одной из важнейших задач литейного производства Украины. Прогресс машиностроения выдвигает требование производства из высокопрочного чугуна тонкостенных отливок, способных заменить отливки из алюминиевых сплавов без увеличения массы готовых деталей. Исследование удельной (отнесенной к массе) прочности и долговременной прочности литейных алюминиевых сплавов и высокопрочного чугуна подтвердили техническую целесообразность применения чугунных отливок с минимальной толщиной стенки 1,5...3 мм взамен алюминиевых.

Перспективным направлением развития технологий высокопрочного чугуна является повышение эффективности модифицирования. Сближение во времени процессов модифицирования и кристаллизации увеличивает инокуляцию (число центров кристаллизации графита) и эффективно предотвращает образование отбела в тонкостенных отливках. При таком ходе кристаллизации формируется мелкокристаллическая структура и преимущественно ферритная металлическая основа, что обеспечивает получение оптимальных технологических и механических свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии без проведения термической обработки.

Стабильность результатов модифицирования, структура, механические свойства и, в целом, качество отливок из высокопрочного чугуна в значительной мере определяются химическим составом и природой применяемых шихтовых материалов и модификаторов, от которых расплав наследует определенную структурно-химическую информацию, связанную с рудно-сырьевой базой и особенностями металлургических технологий. Наиболее экономичным и технологичным для производства высокопрочного чугуна является процесс плавки в индукционных электропечах, требующий шихтовых материалов с низким содержанием серы. Лучшими шихтовыми материалами являются рафинированные внепечной обработкой литейные и передельные доменные чугуны, а также отходы электротехнических и других сталей с низким содержанием серы (менее 0,02 %). С целью снижения себестоимости в составе шихты могут применяться литейные или передельные чушковые чугуны с содержанием серы до 0,03 %, но при этом

повышается расход модификаторов и, как правило, снижается пластичность и повышается прочность высокопрочного чугуна.

Fe-Si-Mg – лигатуры различных зарубежных производителей, аналогичные по содержанию магния, могут значительно отличаться их действием на формирование структуры отливок из высокопрочного чугуна. Проведенное сравнительное исследование показало, что в условиях внутриформенного модифицирования магниевые лигатуры типа ФСМг7 двух зарубежных производителей, обеспечивают высокую степень сфероидизации графита (90...95%), но значительно отличаются своей графитизирующей способностью. Определены технологические условия получения отливок с толщиной стенок 2,5...3,0 мм без отбела. При внутриформенном модифицировании снижается в 2 раза расход магниевой лигатуры, повышаются технологические и служебные свойства литых изделий при одновременном снижении их себестоимости. Интенсифицируя графитизацию, внутриформенное модифицирование, по сравнению с ковшовым, обеспечивает более чем двухкратное увеличение количества феррита в металлической основе, что позволяет получать отливки из высокопрочного чугуна ферритного класса с заданным уровнем свойств без термической обработки.

Разработанные отделом высокопрочных чугунов ФТИМС НАН Украины технологии внутриформенного модифицирования эффективно применяются в условиях крупносерийного производства отливок из высокопрочного чугуна для автомобилей, тракторов, двигателей внутреннего сгорания, компрессоров, насосов, печатных машин, станков, военной техники и др. Приглашаем к взаимовыгодному сотрудничеству по реализации новых научных разработок, повышению свойств высокопрочных чугунов, созданию и внедрению экономичных технологий.

УДК 669.131.7

**В.Б. Бубликов, А.А. Ясинский, Л.Н. Сыропоршнев\*, Д.Н. Берчук,  
И.В. Киришун, Н.П. Мусеева, В.Н. Талько**

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

*\*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

### ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ

Получены экспериментальные данные, характеризующие влияние содержания никеля на структуру и механические свойства высокопрочного чугуна, в зависимости от качества шихтовых материалов, метода модифицирования, скорости охлаждения отливок и вида термической обработки.

Исследование влияния легирования никелем в количестве 1...2 % на механические свойства ферритного высокопрочного чугуна проводили на металле клиновидных проб толщиной 45 мм. Вырезанные из нижней части клиновидных проб темплеты были отожжены на феррит по двум режимам термической обработки.

Режим 1 – одностадийный отжиг: нагрев в печи до 720 °С, выдержка 3 часа, охлаждение на воздухе.

Режим 2 – двухстадийный отжиг: нагрев в печи до 860 °С, выдержка 3 часа, охлаждение с печью до 720 °С, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе.

Оба режима термической обработки в исследованных составах чугунов обеспечивали получение ферритной металлической основы. При увеличении содержания никеля от 1 до 2 % прочностные показатели и твердость повышаются на 15 %, а относительное удлинение изменяется незначительно. По сравнению с нелегированным, легированный никелем ферритный высокопрочный чугун характеризуется более высокими механическими свойствами:  $\sigma_B \geq 550$  МПа;  $\sigma_{0,2} \geq 430$  МПа;  $\delta \geq 18$  %, твердость 170...190 НВ. По сравнению с одностадийным, двухстадийный отжиг мало влияет на изменение механических свойств, незначительно увеличивая относительное удлинение при соответствующем небольшом уменьшении прочностных показателей. Это позволяет применять более экономичный одностадийный низкотемпературный отжиг. По сравнению с легированным никелем в легированном медью ферритном высокопрочном чугуне, получаемом более энергоемким двухстадийным отжигом, достигаются более высокие прочностные свойства, но при меньшем относительном удлинении - 14...16 %.

Представленные в таблице результаты механических испытаний образцов из отливок с толщиной стенки 10 мм показывают, что в результате сочета-

ния легирования никелем с последующей нормализацией сопротивление разрыву высокопрочного чугуна увеличивается на 77 %, а условный предел текучести на 65 %. При этом обеспечивается благоприятное сочетание высокой прочности и весьма высокого, для перлитного высокопрочного чугуна, относительного удлинения – 9,1 %.

Таблица

Высокопрочный чугун	Механические свойства				Количество феррита в металлической основе
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	НВ, МПа	$\delta$ , %	
1. Исходный нелегированный	502	396	2170	14,6	80
2. Легированный 1,5 % Ni	650	511	2410	13,3	55
3. Легированный 1,5 % Ni после нормализации	886	651	2850	9,1	8

По сравнению с нормализацией ещё более высокий уровень механических свойств легированного никелем высокопрочного чугуна позволяет получить изотермическая закалка с 870 °С в селитровую ванну с температурой 380 °С:  $\sigma_B \geq 950$  МПа;  $\sigma_{0,2} \geq 670$  МПа;  $\delta \geq 10$  %.

УДК 621.74

**Г. А. Бялик, С. И. Адамчук, Е. С. Сидоренко**

*Запорожский национальный технический университет, Запорожье*

### РАЦИОНАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА В ИНДУКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Традиционной технологией получения сталей и сплавов с ограниченным до предельно низких значений (0,01 – 0,05%) содержанием углерода является выплавка в дуговых электропечах. Применяется технология с полным окислением. При этом к исходным шихтовым материалам особых требований не предъявляют. После расплавления шихты проводится интенсивный окислительный период, в процессе которого удаляют углерод до заданных предельных значений.

Следует отметить, что минимальная ёмкость дуговых электропечей составляет три тонны. В условиях рыночной экономики, а также при проведении научно-исследовательских работ, направленных на разработку новых сталей и сплавов часто требуются значительно меньшие массы плавок металла – порядка десятков и даже единиц килограммов. Наиболее приемлемым плавильным агрегатом в этом случае является индукционная электропечь.

При плавке малоуглеродистых сталей и сплавов в индукционной электропечи необходимо в качестве основного компонента шихты использовать либо чистое железо (например, карбонильное), либо специальную малоуглеродистую шихтовую заготовку, полученную выплавкой в дуговой электропечи. В последнем случае это уже дуплекс-процесс. Стоимость основного компонента шихты в значительной степени определяет себестоимость выплавляемых сталей и сплавов.

В Запорожском национальном техническом университете разработана технология выплавки малоуглеродистых сталей и сплавов на основе железа, в которой в качестве плавильного агрегата использована индукционная электропечь ОКБ-860 ёмкостью 15 кг, а основным компонентом шихты выбрали отходы электротехнической стали.

Единственным легирующим элементом в электротехнических сталях является кремний. Другие элементы являются вредными примесями и их содержание ограничивается.

Следовательно, для получения в качестве основного компонента шихты практически чистого железа из электротехнической стали необходимо удалить кремний.

Таким образом, технология выплавки малоуглеродистой стали или сплава на железной основе включает два основных этапа:

Удаление кремния;

Доведение сплава до заданного химического состава.

Удаление кремния производится за счёт его окисления и перевода из металла в шлак. Окисление кремния происходит при высоком содержании закиси железа в шлаке. Согласно данным, приведенным в работе [1], при 20% содержании закиси железа в шлаке содержание кремния в металле при плавке в печи с кислой футеровкой может быть понижено до 0,02% при 16000С. Соотношение между содержанием кремния в металле и закиси железа в шлаке, определяемые условиями равновесия реакции:

$2(\text{FeO}) + [\text{Si}] = 2[\text{Fe}] + (\text{SiO}_2)$  могут быть достигнуты при обеспечении жидкоподвижных шлаков с содержанием кремнезёма порядка 50%.

В печи с основной футеровкой основные шлаки содержат значительно меньше кремнезёма, чем кислые. В основных шлаках окись кремния связана с окисью кальция в прочные силикаты.

Активность закиси железа в основных шлаках превышает аналогичный

показатель для кислых шлаков. Высокая активность закиси железа и низкая активность окиси кремния способствует тому, что равновесие между металлом и шлаком устанавливается при низком содержании кремния в металле.

Удаление кремния до предельно низких значений не всегда необходимо, особенно в случае выплавки малоуглеродистых сталей, в которых кремний является легирующим элементом. Поэтому при использовании в качестве основного элемента шихты отходов электротехнической стали актуальным является экспресс-анализ металла на кремний по ходу плавки. В данной работе для этой цели использовали специально разработанный прибор для определения содержания кремния методом термоэдс. Образцы для экспресс-анализа отбирали методом вакуумного всасывания металла в кварцевые трубки.

При содержании кремния 0,1%, содержание кислорода в стали составляет 0,03%. Поэтому после снижения содержания кремния и удаления шлака с кремнезёмом необходимо навести новый шлак и производить раскисление металла дозированными присадками алюминия в процессе второго этапа плавки – доведения металла до заданного химического состава, для предотвращения неконтролируемого угара легирующих элементов, сродство которых к кислороду больше, чем у железа.

Конечное раскисление стали производили присадкой алюминия в разливочный ковш.

Химический анализ опытных плавок малоуглеродистых сталей подтвердил возможность выплавки металла с содержанием углерода не более 0,02 – 0,04%.

УДК 621.745.558.669.295

*М. М. Ворон, Н.И. Левицкий*

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

#### **ВОЗМОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti-AL В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКИ**

Имеющийся опыт получения сплавов интерметаллидных соединений системы Ti-Al методом электронно-лучевой гарнисажной плавки [1,2] свидетельствует как о целесообразности этого метода, так и о необходимости поиска новых решений с целью оптимизации процесса плавки и совершенствования управления этим процессом.

Речь идет, в первую очередь, об обеспечении заданного состава слитков или отливок, полученных в тиглях разной емкости, из различных шихтовых материалов. Поскольку основным, а зачастую и единственным компонентом этих сплавов, интенсивно испаряющимся под действием электронного пучка, является алюминий, большое внимание изучению поведения этого элемента в ходе плавки.

Используя методику и алгоритм расчета конечного состава сплавов системы Ti-Al электронно-лучевой выплавки [3], а также методы математического программирования в среде MathCad 14 в данной работе сделана попытка её практического применения в качестве элемента технологической инструкции проведения плавки. Построенные на основе расчетов графики зависимости изменения содержания алюминия от режима плавки, позволяют выбрать наиболее оптимальные параметры для получения сплава заданного состава.

#### Список литературы

1. Левицкий М.И. Одержання сплавів на основі інтерметалідних сполук методом електронно-променевої гарнісажної плавки / В.І. Мірошніченко, Т.В. Лапшук, С.О. Матвієць // МТОМ. – 2002. – №3. – с. 17-20.
2. Левицкий Н.И. Качество литых заготовок из интерметаллидных сплавов TiAl, полученных электронно-лучевой плавкой / В.И. Мирошниченко, Т.В. Лапшук, Е.А. Матвиец, В.С. Голтвяница, С.К. Голтвяница // Процессы литья. – 2010.– № 1. – С. 33 – 37.
3. Ворон. М.М. Метод расчета испарения алюминия в интерметаллидных системах Ti-Al при электронно-лучевом переплаве// Металл и литье Украины. – 2010. – №11. – С. 31-33

УДК 621.74

*В. Г. Герасименко, Т. О. Широких*

*Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ*

### **ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ІНОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ЯКІСНОЇ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ ЗАГОТІВКИ ЗА ДОПОМОГОЮ «М'ЯКОГО» ОБТИСКУ ПРИ ЇЇ ТВЕРДІННІ**

Технологія безперервного розливання сталі освоєна більш, ніж в 90 країнах світу, де діє близько 2 тис. МБЛЗ різної конструкції і призначення. Понад 93% всієї виплавленої сталі (у 2008 році - 1,228 млрд. тон заготовки) розлита на МБЛЗ.

За підсумками 2009 року, Україна посіла дванадцяту позицію в світі і четверту в Європі (після Росії, Німеччини та Італії) за обсягами застосування

безперервного розливання сталі. Сьогодні ця технологія працює на одинадцять підприємств, з яких п'ять - комбінати повного циклу.

Так як безперервне розливання стало одним з основних способів розливання сталі, вимоги до її якості помітно зросли.

Одними з основних дефектів безперервнолитої заготовки є осьова пористість і осьова ліквіація, які при прокатці проявляються у вигляді внутрішніх тріщин і розслою. Боротися з цими дефектами можна двома способами: зовнішнім фізичним впливом на заготовку, що кристалізується, або методом «м'якого» обтиску. Перший спосіб досить дорогий і вимагає великих енерговитрат, а другий є більш перспективним, так як він не такий дорогий і його легше застосовувати.

Технологічний принцип «м'якого» обтиску полягає в тому, що безперервнолитої зливку у кінці твердіння проходить через зону «м'якого» обтиску, налаштовану на конус, при цьому кінець зони твердіння (кінець рідкої лунки) стискається і цим компенсується усадка при твердінні. При обтиску зливку утворюється більш дрібна і однорідна структура металу, ніж без обтиску.

Для того, щоб отримати позитивний результат, позиція і величина обтиску повинні бути оптимізовані. Якщо «м'який» обтиск занадто малий, він неефективний, наслідком чого є утворення у безперервнолитому зливку сильної сегрегації. Занадто великий обтиск впливає також негативно на осьову ліквіацію, підвищуючи її, а отже, веде до утворення тріщин.

Теоретично величина обтиску визначається за формулою:

$$D_0 = (D_1 + D_2) / \eta + D_3,$$

де  $D_1$ ,  $D_2$ - сумарний обтиск, необхідний для запобігання відповідно руху (витікання) рідкої сталі із зони твердіння і перетікання сталі при спученні заготовки (при використанні плоских брусків  $D_2 = 0$ );  $\eta$ -коефіцієнт пропорційності, що враховує перенесення поверхні внутрішнього фронту твердіння і, отже, умови гарячої деформації заготовки;  $D_3$ - сумарна термічна усадка твердої фази при зниженні температури в ході обтиску (розраховується на підставі аналізу процесів теплопереносу в зоні обтиску).

Параметри м'якого обтиску індивідуальні для різного хімічного складу, швидкісних режимів і сортаменту, а отже, вирішення питань технології «м'якого» обтиску можливо тільки на основі математичного моделювання всього процесу «м'якого» обтиску, починаючи з гідродинамічної роботи, обумовленої переміщенням фронтів кристалізації, закінчуючи призначенням у потрібному місці, на необхідній довжині раціональної величини обтиску.

У зв'язку з тим, що технологія «м'якого» обтиску до кінця недосліджена, вона потребує удосконалення і вирішення наступних завдань:

– розробки математичної моделі для реалізації процесу «м'якого» обтиску і дослідження з її допомогою впливу цього процесу на формування макроструктури безперервнолитої заготовки з рідкою серцевиною в зоні вторин-

ного охлаждения;

- розробки механізму впливу «м'якого» обтиску на формування макро-структури безперервнолитих заготовок;
- визначення кількості та місця прикладання зусиль обтиску (співвідношення між кількістю рідкої і твердої фаз в момент обтиску);
- визначення способів докладання зусиль до поверхні заготовки;
- дослідження якості безперервнолитих заготовок після «м'якого» обтиску і якості металопродукції з них;
- визначення взаємозв'язку технологічних параметрів безперервного розливання сталі з параметрами «м'якого» обтиску;
- розробки технології «м'якого» обтиску безперервнолитих заготовок на МБЛЗ.

УДК 669.15-198:669.017

*В. А. Гладких, В. Ф. Лысенко, А. В. Рубан*  
*Национальная металлургическая академия Украины,*  
*Днепропетровск*

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА, ТЕМПЕРАТУРНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ РАЗЛИВКИ НА КАЧЕСТВО СЛИТКА СПЛАВА**

В соответствии с действующим стандартом (ДСТУ 3548-97) и стандартом зарубежных стран, производящих марганцевые ферросплавы, базовое содержание ведущих элементов (марганца и кремния) в ферросиликомарганце составляет 82 %. По сложившейся практике выплавка сплава MnC17 на отечественных ферросплавных заводах осуществляется с содержанием кремния 17–18 % и марганца 72–74 %, т.е. с суммарным содержанием этих элементов 89–92 %. В связи с поставкой ферросиликомарганца сталеплавильным и фасонолитейным цехам во фракционированном виде в процессе дробления слитка ферросплава и последующем рассеве образуется значительное количество (10–15%) мелких некондиционных фракций – отсев фракционирования. Вследствие отсутствия потребителей основная масса отсева переплавляется в составе шихты при выплавке ферросиликомарганца, что снижает технико-экономические показатели производства.

Кафедрой электрометаллургии НМетАУ совместно с ЦЗЛ ОАО «НЗФ» завода проведена опытная кампания по выплавке и разливке ферросиликомарганца базового состава. В работе приведены результаты эксперимен-

тальных исследований по изучению влияния химического состава сплава, температуры разливки, типа и конструкции мульд разливочных машин на структуру, физико-механические характеристики слитка сплава и на выход отсева фракционирования.

Температура сплава в начале разливки, как правило, была на 10–15 °С выше температуры металла в середине и на 30–40 °С выше, чем в конце разливки. При анализе полученных результатов исследований установлено, что выход отсева фракционирования уменьшается при снижении температуры разливки, использовании стержневых изложниц и исключении процесса дробления. Отмечена характерная зависимость снижения выхода отсева при повышении концентрации железа, снижении содержания марганца, кремния в сплаве до значений базовых величин и уменьшении доли фосфора в сплаве. Повышение концентрации железа в сплаве и, соответственно, в структурных силикокарбидных фазах слитка (по принципу замещения марганца в узлах кристаллической решетки железом) обеспечивает повышение плотности и микротвердости, пластичности и предела хрупкого разрушения структурных фаз под действием статических и динамических нагрузок.

Полученные в работе результаты подтверждают целесообразность организации выплавки ферросиликомарганца с базовым содержанием марганца, кремния и с повышенной долей железа (10–13 %), что является одним из направлений улучшения технологичности процесса выплавки ферросиликомарганца – на заводе, повышения физико-механических и потребительских свойств слитка и фракционированного металла и, в конечном итоге, улучшения технико-экономических показателей его производства.

УДК 669.15-198:669.141.25

*В. А. Гладких, В. Ф. Лысенко, А. В. Рубан*  
*Национальная металлургическая академия Украины,*  
*Днепропетровск*

#### **РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАРГАНЦЕВЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЛИТЕЙНЫХ СТАЛЕЙ**

Вопросы рационального использования раскислителей и легирующих при выплавке литейных сталей различного назначения тесно связаны с номенклатурой производимых ферросплавов. Практически ни одна марка стали не может быть получена без использования марганцевых или кремнистых ферросплавов.

Государственным стандартом Украины на ферросиликомарганец (ДСТУ-3548-97) предусмотрено 4 марки с содержанием от 10 до 35% кремния и от 0,05 до 0,6% фосфора, а по ДСТУ-3547-97 – три группы ферромарганца: низкоуглеродистый, среднеуглеродистый и высокоуглеродистый, содержащие 0,5 – 7,0 % С и 0,05 – 0,70 % Р при 65 – 95 % Мп.

Традиционно литейщики используют для раскисления и легирования большинства марок сталей ферросиликомарганец марки МнС17 с содержанием кремния 15,0-20,0 %, фосфора 0,10-0,6 % и марганца 65,0 %; ферромарганец марки ФМн78 с содержанием фосфора 0,05-0,7 % и марганца 75-82 %; ферросилиций марок ФС45 (41-47 % Si; 0,6 % Mn; 0,05 % P; 0,02 %S) и ФС65 (63-68 % Si; 0,4 % Mn; 0,05 % P; 0,02 %S). Однако за рубежом используют марганцевые сплавы с более низким содержанием фосфора, а ферросиликомарганец содержит не более 68 % марганца. Повышенное содержание марганца в отечественном ферросиликомарганце значительно повышает конкурентоспособность сплава на международном рынке, т.к. его расход на 1 т стали значительно ниже.

С целью проведения сравнительной оценки расхода ферросплавов для раскисления и легирования практически любых литейных сталей приняты к рассмотрению ферросплавы: МнС17Р35, ФМн78С2Р70, МнС25Р35, ФС45, ФС65. При этом основной задачей ставилось ограничение общего количества вводимых ферросплавов, обеспечивающих заданный химический состав стали.

Основная задача состоит в выработке рекомендаций по рациональному сортаменту ферросплавов, расширению номенклатуры марганцевых сплавов, используемых для раскисления и легирования сталей.

При определении общего расхода ферросплавов принят средний химический состав литейных сталей и среднее усвоение марганца и кремния независимо от способа и метода раскисления и легирования (в печи или в ковше). Эти допущения позволили значительно сократить количество рассматриваемых вариантов и в то же время не оказали существенного влияния на общие выводы. Расчеты проводили исходя из среднего содержания марганца, кремния, фосфора и углерода по каждой группе марок сталей. В зависимости от выбранной марки литейной стали усвоение марганца составляет 65—92%, а кремния – 65-80%.

Анализ показывает, что во всех случаях использование ферросиликомарганца производства заводов Украины с повышенным содержанием марганца по сравнению с ферросиликомарганцем зарубежного производства позволяет снизить общий расход ферросплавов на 1 т стали.

Анализируя общую ситуацию с использованием массовых марганцевых ферросплавов в сталеплавильном производстве и состоянии их выплавки, необходимо отметить следующее:

Замена процесса раскисления ферромарганцем и ферросилицием на процесс раскисления ферросиликомарганцем улучшает как стабильность химического состава литейной стали по кремнию, так и ее механические свойства.

Наиболее целесообразно, а в некоторых случаях просто необходимо, особенно для низкоуглеродистых сталей типа 08Х14Н7МЛ, 08Г2ДНФЛ, 07Х17Н16ТЛ замена высокоуглеродистого ферромарганца на ферросиликомарганец в сочетании с ферросилицием марки ФС45. Применение высокоуглеродистого ферромарганца и ферросилиция марки ФС65 приводит к нестабильному составу стали по кремнию ввиду сегрегации кремния в ферросилиции марок ФС65 и ФС75 при его разливке. Для низкоуглеродистых сталей это наиболее актуально, т.к. во многих случаях ферросиликомарганец может заменить среднеуглеродистый ферромарганец.

Высококремнистый ферросиликомарганец марки МнС25 желательно производить с содержанием фосфора не более 0,25%, что позволит его использовать без всяких ограничений при выплавке большинства литейных сталей электропечного сортамента.

Практически во всех вариантах использование ферросилико-марганца марок МнС17 и МнС25 приводит к снижению общего количества вводимых ферросплавов, что позволит уменьшить перегрев стали в печи, снизить угар и повысить выход годного.

Для отдельных групп марок сталей целесообразно использовать комплексные сплавы на основе марганца с другими легирующими элементами.

УДК 669.187.526:51.001.57

*А.С. Гладков, Н.И. Левицкий, Т.В. Лапушук, Е.А. Матвиец, М.Ю. Смирнов*  
Физико-технологический институт металлов и сплавов  
НАН Украины, Киев

#### **РАФИНИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ГАРНИССАЖНОЙ ПЛАВКИ**

В современной металлургии электронно-лучевая плавка (ЭЛП) является эффективным способом рафинирования металлов и сплавов [1]. Ранее ряд исследований, проведенных для определения влияния электронно-лучевого нагрева на степень очистки металлургического кремния, показал, что ЭЛП обеспечивает его эффективное рафинирование от газов и примесей с упругостью пара выше, чем у кремния. Удаление таких элементов, как титан и железо, из кремния при ЭЛП возможно при обеспечении направленной кри-

сталлизации получаемых слитков и отливок. Удаление бора, который определяет основные электрические параметры кремния, при электронно-лучевом нагреве не происходит [2-4]. Кроме того в работах [2, 3] отмечено, что рафинирование кремния при ЭЛП с использованием в качестве плавильной емкости тигля нецелесообразно, так как даже при очень низких мощностях нагрева в пределах от 2,6 до 6,5 кВт и времени плавки 5-15 мин потери на испарение кремния превышают 10 %.

В ФТИМС НАН Украины проведены эксперименты по рафинированию металлургического кремния методом электронно-лучевой гарнисажной (тигельной) плавки (ЭЛПП). Основное отличие от проведенных ранее исследований заключается в дополнительном перемешивании ванны расплава кремния при электронно-лучевом нагреве.

Плавки проводили в кварцевом тигле. Кремний – Кр0. Мощность электронно-лучевого нагрева при плавке кремния составляла 13,5-15 кВт, времени выдержки расплава 20-25 мин. При таком проведении процесса потери на испарение не превысили 10 %. Учитывая тот факт, что мощность нагрева и время плавки более чем в два раза превышали аналогичные параметры, указанные в работах [2, 3], можно утверждать, что применение электромагнитного перемешивания при плавке и рафинировании металлургического кремния в значительной степени сокращает потери испарением.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности дальнейших исследований по применению ЭЛПП для получения чистого кремния.

#### Список литературы

1. Патон Б.Е. Электронно-лучевая плавка / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, Д.А. Козлитин и др. – К.: Наукова думка, 1997. – 265 с.
2. T. Ikeda The Application of Electron Beam Technique for the Purification of Silicon for Photovoltaic Material / N. Mori, T. Shimada, H. Hirashima, S. Lee Cockroft, M. Maeda // Proceeding of the Conference. Electron Beam Melting and Refining. State of the Art. – 1998. – P. 101-109.
3. Blum M. EBCHR for Cleaning and Controlled Solidification of Solar Grade Silicon / A. Choudhury, U. Biebricher, F. Hugo, D. Sarti, B. Schaub, H. Scholz // Proceeding of the Conference. Electron Beam Melting and Refining. State of the Art. – 1998. – P. 126-135.
4. Березос В.А. Рафинирование кремния способом электронно-лучевой плавки / В.А. Березос, А.Г. Ерохин // Современная электрометаллургия. – 2009. – №3. – С. 29-31.

УДК 669.71:532.694:539.216

*С. В. Гнилокурченко*

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

### МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОАЛЮМИНИЯ ИЗ РАСПЛАВА

Пеноалюминий является перспективным материалом для многих отраслей промышленности и народного хозяйства благодаря малому удельному весу, высокой способности поглощать различные виды энергии, хорошей обрабатываемости, экологичности. Ограниченные объемы его производства в настоящее время во многом предопределяются экономическими факторами – дороговизной применяемого оборудования и реагентов для вспенивания.

Способы получения этого материала из порошка исходного матричного металла и реагента-вспенивателя включают ряд технологических стадий - смешивание порошков, их компактирование, экструзию, порезку заготовок, нагрев и вспенивание, что значительно удорожает конечный продукт [1].

Наименее затратными являются методы производства пеноалюминия из расплава, первые из которых были запатентованы еще в 50-х годах прошлого века [2]. В их основе лежит обработка жидкого металла вспенивающим реагентом (гидрид титана, циркония), разлагающимся непосредственно в расплаве с выделением газа, и последующим быстрым охлаждением двухфазной газометаллической смеси. Такой метод получил широкое развитие в Японии под маркой «Альпорас» [3]. Проблема таких способов – трудность контроля интенсивного газовыделения из реагентов, что приводит к формированию больших пор, неравномерному их распределению по объему, и как следствие, к ухудшению механических свойств материала.

Разработаны различные подходы для частичного решения этих проблем. Так, создание поверхностных слоев на частичках реагента замедляет их разложение в расплаве (FORMGRIP-процесс [4]). Разработка новых экономических реагентов с повышенными температурами разложения ( $\text{CaCO}_3$  [5]) позволило в некоторых пределах контролировать процесс вспенивания.

Иной подход к образованию пузырьков в расплаве и управлению их ростом вследствие протекания газозвтектических реакций и контролируемого затвердевания («Газар») предложен украинскими учеными [6]. Он получил широкое развитие для многих сплавов в Японии под названием «Лотус» [7].

Частичное распространение получили методы прямой инъекции газов в расплав и получение вспененного слоя на поверхности (Канада, Норвегия - «Алкан» [8]).

Наряду с поиском путей удешевления получения пенометаллов важной задачей является обеспечение стабилизации жидкой пены [9].

## Список литературы

- J. Baumeister, US Patent 5 151 246, 1992.  
 A. Sosnik, US Patent 2434775, 1948.  
 J. S. Elliott, US Patent 2751289, 1956.  
 V. Gergely and B. Clyne. The formgrip process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors // *Advanced engineering materials*. – 2000. - Vol. 2, -№.4, -P. 175-178.  
 Nakamura, S. V. Gnyloskurenko, K. Sakamoto, A. V. Byakova and R. Ishikawa. Development of New Foaming Agent for Metal Foam // *Materials Transactions*. - 2002. - 43. - P. 1191-1196.  
 V.I. Shapovalov, US Patent 5181549, 1993.  
 H. Nakajima et al., Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties // *Colloids Surf., A*–2001. -179.- P.209–214.  
 I. Jin, L.D. Kenny and H. Sang, US Patent 5112697, 1992.  
 А.В. Бякова, В.П. Красовский, А.О. Дудник, С.В. Гнилокурченко, А.И. Сирко. О роли смачиваемости и распределения твердых частиц в стабилизации вспененных алюминиевых расплавов // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. – 2009. №42. - С. 5-22.

УДК 669.715: 673.3: 621.74.043

**В. П. Головаченко, Г. П. Борисов, В. М. Дука, А. Г. Вернидуб**  
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
 Киев

### НОВЫЙ СПОСОБ ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины проводятся широкомасштабные исследования оригинального способа литья заготовок из цветных сплавов «сегодня на сегодня» (патент находится в завершающей стадии оформления).

Новый способ не требует капитальных затрат на оснастку. В литейной форме, которая может быть изготовлена в течение нескольких минут, отсутствуют литейные уклоны, что повышает точность заготовок.

Способ предназначен для изготовления цилиндрических (диаметром до 50 мм) и прямоугольных заготовок высотой до 150 мм.

Как показали предварительные исследования, с использованием нового способа также возможно изготовление определенной номенклатуры фасонных отливок повышенной точности с достаточно высокой чистотой поверхности.

В качестве примера на рисунке приведены цилиндрические заготовки, изготовленные из алюминиевого сплава АК7, а также их микроструктура.

В зависимости от скорости охлаждения заготовки в ней может форми-

роваться глобулярная, дендритная либо смешанная структура с размерами глобулей 40-120 мкм, дендритов от 100 до 450 мкм.

Заготовки с глобулярной микроструктурой могут быть востребованы в прогрессивных технологиях рео- и тиксолития.

Достигнут уровень прочности литых заготовок из сплава АК7, что превышает требования ГОСТа 1583-93.

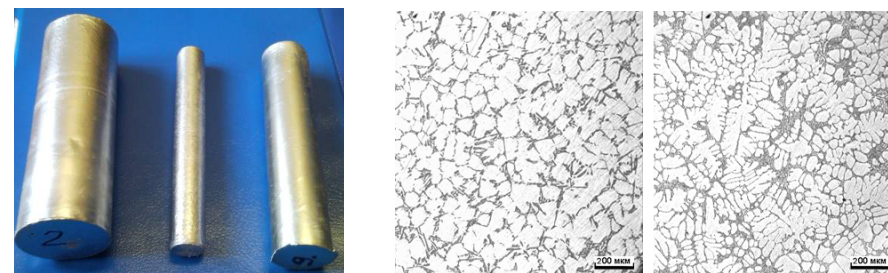


Рис. – Литые заготовки из сплава АК7 и их микроструктура, полученные новым методом литья

УДК 669.18

**А. В. Гресс, С. А. Стороженко**  
 Днепродзержинский государственный технический университет,  
 Днепродзержинск

### О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОДИФУЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ МЕТАЛЛА В ЛИТЕЙНЫХ КОВШАХ

Для оптимизации гидродинамических потоков металла в литейных ковшах для оптимизации гидродинамических потоков металла в литейных ковшах необходима информация об основных их характеристиках. Для ее получения целесообразно использовать различные виды моделирования.

Наиболее доступным методом исследований является «холодное» физическое моделирование, предусматривающее замену металла какой-либо жидкостью (чаще всего водой). Наиболее простым способом определения параметров движения жидкости является метод «треков». Согласно этому методу в жидкость вводят светоотражающие частицы, имеющие нулевую плавучесть и размеры, позволяющие им передвигаться в пространстве модели со скоростями, соответствующими скоростям потоков моделирующей

среды. Эксперименты на таких установках проводят в затемненном помещении посредством фото- и/или видеосъемки участка модели, освещенного обтюрируемым пучком света (иногда стробоскопированного). В силу объективных и субъективных обстоятельств такой метод не является высокоточным, что предопределяет невысокую степень адекватности построенных на его результатах численных моделей гидродинамики жидкости.

В последние десятилетия интенсивно развивается новое направление исследования локальных характеристик потоков – электродиффузионная диагностика, основанная на зависимости величины тока между помещенными в поток электродами от скорости обтекания рабочего электрода электролитом заданного состава.

В условиях лаборатории физического моделирования кафедры литейного производства ДГТУ для моделирования гидродинамики металла в литейных ковшах создана прозрачная экспериментальная установка в масштабе 0,6 реального ковша. Определяющими критериями при создании модели и исследованиях являлись число Лапласа и модифицированное число Фруда. Моделировали поведение металла в литейных ковшах при их продувке нейтральным газом, для чего в днище модели был предусмотрен продувочный узел, расположение которого можно менять в зависимости от задач эксперимента. Для продувки жидкости применяли сжатый воздух.

Эксперименты осуществляли в два этапа. На первом этапе использовали метод «треков». Жидкий металл и шлак моделировали, соответственно, водой и растительным маслом. В качестве индикаторов движения жидкостных потоков использовали полистироловые шарики диаметром 1-1,5 мм с нулевой плавучестью. Обработка результатов экспериментов позволила получить численные значения скоростей потоков жидкости, направление и расположение вихрей в объеме ковша.

На втором этапе экспериментов использовали метод электродиффузионной диагностики. Электронный блок электрохимического анемометра обеспечивает возможность локальных измерений массообмена, имеет блок питания электрохимической ячейки и два независимых канала усиления, которые обеспечивают режим ступенчатой поляризации электрода, режим анодно-катодной активации. Прибор снабжен блоком регистраторов нагрузки, напряжение с которых может поступать на фильтры верхних или нижних частот. Регистрация выходного сигнала производится электронным амперметром и запоминающим осциллографом типа С8-13. В качестве первичных датчиков использовались платиновые микроэлектроды. Металл моделировали электролитом, содержащим  $K_3Fe(CN)_6$  ( $2,50 \cdot 10^{-2}$  кмоль/м<sup>3</sup>),  $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$  ( $2,50 \cdot 10^{-2}$  кмоль/м<sup>3</sup>),  $K_2SO_4$  ( $2,30 \cdot 10^{-1}$  кмоль/м<sup>3</sup>), растворенных в дистиллированной воде.

Сравнение результатов первого и второго этапов экспериментов показало

возможность успешного применения указанного комплекса приборов для электродиффузионной диагностики потоков жидкости в объеме литейного ковша. Разница определения значений скоростей в характерных точках объема литейного ковша не превышала 10%.

УДК 621.74

*Ю. И. Гутько, Н. А. Тараненко*

*Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля,  
Луганск*

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОДЕЛЕЙ ИЗ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА**

Процесс литья по газифицируемым моделям хорошо известен своим многосторонним применением и является перспективным для более экономичного производства сложных отливок по сравнению с традиционными процессами литья.

Поскольку данный процесс литья является новым фактором, влияющим на получение качественных моделей из пенополистирола, еще недостаточно изучены. Следовательно, существует потребность в дальнейших исследованиях в данной области.

Необходимым условием для получения качественных моделей из пенополистирола являются тепловые свойства пенополистирола и характер тепловых процессов при его обработке.

Анализ литературных источников позволил сделать вывод что в работе [1] для установления теплового режима обработки пенополистирола сравнивалось качество пенополистирола, получаемого при различном времени выдержки, проверялось качество заполнения этим материалом пресс-форм и склеивания гранул между собой однако не учитывает трехмерную конфигурацию модели.

В работе [2] авторами изучались изменения теплофизических параметров, действующих в процессе вспенивания гранул, спекания и охлаждения моделей, определили таким образом оптимальный интервал, в котором могут изменяться эти параметры

Математические зависимости [2] выбора оптимального времени предварительного вспенивания выведены на основе экспериментов и только для одномерных моделей (учитывающих только толщину стенки), что не позволяет определить точно время спекания трехмерных сложных отливок.

Для получения рациональных тепловых режимов при изготовлении моделей из пенополистирола необходимо разработать математические модели тепловых режимов, которые учитывают время нагрева, охлаждения моделей, время спекания, толщину стенки, температуру вспенивания пенополистирола и другие теплофизические параметры.

#### Список литературы

1. Павлов В.А. Изготовление моделей из пенополистирола. Москва, 1969г.
2. О.И. Шинский, Х. Киореан, И.О. Шинский. Исследование термовременных параметров получения изделий из пенополистирола для литья по газифицируемым моделям // Процессы литья. – 1996. – № 2. – С. 82-90.

УДК 669.132.3:330.341.1

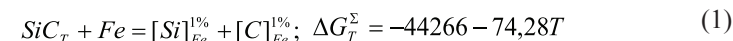
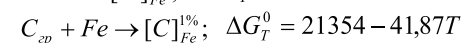
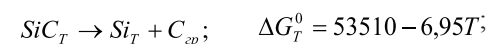
**И. В. Деревянко**

*Национальная металлургическая академия Украины  
(НМетАУ), Днепропетровск*

### **ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Одной из актуальных задач в области электрометаллургии и машиностроения является ресурсо- и энергосбережение при выплавке сталей и чугунов, а так же повышение качества готовой продукции. Основным направлением повышения качества чугунного литья является получение отливок из синтетического чугуна с заданными механическими свойствами. Синтетический чугун, как правило, выплавляют в индукционных печах и вагранках, используя в качестве металлошихты 50-70% литейного чугуна и 30-50% амортизационного стального лома, а для науглероживания расплава применяют литейный или доменный кокс. Для получения чугуна, стандартного по содержанию кремния, его легируют ферросилицием (ГОСТ 1415-93) марок ФС20... ФС75. Существенный экономический эффект при выплавке чугуна для отливок может быть достигнут за счет вовлечения в производство вторичных мелких материалов, содержащих SiC, образующихся в результате производства углеграфитовой продукции и абразивного карбида кремния.

В контакте с железным расплавом SiC, активно реагирует с переходом кремния и углерода в металл, что следует из зависимости  $\Delta G(T)$  для приведенных ниже частных реакций (Дж/моль):



Нами проведены исследования термокинетического взаимодействия SiC с жидким чугуном. Чугуны с различным содержанием углерода и кремния выплавляли в печи ИЧТ-0,06. В качестве металлошихты использовали передельный чугун марки ПЛ-2 (ГОСТ 805-80) и стальной лом марки 1А (ГОСТ 2787-88) в соотношении 3:2. Используемый в эксперименте порошок карбида кремния имел следующий химический состав (% мас.): SiC - 88; C<sub>своб</sub> - 1,5; SiO<sub>2</sub> - 2,0; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 3,0. Средний размер зерна карбида кремния составил 0,63 мм, при коэффициенте однородности K<sub>од</sub> = 22% (гранулометрический состав определен методом ситового анализа). После расплавления металлошихты и нагрева расплава до 1673 К в тигель с жидким металлом через каждые 10 мин порционно вводили порошок карбида кремния в количествах 1,3; 1,5 и 2,0% от массы расплава. По ходу плавки отбирали пробы на химический и металлографический анализ.

Микроструктуру шлифа исследовали до и после травления 2%-ным спиртовым раствором H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub> на микроскопе МИМ-8М при увеличении x100.

Установлено, что структура исходного металла, отобранного из расплава содержащего С - 2,6%, Si - 0,31% представлена белым чугуном с отдельными, редко расположенными включениями точечного графита (0,3-1,0%). Травлением выявлена перлитно-цементитная структура, грубая, с крупными участками перлита. С увеличением содержания углерода и кремния (С - 2,86%, Si - 0,97%), после присадки порции карбида кремния (1,3% от массы металла) структура белого чугуна сохраняется, наблюдаются включения точечного графита до 0,1%. Структура после травления мелкозернистая перлитно-цементитная. При дальнейшем вводе в расплав карбида кремния (1,5% от массы металла) структура металла трансформируется. Так при концентрации в расплаве 3,32% С и 1,94% Si получаем серый чугун с пластинчатым тонко разветвленным графитом.

Характер распределения графита соответствует Гф5. Преимущественная длина Гд5 - Гд6, в отдельных участках шлифа Гд2, количество графитных включений 9-11%. Структура матрицы - перлитная. После присадки SiC в количестве 2% от массы расплава металл, содержащий 3,56% С и 2,55% Si; представлен серым чугуном с пластинчатым графитом 15-18%, длина Гд4, а металлическая матрица - перлитом.

Анализ данных, полученных в ходе исследования, показал возможность использования металлургического карбида кремния в качестве шихтового материала для плавки чугунов и возможность замены им ферросилиция, ввод карбида кремния обеспечивает получение необходимой структуры и механических свойств чугунов.

УДК 621.744.072.2

*В. С. Дорошенко, Ю. Н. Иванов*

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

### **ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПЕСЧАНОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ, ПОЛУЧЕННОЙ ПО КРИО-ВАКУУМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Поверхностные явления, протекающие в литейной форме, играют решающую роль в процессах производства качественных отливок и постоянно находятся в поле зрения литейщиков [1]. В ходе разработки теоретических основ и технологии получения отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов с использованием крио-вакуумных процессов формообразования, в частности, по разовыми ледяными моделями, которые плавятся и испаряются при удалении из литейной формы, изучали механику и физико-химию процесса пропитки песчаной формы продуктами деструкции модели.

Процесс пропитки водной модельной композицией (в процессе таяния модели) сухого песчаного наполнителя формы, с поверхности, касательной к ледяной модели выглядит следующим образом. Экспериментально определили, что на глубину до 2...3 мм в наполнитель отфильтровываются примеси, введенные в эту композицию в качестве связующего или ускорителя твердения поверхностной оболочки песчаной формы, а на большую глубину просачивается только вода. При наличии в материале модели 4...5 % таких примесей, в 2-3-х миллиметровом поверхностном слое их концентрируется значительно (часто в разы) больше, что дает благоприятную основу для получения оболочковых форм пропиткой несвязанного песка водой с малым количеством таких добавок.

Причем «гравитационная» пропитка воды происходит постепенно с замедляющейся скоростью, а глубину этой пропитки на уровне до 6...10 мм в песчаный наполнитель целесообразно и проще всего регулировать количеством водной композиции путем удаления ее избытка из полости формы после таяния ледяной модели. Это дает веские аргументы для обоснования технологии изготовления песчаных оболочек толщиной 6...10 мм, в кото-

рых связующими песчаного наполнителя выступают такие неорганические гидратационные вяжущие материалы, образующие в контакте с водой кристаллогидраты, как гипс, цемент или металлофосфаты. Значительные возможности регулирования кинетики и глубины пропитки песка формы модельным составом имеют хорошо отработанные способы вакуумирования формы при ВПФ и ЛГМ.

Использование минимально допустимого количества холодно-твердеющих связующих неорганического происхождения (1) для получения тонкостенных песчаных оболочковых форм методом концентрирования фильтрованием добавок из замороженной воды моделей (2) в виде криотехнологии литье металлов по разовым ледяными моделями (3), которая в настоящее время создается и отрабатывается во ФТИМС НАНУ, в совокупности дает три основания для аргументирования высокого уровня ее экологичности по сравнению с известными действующими технологиями формообразования. Последние используют органические материалы для разовых моделей (пенопласт и парафино-стеариновые составы), а также часто органические связующие в формовочных смесях на весь объем песка литейной формы.

При разработке технологии получения ледяных литейных моделей отработывали операции сборки этих моделей в блоки на литниковом коллекторе, успешно монтировали модельные блоки с шестью и десятью моделями. Изготовлено шестиместную оболочковую форму для литья мелких отливок по ледяным моделям и определено, что качество поверхности литейной полости формы приемлемо для изготовления отливок. Сравнительные расчеты экономических затрат на изготовление форм на 1 т отливок по пенопластовым и ледяным моделями показывают, что затраты на изготовление ледяных моделей и форм по ним меньше, чем по пенопластовым, при большей экологической безопасности литья по ледяными моделям.

#### Литература

1. Дорошенко С. П. Состояние науки о поверхностных явлениях в песчаной форме и направления ее развития // Металл и литье Украины. - 1998. - №5-6, С. 63 – 65.

УДК 621.74

*В. С. Дорошенко, В. П. Кравченко**Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,  
Київ***О СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК В КОНТАКТЕ  
СО ЛЬДОМ**

На совещании бюро отделения НАН Украины после доклада о литье по ледяным моделям одним из членов бюро был задан вопрос «можно ли лить металл в ледяные формы?». После проведения экспериментов по литью металла на лед при температуре льда на  $15...20^\circ$  ниже точки его плавления, мы можем утвердительно ответить на этот вопрос. Однако при этом, чтобы получить точную геометрию отливки, необходимо нанести расплав металла на лед как можно более тонким слоем на максимально возможную площадь поверхности льда при минимально допустимой температуре перегрева металла для сохранения его жидкотекучести. Тонкая пленка металла мгновенно затвердеет и сможет удерживать стенку отливки, при этом между поверхностью отливки и льдом образуется прослойка воды, которая при тонкостенной отливке может даже замерзнуть при охлаждении отливки холодом окружающего льда.

Учитывая работы по разработке «мягких» кристаллизаторов [1], а также по созданию способов взаимодействия расплавленного металла со льдом в песчаной литейной форме [2], на наш взгляд, наиболее просто осуществить такой способ литья при получении тонкой полосы разливкой тонкой плоской струи металла на ледяную подложку в виде облицованной льдом движущейся ленты конвейера. При этом теплофизические условия процесса могут выглядеть таким образом, что затвердевание металла обеспечивается за счет плавления льда (теплота перегрева металла и его фазового перехода расходуется на нагрев и плавление льда), а дальнейшее охлаждение металла происходит в контакте с водой. Тогда тепловой баланс при затвердевании металла выглядит следующим образом:  $m_M (c_M t_M + \lambda) = m_L (c_L t_L + r)$ , где с индексом «М»  $m_M$  - масса,  $c_M$  - теплоемкость,  $t_M$  - температура перегрева металла в жидкой фазе и  $\lambda$  - удельная теплота его кристаллизации, а с индексом «Л»  $m_L$  - масса,  $c_L$  - теплоемкость,  $t_L$  - температура переохлаждения льда и  $r$  - удельная теплота его плавления. Отсюда определяется масса ледяной облицовки кристаллизатора:  $m_L = m_M (c_M t_M + \lambda) / (c_L t_L + r)$ .

Кроме того, воспользовавшись аналогией с работами американских исследователей по намораживанию ледяных моделей трех-мерным принтером в морозильной камере, когда капельным или струйным способом подается вода на подложку с получением в результате фасонного ледяного изделия [3], вполне резонно предложить, что подавая принтером струйку расплава

металла на поверхность ледяной пластины, мы можем, например, написать букву или слово, состоящее из фигурной полоски металла. Капля или струйка металла во льду выплавляют ложбинку или канавку и мгновенно в них застывают.

Рассмотренные способы литья пригодны для осуществления с использованием роботизированных комплексов и кристаллизаторов непрерывного действия, ряд аналогов которых можно найти среди оборудования для получения изделий из расплавленных пластмасс. Кроме того, работы в этом направлении могут привести к созданию варианта способа получения аморфных сплавов закалкой из жидкого состояния.

## Литература

1. Дорошенко В.С. О возможности применения «мягких» кристаллизаторов для непрерывного литья // Литейное производство. – 1994. – №7. – С. 19-20.
2. Дорошенко В.С., Кравченко В.П. Постепенное обновление парадигмы в теории литейных процессов по теме взаимодействия металла с песчаной формой // Металл и литье Украины. – 2009. – № 10 – С. 28-33.
3. Qingbin Liu, Guanghua Sui, M. C. Leu. Experimental study on the ice pattern fabrication for the investment casting by rapid freeze prototyping (RFP) // Computers in Industry. V. 48. – Issue 3 (August 2002). – P. 181 – 197.

УДК 621.74.045

*В. С. Дорошенко, І. О. Шинський**Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ***ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОДЕРЖАННЯ  
ВИЛИВКІВ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ  
ПІД ГАЗОВИМ ТИСКОМ**

В Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України згідно договору було виготовлено дослідні зразки виливків з алюмінієвого сплаву АК5М2. По формі виливків являє собою патрубок діаметром 150 мм і висотою 130 мм з товщиною стінок 25 мм. Моделі виливків були виконані з пінополістиролу, пофарбовані протипригарним покриттям на основі дистенсиліманіту з товщиною кірки покриття після підсушки 0,5-0,8 мм.

Відпрацювання технології вели послідовно на таких операціях. Виготовлення пінополістиролових моделей з виконанням ливникової системи з виводом ливника в нижньому напрямі. Проектування та виготовлення опочного оснащення з засобами вакуумування та з отвором в нижній частині контейнерної опоки. Формування моделей в сухому піску форми з точним

позиціонуванням ливникового каналу моделі та виходом його назовні в нижній частині форми. Установка форми з точним зіставленням ливника моделі з трубчастим подавачем розплавленого металу установки заливання металу під газовим тиском, закріплення та вакуумування форми, а також подання до неї металу. Під час цієї дослідно-технологічної роботи було знайдено ряд технічних рішень, що мають новизну і дозволяють патентувати спосіб лиття як винахід.

Тиск газу на метал було розраховано так, що з урахуванням протидії металостатичного напору, величина газового тиску гарантовано не могла перевищувати критичного тиску, що здатний здеформувати ливарну форму. Для регулювання газового тиску по ходу заливання розроблено спосіб оберненого зв'язку, коли шляхом виміру величини тиску в каналі вздовж моделі сигнал поступає на регулятор газового тиску і коригує цей тиск в оптимальному інтервалі під час заливання форми [1]. Ця технологія забезпечує оптимальний режим заливання та високу якість виливків. Тиск підтримують до кінця твердіння виливка. Дослідні зразки виливків мали чисту поверхню без пригару. Розрізання вздовж осі виливка показало суцільний метал без ознак пористості, що є позитивною характерною особливістю такого способу лиття металів. Ливникова система, що являє собою металопровід і постачає розплав металу з тигля, одночасно слугує аналогом живильного надливу, який саме забезпечує повноцінне живлення розплавом під газовим тиском з твердненням виливка повністю з якісним щільним металевим тілом.

Подальші напрями досліджень полягатимуть в оптимізації передусім параметрів газового тиску та температури металу з огляду економії енергії, пришвидшення кристалізації виливків та оптимізації структури металу, а також опробування інших видів створення тиску в металопроводі для спрощення автоматизації процесу.

#### Література

1. Спосіб лиття металу за одноразовими моделями в піщану форму під дією перепаду тиску: Патент UA 93723, МПК В22D 18/06, 18/04, 18/08, 27/13, 27/15, В22С 9/04/ Шинський О. Й., Дорошенко В. С. - Опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

УДК 669.716:621.74:669.054.8

*Ю. В. Доценко, В. Ю. Селиверстов*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### **ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ПЕРЕПЛАВА ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ**

Разработана технология получения новых литейных сплавов на основе переplava деформируемых сплавов системы Al–Mg и получения отливок из них. Это открывает перспективы решения актуальных задач конверсии и применения низкосортных шихтовых материалов в литейном производстве, но и возможности дальнейших исследований связанных с разработкой технологий рафинирования, модифицирования, фильтрации, применения внешних воздействий на расплав и кристаллизующийся металл при производстве отливок на основе вторичных алюминиевых сплавов различными способами (литье в кокиль, песчаноглинистую форму, литье под давлением, литье по выплавляемым моделям). Также перспективно направление связанное с оптимизацией химического состава известных литейных сплавов полученных на основе переplava, с целью получения максимальных литейных и механических свойств.

Разработаны технологические процессы плавки, заливки и термообработки отливок из экспериментальных сплавов. Технология не требует применения новых дорогостоящих материалов и является эффективной с экономической точки зрения.

Потенциальный годовой экономический эффект при использовании сплавов АК5Mg3 и АК10Mg3 для производства отливок составляет 3563,62 тыс. грн. и 3458,9 тыс. грн., соответственно.

#### Список литературы

1. Голованов А. Ю., Никитин В. И., Парамонов А. М., Переведенцев В. В. Применение деформированных отходов для приготовления алюминиевых сплавов // Литейное производство. – 1992. – №3. – С. 9.
2. Демина Е. Л. Область микрорасслоения эвтектических расплавов // Тез. докл. III Всесоюзной научной конференции: Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. Днепропетровск, 1986. – С. 139–142.
3. Никитин В. И. Связь эффекта наследственности шихты с природой добавок и примесей в сплавах алюминия // Литейное производство. – 1990 – №6 – С. 9–11.
4. Пархутик П. А., Лубенский М. В. Формирование структуры Al–Si-сплавов при разных условиях кристаллизации // Литейное производство –1971 – №5 – С. 23 – 24.

5. Никитин В. И. Основные закономерности структурной наследственности в системе <<шихта–расплав–отливка>> // Литейное производство. – 1991. – №4. – С. 4–5.

6. Никитин В. И., Лукьянов Г. С. Использование структурной наследственности для изготовления алюминиевых отливок ответственного назначения // Литейное производство. – 1995. – №10. – С. 14 – 15.

УДК 621.742.4

*А. П. Еременко, А. А. Свиженко*

*Днепродзержинский государственный технический университет,  
Днепродзержинск*

### **УЛУЧШЕНИЕ ВЫБИВАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕКОВЫХ СМЕСЕЙ**

Несмотря внедрение современных технологий доля бракованных отливок по вине литейной формы остаётся ещё достаточно большой, что требует существенных затрат на исправление дефектов.

Таким образом вопросы повышения качества смесей и изготавливаемых из них форм и стержней, вместе с усовершенствованием технологии,

обеспечивающей значительное сокращения цикла производства, количества и объемов трудоёмких ручных операций, занимают на современном этапе развития литейного производства Украины заметное место.

Проблемы получения смесей с оптимальными свойствами решены на отдельных предприятиях отрасли, но повсеместное их тиражирование не приносит ожидаемых результатов вследствие специфических особенностей технологических процессов, используемых на этих предприятиях.

Для решения указанной проблемы могут быть использованы методы активации компонентов смеси преимущественно на этапе формирования их структурно-механических свойств при перешивании. Широкое разнообразие методов позволяет с учетом особенностей условий работы отдельных предприятий определить необходимые материалы, подобрать методы их обработки и обеспечить стабильное качество изготовленной продукции при минимизации затрат на усовершенствование действующих технологических процессов.

В соответствии с поставленной задачей при выполнении работы были проведены исследования по оптимизации свойств облицовочной жидкостекровой формовочной смеси за счет проведения методов активации.

Исследования проводили с использованием методов математического планирования эксперимента. В качестве параметра оптимизации на первом этапе исследований была выбрана работа выбивки образцов смеси. Как

материалы для добавок в составы смесей по результатам информационного поиска были выбраны такие материалы : глина, мел, древесная мука, боксит, пульвербакелит, гидрол и мазут.

Учитывая значимость коэффициентов регрессии для дальнейших исследований были выбраны такие материалы как пульвербакелит, древесная мука и гидрол.

На втором этапе для уточнения влияния этих веществ на остальные свойства смеси были проведены дополнительные исследования. В результате их проведения установлено, что наиболее эффективным следует считать введение древесной муки, при введении которой ( 3,0... 4,0 % по массе ) снижается работа выбивки со 480...500 Дж до 250... 300 Дж, при сохранении требуемых значений по остальным свойствам. С учетом эффективности ввода отдельных добавок, а также приняв во внимание стоимость материалов и особенности их предварительной обработки, преимущества были отданы древесной муке.

Древесная мука эффективно влияет на улучшение свойств данных смесей, особенно на снижение работы выбивки. Учитывая, что этот материал есть в достаточном количестве во многих литейных цехах, как отходы производства, можно прогнозировать его широкое использование, что будет способствовать улучшению качества изготовленной продукции и не приведёт к ухудшению условий труда на основных рабочих местах.

#### Список литературы

1. Васин Ю.П., Каршенштейн В.Х., Цайзер Г.Г. Полистирольные термопластичные связующие для форм и стержней // Литейное производство, 1979, № 4. – С. 10-14.
2. Бречко А.А., Великанов Г.Ф. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. – Л.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
3. Бречко А.А. Смеси и технология их приготовления для машиностроения.– Л.: ЛДНТП, 1975. – 31 с.
4. Сварика А.А.Формовочные материалы и смеси.– К.:Техніка, 1983.– 144с.
5. С.П. Дорошенко, В.П. Авдокушин, К. Русин, И. Мацашек / Формовочные материалы и смеси. – К.: Вища школа, Прага: СНТЛ, 1990. – 415 с.

УДК 621.746

*В. Г. Ефимова, Г. В. Ефимов, В. М. Симановский**Национальный технический университет Украины «КПИ» МОНМС, Киев  
Физико-технологический институт металлов и сплавов Украины НАНУ,  
Киев***МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ  
ОГНЕУПОРОВ**

Одним из наиболее важных качеств огнеупоров, применяемых для выплавки высококачественных сталей и жаропрочных сплавов является их динамическая металлоустойчивость. Высокие показатели устойчивости огнеупоров плавильных емкостей обеспечивают, прежде всего, чистоту металла в отношении загрязнения неметаллическими включениями, а также существенно улучшают экономические показатели за счет увеличения количества плавов [1].

Процесс металлошлакоразъедания огнеупорных материалов чрезвычайно сложен. На материал огнеупора (черепок), состоящий в большинстве случаев из различных веществ, действуют расплавы, содержащие до десятка и более различных окислов. Некоторые из веществ черепка представлены в виде различных модификаций и имеют различную величину зерна. Кроме того, в черепке имеются поры, причем общее занимаемое ими пространство меняется так же, как и величина отдельных пор. Существенную роль на металлошлакоустойчивость оказывает макроструктура черепка. В нашем случае предусматривается равенство структур исследуемых материалов (стремление получения наиболее плотного черепка) при изменении его вещественного состава. Для изучения металлоустойчивости была разработана специальная методика.

Существующие методики изучения металлошлакоустойчивости весьма трудоемки и не всегда обеспечивают достоверное соответствие данных испытаний реальному состоянию. Представленная авторами методика позволяет определять эрозионно-коррозионную устойчивость огнеупорных материалов в расплаве жидких металлов. При индукционной плавке металл под воздействием индукционных токов интенсивно перемешивается. В этих условиях испытываемая таблетка огнеупорного материала подвержена не только физико-химическому воздействию расплава, но также и размывающему (эрозионному) воздействию потоков. Это хорошо соответствует условиям воздействия металла на огнеупор при выплавке высококачественных сталей и жаропрочных сплавов.

Свойства некоторых образцов огнеупорных материалов и их металлоустойчивость представлены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства огнеупорных материалов обожженных при 1650 °С

Материал состава, №	Состав, все. %			Металлоустойчивость	Открытая пористость, %
	Электроплавленный корунд	Молотый глинозем	Молотая глина		
Корундовый					
1	90	10	-	35	12...16
2	80	20	-	35	12...16
3	90	-	10	35	12...16
4	80	-	20	26	11...13
5	80	20	-	19	20...22
Периклазовый					
6	Периклаз	Сырой магнезит	Молотая глина		
6	90	10	-	155	12...16
7	80	20	-	153	12...16
8	90	-	10	153	12...16
9	80	-	20	152	12...16
10	80	20	-	47	20...22
Хромомагнезит					
11	Магнезит	Хромит			
11	35	65	-	154	12...16
12	50	50	-	154	12...16
13	65	35	-	154	12...16
14	65	35	-	41	20...22
Шпинели					
15	Магнезит	Хромит	Молотый глинозем		
15	35	35	30	132	12...16

Металлоустойчивость определяли временем разъедания таблетки (образец огнеупорного материала) толщиной 5 мм, диаметром 30 мм в турбулентном расплаве стали. Образец приклеивался к дну тигля при помощи специального огнеупорного мертеля. В дне тигля имелось сквозное отверстие

диаметром 10 мм. В тигле осуществлялась индукционная плавка металла при температуре 1600 °С.

Список литературы

Emi T. Process integration for making extra clean steels for stringent applications// Metal Separation Technologies beyond 2000. – TMS, Warrendale. – 1999. – P. 207 – 218.

УДК 621.74

*А. В. Жаданос, О. Н. Кукушкин*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ

Одной из важнейших целей внепечной обработки стали на электродуговой установке ковш-печь (УКП) и вакуумной установке (VD) является обеспечение перед разливкой стабильной, регламентированной технологическими требованиями температуры металла, что необходимо для обеспечения благоприятных условий формирования качественной структуры слитка. При этом необходимо минимизировать расход электрической энергии. Сложность решения этой задачи связана с особенностями контроля температуры металла в процессе внепечной обработки стали только путем периодических замеров. Создание математической модели, которая позволит с достаточной точностью прогнозировать температуру металла, корректного математического алгоритма для расчета энергетического режима на каждом этапе нагрева металла на УКП даст возможность усовершенствовать технологию внепечной обработки стали.

Разработка математической модели. В качестве объекта для разработки модели выбран участок внепечной обработки, на котором обрабатываются сталь колесного сортамента. Внепечной обработке длительностью 120-150 минут (в том числе, 20-50 минут обработка на УКП мощностью 14,4 МВ·А) подвергаются ковши с массой расплава  $M_{расп} = 95-115$  т [1]. Задача оптимизации энергетического режима формулируется следующим образом: за заданное время (t), при минимально возможном расходе активной электрической энергии  $E_{акт}$  передать расплаву необходимый запас теплоты для выполнения последующих технологических операций. Целевая функция определяется выражением [2]:

$$E_{акт} = \sqrt{3} \cdot \sum_{j=1}^n U_{2,j} \cdot I_{2,j} \cdot \cos \varphi_j \cdot t_{нагр,j} \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $t_{нагр,j}$  – время нагрева на ступени напряжения j,  $U_{2,j}$ ,  $I_{2,j}$  – соответственно номинальные напряжения и токи на вторичной обмотке трехфазного трансформатора,  $\cos \varphi_j$  – коэффициент мощности трансформатора.

Решение задачи состоит в определении времени начала нагрева металла на УКП и временной последовательности переключений ступеней напряжения трансформатора. При разработке алгоритма необходимо учитывать влияние на работу УКП смежных технологических агрегатов участка внепечной обработки стали – машины скачивания шлака и вакуумной установки, а также сталеплавильных печей. Это приводит к необходимости учета ограничений по времени на длительность обработки стали на УКП.

$$t_{мин} \leq t_{обр} \leq t_{макс}; t_{дес.мин} \leq t_{обр.н-к}; t_{доб} + t_{усв} \leq t_{нагр}, \quad (2)$$

где  $t_{обр} = t_{обр.н-к} + t_{см}$  – время внепечной обработки, включающее обработку расплава на УКП и выдержку под слоем утепляющей смеси до нагрева;  $t_{мин}$  – минимально возможное время внепечной обработки, по достижении которого возможно вакуумирование данного ковша;  $t_{макс}$  – максимально возможное время внепечной обработки, определяемое периодичностью выпуска последующих плавов из сталеплавильных агрегатов;

$t_{обр.н-к} = \sum_{j=1}^n t_{нагр,j} + t_{ост}$  – время обработки на УКП, включающее нагрев на ступенях напряжения и технологические остановки;  $t_{дес.мин}$  – минимальное время обработки на УКП, которое обеспечивает проведение десульфурации стали;  $t_{доб}$  – время ввода последней порции легирующих, раскислителей и шлакообразующих материалов;  $t_{усв}$  – время усвоения добавок.

Так как температура металла перед разливкой должна находиться в заданном технологическими требованиями диапазоне, который зависит от марки стали, уравнение теплового баланса является основным ограничением решаемой задачи.

$$E_{расп} = \sum_{t_{обр}=1}^n \Delta E_{расп.t} \quad (4)$$

где  $E_{расп}$  – энергия, которую необходимо передать во время обработки;  $\Delta E_{расп.t}$  – приращение энергии расплава за шаг обработки, которое происходит вследствие подвода энергии во время работы УКП и тепловых потерь, связанных с нагревом футеровки ковша и теплопередачей через нее, излучением с поверхности металла и шлака. Величину  $E_{расп}$  определяли из выражения

$$E_{расп} = M_{расп} \cdot C_{расп} \cdot (T_{н-к.кон} - T_{обр.нач}) + E_{доб}, \quad (5)$$

где  $E_{доб}$  – затраты энергии, связанные с нагревом и расплавлением химических добавок;  $T_{п-пкон}$  – температура расплава, при превышении которой должна закончиться обработка на УТП;  $T_{обр.нач.}$  – температура на начальном шаге решения задачи динамического программирования,  $C_{расп}$  – удельная теплоемкость расплава.

С применением метода динамического программирования разработан алгоритм расчета оптимального энергетического режима на каждом этапе обработки металла на УТП. Установлено, что для минимизации расхода электрической энергии, нагрев металла должен производиться без промежуточных остановок, а время начала процесса нагрева должно выбираться таким образом, чтобы энергетический к.п.д. установки, зависящий от толщины шлака, на каждом шаге обработки был максимальным.

#### Литература

Малик А.А. Оснащение сталеплавильных цехов установками внепечной обработки стали / А.А. Малик, В.А. Уголков, В.Ю. Довгач // *Электротехнология*. - 2005. - №4. - С. 21-25.

Жаданос А.В. Оптимизация энергетического режима внепечной обработки колесной стали на основе математического моделирования / А.В. Жаданос, О.Н. Кукушкин // *Теория и практика металлургии*. - 2010. - № 3-4. - С. 37-43.

УДК 621.74.04

*Н. О. Жижкина, Ю. І. Гутько, А. І. Малик*

*Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,  
Луганськ*

### **МОДИФІКУВАННЯ МАСИВНИХ ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ**

Підвищення конкурентоздатності металопродукції можливо шляхом поліпшення її якості й зниження собівартості, що нерозривно пов'язане з експлуатаційною стійкістю й надійністю змінного металургійного встаткування (валків, кюмпельних піддонів й інше). Таке встаткування виготовляють із чавуну, що характеризується одночасно високим рівнем технологічних й експлуатаційних властивостей.

Досвід виробництва масивних валків [1] показує, що для одержання чавунних виливків необхідної якості змінюють технологічні параметри процесів плавлення, лиття й термічної обробки виробу. Застосування позапечного оброблення розплаву різними добавками, що модифікують, допомагає управляти процесом структуроутворення таких виливків. В якості основних модифікаторів застосовують магній і його лігатури, феросиліцій, силікобарій, алюміній, кальцій, стронцій, церій, РЗМ (Ce, Y, La) і інші компоненти. Одержання кулястих включень у структурі при найменшому серед модифікаторів змісті забезпечує магній.

Уводять такі добавки в ківш, в автономні проточні реактори, усередину форм. Разом з тим процес модифікування характеризується нестабільністю ефекту, що обумовлено його чутливістю до коагуляції, розчиненню, розподілу добавок в обсязі розплаву й залежить від ряду технологічних факторів: хімічного складу й температури розплаву, марки й фракції застосовуваного модифікатора, кількості оброблюваного металу, швидкості наповнення реакційної ємкості, методу оброблення [2].

В процесі кристалізації виливків з модифікованого чавуну утворюється кулястий графіт й одночасно збільшується дисперсність структури, що забезпечує одержання рівня міцностних і пластичних властивостей, що відповідає сталевим виробам. Установлено, що сферичні включення в таких чавунах перешкоджають поширенню тріщини, а, отже, підвищують здатність матеріалу витримувати більш високі зовнішні знакозмінні температурні й динамічні навантаження [2].

Вивчення кількісного взаємозв'язку між хімічним складом, структурою, товщиною вилівка й міцностними властивостями масивних виробів, що виготовляють із модифікованого чавуну, показали, що зміст Сзаг шляхом установлення кількості зв'язаного вуглецю визначає часткове співвідношення структурних складових металевої матриці, а, отже, міцностні характеристики чавуну. Так максимальним усередині досліджуваної групи виливків зна-

ченням міцності характеризується виріб з максимальним змістом вуглецю й мінімальним кремнію. У структурі таких виробів спостерігається найбільше серед досліджуваної групи кількість перліту в металевій матриці. Зміна ж їхнього рівня більш відчутно до коливань у змісті кремнію, що регулює кількість вільного графіту.

Разом з тим, на ефективність процесу модифікування чавунних виробів значний вплив робить ступінь чистоти розплаву від неметалічних включень, що вимагає додаткових досліджень. Тому робота в цьому напрямку триває.

#### Література

Виробництво та експлуатація листопрокатних валків / [Електронний ресурс] / Н. О. Жижкіна // Наукові вісті Дніпровського університету. – 2010. - № 1. – Режим доступу до журн.: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/nvdu/2010\\_1/10zhnoelv.htm](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/nvdu/2010_1/10zhnoelv.htm)  
Модифицирование литейных чугунов. Технология контроля над формой включений графита // Материалы фирмы Elkem ASA. - Осло: Elkem ASA, 2000. – 11 с.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан*

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

### **ОДНОТЕМПЕРАТУРНЫЙ МЕТОД БЕСКОНТАКТНОЙ СПЕКТРАЛЬНО-КОМПЕНСАЦИОННОЙ МНОГОЦВЕТОВОЙ ПИРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ**

Известной проблемой современной во многих случаях безальтернативной для металлургии оптической пирометрии, является изменение в процессе измерений излучательной способности объекта ( $\epsilon$ ) и коэффициента пропускания промежуточной среды, приводящие к значительным методическим погрешностям пирометрических методов измерения температуры. При оптическом термодатировании большинства металлических сплавов спектральное распределение  $\epsilon$  изменяется в процессе окисления металла, сохраняя при этом линейный или близкий к линейному характер.

Авторами разработан метод спектрально-компенсационной многоцветовой пирометрии излучения с усредненной оптимальной настройкой спектральных характеристик пирометрической системы. Метод обеспечивает снижение методических погрешностей оптического термодатирования за счет получения минимально возможного отклонения эквивалентной излучатель-

ной способности от единицы во всем диапазоне фактических изменений спектрального распределения  $\epsilon$ . В том числе это достигается за счет минимизации эквивалентной длины волны при определении спектральных настроек многоцветовой пирометрической системы.

Например, при испытаниях метода в условиях термодатирования поверхности стальной заготовки под кристаллизатором ( $T=1100-1350$  °С,  $\epsilon=0,2-0,9$ ) погрешности метода находились в пределах от 2 до 7 °С. При этом погрешности классической одно- и двухцветовой пирометрии излучения превышали указанное максимальное значение в 13 и в 9 раз, соответственно.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан*

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

### **СПЕКТРАЛЬНО-КОМПЕНСАЦИОННАЯ МНОГОЦВЕТОВАЯ ПИРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМ ВВЕДЕНИЕМ ПОПРАВКИ**

В результате проведенных ФТИМС НАНУ исследований авторами разработан метод бесконтактной спектрально-компенсационной многоцветовой оптической термометрии с динамическим введением поправки в результате измерений. Известно, что изменения излучательной способности термометрируемого объекта вносят значительную погрешность в результаты пирометрических измерений. Ее значения в температурном диапазоне 1300..1900 К при характерных для металлических сплавов изменениях спектрального распределения излучательной способности могут достигать 96 и 65 К для классических одно- и двухцветовых методов пирометрии.

Метод разработан на основе трехцветовой пирометрии – пирометрии двойного спектрального отношения. Доказано, что по относительным параметрам (ОП) получаемым по характеристической температуре, можно определить состояние излучающей поверхности объекта, а точнее изменения ее излучательных свойств. Величина (ОП) имеет однозначную связь с методической погрешностью температуры излучения, вызванной отклонением эквивалентной излучательной способности от 1. Эта информация дает возможность определять значение температурной поправки по априори рассчитанной градуировочной характеристике, и динамически корректировать результаты в процессе измерений, исключая тем самым влияние излучательных свойств объекта.

Например, при характерных для металлических сплавов изменениях излу-

чательной способности от 0,2 до 0,9 в спектральном диапазоне 0,5...1,1 мкм для температур 1300..1900 К погрешность метода с динамическим введением поправки не превышает 1%.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан, Н. Ф. Зубенина*

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

### **НОВЫЙ МЕТОД МНОГОЦВЕТОВОЙ ПИРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЗАИМНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕРМОКОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ**

В результате исследований доказано, что определенные ранее критические настроечные параметры многоцветовой пирометрии обуславливают гиперболический характер зависимостей многоцветовых температур излучения металлических сплавов от настроечной длины волны. Установлено, что для чистых и окисляющихся металлических поверхностей гиперболическая зависимость многоцветовых температур излучения изменяет свой вид и положение относительно характеристической температуры излучения и температуры металла. Доказано существование и разработан алгоритм определения сопряженных настроечных длин волн, при которых отклонения многоцветовых температур излучения от температуры металла противоположны по знаку и равны по абсолютному значению. В этом случае температура металлических сплавов определяется средним арифметическим многоцветовых температур их излучения, измеренных на сопряженных длинах волн.

Основное отличие разработанного метода от известных заключается в самокомпенсации методических погрешностей, возникающих при качественных и количественных изменениях спектральных распределений излучательной способности металлических сплавов. Погрешности нового метода, в случае характерных изменений излучательной способности окисляющихся металлических сплавов от 0,2 до 0,9 в спектральном диапазоне 0,4-1,1 мкм, не превышают 1,0% при температурах 1300-1900 К. Высокие метрологические характеристики и априорная настройка обеспечивают использование метода для термоконтроля металлических сплавов в сложных термометрических условиях металлургических производств, в том числе бесконтактного контроля температуры заготовки под кристаллизатором.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, А. Л. Гончаров*

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

### **ПЕРИОДИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА**

Термометр переносной контактный ТПК-05 предназначен для периодических измерений температуры металлических расплавов методом погружения.

Термометр состоит из переносного микропроцессорного вторичного измерительного преобразователя (ВИП-П) и штанги с терморазъёмом и сменными термоэлектрическими пакетами типа ТСП.

Технические характеристики ВИП-П.

1. Диапазон измерений, °С 0 – 1800.
  2. ВИП-П обеспечивает работу в комплекте с термоэлектрическими преобразователями типов ТВР, ТПР, ТПП, ТХА и ТХК.
  3. Разрешающая способность ВИП-П, °С 1,0
  4. Объём памяти ВИП-П (значений измеренных температур) 110.
  5. Погрешность ТПК-05 практически определяется погрешностью первичного термоэлектрического преобразователя.
  6. Систематическая составляющая абсолютной основной погрешности ВИП-П, вызванная нелинейностью номинальной статической характеристики первичного термоэлектрического преобразователя, °С  $\leq 0,2$
  7. Погрешность измерений температуры холодных концов, °С 1,0.
  8. Питание ВИП-П осуществляется от 3-х элементов напряжением 1,5 В.
  9. Масса ВИП-П, кг  $\leq 1,0$ .
  10. Функции ВИП-П:
    - автоматическая компенсация температуры холодных концов;
    - диагностика обрыва в измерительной цепи, состояния источника питания и работоспособности электронной части;
    - световая и звуковая сигнализация окончания измерения;
    - напоминание и протоколирование результатов измерений с возможностью последующего считывания по интерфейсу;
    - сокращение времени измерений за счет прогнозирования  $T_{max}$ .
- ТПК-05 комплектуется термоэлектрическими сменными пакетами.
- Отличительной чертой пакета ТСП является снижающая стоимость измерений повышенная стойкость к воздействию металлических расплавов и глина погружения до 80мм.

УДК 621.745.5.06./07:536.5

*Л. Ф. Жуков, А. Л. Гончаров, Э. В. Захарченко*  
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
 Киев

### ЭКСПРЕССНЫЙ КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ГРАФИТА В ЧУГУНЕ

Для стабильного производства качественной металлопродукции с заданными свойствами при минимально возможных ресурсозатратах необходимо в процессе плавки, обработки и разливки чугуна экспрессно контролировать форму графита. С этой целью ФТИМС НАН Украины разработал новую технологию термодинамического экспресс-анализа железоуглеродистых сплавов.

Температуропроводность является перспективным метрическим параметром для контроля структуры сплавов, в том числе наиболее сильно зависящим от формы графита в чугуне. Например, при изменении степени сферидизации графита от 30 до 70% температуропроводность чугуна изменяется почти в 10 раз, в то время как скорость ультразвука в нем - только на 8 - 10%. Увеличение крутизны метрического параметра почти в 10 раз повышает статистическую достоверность термодинамического контроля до 0,95 при 0,6 для традиционно используемого для этих целей ультразвука.

ФТИМС НАН Украины разработана термодинамическая установка для экспресс-анализа формы графита в чугуне.

Метод экспресс-анализа основан на регистрации и обработке термодинамических характеристик тестируемых образцов металла.

Форма графита (пластинчатая, вермикулярная и шаровидная) определяется по температуропроводности чугуна в специально отлитых образцах или отливках.

Таким образом, в результате сравнительных исследований доказаны более высокие по сравнению с другими методами, в том числе ультразвуковым, метрологические характеристики и технологические возможности термодинамического экспресс-анализа структуры сплавов. При промышленном использовании методы и средства обеспечивают определение формы графита со статистической достоверностью не ниже 95%, что позволяет стабильно получать металлопродукцию с заданными свойствами при минимально возможных затратах.

УДК 621.745.5.06./07:536.5

*Л. Ф. Жуков, А. Л. Гончаров, Э. В. Захарченко, В. В. Батальянец,*  
*Г. О. Антонов*  
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
 Киев

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Установка (УТЭА-Ч) предназначена для оперативного определения содержания углерода, кремния и марганца в чугуне непосредственно в процессе получения и обработки жидкого металла.

УТЭА-Ч рекомендуется применять на предприятиях металлургии и металлургии машиностроения.

Принцип действия установки основан на зависимости термо-ЭДС в термоэлектрической цепи «горячий электрод – анализируемый образец» от химического состава образца.

УТЭА-Ч состоит из первичного термоэлектрического модуля (ПТМ) и вторичного микропроцессорного преобразователя (ВМП).

ПТМ формирует следующие сигналы:

- термо-ЭДС, обусловленной составом образца;
- момента контакта с анализируемым образцом;
- текущего теплового состояния горячего электрода (ГЭ).

ВМП обеспечивает:

- измерения термо-ЭДС в термоэлектрической цепи ПТМ «горячий электрод – анализируемый образец»;
- анализ достоверности измерений и накопление необходимой выборки измерений термо-ЭДС;
- вычисление по полученной выборке термо-ЭДС содержания C, Si, Mn;
- контроль функционирования ПТМ и управление тепловым состоянием ГЭ;
- контроль последовательности операций при проведении экспресс-анализа пробы;
- индикацию результатов анализа и сообщений.

На рис.1 приведена электрическая схема установки.

В состав ПТМ входят ГЭ, каретка с подложкой для образцов и холодным электродом (ХЭ), механизм привода и станина. Внутри ГЭ расположены нагреватель (Н) и термопреобразователь (ТП) для контроля и регулирования температуры ГЭ.

ВМП выполнен в пылезащитном корпусе и монтируется в пульт или щит. На лицевой панели расположены клавиатура, цифровой индикатор и вспомогательные индикаторы. Лицевая панель герметично закрыта защитной

пленкой.

Установка работает следующим образом:

После включения УТЭА-Ч и нагрева ГЭ в течение 30 мин. до рабочей температуры установка готова к работе и может находиться в режиме готовности любое время.

Подготовленные для анализа образцы чугуна (серый, белый и пестрый) поочередно устанавливаются на подложку установки, на которой к противоположным торцам образца прижимаются ГЭ и ХЭ. Термо-ЭДС в образованной измерительной цепи фиксируется ВМП. После проведенных измерений ВМП проводит расчет процентного содержания углерода, кремния и марганца и результаты расчета индицируются на цифровом индикаторе.

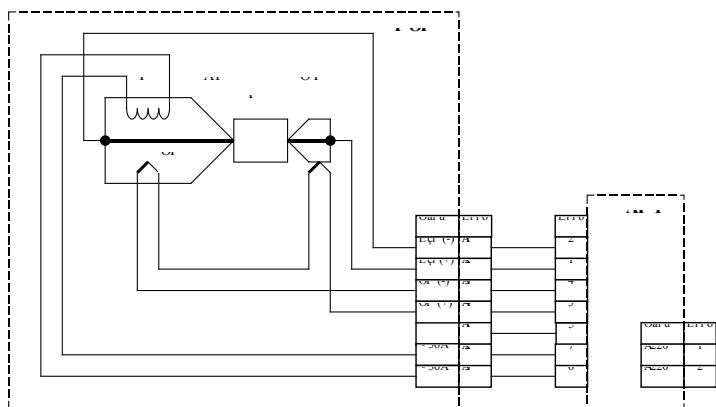


Рис.1. Электрическая схема УТЭА-Ч

УТЭА-Ч имеет ряд преимуществ по сравнению с предыдущими решениями, в том числе более высокую чувствительность ПТМ, сходимость результатов анализа и эксплуатационный ресурс ГЭ, а также существенно уменьшенные габариты и вес.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, В. В. Дроздовский, В. Н. Гордин*

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

### **НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВОВ В ПОТОКЕ ИЛИ СТРУЕ НА СЛИВЕ ИЛИ ВЫПУСКЕ ИЗ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ И ВАГРАНОК**

Ранее предложены методы непрерывного измерения температуры жидкого чугуна на сливе из электродуговых печей, заключающиеся в том, что пирометрический преобразователь визируется на струю расплава у носка желоба.

Печи имеют сифон для разделения чугуна и шлака, поэтому поверхность потока расплава на желобе свободна от шлака. Это позволяет в соответствии с разработанным нами методом располагать преобразователь над желобом печи и визировать его сверху на поток расплава. При таком расположении преобразователь более удобен в эксплуатации, выше надежность его работы. Кроме того, установлено, что поверхность потока расплава на желобе печи имеет более стабильную излучательную способность, чем поверхность струи у носка желоба.

Яркостная температура расплава имеет достаточно тесную однозначную связь с его действительной температурой только на определенных этапах слива, на которых и следует обеспечить контроль. С этой целью бесконтактные пирометрические системы комплектуются релейной приставкой. Над желобом печи установлен вытяжной зонтик, поэтому для повышения эффективности применения сжатого воздуха фурма преобразователя имеет удлиненную насадку. Для сглаживания пульсации показаний и записи температуры применена интегрирующая приставка.

Для полного использования технологических возможностей электродуговых печей необходим непрерывный контроль температуры чугуна непосредственно по ходу плавки в самом тигле. Периодический режим эксплуатации печей исключает применение, единственно возможных для такого контроля, световодных методов и средств.

Для технической реализации описанного бесконтактного метода разработана двухканальная система, которая по термоэлектрическому каналу с помощью термопреобразователя погружения обеспечивает периодические измерения температуры жидкого чугуна в процессе перегрева и по пирометрическому каналу контролирует этап слива металла. Электродуговые печи с основной футеровкой часто используются для перегрева ваграночного металла при производстве отливок из ковкого чугуна. В этом случае чугун часто сливается из печи (примерно 1 раз в 5 минут) и автоматически обе-

спечивается практический непрерывный температурный контроль по пирометрическому каналу.

Такой контроль стабилизирует температурные режимы электродуговой плавки и разливки чугуна, за счет чего снижается уровень брака, расход электроэнергии, угар шихтовых материалов и повышается ресурс футеровки.

Для контроля и управления температурным режимом ваграночной плавки достаточно непрерывно измерять температуру чугуна на выпуске. Значительная инерционность вагранок позволяет измерять температуру расплава в сифоне пирометром излучения с погружаемой в расплав цилиндрической моделью АЧТ. Такое решение целесообразно использовать для непрерывной термометрии чугуна с температурами выпуска близкими к температурам термодинамического равновесия основной металлургической реакции. Чугун в этом случае в различной, зависящей от температуры, состава и перемешивания, степени покрыт оксидными пленами, нарушающими однозначную связь между условными и действительными температурами. Если температура выпускаемого чугуна превышает равновесную температуру, то для контроля лучше использовать двухканальную микропроцессорную бесконтактную пирометрическую систему. В этом случае пирометрический преобразователь, в соответствии с разработанным методом, визируется на начало потока расплава на желобе непосредственно у сифона.

Известны методы измерений температуры чугуна на выпуске из стационарного копильника вагранки, заключающийся в том, что пирометр излучения визируется на поток расплава на желобе или на струю (снизу, сбоку) у носка желоба. Однако, проведенные нами исследования показывают неоптимальность этих методов. В результате исследований температурных полей участков поверхности расплава, доступных для пирометров излучения, установлено, что наиболее стабильную излучательную способность имеет участок струи непосредственно у летки. Для уменьшения погрешности измерений температуры предложено визировать пирометр на этот участок струи с помощью специальной разработанной фурмы. По температурной диаграмме можно, кроме температуры, контролировать производительность агрегата, ритмичность работы, простои и нарушения технологии, в частности, слив шлака в ковш.

Чугун из вагранок по третьей схеме выпускается непрерывно через открытый желоб. Наиболее приемлемым в этом случае является бесконтактный метод, заключающийся в том, что пирометрический преобразователь визируется на струю непосредственно у летки вагранок.

Непрерывный контроль температуры чугуна на выпуске из вагранки позволяет вагранщику изменением подачи дутья и кокса выдерживать заданный температурный режим плавки. Стабилизация температуры выпускаемого металла обеспечивает требуемый температурный режим разливки.

В комплексе стабилизация температурных режимов процессов получения и разливки ваграночного чугуна снижает уровень брака, расход кокса, угар шихты и амортизацию футеровки.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, Э. В. Захарченко, А. Л. Гончаров, Е. А. Сиренко*  
*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,*  
*Киев*

### **ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ЧУГУНОВ И ДРУГИХ ЛИТЫХ СПЛАВОВ**

Для стабильного получения качественного литого металла с заданными свойствами необходимо экспрессно по ходу плавки контролировать температуру, химический состав и ряд технологических характеристик.

Термографический экспресс-анализ (ТГА) основан на интерпретации характеристик термограмм охлаждения небольших масс металла (обычно 200-300г; длительность затвердевания - около 2мин.). Обсуждаются состояние и пути повышения точности этого экспрессного и недорогого метода. Подчеркивается, что ТГК- методу, имеющему богатую историю, в настоящее время нет адекватной альтернативы.

В чугунолитейном производстве ТГА чаще всего используется для контроля содержания углерода и кремния, углеродного эквивалента, структуры металлической основы и формы графита и реже - некоторых физико-механических и технологических в том числе усадочных свойств. С помощью ТГА контролируют степень инокулирования и модифицирования литых алюминиевых сплавов, содержание фосфора в медно-цинковых сплавах, а также низкие содержания углерода в низколегированных сталях и количество карбидов в износостойких сталях. Используют ТГА и при литье сплавов никеля и кобальта.

Несмотря на большое число исследований в области ТГА остаются все же неясными и спорными некоторые важные его стороны, особенно касающиеся точности и воспроизводимости, формы и интерпретации термограмм охлаждения. Даже крупнейшие мировые компании, давно специализирующиеся на выпуске аппаратуры для ТГА, производят пробницы неоптимальной конструкции, используют математические модели, недостаточно учитывающие влияние сопутствующих и неконтролируемых химических элементов на термограммы охлаждения чугунов.

Систематизируется и анализируется с использованием мирового опыта

влияние различных факторов на метрологические характеристики ТГА (электропитания приборов; защиты от электромагнитных помех в термоэлектрических цепях; химического состава сплава; конструкции пробоотборника; термической защиты термопар; надежности химических анализов, используемых для проверки метрологических характеристик ТГА; надежности микропроцессорной аппаратуры; достоверности программ обработки результатов ТГА и др.). О важности термоконтроля для ТГА свидетельствует то, что погрешность измерений температуры чугуна в 1°С приводит к погрешности определения содержания углерода около 0,01%, а кремния - 0,08%.

На основе анализа перечисленных факторов разработаны практические рекомендации, которые в чугунолитейном производстве могут обеспечить экспериментально подтвержденную погрешность ТГА на уровне 0,03% для углерода и 0,03% для кремния. Это сравнимо с погрешностью определения углерода методом сжигания (0,035%). В Физико-технологическом институте металлов и сплавов Национальной Академии наук (г. Киев) за последние пятьдесят лет накоплен значительный опыт в области ТГА. В настоящее время выполняются работы по модернизации ТГА чугунов. Разрабатываются новые компактные конструкции пробоотборников, оптимизируется размещение и термоизоляция термопар, создаются новые усовершенствованные алгоритмы и программы математической обработки термограмм охлаждения чугунов. Особое внимание обращается на повышение точности и чувствительности, а также снижение инерционности измерений температуры, определение степени точности корреляции между формой термограммы охлаждения на участках ее перегиба и характеристиками металлографической структуры чугунов.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, Н. Ф. Зубенина*

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

#### **КОНТРОЛИРУЕМЫЕ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЛАВКИ, МИКСЕРОВАНИЯ И РАЗЛИВКИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА**

На базе современной оптоэлектронной, волоконной, микропроцессорной и компьютерной техники и новых материалов разработана световодная система для непрерывного контроля, регистрации, индикации и регулирования температуры жидкого металла в индукционных тигельных и канальных

плавильных, миксерных и разливочных печах. В результате промышленных испытаний и использования, а также исследований метрологических характеристик установлено, что система обеспечивает непрерывный, в течение кампании футеровки, контроль температуры жидкого металла в указанных печах со средними квадратическими погрешностями, соответственно не превышающими 6,4; 4,9 и 4,3°С, в диапазоне от 1260 до 1600°С.

Установлены закономерности влияния контролируемых определяющих параметров, в том числе массы зумпфа, мощности, состава и массы загружаемых доз шихты, режимов загрузки шихтовых материалов, температур и режимов наплавления тигля металлом, перегрева и термостатирования расплава и ошлакования футеровки на энергозатраты и производительность процессов плавки, выдержки и миксерования металла в индукционных печах. Показана высокая технико-экономическая эффективность оптимального управления на основе комплексного контроля и прежде всего непрерывного термоконтроля.

С использованием полученных математических моделей, установленных закономерностей влияния определяющих параметров и световодного термоконтроля разработаны физические основы, методы и технологические алгоритмы комплексного контроля и управления индукционными процессами получения, обработки, выдержки, миксерования и разлики жидкого металла, в том числе на предприятиях автомобиле-, тракторо- и двигателестроения, использующих моно-, дуплекс- и триплекс-процессы. Методы, средства и алгоритмы комплексного контроля и оптимального управления в исследованных пределах температурными, энергетическими и загрузочно-разгрузочными режимами индукционных плавильных, миксерных и разливочных печей обеспечивают снижение энергозатрат (16%-76%), брака «по температуре» (40%-100%), угара шихтовых материалов (20%-30%), а также повышение срока службы футеровки (50%-140%) и производительности печей (39%-78%).

При использовании этих разработок на промышленных печах типа ИЧТ (с емкостью 10 т и мощностью 2,2 мВт) было достигнуто рекордное практически двукратное снижение расхода электроэнергии до 434кВтЧ на выплавку и перегрев до 1400°С 1 т чугуна.

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

*Л. Ф. Жуков, М. И. Смирнов, А. В. Богдан**Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев*

### **НЕПРЕРЫВНЫЙ СВЕТОВОДНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ**

Непрерывный контроль температуры является наиболее эффективным для оптимизации температурных режимов и автоматизации теплотехнического оборудования, в том числе самых сложных в управлении и ресурсоемких металлургических и нагревательных печей. Традиционные средства – термоэлектрические (ТЭТ) и оптические (ОТ) термометры в принципе не могут обеспечить требуемый непрерывный термоконтроль. В процессе получения, обработки и разлива жидкий металл в металлургических агрегатах, как правило, покрыт шлаком, который исключает бесконтактный термоконтроль с помощью ОТ и ограничивает возможности контактных ТЭТ периодическими измерениями температуры методом кратковременного погружения. Метрологические характеристики применяемого на практике непрерывного термоконтроля нагревательных печей с помощью ТЭТ и ОТ далеко не всегда отвечают предъявленным требованиям из-за сильного влияния случайных изменений термоэлектрических характеристик ТЭТ, а также пропускания, излучательной способности и интенсивности фонового излучения печной атмосферы, нагреваемого металла и футеровки.

Для решения рассматриваемой проблемы ФТИМС НАНУ проведены длительные испытания в промышленных условиях наиболее перспективных современных термометрических методов. Лучшие результаты показали методы контроля с помощью стационарно установленных в футеровке печей огнеупорных коррозионностойких световодных устройств. Для технической реализации непрерывного световодного термоконтроля выполнен комплекс термометрических исследований металлургических и нагревательных печей, а также световодных методов и средств в условиях плавки, обработки, разлива и нагрева металла. В результате исследований разработаны армированные и световодные материалы, конструкции, технологии изготовления и монтажа вспомогательных, световодных и фокусирующих устройств и схемы их оптического сочленения, а также общий и частные, для основных типов металлургических и нагревательных печей, термометрические методы. Разработаны теоретические, технологические и метрологические основы построения систем световодного термоконтроля.

На основе выполненных разработок и современной оптоэлектронной, волоконно-оптической и микропроцессорной техники создано несколько типов и модификаций систем непрерывного световодного термоконтроля

металлургических и нагревательных печей.

В отличие от известных решений разработанные световодные технологии позволяют осуществить непрерывный контроль температуры расплавов, в том числе высокотемпературных, непосредственно в металлургических печах и значительно повысить точность непрерывного термоконтроля или вообще сделать его возможным для нагревательных печей и близких к ним по термометрическим условиям теплотехнических агрегатов.

Разработки защищены авторскими свидетельствами и патентами в СНГ, а также в Австралии, Великобритании, Канаде, Болгарии, США, Германии, Швеции и Японии.

Эксплуатация в промышленных условиях на отечественных и зарубежных предприятиях показала, что световодные термометрические технологии позволяют снизить энергозатраты и угар шихтовых материалов, исключить брак и аварии, обусловленные нарушением температурных режимов, повысить срок службы футеровки и производительность металлургических и нагревательных печей, в результате чего имеет незначительный срок окупаемости. Например, непрерывный световодный контроль температуры металла в индукционных плавильных, миксерных и раздаточных печах обеспечивает снижение расхода электроэнергии на 10-40%, угара шихтовых материалов на 10-20% и брака «по температуре» на 20-60%, а также повышение ресурса футеровки на 20-90% и производительности плавильных печей на 20-30%.

УДК 621.74.042:546.521:673.3

*А. С. Затуловский, Е. В. Миронова, Е. А. Набока**Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев*

### **ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ЛИТЬЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ КОКИЛЯ**

Широкое промышленное применение находят литые композиционные материалы (ЛКМ) на алюминиевой основе как конструкционные и функциональные сплавы. Преимущества их состоят в том, что они обладают высокой удельной прочностью, износостойкостью, а также некоторыми другими повышенными физико-механическими свойствами. ЛКМ получают с помощью технологий твердо-жидкофазного совмещения (пропитки, специальных методов литья). Центробежное литье – уникальный способ создания заготовок деталей со слоистой градиентной структурой, у которых за счет направленного осаждения частиц в жидкометаллической суспензии могут быть организованы поверхностные зоны (слои) с повышенной концентрацией

армирующих частиц [1-3]. Получение композитов методом центробежного литья с горизонтальной осью вращения дает возможность получать заготовки с дифференцированным распределением армирующих элементов по сечению отливки, благодаря одновременному заполнению металлом формы по всей длине отливки и отсутствия оседания частиц. Полученные детали имеют армированную наружную или внутреннюю поверхность (зону), в зависимости от соотношения плотности частиц и матричного сплава [4].

Для определения рациональных составов композитов на основе алюминия и выбора наиболее рациональных наполнителей был проведен расчет траектории движения различных армирующих частиц с различной плотностью при получении композитных заготовок методом центробежного литья. Установлено, что частицы бронзовой стружки, имеющие наибольшую плотность ( $\rho=8820\text{кг/м}^3$ ) достигнут область наружной поверхности гораздо быстрее, чем частицы карбида кремния ( $\rho=3200\text{кг/м}^3$ ) и каменного литья ( $\rho=3000\text{кг/м}^3$ ), имеющие более низкую плотность, а частицы алюмосиликата ( $\rho=2000\text{кг/м}^3$ ) будут оттеснены к внутренней поверхности отливки. В результате этого воздействия композиционные материалы армированные бронзовой стружкой будут иметь более плотный наружный слой, т.к. процесс пропитки будет происходить более полно.

Результаты расчетов подтверждает физическое моделирование процессов происходящих при центробежной заливке гетерогенных суспензий, полученных введением в воду частиц различной плотности. С увеличением скорости вращения формы во вращательное движение вовлекается все более толстый слой жидкости, часть которой под действием силы тяжести сползает обратно в ванну (т.н. дождевание). Лишь при скорости, соответствующей установившемуся режиму вращения, весь объем жидкости полностью вовлекается во вращательное движение, причем при вводе частиц бронзовой стружки данный режим вращения наблюдается уже при скорости вращения равной 550 об/мин, а при использовании полистирола только при 650 об/мин. Следовательно, пропитка бронзовой стружки будет начинаться раньше, чем других частиц имеющих более низкую плотность.

Проведенные расчеты и моделирование процесса центробежного литья дало возможность получить плотные литые композиционные отливки на основе алюминия армированные элементами бронзовой стружки и частицами каменного литья с наружным композитным слоем (4-5 мм) и равномерным их распределением по всей длине втулки.

#### Список литературы

1. С.С. Гусев, Д.Н. Лобков, С.С. Казачков Использование методов центробежного литья для получения изделий из композиционных материалов с упрочненной поверхностью // «Материаловедение». – 1999. – №5. – С. 50-53.
2. Эскин Г.И. и др. Устранение структурной неоднородности композитов на основе

алюминиевых сплавов с целью повышения их качества // Литейное производство. – 2001. – №9. – С. 2-8.

3. A. Dolata-Grosz и др. Struktura strefowa kompozytow AK12-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-AK12-SiC kształtowana w Prozesie odlewania odsrod kowedo // Kompozyty. – 2002. – №5. – С. 305-308.

4. J. Braszczyński. Lite kompozitni materially s kovovou matrici // Slevarcnstvi. 2004. – №6. – С. 209-212.

УДК 621.74.045

*З. А. Ивченко, В. В. Лунёв*

*ОАО «Мотор Сич», Запорожский национальный технический университет, Запорожье*

### **ВЛИЯНИЕ ВЕЩЕСТВ-ПРИМЕСЕЙ И РАЗМЕРА МИКРОЗЕРНА НА ПЛАСТИЧНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ5Л (ВТ5Л-МС)**

подавляющее число отливок представляют собой поликристаллические тела, состоящие из кристаллов неправильной геометрической формы (макро- и микрозёрен). Каждое зерно в отливке имеет свою индивидуальную пространственную ориентировку кристаллической решетки и в зависимости от условий роста – размер и границу. Размер макро- и микрозёрен во многом предопределяет механические свойства литого металла. Применительно к титановому сплаву ВТ5Л (ВТ5Л-МС) установлено, что его пластические свойства при комнатной температуре тем выше, а предел текучести тем ниже, чем мельче зерно. В тоже время ударная вязкость зависит от размера зерна в значительно меньшей степени и практически не зависит от размера зерна предел прочности сплава на разрыв. Это объясняется тем, что в поликристаллическом теле по своим границам дезориентированные зёрна взаимодействуют между собой только в точках соприкосновения. Как результат, пространство между зёрнами представляет собой область шириной в несколько атомных диаметров в которой скапливаются вышедшие на поверхность дислокации. Определённая хаотичность в расположении атомов на границах зёрен приводит к понижению плотности вещества в поверхностном слое зёрен и межзёренном пространстве и, соответственно, повышенной концентрации примесей, понижающих поверхностную энергию кристаллов, нарушению стройности кристаллического строения самих зёрен.

Сплавы промышленной чистоты содержат определённое количество веществ-примесей, которые в той или иной степени оказывают влияние на механические свойства литого металла. Из числа веществ-примесей, обычно присутствующих в сплаве ВТ5Л (ВТ5Л-МС), с точки зрения объяснения

влияния размера микрочерта сплава на его механические свойства наиболее значимыми являются O и N. Размер атомов O и N по сравнению с размерами межузельного расстояния кристаллической решётки Ti настолько мал, что позволяет этим газам относительно свободно мигрировать в теле кристаллической решётки и адсорбироваться на дефектах кристаллической решётки зерна и его поверхности. При этом в твёрдом сплаве O и N находятся, преимущественно, в свободном состоянии, не образуя химических соединений.

До начала кристаллизации металла (титанового сплава) вещество-примесь (O, N) равномерно распределено по всему объёму и имеет определённую концентрацию. С появлением кристаллической фазы в затвердевающем сплаве концентрация вещества-примеси в твёрдых кристаллах становится выше, чем в расплаве. В момент окончания процесса кристаллизации (смыкания соседних кристаллов между собой) образуется межзёрная граница и с этого момента сформировавшаяся кристаллическая система стремится к равновесию. Поскольку атомы, расположенные на поверхности кристаллов по сравнению с атомами в объёме субзерен, в результате нескомпенсированности сил межатомного взаимодействия, характеризуются более высокой потенциальной энергией, а плотность вещества в межзёрном пространстве значительно ниже, чем в субзёрнах, можно предположить, что в момент появления границы между зёрнами начинается процесс перераспределения вещества-примеси. При этом, наиболее полно и интенсивно процесс перераспределения будет проходить для вещества-примеси с малой величиной атома (N, O). Данный процесс протекает путём диффузии атомов вещества-примеси из тела зерна на его поверхность. Достигнув поверхности зерна, атом вещества-примеси оседает (адсорбируется) на ней, по-видимому, понижая свою концентрацию на внутризёрных дефектах кристаллической решётки зерна. [1 - 3]

Если предположить, что процесс перераспределения атомов вещества-примеси в металле отливки завершается после достижения (при данной температуре) определённой концентрации атомов вещества-примеси в межзёрном пространстве, то известные экспериментальные факты о том что, чем меньше содержание вещества-примеси внедрения в теле зерна, тем меньше напряжена его кристаллическая решётка, выше подвижность дислокаций (за счёт уменьшения плотности атмосферы Коттрелла вокруг дислокаций) и тем выше пластические свойства вещества и ниже его предел текучести, с точки зрения влияния размера зерна на предел текучести сплава можно объяснить следующим образом. Поскольку с уменьшением размера зерна возрастает площадь межзёрной поверхности, то при концентрации атомов вещества-примеси в межзёрном пространстве  $c_{\Pi} = const$  уменьшение размера зерна должно сопровождаться понижением содержания вещества-примеси в теле зерна, а именно - на дефектах его кристаллической структуры (дислокациях).

В этом случае материал отливки, не изменяя своей прочности на разрыв, становится более пластичным и характеризуется понижением величины предела его текучести при увеличении пластических свойств.

В результате математической обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость между содержанием в сплаве Al, Fe, O, N, размером микрочерта и пределом текучести сплава при комнатной температуре (из образцов, вырезанных из элементов ЛПС), которая имеет вид:

$$\sigma_T = 400 + 4 \cdot C_{[Al]} + 850 \cdot C_{[Fe]} + 232,2 \cdot C_{[O]}^{0,41} + 1118 \cdot C_{[N]}^{1,2} - 0,903 \cdot (1/d + 1), \text{ МПа} \quad (1)$$

где  $C_{[Al]}$ ,  $C_{[Fe]}$  – содержание алюминия и железа в сплаве соответственно, % (по массе);

$d$  – размер микрочерта, см.

Зависимость между размером микрочерта в сплавах ВТ5Л(ВТ5Л-МС) и толщиной стенки  $\square$  плоской отливки, получаемой литьём по выплавляемым моделям, имеет вид:

$$d = -0,00008 \cdot \square^3 + 0,0021 \cdot \square^2 - 0,0047 \cdot \square - 0,0001, \text{ мм.} \quad (2)$$

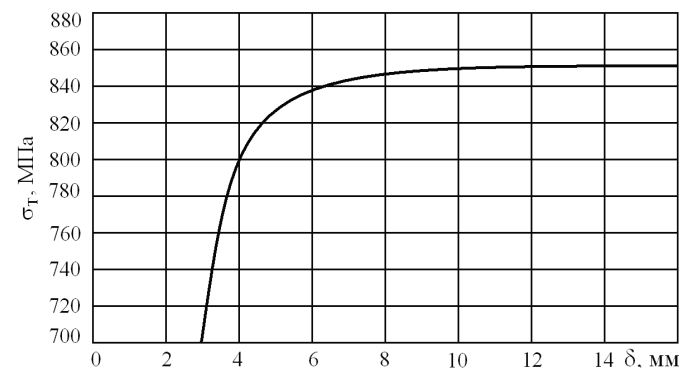


Рис. 1. Зависимость  $\sigma_T=f(\delta)$

Возможно можно рассчитать зависимость  $\sigma_T=f(\delta)$  для плоских отливок с толщиной стенок от 3 до 15 мм. В качестве примера, на рис. 1 представлена зависимость  $\sigma_T=f(\delta)$  для плоских отливок из сплава ВТ5Л-МС при содержании в нём Al=5,5%, Fe=0,10%, O=0,13%, N= 0,05%.

Используя формулы (1) и (2) с достаточно высокой степенью точности можно прогнозировать величину предела текучести сплава ВТ5Л (ВТ5Л-МС) в отливках, и, соответственно, проводить научно-обоснованный выбор содержания наиболее опасных примесей в исходном сплаве, для получения отливок с заданным уровнем свойств, надёжности и долговечности. Кроме

этого, полученные формулы позволяют оценить влияние того или иного входящего в них параметра на показатель  $\sigma_T$ . С использованием формул (1) и (2) построены зависимости  $\sigma_T = f(d)$  и  $\sigma_T = f(C_{[Al]}, C_{[Fe]}, C_{[O]}, C_{[N]})$  при содержании в сплаве  $C_{[Al]} = 5,5\%$ ,  $C_{[Fe]} = 0,10\%$ ,  $C_{[O]} = 0,13\%$ ,  $C_{[N]} = 0,02\%$  и  $d = 1,3$  мм.

Результаты проведенных исследований являются косвенным подтверждением описанной выше гипотезы о перераспределении веществ-примесей внедрения (O, N) между дислокациями внутри зерна и на межзёренной границе в титановых сплавах и их влияние на величину предела текучести. Приведенные формулы были получены для плоских отливок, полубесконечных в тепловом отношении, поэтому, заменяя реальную стенку или элемент отливки стенкой эквивалентной ей в тепловом отношении, несложно считать некоторые прочностные и пластические свойства сплава в каждом конкретном элементе отливки. Данную информацию целесообразно использовать для выявления наиболее “узкого звена” в конструкции отливки и, соответственно, рассчитать требуемый химический состав расходуемого электрода вакуумно-дуговой гарнисажной печи с целью обеспечения требуемого уровня предела текучести и пластических свойств той или иной отливки или её элемента.

#### Список литературы

1. Коттрелл А. Х. Атомный механизм разрушения. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 33 с.
2. Полетика И. М. Межкристаллитная адсорбция примесей и разрушение металлов. – Новосибирск: Наука, Сиб. Отд-ние, 1988. - 127 с.
3. Мак Лин Д. Границы зёрен в металлах. М.: Metallurgiya, 1960. – 323 с.

УДК 621.74

*Н. В. Игнатов, Е. Е. Вылупко*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ**

Современная ситуация в обеспечении агломерационного процесса шихтовыми материалами характеризуется возрастающим удельным расходом тонкодисперсных и железосодержащих составляющих. С увеличением в шихте доли тонкоизмельченных компонентов роль окомкования в интенсификации процесса спекания становится определяющей.

Установившаяся тенденция повышения содержания тонкодисперсных

составляющих в железорудной части шихты сопровождается повышением требований к качеству подготовки шихты и в особенности к окомкованию. Это привело к разработке дополнительных технологических операций подготовки тонкозернистых ингредиентов шихты – их предварительному и селективному гранулированию, а в некоторых случаях, просто агрегированию в машинах и аппаратах нового поколения. Указанные операции следует рассматривать не только как средство повышения показателей процесса традиционного спекания, но и как путь к формированию агломерационной шихты с идентичными по гранулометрическому, вещественному и химическому составу реакционными объемами и, таким образом, получению спека с равнозначными по металлургическим свойствам фрагментами из слоевых систем специальной конструкции.

Совершенствование процесса окомкования возможно двумя методами - внутреннего и внешнего воздействия: 1) внутреннего воздействия – через состав шихты, предварительной грануляцией отдельных ее компонентов, добавкой в шихту вяжущих материалов (известь, ПАВ); 2) внешнего воздействия – путем изменения аппаратного обеспечения процесса окомкования, сочетания известных окомковательных аппаратов, изменения работы существующего оборудования, применения новой техники.

Опыт показывает, что решению проблемы при традиционных схемах подготовки шихты способствует введение в ее состав до 80,0 кг/т агломерата извести – флюса и вяжущего компонента. Однако следует признать, что ориентация на повышенный расход извести скорее вынужденная мера и требует экономической оценки.

Решение проблем возможно совершенствованием технологии окомкования, техники, а также режимов работы известных окомковательных агрегатов. Тонкодисперсные материалы должны подаваться в шихту в предварительно подготовленном гранулированном виде. Повышению степени окомкования тонкодисперсных шихт способствует раздельная подача твердого топлива, применение агрегатов виброгрануляции концентрата, изменение параметров работы традиционных барабанов и тарельчатых грануляторов.

Применение в агломерационной шихте микроокатышей меняет условия ее окомкования. При смешивании мелкие классы грубозернистой части шихты накатываются на влажные гранулы концентрата, в результате известняк, возврат и топливо располагаются на поверхности гранул, либо между ними, что аналогично технологии наката топлива. Вывод частиц коксовой мелочи на поверхность гранул в фильтрующие каналы спекаемого слоя, повышает степень и эффективность использования топлива в качестве источника тепла, что сопровождается значительной экономии его.

В ходе исследований варьировали аппаратным обеспечением процесса окомкования, режимом работы окомковательных аппаратов, долей пред-

варительно гранулированной тонкодисперсной составляющей в шихте, что позволяло оценить влияние равнозначных по вещественному и химическому составу реакционных объемов на показатели процесса спекания и качество агломерата.

Экспериментальные данные показывают, что при замене агломерационной шихты на 100% гранулированную слоевую систему становится возможным ее целенаправленное физико-химическое конструирование, получение спека с регулярной блочно-ячеистой структурой в режиме агломерационного спекания и фильтрационного горения твердотопливной насадки с заданными характеристиками. Повышение в шихте доли микроокатышей от 25 до 100% сопровождается повышением производительности процесса от 0,96 до 1,43 т/м<sup>2</sup>ч, снижением расхода твердого топлива от 6,04 до 3,38%, а время спекания сокращается от 18,5 до 13,0 мин. Увеличение угла подъема разгрузочной части барабана и совмещение барабана и гранулятора позволяет повысить степень грануляции шихты и показатели процесса спекания. Удельная производительность увеличилась от 0,9 до 1,54 т/м<sup>2</sup>.час., скорость спекания возросла от 18,67 до 25,53 мм/мин, выход годного увеличился от 64,88 до 71,76%.

Приведенные результаты показали возможность совершенствования процессов окомкования, повышения газопроницаемости агломерационной шихты и удельной производительности процесса за счет ввода в шихту вяжущих добавок, предварительного гранулирования тонкодисперсных составляющих, совершенствования аппаратурного обеспечения и режима его работы.

УДК 669.14.018

*А. Ю. Калашикова, Л. Х. Иванова*

*Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ*

### **РОЗРОБКА СКЛАДУ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З ВИСОКОЮ УДАРСТІЙКІСТЮ**

Метою дослідження було визначення комплексу модифікувальних елементів для одержання високоміцного чавуну з підвищеною ударостійкістю.

Відомо, що вплив окремих елементів на структуру і властивості чавуну дуже різноманітний, і так само є багато додаткових факторів, які можуть змінювати вплив того або іншого елементу. Змінний якісний і кількісний вплив різних елементів на структуроутворення сплавів ускладнює

можливість їхньої класифікації за ознакою інтенсивності цього впливу, тим більше, що в багатьох випадках, наявність у сплаві двох, наприклад, карбідоутворюючих елементів не обов'язково посилює їх окремий вплив, а іноді нівелює його. Тому задача з підбирання модифікувального комплексу, зводилася до того, щоб нейтралізувати небажаний вплив окремих елементів і посилити їх спільний вплив.

Експериментальні плавки проводили в індукційній печі з кислотофутеровкою, вага шихти 40 кг. Після розплавлення шихти потужність печі знижували до 30-40% від максимальної, зчищували шлак періоду плавлення, заміряли температуру та вводили гафній у вигляді гафнієвої лігатури такого складу, мас. %: гафній 90, залізо решта. Модифікування робили таким чином: модифікувальні елементи (церій, лантан) вводили у ківш перед випуском металу у вигляді лантан-церієвої лігатури такого складу, мас. %: лантан 8...10; церій 10...15; вуглець 0,3...0,5; кальцій 0,4...0,5; кремній 40...45; залізо решта. При температурі 1500±5°C чавун випускали у ківш з необхідною наважкою модифікаторів та при досягненні температури 1330...1340°C заливали у кокільні форми. Виливки мали розміри: 1) куля діаметром 60 мм, 2) циліндр діаметром 50 мм та висотою 200 мм. З цих виливків вирізали зразки для хімічного аналізу, металографічних досліджень, випробування границі міцності при розтягу та ударостійкості. Випробування границі міцності при розтягу проводили за стандартним методом. Випробування ударостійкості проводили за кількістю ударів до руйнування литої кулі при падінні її з висоти 6 м.

При виборі модифікаторів для подавлення виділення ледебуритної евтектики у чавуні та підвищення властивостей було прийнято до уваги, що ці модифікатори значною мірою відрізняються один від одного за хімічною активністю, модифікуючим впливом, мають різні температури плавлення, кипіння, теплоти утворення сполук та енергії Гібса. Однозначно встановлено, що, наприклад, максимальну мікротвердість цементиту та перліту дозволяє одержати модифікування лантаном, а фериту – модифікування церієм. Механізм такого впливу на теперішній час вивчено недостатньо. Комплексне модифікування вказаними модифікаторами призводить до переважного утворення оксиду  $\text{CeO}_2$ , енергія Гібса котрого значно нижча, ніж у оксидів  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Таким чином, урахувавши вищевикладене, встановили нижні границі вмісту вказаних елементів, що забезпечує подавлення виділення ледебуритної евтектики та перетворення її в пластиноподібну. За нашими даними нижні границі концентрацій модифікаторів повинні бути такими, мас. %: церій – 0,1, лантан – 0,08. Зменшення концентрацій модифікаторів (будь-якого з вказаних) нижче за границі, що рекомендуються, не дозволяє повністю одержати пластиноподібну евтектику, у структурі присутній ледебурит, який призводить до зниження міцності та ударостійкості. Верхні границі

концентрацій лантану визначали зі ступенем зростання мікротвердості карбідної фази. При концентраціях 0,1% лантану мікротвердість карбідної фази була максимальною. Подальше збільшення вмісту цього елемента призводило до утворення великої кількості неметалевих включень, які зменшували міцність чавуну. Ураховуючи, що церій у першу чергу витрачається на рафінування розплаву розраховували максимально необхідні його вмісти, а потім за ступенем зростання мікротвердості матриці визначали максимальну його концентрацію. При вмістах 0,15% церію (в комплексі з 0,1% лантану) мікротвердість матриці була максимальною. У запропонованому чавуні гафній виявляв перлітоутворюючий вплив на структуру металеві матриці та підвищував дисперсність перліту, за цього збільшувалися показники міцності та ударостійкості. При вмістах гафнію менше за 0,05% цей вплив був незначний, підвищення ж вмісту вище за 1,0% призводило до зменшення міцностних властивостей. Слід відмітити, що ступінь модифікуючого впливу індивідуальних елементів-модифікаторів, що розглянуто, значною мірою зростає при комплексному використанні та у більшості випадків модифікування індивідуальним елементом-модифікатором не дозволяє досягти результатів, що були одержані при комплексному модифікуванню.

В результаті проведених досліджень обраний модифікувальний комплекс значно поліпшує структуру та фізико-механічні властивості чавуну: збільшується дисперсність перліту з ПД1,0 до ПД0,5 та ПД0,3, ударостійкість досягає 25-29 разів, а міцність  $\sigma_B^{612} - 735-760$  МПа.

УДК 621.74

*Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

#### **РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ОКАТЫШЕЙ**

Для производимых в настоящее время окисленных окатышей характерен целый ряд недостатков, делающих их неконкурентноспособными с агломератом: низкая основность, сегрегация при загрузке в доменную печь, сравнительно низкие свойства при восстановлении в нижней части доменной печи, связанные с усадкой и низкой газопроницаемостью слоя.

Все разработанные до настоящего времени технологии получения углеродсодержащих материалов включали обжиг рудоугольных брикетов или окатышей в нейтральной или восстановительной атмосфере. Применительно

к типовым конвейерным обжиговым машинам это связано с потерей производительности. Ни одна из них не получила распространения. Поиск путей улучшения качества железорудных окатышей привел к техническому решению производства в промышленных условиях самовосстанавливающихся материалов, использование которых в доменной плавке снижает расход кокса и повышает производительность доменной печи.

В Украине существует большой парк обжиговых машин, характеризующихся сравнительной простотой конструкции и технологии получения на них окатышей. Существует также принципиальная возможность перевода этих обжиговых машин на технологии производства окатышей из шихт с добавкой твердого топлива. Обжиговая машина может служить базовым агрегатом для производства самовосстанавливающихся окатышей. Теоретические основы этой технологии включают решение задач, связанных с динамикой тепло-массообменных процессов в слое железорудных окатышей, содержащих углерод. Цель работы заключалась в разработке и оптимизации технологии получения самовосстанавливающихся окатышей и определении их металлургических свойств. Задача совершенствования технологии производства самовосстанавливающихся окатышей сводится к поиску связи между выходными технологическими параметрами и входными параметрами, воздействующими на технологию.

Кинетика нагрева и охлаждения углеродсодержащих окатышей показывает, что с увеличением массовой доли углерода скорость нагрева обратно, а скорость охлаждения прямо пропорциональны ее величине, что объясняется протеканием эндотермических восстановительных реакций, а также теплоемкостями концентрата и коксика.

Для получения самовосстанавливающихся окатышей необходимо, чтобы время термообработки окатышей в диапазоне температур воспламенения и горения углерода было меньше времени полного его «выгорания». Выполнением требования сокращения времени термообработки верхней части слоя было обусловлено прекращение подачи природного газа, что позволило уменьшить время термообработки почти в 2 раза.

Обычный способ охлаждения атмосферным воздухом может привести к дополнительному разогреву слоя за счет горения углерода, что снижает его массовую долю в готовых окатышах и приводит к плавлению слоя. Во избежание этого был теоретически обоснован и практически осуществлен на аглочаше способ охлаждения окатышей, значительно снижающий указанные негативные явления. В результате ступенчатого охлаждения в структуре окатышей сохраняется необходимая массовая доля углерода и достигается высокая степень предварительного восстановления при достаточной прочности окатышей.

Структура самовосстанавливающегося окатыша состоит из четко выра-

женных зон: периферии, переходной зоны и центральной части, различающихся по минералогическому составу и структуре.

Окатыши характеризуются высокой пористостью, что в условиях высокотемпературной обработки в доменной печи приведет к интенсификации процессов восстановления оксидов железа.

На основании проведенного минералогического анализа можно сделать следующие выводы:

- при определенных условиях температурно-тепловой обработки возможно сохранить определенное количество углерода в структуре окатыша, что характеризует его, как самовосстанавливающийся железосодержащий окускованный продукт;

- выгорание углерода и использование его восстановительного потенциала происходит зонально. Это определяется распределением углерода по сечению образца. Центральная часть содержит 21,1% по объему, а в переходной зоне сосредоточено 10,1% остаточного углерода. В периферийной зоне топливо отсутствует.

Длительность термообработки рудугольных окатышей и связанная с ней степень окисления углерода определяются достижением заданных температур в нижнем слое окатышей, обусловленных уровнем максимальных температур в горне и скоростью фильтрации теплоносителя. Сократить продолжительность термообработки можно снижением высоты слоя, увеличением скорости фильтрации газа-теплоносителя.

Для сохранения остаточного углерода необходимо стремиться также к увеличению диаметра окатышей, содержания углерода в них и снижению кислорода в газовой фазе.

УДК 621.74

*Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО УГЛЕРОДА В ОКАТЫШАХ В УСЛОВИЯХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНО-ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ**

Возросшие потребности всех отраслей народного хозяйства в металлопродукции в последние годы поставили перед металлургами задачи по повышению объема производства металла и улучшению его служебных свойств. В значительной степени решение этой задачи сдерживается повышенным расходом кокса на вылавку чугуна в доменной печи и связанные с этим проблемы качества металла и экологической обстановки. Анализ многочисленных публикаций свидетельствует, что выполненные исследования направлены на совершенствование уже известных энергосберегающих технологий, в частности, вдувание пылеугольного топлива, повышение содержания железа в концентрате, улучшение гранулометрического состава агломерата и окатышей. Каждое техническое решение, научный поиск в области снижения расхода кокса на выплавку чугуна позволяет решить на определенном уровне задачу энергосбережения в металлургии. Установлен предельный расход кокса с учетом научно-технических достижений в доменном производстве.

Расход кокса в значительной мере, как уже отмечалось, регламентируется технологией доменной плавки, составом и свойствами окускованного сырья. В процессе подготовки металлургического сырья к доменной плавке не всегда удается получить гарантированные показатели качества, обеспечивающие низкий расход кокса.

Выполненные в различные годы теоретические и экспериментальные исследования по использованию в доменной плавке металлизированных железорудных материалов с различной степенью металлизации (вплоть до 100%) позволили сделать вывод о возможности их эффективного применения. В ряде работ отечественных и зарубежных авторов отмечалось, что достигаемая при этом экономия кокса составляет от 4 до 8 %, а рост производительности доменной печи – от 1,5 до 10 % на каждые 10 % металлизации шихты. В свое время эти данные обобщил и проанализировал А.Н.Рамм.

Основным фактором, препятствующим до настоящего времени широкому использованию в доменной плавке металлизированных материалов, является достаточно высокая их стоимость, и, как следствие - экономическая нецелесообразность их применения. Это обусловлено, прежде всего, высокими энергетическими затратами, характерными для известных процессов твердо- и жидкофазного восстановления.

Альтернативным решением, заслуживающим дальнейшего развития,

может быть загрузка в доменную печь окискованных материалов, содержащих остаточный углерод. В большей степени это относится к железорудным окатышам, произведенным с добавкой твердого топлива. В этих окатышах остаточный углерод сосредоточен, в основном, в центральной зоне.

Моделирование и анализ поведения железорудных материалов с остаточным углеродом, в частности окатышей, при восстановительно-тепловой обработке в доменной печи, показывают их очевидные преимущества. В верхней части шахты доменной печи эти материалы, обладая достаточно развитой поверхностью, интенсивно восстанавливаются. По мере их опускания и нагрева до температур около 900° получают развитие процессы восстановления за счет «собственного» углерода, в то время как восстановление обычных окисленных материалов в тех же условиях останавливается на стадии вюстита.

Одновременное восстановление оксидов железа твердым углеродом и восстановительным газом называется комплексным восстановлением. Кинетика комплексного восстановления и доли участия в нем различных газов и углерода определяются температурой, составом газа, реакционной способностью и содержанием углерода, степенью совершенства контакта углерода и оксидов железа, а также минералогическим составом.

Проведены сравнительные исследования окатышей с остаточным углеродом и окисленных окатышей. Преимущество углеродсодержащих окатышей по сравнению с окисленными заключается в их более высокой степени восстановления и металлизации. Так при испытаниях по ДСТУ 3202-95 степень восстановления возросла на 13,49%, а степень металлизации на 19,42% при степени использования углерода 67%. Аналогичные результаты получены и при испытании по ДСТУ 3205-95, где при полном использовании углерода степень восстановления возросла на 5,56%, а степень металлизации на 10,22%. Улучшению этих показателей способствовали увеличение содержания углерода и пористости. Дополнительными экспериментами установлено, что при увеличении пористости и содержания углерода на 1%, степень комплексного восстановления увеличивается на 0,84% и 7,87% соответственно. Это вдвое снизило выход первичного шлака с 17% до 9%, а также значительно улучшило высокотемпературные характеристики опытных окатышей. Результаты испытаний показали, что температуры начала образования жидкости и формирования первичного шлака поднялись на 600С, а температура капельного течения и образования жидкости на 40°С.

УДК 621.74

*Д. А. Ковалёв, Н. Д. Ванюкова, А. Ю. Худяков, М. Н. Бойко*  
*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### **АНАЛИЗ РАБОТЫ ОБЖИГОВОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЖИМА ИНТЕНСИВНОЙ СУШКИ**

С помощью динамической математической модели обжига железорудных окатышей, проведено исследование по отработке эффективного высокотемпературного режима сушки, осуществлено сравнение особенностей и результатов работы зоны сушки в базовом и опытном высокотемпературном режимах. Анализировали влияние режима сушки на прочность окатышей, содержание FeO, распределение температур по высоте слоя и производительность обжиговой машины. В качестве объекта для исследований была выбрана обжиговая машина ОК-1-520, как наиболее современная из используемых в настоящее время и отвечающая большинству требований, которые предъявляются к обжиговым агрегатам конвейерного типа.

Используемая для исследования динамическая математическая модель, основана на описании реальных физико-химических и тепловых механизмов, вовлеченных в процесс обжига окатышей. Превращения в этой системе анализируются из позиций кинетики, основанной на кинетических уравнениях. Для общего случая топохимического реагирования модель массопереноса включает химическое взаимодействие и диффузию газового компонента в пограничной пленке и через пористый слой продукта реагирования.

В общем виде модель представлена следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{H_2O} \rho_{ок} (1-\xi) \frac{\partial W_{H_2O}}{\partial \tau} - \alpha_v (t_{ок} - t_{исп}), \\ \rho_{ок} (1-\xi) C_{ок} \frac{\partial t_{ок}}{\partial \tau} - \alpha_v (t_2 - t_{ок}) + Q_1 - Q_2 + Q_3, \\ \rho_2 C_2 W_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} = - \alpha_v (t_{ок} - t_2) \end{array} \right. \quad (1)$$

где:  $\rho_{ок}$  - плотность концентрата;  $\xi$  - пористость слоя окатышей;  $t_{ок}$  - температура обжиги;  $\tau$  - время;  $\alpha_v$  - коэффициент теплопроводности (от газа к окатышам);  $t_2$  - температура газа;  $Q_1$  - теплота окисления магнетита;  $Q_2$  - теплота разложения известняка;  $Q_3$  - теплота окисления углерода.

Для описания физико-химических процессов окисления магнетита, окисления углерода, диссоциации известняка применяются соответствующие частные модели этих процессов.

Решение системы (1) проводилось методом конечных разностей по явной схеме.

Для определения прочности обожженных окатышей на сжатие используется математическая модель, которая включает частные подмодели для определения влияния на процесс упрочнения: химического состава исходных окатышей – через использования показателей основности  $\text{CaO/SiO}_2$ , глиноземного  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  и магнезиального  $\text{MgO/SiO}_2$  модулей; динамики нагрева окатышей; температуры обжига; диаметра окатышей.

Между базовым и опытным периодами установлены следующие различия:

Базовый период: температура в зоне сушки 1 (1а,1,2,3,4 вакуум-камеры) – 350 °С, скорость газа – 1,2 м/с (движение газа снизу вверх); температура в зоне сушке 2 (5,6 вакуум-камеры) – 450 °С, скорость газа – 1,2 м/с (движение газа сверху вниз).

Опытный период: температура в зоне сушки 1 (1а,1,2,3 вакуум-камеры) – 350 оС, скорость газа – 1,2 м/с (движение газа снизу вверх); температура в зоне сушки 1 (4-я вакуум-камера) – 500 °С, скорость газа – 0,6 м/с (движение газа снизу вверх); температура в зоне сушке 2 (5-я вакуум-камера) – 800 °С, скорость газа – 0,7 м/с (движение газа сверху вниз); температура в зоне сушке 2 (6-я вакуум-камера) – 1000 °С, скорость газа – 0,85 м/с (движение газа сверху вниз).

Также в опытном периоде температура в зоне подогрева составляла 1100 °С.

В обоих периодах: высота слоя окатышей - 0,3 м, диаметр окатышей - 15 мм, содержание кремнезема - 7,56%, известняка - 5%, бентонита - 0,5%.

При моделировании опытного периода изменяли скорость движения обжиговых тележек, подбирая ее таким образом, чтобы влагосодержание окатышей на входе в зону подогрева было не выше, чем при базовом периоде.

В результате проведенного моделирования установлено, что сушка окатышей в опытном высокотемпературном режиме, по сравнению с базовым, дает следующие преимущества:

- позволяет осуществить окисление слоя окатышей приблизительно на 50%, в то время как в базовом режиме значительного окисления не происходит;
- обеспечивает более благоприятный, по сравнению с базовым режимом, прогрев слоя, чем осуществляет подготовку для перехода к зоне подогрева и дает возможность повысить температуру в зоне подогрева до 1100°С;
- способствует определенному улучшению качества конечного продукта: прочность на сжатие обожженных окатышей в опытном периоде, в сравнении с базовым, выросла в среднем по высоте слоя на 5,44-5,58%;
- повышает производительность обжиговой конвейерной машины на 6,56%.

УДК 621.74

*Д. А. Ковалёв, А. П. Поповская, Н. Д. Ванюкова, М. В. Ягольник*  
Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

### **РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ БРИКЕТОВ МЕТОДОМ ВИБРОПРЕССОВАНИЯ**

Черная металлургия относится к тем отраслям промышленности, влияние которых на окружающую среду значительно, в том числе из-за огромного количества образующихся отходов. Производство брикетов из отходов металлургических предприятий является одним из наиболее актуальных направлений подготовки сырья для металлургических переделов.

Проведено исследование влияния влажности шихты на холодную прочность брикетов полученных методом вибропрессования. В качестве исходных материалов применяли: прокатную окалину и цемент М 400. Гранулометрический состав окалины был выбран, как отношение крупной фракции (1 – 5 мм) к мелкой (0 – 1 мм) соответственно 70 % : 30 %. При таком соотношении наиболее оптимальна порозность материала, т.к. крупное зерно окалины окружено мелкими зёрнами. Влажность шихты варьировали от 4 до 9 %. В частности при исследовании формирования холодной прочности брикета на цементной связке, важно установить зависимость прочности брикетов от влажности шихты, продолжительности выдержки сырых брикетов, а также роль подпрессовки шихты в пресс-форме. При подготовке шихтовые материалы дозировали (по весу): окалины 90 %, цемента 10 %, смешивали в сухом виде, увлажняли и смешивали во влажном состоянии.

Брикеты изготавливали на лабораторном вибростоле в цилиндрической пресс-форме (высотой 52 мм и диаметром 36 мм). Перед загрузкой шихты форму смазывали солидолом, для предотвращения взаимодействия цементной связки со стенками пресс-формы. Уплотнение смеси производилось воздействием вибрации с частотой 50 Гц и амплитудой колебания 0,35 мм, а также серия экспериментов с одновременным воздействием нагрузки сверху (0,027 МПа) при аналогичных условиях.

После вибростола брикеты находились в пресс-форме в течение 1 суток. Далее брикеты вынимали из формы, после чего они набирали прочность в обычных условиях ( $t = 20^\circ\text{C}$  и  $P = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ ) на протяжении 28 суток.

Порошок портландцемента, состоящий из мономинеральных, полиминеральных частиц и силикатов кальция, активно взаимодействует с водой сразу же при смешивании. Определенную роль в прочности брикета играет то, что гидратация цемента протекает благоприятно и достаточно полно лишь при некотором избытке воды по сравнению с тем количеством, которое необходимо для гидратации цемента. Уменьшение этого избытка ниже определенных пределов влечет за собой неполноту гидратации и, следова-

тельно, понижение прочности брикета. При низком содержании воды 4 % смесь была практически сухой, и брикет ломался во время извлечения его из пресс-формы.

Большое количество влаги 9 % также отрицательно влияет на прочность брикетов. Избыточная вода, не вступающая в химическую реакцию с цементом, остается или испаряется, оставляя на своих местах поры.

Одновременное воздействие вибрации и приложения нагрузки формирует более уплотненную структуру брикета. Высота брикета уменьшалась на 5 мм, а объем на 12,6 %. Приложение нагрузки снижает количество пустот в брикете, что положительно влияет на прочность брикета.

Максимальная прочность лабораторных брикетов была достигнута с влажности шихты 7 % при воздействии на шихту только вибрации и составила 4,36 МПа. При аналогичных условиях с приложенной нагрузкой прочность брикета достигла 5,78 МПа, при влажности шихты 6 %.

Таким образом, при разработке новой технологии получения брикетов методом вибропрессования осуществлены:

- разработка методики исследования, основным новшеством которой было использование заданного гранулометрического состава шихты (отношение крупной фракции окалины к мелкой составляло 70 % к 30 %);

- экспериментальное исследование влияние влажности шихты на прочность брикетов полученных с добавлением цемента методом вибропрессования;

- анализ полученных результатов, который свидетельствует о том, что максимальная холодная прочность лабораторных брикетов составила 5,78 МПа при влажности шихты 6 %.

В дальнейшем для усовершенствования предложенной технологии был осуществлен пятифакторный план эксперимента, где в качестве факторов были использованы: влажность шихты, доля крупной фракции окалины, нагрузка сверху, содержание цемента в шихте и работа активации. Было проанализировано влияние приведенных выше факторов на металлургические свойства брикетов, в частности на прочность брикетов в холодном состоянии, пористость, восстановимость.

УДК 669.18:669.89:548.7

*Д. С. Козак, В. Б. Бубликов, Л. А. Зеленая*  
*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,*  
*Киев*

### **СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИЛИКОКАЛЬЦИЕМ**

Сплавы, в которых графитная фаза выделяется в процессе кристаллизации, характеризуются малой усадкой и, соответственно, не склонны к трещинообразованию. Варьирование формой графитных включений (пластинчатая, вермикулярная, компактная, шаровидная) и структурой металлической основы (ферритная, перлитная, бейнитная, мартенситная, аустенитная) обеспечивает многообразное сочетание механических и служебных свойств этих сплавов и их марок.

К таким сплавам относятся не только чугуны, но и заэвтектоидные графитизированные стали с содержанием углерода 1,3-2,0%.

Целью данной работы являлась изучение особенностей структурообразования заэвтектоидной стали, модифицированной силикокальцием СК25. Для анализа структуры из каждой плавки в сырых песчано-глинистых формах отливали три типоразмера клиновидных проб толщиной 5; 10 и 15 мм. Химический состав исследуемых сталей находился в следующих пределах (мас.%): 1,40-1,75C; 1,70-2,70Si; 0,10-0,30Mn; 0,03-0,10Cr; 0,008-0,04S; 0,035-0,05P.

В результате проведенных экспериментов, определены основные закономерности и характерные особенности модифицирования заэвтектоидной стали силикокальцием СК25. Установлено, что сфероидизирующее действие силикокальция СК25 проявляется при выполнении следующих условий: содержание углерода в стали должно находиться в пределах 1,4-1,7% и соотношение Si/C = 1,5-2,2. Так, при низком содержании серы (0,008%) получена графитизированная сталь с шаровидным графитом (ШГф4; ШГф5) с феррито-перлитной металлической основой и твердостью 204-210 НВ.

УДК 621.74:669.131.622

*А. А. Кондрат, В. Т. Калинин**Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### ПРИМЕНЕНИЕ БРИКЕТИРОВАННЫХ УЛЬТРА- И НАНОДИСПЕРСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ОТЛИВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Выход из строя крупных деталей металлургического оборудования обусловлен литейными дефектами и, прежде всего, неудовлетворительной макроструктурой чугуна. Одним из перспективных способов, позволяющих повысить качество массивных отливок, является графитизирующее и инокулирующее модифицирование ультра- и нанодисперсными материалами. Это направление позволяет качественно изменить технологию модифицирования: сократить требуемое количество модификатора, повысить эффективность и полноту протекания процессов в объеме расплава. Устранение этих недостатков путем создания комплексных ультра- и нанодисперсных модификаторов позволит обеспечить изменения в строении жидких расплавов, дисперсности структуры и повысить свойства отливок.

Ультра- и нанодисперсные модификаторы TiCN и SiC наиболее приемлемые для инокулирующей и графитизирующей обработки чугунных расплавов, получают на специальных высокочастотных установках методом плазмохимического синтеза. Важнейшей задачей в процессе получения порошков является сохранения чистой неокисленной поверхности, обеспечивающей большую адсорбционную активность частиц, что достигается путем их плакирования после плазмохимического синтеза. В этом случае введенные в расплав частицы с учетом других требований – соразмерности их с критическим радиусом зародыша, соответствия кристаллической решетки частиц модификатора с решеткой кристаллизующейся фазы – будут играть роль дополнительных активных центров кристаллизации и значительно измельчать структуру чугуна.

Для отливки сталеразливочных изложниц разработана технология обработки чугунного расплава брикетированным комплексным модификатором на основе TiCN и SiC (рис. 1), включающая оптимизацию состава модификатора, определение оптимального способа ввода брикетов в ковш, установление термовременных параметров плавки и заливки расплава в форму. Состав комплексного модификатора [1] следующий, %:

- нанодисперсный (< 0,1 мкм) TiCN – 25-35
- ультрадисперсный (0,1...1,0 мкм) SiC – 15-25
- чугунная стружка (< 0,5 мм) – остальное



Рис. 1. Внешний вид брикетов

Смешивание порошков и чугунной стружки производится в атриторе (смесителе), прессование – на гидравлическом прессе в пресс-форме.

Для отливки прокатных валков разработана технология инокулирующей обработки чугунного расплава брикетированным нанодисперсным модификатором на основе TiCN следующего состава, %:

- нанодисперсный порошок TiCN - 25-23
- порошок селена – 30-40
- чугунная стружка – остальное

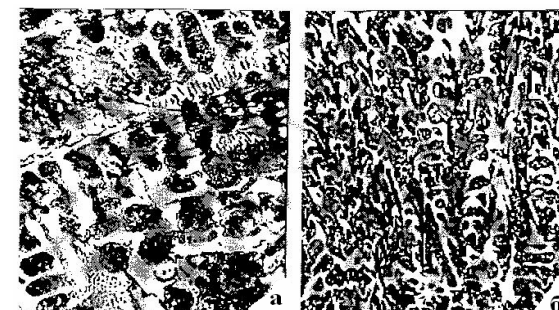


Рис. 2. Микроструктура чугуна рабочего слоя двухслойных валков, x100:

- а) немодифицированного,
- б) модифицированного брикетами на основе TiCN

Расход модификатора при литье прокатных валков и изложниц составляет 0,5...1,0 кг на тонну чугуна.

Разработанные модификаторы, растворяясь в чугунных расплавах, равномерно распределяются в объеме ковша при выпуске чугуна из печи, что позволяет с минимальными потерями вводить необходимое его количество и измельчать структуру чугуна, например, в рабочем слое двухслойных листов прокатных валков (рис. 2).

Разработанные технологии отливки деталей металлургического оборудования опробованы и освоены на предприятиях Украины [2-3].

#### Литература

Пат. 54846 Украина, МПК С22С 35/00. Брикетированный модификатор для обработки чугуна / В. Т. Калинин, А. А. Кондрат от 25.11.2010 г.

Калинин В. Т., Кондрат А. А. Прогнозирование эффективности различных типов модификаторов при обработке чугунов // Процессы литья. – 2010. - № 6. – С. 14-19.

Калинин В. Т., Кондрат А. А. Роль тугоплавких наночастиц в модифицирующих процессах при кристаллизации чугунных отливок // Металлознание и термическая обработка металлов, 2009. - № 1 (44). – С. 14–20.  
УДК 621.743.669.713

*Ф. М. Котлярский, И. В. Хвостенко*

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

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ**

Фасонные и крупногабаритные отливки обычно получают либо в песчаных (в том числе оболочковых, керамических) зачастую нагретых формах, либо в окрашенных кокилях с рабочей температурой 250–400°C. Копировать эти условия при получении заготовок на механические свойства не просто: как в плане технологии, так и оборудования.

Проще воспользоваться предлагаемой комбинированной формой, сочетающей металлическую оболочку (листовая сталь) с дисперсной засыпкой. Изменяя толщину оболочки и материал засыпки (асбест, песок, металлическая дробь), можно в широких пределах изменять интенсивность затвердевания расплава без нагрева формы в исходном состоянии. Форма проста по конструкции и удобна в обслуживании.

В данной работе с использованием такой формы исследовали влияние наводороживания (2 мин влажным асбестом), модифицирования стронцием (0,07%) и перегрева расплава на пористость и механические свойства (разрывные образцы диаметром 10 мм) вторичного сплава АК9, затвердевающего с интенсивностью на уровне песчаной формы, в зависимости от выдержки после обработки. Для этого толщина стальной оболочки составляла 1,3 мм, а в качестве засыпки был сухой кварцевый песок.

Проведено четыре эксперимента: 1 – наводороживание расплава влажным асбестом 2 мин при 615±5°C; 2 - то же при 710±5°C; 3 – наводороживание и

модифицирование стронцием (0,07%) при 745±10°C;

4 - наводороживание переplava после эксперимента 3 при 620-625°C.

Судя по полученным данным, наводороживание слабоперегретого расплава повышает пористость примерно в 2,5 раза по сравнению с необработанным и удерживает это значение (~2%) при выдержке после обработки более 2,5 часов. После аналогичной операции с тем же расплавом при 710°C пористость также повышается в 2,5-3 раза по сравнению с необработанным при малых выдержках, однако после 40 мин она начинает практически линейно снижаться и при выдержке 160 мин уравнивается с пористостью слабоперегретого расплава.

Дополнение наводороживания модифицированием стронцием слабоперегретого расплава (620°C) отличается от немодифицированного, в основном, только существенным повышением пористости литого металла при малых выдержках. Интересно, что после выдержки 160 мин значения пористости различных экспериментов приходят в одну точку.

Переходя к механическим свойствам, следует отметить, что характер изменения прочности и пластичности не просто логически увязать с характером кривых изменения пористости. Величина этих показателей не зависит от выдержки и тех факторов, на которые она влияет, включая пористость. Полученный из слабоперегретого расплава металл с меньшей пористостью соответствовал ГОСТ 2685-75, согласно которому для сплава АЛ4 без термообработки  $\sigma_B=147$  МПа,  $\delta=2\%$ . Причем, роль модифицирования практически не проявляется. И хотя литой металл после обработки расплава потерял ~8% прочности, зато приобрел значительную газовую пористость (особенно наводороженный и модифицированный после малой выдержки – 3,5%), которая может быть эффективно использована для компенсации усадки затвердевания фасонных и крупногабаритных отливок, формирующихся в условиях недостаточного питания.

Расплав с повышенным перегревом дал металл с показателями несколько ниже гостовских, хотя следует отметить, что пластичность модифицированного сплава оказалась наиболее стабильно высокой (~2,6%) для всех интервалов выдержки.

УДК 621.74

*В. П. Кравченко, В. С. Дорошенко**Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев***КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И МНОЖЕСТВО (ОБЛАСТЬ) ВОРОНОГО**

Рассматривая процесс кристаллизации с точки зрения топологии, в частности, процесс образования из жидкого металла кристаллического тела отливки в литейной форме, аппроксимируем область кристаллизации металла, идентифицируя ее областью Вороного. Область Вороного - это, в общем случае, область  $n$ -мерного пространства, а в нашем случае – трехмерное пространство в полости литейной формы. Понятие такой области было введено Г.Ф. Вороным в 1908 г. в связи с исследованием задач топологии о параллелоэдрах. Параллелоэдры, которые являются выпуклыми многогранниками, рассматриваются как тела, параллельным переносом которых можно заполнить все пространство, в нашем случае трехмерное пространство литейной формы, причем так, что бы они (параллелоэдры) не входили друг в друга и не оставляли между собой пустот, что происходит при кристаллизации жидкого металла. Разбивая пространство литейной формы совокупностью параллелоэдров, его можно полностью заполнить этими параллелоэдрами в процессе математического моделирования кристаллизации отливки с помощью области Вороного как одного из методов вычислительной геометрии. Рост отдельного кристалла можно рассмотреть по аналогии с решением задачи поиска ближайшего соседа и такой образной трактовкой метода Вороного: «нечто расширяется в пространстве до тех пор, пока не соприкоснется с расширением себе подобного».

Если параллелоэдры разбиения пространства литейной формы смежные своими гранями, то такое разбиение называется нормальным. Центры параллелоэдров такого разбиения образуют некоторую решетку, т.е. определенную совокупность всех точек с целыми координатами относительно некоторой декартовой системы координат, связанной с пространством объема литейной формы. Множество точек пространства литейной формы, таких, что каждая из которых находится от некоторой данной т. О рассматриваемой решетки  $E$  не дальше, чем от всякой другой точки этой решетки и определяет собой область Вороного  $G_{OE}$ . Таким образом, область  $G_{OE}$  является выпуклым многогранником с центром в точке  $O$ . Совокупность (множество) таких областей Вороного всех точек произвольной решетки образуют нормальное разбиение пространства литейной формы. Центры всей совокупности множеств областей Вороного представляют собой центры кристаллизации жидкого металла в пространстве литейной формы. Важное свойство области Вороного - то, что всякое движение, переводящее в себя решетку  $E$  и

оставляющее на месте ее точку  $O$ , преобразует в себя область  $G_{OE}$  и обратно. Групп таких движений 7: группа кубическая, квадратная (тетрагональная), ортогональная (ромбовидная), моноклинная, триклинная и гексагональная.

По этим топологическим движениям и происходит процесс кристаллизации расплава металла с образованием кристаллографических многогранников. Каждая из семи топологических групп процесса кристаллизации имеет свои подгруппы, которые называются кристаллографическими классами. Если взять плоскость, не проходящую через т.  $O$  и подвергнуть эту плоскость всем поворотам, какого-нибудь кристаллографического класса, то полученные плоскости ограничивают, либо некоторый изоэдр с центром в т.  $O$ , либо бесконечно выпуклое призматическое тело. Полученные тела называются простыми формами кристаллов, по которым и происходит процесс кристаллизации расплава металла. Согласно теореме единственности Минковского, выпуклый многогранник, в частности, параллелоэдр, вполне определяет заданность топологии процесса образования кристаллов из расплава металла.

В теории литейных процессов множество Вороного можно использовать не только в механике жидкости и кристаллохимическом анализе, но и как математический инструмент для описания структурообразования пенопластовых моделей спеканием из гранул или литья ледяных моделей, уплотнения дисперсного наполнителя литейной формы, а также для мониторинга литейных процессов и их автоматизации.

УДК 621.745.558:669.295

*Н. Н. Кузьменко, Л. Д. Кулак, Н. И. Левицкий\*, Т. В. Лапушук\*,  
Е. А. Матвиец\***Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев  
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев\****ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ  
Ti-AL-Si**

Эффективность использования тех или иных материалов определяется многими факторами, среди которых главными являются коэффициент использования первичного сырья, затраты при получении готовых изделий и их качество. Это в полной мере относится и к материалам системы Ti-Al-Si, которая является перспективной композицией для создания жаропрочных и жаростойких титановых сплавов.

В данной работе рассмотрены возможности применения этих материалов в разных состояниях: литом, деформированном и полученных методами порошковой металлургии. Критерием оценки материала служили механические свойства в диапазоне температур от комнатной до 800°C. В качестве материала для исследования был выбран сплав Ti-5,4 Al-6,7 Si -6,0 Zr, который в литом состоянии имел прочность на растяжение 1200 МПа, а на сжатие  $\geq 1500$  МПа. При этом он сохраняет прочность на уровне 350-400 МПа вплоть до 800°C. Исходными заготовками, как для деформационной обработки, так и получения порошка являлись слитки  $\varnothing 55-60$  мм, h-400-700 мм электронно-лучевой гарнисажной плавки с заливкой в графитовую форму.

Представленные результаты свидетельствуют о возможности применения исследуемого материала в разных состояниях.

УДК 678.7: 541.64

*Ю. Ю. Ладарева, О. И. Шинский, А. И. Рыбицкий*

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

#### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИСТИРОЛЬНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ**

Одним из актуальных вопросов в наше время стоит решение экологических проблем. Одной из причин загрязнения окружающей среды являются свалки отходов, которые постоянно возрастают. Одним из видов отходов, которые накапливаются на свалках без дальнейшего применения, являются отходы полистирола.

Полистирол обладает хорошими прочностными свойствами, он используется в качестве материала для упаковки и сохранения различных видов продуктов, а также является исходным материалом для производства пенополистирола. Большое его количество также используется в литейном производстве. После разового потребления полистироловая тара выбрасывается, при этом не меняя своих свойств.

При депонировании на полигонах вместе с пищевыми отходами пластики не разлагаются, их невозможно утилизировать традиционными методами. Так как при их сжигании образуются опасные для здоровья человека и окружающей среды соединения. Не является выходом из проблемы и захоронение пластмасс в землю. При небольшом удельном весе в 5-9% отходы пластиков занимают до 25% всех отходов по объему. И это только сегодня, а потребление же их постоянно увеличивается. Лишь в Киеве собрано свыше

1000 т отходов, что занимает площадь объемом 8000 м<sup>3</sup>.

Все это послужило толчком к переработке отходов полистирола, путем получения новых связующих широкого назначения для приготовления литейных смесей, покрытий литейных форм в процессе литья черных и цветных сплавов.

Одним из видов переработки отходов пенополистирола является получение растворов путем растворения полистирола в растворителе.

Растворителями его отходов может быть растворитель растительного происхождения - живичный скипидар (ГОСТ 1571-82) [1], а также растворитель, представляющий собой смесь летучих органических жидкостей, который был добавлен к живичному скипидару в экспериментальном соотношении.

Рост эффективности общественного производства в значительной мере определяется прогрессивностью и экономичностью технических решений, которые принимаются на стадии проектирования новых процессов, конструкций, видов продукции.

Себестоимость выполнения работы, как один из важнейших экономических показателей, отображает уровень материальных и трудовых затрат, а ее планирование обеспечивает получение необходимых результатов при минимальных затратах.

Расчет стоимости смесей производился с учетом:

- фонд заработной платы формовщика – 20 % от заработной платы;
- бюджетные отчисления – 36,8 % от фонда заработной платы;
- накладные расходы – 80 % от фонда заработной платы;
- для приготовления смеси используется 20 % свежего и 80 % оборотного песка;
- прочие расходы – 20 % от связующего;
- расход электроэнергии – 50 кВт/ч работы 3 часов работы на бегунах;
- прибыль – 10 % от себестоимости;
- налог на добавочную стоимость составляет 20 % от себестоимости;

При расчете стоимости материалов необходимо учитывать их количество и прейскурантную цену.

Физико-механические свойства формовочных стержневых смесей на основе полистирольных связующих превосходят или равны аналогичным характеристикам холодно-твердеющих смесей на основе жидкого стекла, феноло-формальдегидных, карбо-фурановых смол. Это обстоятельство позволяет полагать, что полистирольные связующие, полученные из растворов отходов пенополистирола могут служить заменой вышеупомянутых связующих.

Согласно проведенным результатам технико-экономического анализа стоимости материалов для приготовления 1 тонны смеси (двух разных составов) было установлено преимущество применения смесей с связующим на основе

отходов пенополистирола по сравнению с ХТС.

Экономический эффект на одну тонну отливок при замене ХТС на полистирольное связующее на основе живичного скипидара составил 390,00 грн., при замене на полистирольное связующее на основе смеси растворителей составил 421,19 грн.

Применение полистирольных связующих позволяет решать важное задание по переработке техногенных отходов и, соответственно уменьшать эти отходы полистирола, совершенствовать качество литья путем обеспечением высококачественным связующим литейное производство Украины, и поэтому улучшать экологическую и экономическую обстановки в мире.

#### Список литературы

1. Деклараційний патент України на корисну модель № 9003 V, «Застосування живичного скипидару як розчинника для відходів пінополістиролу»./ Автори: Шинський О.Й., Терліковський Є.В., Стрюченко А.О., Шинський І.О., Ладарева Ю.Ю. Опуб. 15.09.2005., Бюл. № 9.

УДК 621.745.5: 537.525

*С. В. Ладохин, В. А. Тузык\**

*Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України,  
Київ*

*\*Національна металургічна академія України, Дніпропетровськ*

### **ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПЛАВКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУШЕК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

В последние годы в практике электронно-лучевой плавки в нашей стране все более широкое применение находят пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с холодным катодом, которые были разработаны в 70-80-х годах прошлого столетия специально для плавки газонасыщенных материалов и в свое время прошли достаточно широкую проверку при плавке различных тугоплавких металлов. Эти пушки не имеют специальных систем вакуумной откачки, поскольку способны стабильно работать при давлении до 10 Па, а удаление рабочего газа вполне надежно обеспечивается вакуумными системами установок.

Способность пушек ВТР устойчиво работать при относительно низком вакууме в плавильной камере, характерном для плавки материалов с высоким содержанием газов, сделала возможным их использование при пере-

плавке даже такого весьма газонасыщенного материала, как титановая губка. Получение слитков титана непосредственно из губки при проведении плавки в среднем вакууме стало одним из важных достижений в области электронно-лучевой металлургической технологии. При этом конструкции пушек ВТР были усовершенствованы с учетом специфических условий их эксплуатации при плавке различных металлов и сплавов.

Надежная работа пушек ВТР, продемонстрированная при переплаве титановой губки, свидетельствует о целесообразности их использования также при тигельной плавке, особенно в случаях, когда для получения литых изделий применяются отходы производства. Однако тигельная плавка в нашей стране проводится с обязательным электромагнитным перемешиванием расплава, применение которого обуславливает необходимость размещать пушку и тигель на одной вертикальной оси. В случае применения электромагнитного перемешивания в кристаллизаторе скольжения последний также будет необходимо размещать на одной вертикальной оси с пушкой. Но такого взаимного размещения пушки и обогреваемого объекта при ЭЛП стараются избегать, чтобы исключить попадания на катод и анод пушки теплового излучения с обогреваемого объекта, который находится в зоне прямой видимости с анодно-катодного узла пушки. Кроме того, при таком размещении пушки и обогреваемого объекта в анодно-катодный узел пушки будут попадать пары испаряющихся металлов и даже брызги, образующиеся при плавке.

С целью исключения негативного воздействия указанных факторов во ФТИМС НАН Украины разработана пушка ВТР, в которой лучевод выполнен в виде колена. Угол колена выбирается из условия исключения анодно-катодного узла пушки из зоны прямой видимости с обогреваемой поверхностью, а отклонение луча на требуемый угол обеспечивается катушками поворота. Катушки фокусировки луча устанавливаются на обеих частях лучевода, а катушки отклонения и сканирования луча по обогреваемой поверхности – на части лучевода, которая стыкуется с плавильной камерой.

В настоящее время работы по усовершенствованию конструкции пушек ВТР продолжаются по различным направлениям, в частности в НМетА Украины создаются пушки, которые могут функционировать как при низком, так и при высоком вакууме в плавильной камере. Низковакуумные пушки представляются незаменимыми в случаях, когда технологический процесс требует использования расплава газовыми или парогазовыми смесями, что характерно, например, для рафинирования кремния от бора. Целесообразность разработки высоковакуумных пушек ВТР обусловлена экономическими соображениями – их изготовление обходится намного дешевле в сравнении с традиционными пушками с термокатадами.

УДК 669.187.2:621.745

*Н. И. Левицкий, Е. А. Матвеев, Т. В. Лапушук, М. П. Кругленко\**  
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины  
 \*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины

### **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti-AL-Nb С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ НИОБИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО- ЛУЧЕВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКИ**

Несмотря на очевидные достоинства сплавов на основе соединения Ti<sub>2</sub>NbAl (орто-сплавы) (высокие упругие, прочностные и пластические характеристики, низкий коэффициент термического расширения, высокая жаропрочность и жаростойкость), до сих пор они практически не используются. Это связано со сложностью их металлургического производства и, в первую очередь, обеспечения высокой однородности состава слитков, учитывая значительное количество Al и Nb – элементов, резко отличающихся по своим физико-химическим свойствам.

В работе представлены результаты исследований по получению сплавов данной системы: Ti-(13-15) Al-(20-25) Nb-(1,5-2,5) Zr-(1,5-2,5) Mo и Ti-(13-15) Al-(27-30) Nb-(1,5-2,5) Zr-(1,5-2,5) Mo.

Опытные плавки проводили на установке ЭЛЛУ-4 в медном водоохлаждаемом тигле емкостью 10 дм<sup>3</sup> с электромагнитным перемешиванием расплава. Заливка осуществлялась в графитовую форму диаметром 110 и высотой 260 мм.

В качестве основных шихтовых материалов использовали как титановую губку, так и отходы листопрокатного производства сплава ВТ1-0, алюминий марки А99, иодидный цирконий, ниобий и молибден в виде прессованных штабиков и листов толщиной 0,5-1 мм.

Первые опыты по применению губки показали необходимость ее предварительного переплава в компактную заготовку, вследствие частых электрических «пробоев», что усложняет получение сплавов необходимого состава.

Основная трудность при получении заданного состава в случае использования компактной заготовки титана и кускового ниобия состояла в создании условий, при которых бы происходило сплавление и взаимное растворение этих компонентов. Размещение более тугоплавкого ниобия поверх титана, как это осуществлялось при выплавке сплава со сравнительно небольшим количеством Nb (до 5 % масс.) в данном случае приводило к плавлению титана до того, как расплавлялся ниобий. В результате этого значительная часть нерасплавленного ниобия оседала на дно гарнисажа, после чего дальнейший нагрев приводил лишь к испарению титана.

Решить задачу получения слитка заданного состава, в случае такого вида шихтовых материалов, удалось, размещая основные компоненты (Ti и Nb) рядом по диаметру тигля. Первым начинали плавить ниобий с постепенным обогащением расплава титаном.

Более удобной с этой точки зрения оказалась шихта, состоящая из Ti-пластин – отходов прокатного производства толщиной 3-8 мм и листового ниобия толщиной 1-2 мм. В этом случае шихтовые материалы размещали вперемешку, что, учитывая разность в толщинах пластин, способствовало их плавлению при приблизительно одинаковых мощностях электронного пучка.

Что касается других элементов, в частности Al, Zr и Mo, то их введение осуществляли, как и в более ранних опытах, а именно, Mo и Zr размещали поверх основной шихты, а Al вводили с помощью манипулятора на заключительной стадии плавки.

Химический состав верхней и нижней части слитков практически не отличается и соответствует заданному, что свидетельствует о целесообразности применения электронно-лучевой гарнисажной плавки для получения сплавов данной системы.

УДК 621.74:669.13

*В. В. Лунев, А. С. Амельченко, В. В. Васильев*  
 Запорожский национальный технический университет, Запорожье

### **ПЕРСПЕКТИВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК**

Качество – краеугольный камень, лежащий в основе всего клубка проблем, достижений и неудач предприятий металлургического комплекса.

Организация сплошного ультразвукового контроля – мощный и эффективный способ повышения качества выпускаемой продукции. Внедрение контроля неизбежно и благоприятно сказывается на состоянии технологической дисциплины, дает возможность целенаправленно, точно и оперативно воздействовать на параметры технологического процесса.

Ультразвук является наиболее универсальным, эффективным, хорошо отработанным, имеющим мощную нормативную базу, инструментом. А поскольку ультразвуковые методы к тому же хорошо поддаются автоматизации, - целесообразно именно им уделять особое внимание.

До недавнего времени главным недостатком ультразвуковых методов и реализующих их систем являлось обязательное применение воды в качестве контактной жидкости [1]. Однако прогресс не стоит на месте и сейчас появилось много бесконтактных систем ультразвукового контроля с великолепными метрологическими характеристиками.

При производстве труб (ЗАО «Никопольский трубный завод») давно уже применяются автоматизированные установки ультразвукового контроля стальных труб, внедряются также и установки для контроля чугунных труб.

Методика ультразвукового контроля труб. Скорости волн являются свойствами среды: для жидкостей и газов – продольных волн, а для твердых тел – продольных и поперечных [1].

Значительное преимущество ультразвукового анализа свойств материалов заключается в том, что он может проводиться без остановки технологических процессов или поточным способом. Высокочастотные ультразвуковые волны могут передаваться в движущиеся объекты без непосредственного контакта с ними преобразователя (так называемые иммерсионные методы контроля) [2]. Измерения также могут проводиться в закрытых емкостях с передачей ультразвуковой энергии через стенки. То обстоятельство, что ультразвуковые волны проходят через объект контроля, позволяет изучать внутренние свойства материала [3]. Иногда возможно, используя строб импульсы, получать данные о свойствах только одного слоя в многослойных материалах.

Анализ известных исследований и разработок позволяет сделать следующие выводы: при ультразвуковых исследованиях стальных изделий не вызывает сомнения высокая эффективность и точность измерений, однако следует отметить, что при ультразвуковом контроле чугунных изделий возникает множество трудностей связанных с отличием акустических свойств этих сплавов, и для достижения высокой достоверности результатов при контроле качества чугунных изделий необходим подбор оптимальных методов и параметров проведения исследований.

#### Список литературы

1. Ермолов И. Н., Алешин Н. П. и др. Достижения акустических методов контроля за последние 5 лет - Тезисы докладов 14-ой Российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика", Москва, 23-26 июня, 2006, с. 453.
2. Разумов-Раздолов К. Л. Неразрушающий контроль в промышленности // «РИТМ» (Ремонт Инновации Технологии Модернизация). – 2010. - №9. С. 36 - 39.
3. Сучков Г. М., Катасонов Ю.А. Экспериментальные исследования нового способа бесконтактной ультразвуковой дефектоскопии труб эхометодом // Дефектоскопия. - 1999. - № 11. - С.77-80.

УДК 621.74.08

*Т. В. Лысенко, Д. А. Желдубовский, И. И. Становская*  
Одесский национальный политехнический университет, Одесса

### **СИНХРОНИЗАЦИЯ СОСТАВНЫХ СОБЫТИЙ В СИСТЕМЕ «ОТЛИВКА – ПЕСЧАНАЯ ЛИТЕЙНАЯ ФОРМА»**

Многочисленные известные зависимости фазовых переменных системы «отливка – песчаная форма» от времени [1] не позволяют четко сформулировать цель управления качеством отливок.

В последнее время в качестве цели выдвигают совпадение (или несовпадение) во времени заранее назначенных событий в литейной форме, к которым относят некоторые поименованные состояния на фазовом портрете объекта управления [2]. Наличие, как минимум, двух синхронизируемых подсистем позволяет рассматривать остывающую в форме отливку с точки зрения теории динамических систем и построить ее фазовый портрет, т.е. все фазовые траектории, возможные в пределах технологических ограничений. На фазовом портрете выделяется точка S, соответствующая синхронизации событий в подсистемах на пути динамической системы от точки из области начальных условий к естественному аттрактору, представляющему собой температуру и давление окружающей среды.

Пусть специалистами-литейщиками признано, что такая синхронизация необходима для качества отливок. Если траектория фазового портрета системы не проходит через точку S, а значит, синхронизация событий не произойдет, то целью управления становится изменение траектории так, чтобы последняя прошла через эту точку.

В этом случае проблема сводится к возможности математического прогнозирования таких событий, что может представлять значительные трудности по разным причинам. Одна из таких причин – так называемые «составные» события, когда имеет место их последовательная цепочка: первое рассчитывается аналитически, чаще всего, по уравнениям тепло- и массопереноса, а последнее проистекает из предыдущих, причем эти переходы имеют иную природу и описываются совершенно другими математическими моделями.

Примером составного события в литейной форме может служить последовательность: <достижение максимального давления в форме на границе с жидкой отливкой> – <всплытие газового пузыря>. Модель наступления первого элемента последовательности (назовем его предварительным событием) – дифференциальные уравнения выделения и удаления газов из литейной формы, модель второго (основного) события – уравнения гидродинамики гетерогенных сред. В таких условиях синхронизация (десинхронизация) предварительных событий не решает задачу. Поэтому в работе выведено соотношение, рассматривающее разницу во времени между пред-

варительным и основным событиями в качестве запаздывания по состоянию объекта управления.

Функции, входящие в это соотношение весьма сложны и, как правило, представляют собой дифференциальные уравнения в частных производных второй степени. Поэтому в компьютерных экспериментах использовали численные методы решения задач в среде MathCAD. Анализ соотношения показал, что наличие компонент запаздывания может существенно повлиять на ход фазовой траектории, приближая или отдаляя возможность синхронизации событий в системе. Важно также, что эти компоненты входят в соотношение с разными знаками, что может привести к их взаимной компенсации.

#### Литература

Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Часть 1. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.

Найдек В.Л. Синхронизирующее управление процессами тепломассопереноса в системе отливка – форма / В.Л. Найдек, Т.В. Лысенко, А.Л. Становский // Литейное производство. – 2007. – № 7. – С. 23 – 26.

УДК 621.746.04:666.85/86

*А. Г. Малявин*

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

### **ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КАМНЕЛИТЫХ ФТОРФЛОГОПИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Исследование влияния химического состава на строение и прочностные свойства камнелитых фторфлогопитовых изделий проводили, используя способность изоморфного замещения ионов кремния и алюминия, а также изменение содержания анионов фтора в калиевом фторфлогопите. Были получены две группы материалов: с изменяющимся алюмосиликатным модулем ( $M=2,3,4$ ) и с различным содержанием фтора (стехиометрическим и избыточным в 1,5 и 2 раза).

Установлено, что отливки полученных материалов имеют существенные различия в макростроении, характеризуемые зональностью, подобно зональности строения металлических отливок. Характерным для них является наличие трех структурных зон: корковой (поверхностной), переходной (транскристаллитной) и центральной (рис.1). Протяженность зон и размер кристаллов фторфлогопита,

слагающих зоны, у разных материалов различны. Так, у материалов с различным  $M$  имеется тенденция к большему проявлению зональности и укрупнению структуры с уменьшением  $M$ , а с различным содержанием фтора (при одинаковом  $M$ ) большей зональности и увеличению размера кристаллов фторфлогопита - повышению количества фтора. Увеличение величины кристаллов и зональности объясняется тем, что при одинаковых условиях затвердевания отливок основными факторами, стимулирующими рост кристаллов является массоперенос и теплопередача. Массоперенос определяется вязкостью силикатного расплава, которая незначительна (при температуре 1450-1360°C составляет 0,4-0,85 Па•с), а при уменьшении содержания кремния или увеличении содержания фтора она уменьшается, что способствует возрастанию массопереноса и линейной скорости роста кристаллов, а в итоге к увеличению протяженности переходной зоны и величины кристаллов фторфлогопита.

Петрографическое изучение материала отливок показало, что основной минеральной фазой их являются пластинчатые кристаллы фторфлогопита, количество которых в материалах близких по составу к стехиометрии составляет  $\sim 90\pm 5\%$ , а при значительных отклонениях - 80% и менее. Кроме фторфлогопита в них имеются стеклофаза и примесные минералы (селлаит, энстатит, форстерит и др.), которые расположены в промежутках образованных кристаллами основной фазы. Характерной структурной составляющей является межкристаллитная пористость, имеющая замкнутый характер, количество которой 4,5-15%.

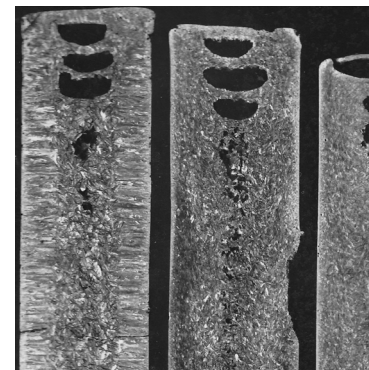


Рис. 1 Макроструктура камнелитых отливок а)  $M=2$ ; б)  $M=3$ ; в)  $M=4$ .

Особенности в строении и фазовом составе материала отливок отражаются на прочностных свойствах, которые изучали в интервале температур 600-1000°C. Установлено, что общими закономерностями являются различия в прочности, связанной с зональностью, а также зависимость прочности от химического состава и величины кристаллов фторфлогопита. Минимальную прочность имеет материал центральных зон, а максимальную - материал с литейной поверхностью. У материала с одной корковой поверхностью прочность повышается на 15-25%, а двух – на 35-60% по сравнению с материалом центральной зоны.

Установлено, что прочность зависит от химического состава: она повышается при увеличении М и уменьшается при значительных отклонениях содержания фтора от стехиометрии, что связано с различным содержанием в материале фторфлогопита и величиной его кристаллов.

С повышением температуры до 600°C прочность мелко кристаллического материала (М=4) практически не изменяется, а при дальнейшем повышении – приводит к ее увеличению на 25-30% по сравнению с нормальной. В то же время прочность крупно кристаллических материалов при нагреве до 600°C уменьшается на 30-50%, а при 800°C возрастает на 6-30% по сравнению с нормальной.

Подобное явление – увеличение прочности при повышении температуры – наблюдают у графита, имеющего, также пластинчатое строение [1].

Прочностные свойства камнелитого фторфлогопитового материала при повышенных температурах позволяет использовать его в эксплуатации не только как футеровочный, но и как конструкционный материал в виде различных фасонных изделий.

Обладая уникальным комплексом физико-химических и технологических свойств камнелитые фторфлогопитовые изделия применяют в хлораторах и электролизерах титано-магниевого производства, при разливе алюминия, цинка, меди и их сплавов.

#### Список литературы

1. Carpenter Z. G. «Brit. J. of Applied Physios», 1964, Т.15, S 871-882

669.18:621.746

*В. А. Мамишев*

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

### **ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ ПРОФИЛЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ КОРКОВОЙ ЗОНЫ**

На поверхностях охлаждения слитков и отливок имеются участки с плоским, выпуклым и вогнутым профилем твердой корочки плотного металла. Кривизна плоских участков корочки  $k_F = 0$ , кривизна выпуклых участков положительна  $k_F > 0$ , а кривизна вогнутых участков отрицательна  $k_F < 0$ . Знак кривизны (плюс или минус) выпуклых и вогнутых участков твердой корочки слитков и отливок влияет на интенсивность внешнего теплоотвода от литой заготовки к стенкам литейной оснастки в зоне их термического контакта.

Температура, градиенты температуры и плотность теплового потока на поверхностях охлаждения затвердевающих заготовок (слитков и отливок) и поверхностях нагрева стенок изложниц и форм распределены неравномерно, а толщина корочки литого металла на разных участках их профиля неодинакова.

По периметру поперечного сечения кузнечных и прокатных слитков и фасонных отливок сложной геометрии толщина корочки разная. На ребрах кузнечного слитка корочка толще, а во впадинах – тоньше. В угловых зонах прокатного слитка, геометрия которого близка к прямоугольной, корочка толще, чем посередине широкой и узкой граней слитка. В области внешних углов фасонных отливок толщина корочки больше, чем в области внутренних углов.

Температура поверхностей охлаждения слитка или отливки наиболее сильно изменяется в начале затвердевания, когда формируется сплошная корочка литого металла. Именно в этот период разница между температурой выпуклых и вогнутых участков профиля литой заготовки максимальна.

При затвердевании литых заготовок разной конфигурации температура их поверхностных слоев неодинакова по периметру криволинейных участков профиля поперечного сечения слитков и фасонных отливок. Только в простых случаях плоской, цилиндрической и сферической симметрии температурного поля литые заготовки (плита, цилиндр, шар) с постоянной кривизной профиля имеют одинаковую температуру по периметру их поперечного сечения.

Кривизна профиля литых заготовок по-разному влияет на температурные поля выпуклых и вогнутых участков твердой корочки затвердевающих слитков и отливок, как это следует из дифференциального уравнения нестационарного теплопереноса в виде [1 - 3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_3 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - k_F G_T \right) \quad 0 < r < R_0$$

где  $r$ ,  $t$ ,  $T$  - расстояние, время и температура;  $k_f$  - локальная кривизна изотерм;  $a_3$  - эффективный коэффициент температуропроводности слитка или отливки;  $G_f = \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right|$  - градиенты температуры в любой точке затвердевающей заготовки.

В уравнении (1) выражение в скобках – это дивергенция температурного поля. В случае охлаждения первый член в скобках отрицателен, а второй зависит от знака кривизны  $k_f$  фронта затвердевания. Он положителен для выпуклых участков изотермы солидус и отрицателен для ее вогнутых участков.

Дивергенция температурного поля и интенсивность охлаждения больше на выпуклых участках (углы и ребра профиля слитков или внешние углы фасонных отливок) и меньше на вогнутых участках фронта солидус (впадины профиля слитков и внутренние углы фасонных отливок). В первом случае корочка плотного металла толще, а во втором случае тоньше в соответствии с термическим механизмом выравнивания фронта затвердевания (изотерма солидус) по периметру поперечного сечения заготовок разной конфигурации.

#### Список литературы

1. Мамишев В.А. Методика расчета термовременных параметров затвердевания литых заготовок разной конфигурации // Процессы литья. - 2008. - № 5. - С. 43 - 49.
2. Мамишев В.А. Особенности теплопереноса при формировании литых изделий с изменяющейся кривизной фронтов затвердевания // Процессы литья. - 1998. - № 3-4. - С. 63 - 67.
3. Мамишев В.А. Оптимальный подход к расчету температурных полей при формировании литых изделий разной конфигурации // Праці міжнарод. симпозіуму "Питання оптимізації обчислень" (ПОО-XXXIII). - К.: Ін-т кібернетики НАН України. - 2007. - С. 189 - 190.

669.18:621.746

*В. А. Мамишев, О.И. Шинский, Л.А. Соколовская*

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

### **ВЗАИМОСВЯЗЬ КИНЕТИКИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ С ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОЛЯМИ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК**

Чтобы усовершенствовать традиционные и создавать новые технологии литья в металлургии и литейном производстве необходимо управлять теплофизическими процессами затвердевания литых заготовок (слитков и отливок) разной массы, конфигурации и габаритных размеров из стали, чугуна и цветных сплавов.

Для выбора рационального способа получения литых заготовок в конкретных условиях производства следует удовлетворить противоречивым требованиям: технологической эффективности, экономической целесообразности, экологической безопасности, металло-, материало- и энергосбережения. Чтобы гарантировать конкурентоспособность литых деталей необходимо получать заготовки с высоким уровнем физико-механических и функциональных свойств литого металла.

Формирование высокого качества литых заготовок существенно зависит от температурных режимов их затвердевания в полости металлургической изложницы или литейной формы. Поэтому изучение температурного состояния затвердевающих заготовок разного назначения облегчает поиск оптимальных теплофизических условий затвердевания стальных слитков и массивных отливок [1 - 4].

С этой целью:

- изучен характер изменения во времени нестационарных температурных полей затвердевающих заготовок с учетом двухфазной зоны кристаллизации стали;
- выполнен системный анализ пространственно-временной эволюции температурного поля кузнечного слитка, предназначенного для получения машиностроительных изделий ответственного назначения;
- выявлены основные закономерности распределения изохрон температуры по радиусу кузнечного слитка массой 13,2т и кривых охлаждения локальных объемов кристаллизующейся стали в его поверхностных и глубинных слоях;
- установлена взаимосвязь кинетики затвердевания слитка с изохронами температуры и кривыми охлаждения с учетом влияния фронтов ликвидуса и солидуса в поперечном сечении слитка на двухфазную зону кристаллизации;
- получена функциональная зависимость между градиентами температуры на движущемся фронте солидус двухфазной зоны кристаллизации, интенсивностью охлаждения локальных объемов стали и линейной скоростью затвердевания литых заготовок цилиндрической геометрии;
- установлено, что скорость затвердевания слитков и массивных отливок прямопропорциональна интенсивности (скорости) охлаждения стали и обратно пропорциональна градиенту температуры на криволинейном фронте солидус двухфазной зоны кристаллизации;
- отмечены преимущества и недостатки кристаллической структуры литого металла по сравнению со структурой деформированного металла, полученного ковкой или прокаткой стальных слитков после их затвердевания;
- показаны пути интенсификации процесса затвердевания слитков и отливок для уменьшения вредного влияния литейных дефектов на качество литого металла за счет воздействия микрохолодильников на жидкий и кристаллизующийся металл при их введении в расплав и за счет замораживания

стенок литейной формы.

Полученные результаты показали, что для ускорения процесса затвердевания литых заготовок следует повышать теплоаккумулирующую способность литейных форм, что существенно повысит скорость охлаждения стали в гетерогенной зоне двухфазного (твёрдо-жидкого) состояния слитков и отливок. Внутренний теплоотвод от расплава к теплоотражающим микрохолодильникам, введенным в ограниченный объем затвердевающего слитка или массивной отливки, позволяет уменьшить градиенты температуры по толщине их стенок и обеспечивает эффективное увеличение скорости затвердевания литых заготовок разной массы и геометрии.

#### Список литературы

1. Мамишев В.А. Реотермическая концепция управления кристаллическим строением литых изделий // Процессы литья. – 2004. – № 3. – С. 43 - 48.
2. Мамишев В.А., Соколовская Л.А. О теоретическом прогнозировании термических условий повышения качества макроструктуры и эффективности затвердевания стальных слитков и слябов // Процессы разливки и кристаллизации стали. - К.: Ин-т проблем литья НАН Украины, 1991. – С. 72 - 82.
3. Мамишев В.А., Шинский О.И., Соколовская Л.А. О теплофизическом взаимодействии слитка с изложницей и отливки с формой в период формирования литой структуры // Литье и металлургия. - 2008. – № 3 (48). – С. 307 - 309.
4. Мамишев В.А., Шинский О.И., Соколовская Л.А. Системный анализ процесса затвердевания литых заготовок разной массы и назначения // Процессы литья. – 2010. – № 1. - С. 20 - 24.

УДК 627.771:07

*М. О. Матвеева, Б. В. Климович, В. В. Климович*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВКИ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛА РАБОЧЕГО СЛОЯ ВАЛКОВ**

Для обеспечения заданной структуры металла должны быть строго взаимосвязаны факторы времени, химического состава и жидкого состояния чугуна [1]. Технологическим процессом производства чугунных отбеленных валков не предусмотрена термическая обработка, поэтому литая структура последних обуславливается значительным влиянием указанных выше факторов. Необходимость изучения термо-временных параметров (ТВП) плавки и заливки при получении отливок из белых чугунов обоснована в работе [2].

В мировой практике разработаны и широко применяются методы оцен-

ки качества продукции с использованием пассивных методов проведения эксперимента. В этом случае задачей является сбор численных значений, отражающих ход исследуемого процесса. Собранные данные затем подвергаются специальной обработке с использованием методов математической статистики. На этой основе проведены исследования влияния ТВП плавки на качество и твердость рабочего слоя центробежнолитых биметаллических и однослойных заготовок размерами диаметром 305...315 мм ТПХНЦ-60 и ТПХНЦ-52.

Анализ данных, упорядоченных на гистограммах (рис.1), позволяет судить о следующем. Температура металла в печи изменялась в пределах 1400...1500 °С. Из общего количества отлитых заготовок при предположительно оптимальных температурах перегрева металла для рабочего слоя биметаллических валков  $T_n = 1426...1475$  °С отлито 87,3 %, в запредельных областях температур проведено: 3,64% при низких  $T_n = 1400...1425$  °С и 9,09% при высоких  $T_n = 1476...1500$  °С температурах. При этом перегрев выше температуры равновесия кремний-восстановительной реакции изменялся в широких пределах (75...130 °С).

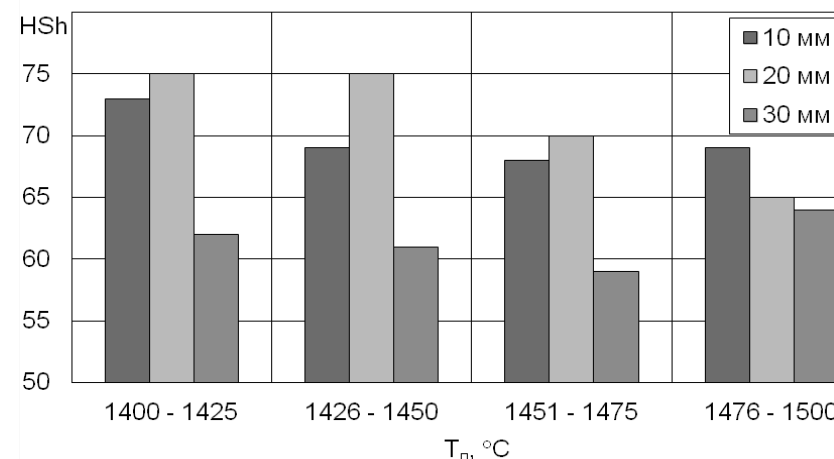


Рис. 1 – Твердость образцов по глубине заготовки в зависимости от температуры металла в печи

Выводы. В области низких значений перегрева в печи  $T_n = 1400...1425$  °С и значениях  $\Delta T_p = 91$  °С все отлитые валки имели практически одинаковую твердость на глубине 10 мм от литой поверхности (67...75 ед.Шора). С увеличением расстояния от поверхности в пределах 10...30 мм твердость уменьшается, но сохраняется тенденция увеличения твердости при повышении  $T_n$ . В оптимальных температурных интервалах перегрева в печи  $T_n =$

1426...1450 °С проведено 49,1% плавов и 1451...1475 °С – 38,18%. При этом  $\Delta T_p$  изменялась от 75...123 °С. В указанных температурных интервалах четко проявилась тенденция увеличения твердости по всей глубине рабочего слоя от 10 до 30 мм. Основное количество валков имели на одинаковом расстоянии от поверхности близкую твердость.

При повышенных перегревах  $\Delta T_p = 120...123$  °С, соответственно резко возрастает твердость рабочего слоя на глубине 10...20 мм.

#### Список литературы

1. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966.- 534 с.
2. Бунин К. П., Таран Ю. Н. Строение чугуна. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.

УДК 621.74: 669.14.018.44

*Л. А. Матвеева\**, *В. В. Лашнева\*\**, *И. И. Максютя*, *Ю. Г. Квасницкая*,  
\*Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,  
Киев,

\*\* Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН  
Украины, Киев,

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев

### **НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЕ ПОКРЫТИЕ НА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ**

Практическое применение различных устройств с использованием фуллеренов в науке и технике постоянно расширяется. Так, фуллереновое (углерод С60) покрытие стали приводит к ее рекордному упрочнению, повышению износ- и термостойкости, что крайне важно, например, при производстве лопаток турбин авиационных двигателей и вертолетных лопастей.

В настоящей работе представлены результаты исследования физико-химических характеристик фуллеренового покрытия на промышленных жаропрочных сплавах марок ЧС 88 - ВИ (Ni 57,6 %; Cr 15,6 %; Co 10,7; Mo 1,9 %; C 0,09; Fe 0,5 %; Al 3 %; B 0,005 %; Ti 4,6 %; W 5,3 %; Nb 0,11%) и ЧС 88 У - ВИ (Ni 57,0 %; Cr 15,9 %; Co 11,0; Mo 1,9 %; C 0,06; Fe 0,5 %; Al 3,05 %; B 0,08 %; Ti 4,6 %; W 5,3 %; Zr 0,5 %, Nb 0,20 %) и его влияние на износостойкость этих сплавов. Данные сплавы широко используются на украинских предприятиях газотурбостроения, таких, как ГП НПКГ «Зоря»

- «Машпроект» (г. Николаев) и ОАО «Мотор Сич» (г. Запорожье) при изготовлении лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) для судостроения и авиации. Эти детали в течение длительного времени работают в условиях повышенных механических нагрузок в агрессивной атмосфере, содержащей соли морской воды и продукты сгорания дизельного топлива. Наиболее эффективным способом защиты и рабочих и сопловых лопаток является нанесение износостойких, а также коррозионно- и эррозионноустойких покрытий.

Ранее авторами была показана перспективность применения фуллеренового С60 покрытия в травматологии и ортопедии, в частности, при эндопротезировании тазобедренных суставов. Так, износостойкость компонентов в узле подвижности (паре трения) эндопротеза «высокоплотный полиэтилен Chirulen - сплав титана ВТ6» с применением фуллеренового покрытия С60 примерно на порядок превышает износостойкость в паре трения тех же компонентов без покрытия, что значительно повышает срок эксплуатации эндопротеза [1].

#### *Результаты и обсуждение*

Фуллереновое покрытие на подложки из исследуемых сплавов наносили в вакууме методом термического испарения порошка С60 из эффузионной танталовой ячейки. Испарение проводили при температуре 450 °С. Для уменьшения внутренних механических напряжений в системе «покрытие С60 – сплав» подложки не подогревали. Толщину покрытия определяли на интерферометре МИИ-4 и из профилограмм. Она составляла 1,2 мкм. Покрытие сплошное, однородное. Прочность сцепления с подложкой составляла 0,8 ГПа. Контроль состава покрытия осуществляли методом комбинационного рассеяния света и Фурье ИК-спектроскопии. Испытания на износ проводили на воздухе с помощью машины трения МТ-68 по методике «вал - вкладыш» при ступенчатом повышении нагрузки (Р). В качестве контртел использовали алмаз и нержавеющей сталь 65 Г, применяемую в машиностроении. Такая схема трения при однонаправленном вращательном движении позволяет реализовывать знакопеременное нагружение поверхностного слоя образца за счет разницы размеров контактирующих поверхностей. Условия испытаний: нагрузка ступенчатая - Р1= 5 МПа; Р2=7,5 МПа; Р3=10 МПа; скорость скольжения - 0,2 м/с; продолжительность испытаний – 10 мин. Все испытания проводили без смазочного материала. Размеры исследуемых образцов: высота 12-12,2 мм, площадь сечения –64 мм<sup>2</sup>. Исходная шероховатость Ra поверхности трения составляла 0,02 мкм.

Количественно износ исследуемых сплавов рассчитывали по уменьшению массы образцов ( $\Delta m$ , г) при трении путем измерения их массы до и после испытаний с помощью весов типа ВЛР-200 с точностью до 0,00001г. Определяли также коэффициент трения ( $\mu$ ) сплавов.

Из проведенных исследований следует, что при всех нагрузках износ сплавов в паре трения с алмазом выше, а износостойкость ниже, чем в паре трения с нержавеющей сталью 65 Г. При этом более высоким значением износа (меньшей износостойкостью) характеризуется сплав ЧС 88У-ВИ. С повышением нагрузки износ материалов растет, износостойкость падает. Наблюдаемое уменьшение износа на сплаве ЧС 88-ВИ при нагрузке 10 МПа как с алмазным контртелом, так и со сталью 65 Г, вероятно, связано с налипанием продуктов износа на поверхность образца. Коэффициенты трения обоих сплавов одного порядка и несколько снижаются с увеличением нагрузки, что обусловлено нагревом образцов при трении.

#### Выводы

Наноструктурированное фуллереновое С60 покрытие на жаропрочных сплавах может играть роль защитной пленки от коррозии, влияние которой на свойства этих сплавов требует дальнейших исследований.

УДК 627.771:07

*М. О. Матвеева, А. А. Макарова, Б. В. Климович*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск*

### ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ МАРГАНЦЕМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФИТА В ЧУГУНАХ

Чугун широко распространенный в промышленности литейный материал. Его относительно небольшая цена, хорошая жидкотекучесть, малая усадка, способность образовывать различные структуры и свойства в зависимости от состава и условий затвердевания – делают чугун материалом, постоянно востребованным, прогрессивным и пригодным для производства самых разнообразных изделий.

Состав, количество, форма и распределение высокоуглеродистой фазы во многом определяют свойства отливок из чугуна. Эти характеристики возможно регулировать введением в состав чугуна марганца. Влияние марганца и серы на первичную структуру чугуна целесообразно рассматривать совместно. Являясь обычными примесями чугуна, они нейтрализуют друг друга путем образования тугоплавких сульфидов марганца. На структуру и свойства чугуна главным образом влияет избыток одного или другого элемента сверх соотношения определяющего наиболее полную нейтрализацию. Марганец увеличивает отбеливаемость чугуна и расширяет температурную область образования половинчатых структур.

Объектом исследования в настоящей работе были чугуны, легированные марганцем в количестве от 1,4 до 3,10 % и процессы структурообразования

в них.

Анализ данных по влиянию марганца на количество графита (Г) показывает, что при малом содержании марганца (1,40 %) количество Г составило 3,0 %, очевидно весь марганец израсходовался на нейтрализацию серы. Но уже при содержании марганца 1,86 % количество графита было максимальным и составило 9,0 % (рис. 1). Участки с графитом неравномерно распределялись по объему слитка, концентрируясь в основном в нижней части отливки, которая охлаждалась более медленно. Включения графита имели пластинчатую завихренную форму иногда гнездообразную (ПГф2 и ПГф4).

С повышением содержания марганца от 1,86 до 2,70 % количество графита резко уменьшается с 9,00 % до 0,12 %, а при 3,1 % марганца чугун становится полностью белым. При этом значительно увеличивалась доля междендритного графита, хотя в отдельных участках сохранялось неравномерное распределение графита пластинчатой завихренной формы.

Повышение содержания марганца в чугуне, по-видимому, способствует его переохлаждению, что приводит к изменению формы и величины включений графита от пластинчатой к междендритной, а затем и к образованию цементитной эвтектики.

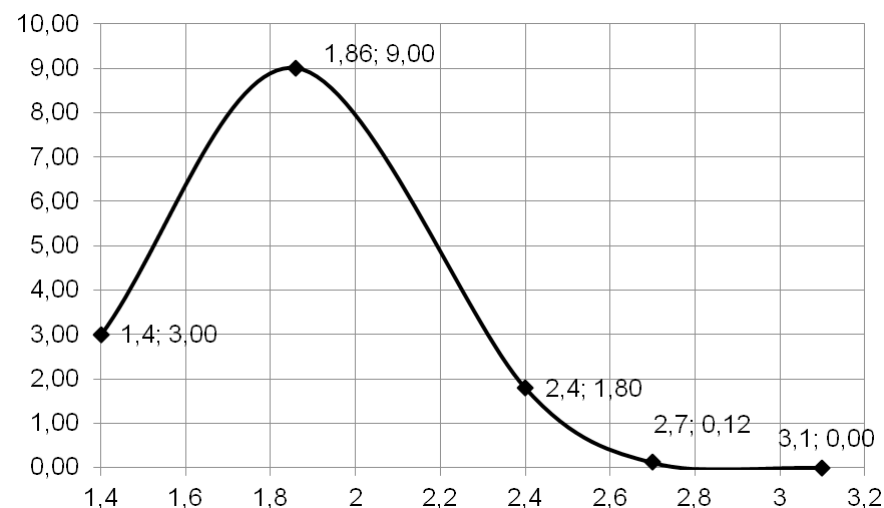


Рис.1 – Влияние марганца на количество графиты в опытных чугунах

#### Выводы

Марганец влияет на строение колоний графито-аустенитной эвтектики.

Наблюдается увеличение разветвленности графита при повышении его содержания свыше необходимой для нейтрализации влияния серы.

Влияние марганца на торможение кристаллизации графита из жидкого раствора можно объяснить небольшой разницей в силах связи Fe-C и Mn-C и обусловленным этим незначительным снижением активности и диффузионной подвижности углерода. Эти изменения играют значительную роль в твердофазных превращениях, происходящих к тому же при пониженных температурах. Марганец расширяет область существования аустенита, снижает температурные интервалы эвтектичного равновесия.

УДК 669.018.28:533.9

*В. Л. Найдек, В. Н. Костяков, А. А. Волошин*

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

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПЛАЗМЕННО-ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ**

Анализ работы индукционных печей показывает, что они неэффективны на режиме подогрева шихты до температуры плавления, их работа характеризуется низким значением термического КПД. Поэтому интенсификация процесса плавки позволяет существенно повысить эффективность работы печей.

Известны следующие методы интенсификации плавки в индукционных печах: использование источников питания повышенной мощности; изменение частоты тока в процессе плавки; предварительный подогрев шихты вне плавильной печи; применение дополнительного плазменного нагрева.

Применение дополнительного плазменного нагрева в печи позволяет не только интенсифицировать плавку, но и вести плавку активным металлургическим процессом за счет высокой жидкоподвижности шлака.

Использование в качестве рабочего газа аргона практически устраняет угар легирующих элементов и повышает качество выплавляемого металла. Рафинирующая способность плазменной дуги дает возможность снизить в металле содержание газов на 30-40 % и уменьшить содержание неметаллических включений на 40-50 %. При этом неметаллические включения уменьшаются в размере, округляются и равномерно распределяются в матрице сплава. Это существенно повышает пластические характеристики и ударную вязкость литого металла.

В ФТИМС НАН Украины разработаны плазменные приставки к

индукционным печам емкостью 0,16-10 т (таблица).

Таблица – Технические характеристики плазменных приставок к индукционным печам

Параметры	Тип печи				
	ИСТ			ИЧТ	
Емкость тигля, т	0,16-0,25	0,4-0,5	1,0	6,0	10,0
Подводимая емкость к плазматрону, кВт	50	70	150	100	100
Род тока	Постоянный				
Параметры источника питания					
- рабочий ток, А	1000	1000	1600	1250	1250
- рабочее напряжение, В	230	230	300	230	230
Рабочий газ	Аргон			Воздух	
Экономия электроэнергии на 1 т жидкого металла, кВт·ч	400	350	270	100	100

Следует отметить, что институт имеет большой опыт внедрения этого оборудования на машиностроительных предприятиях СНГ. Однако неэффективная работа машиностроительного комплекса Украины не позволяет предприятиям внедрять разработанное оборудование.

Вместе с тем, предприятия Вьетнама проявили интерес к такого рода оборудованию.

ФТИМС НАН Украины подготовил и поставил во Вьетнам плазменную приставку к индукционной печи 1,5 т и электротехническое оборудование к печам 0,2 и 0,3 т.

УДК 621.745.5:66.046.5

*В. Л. Найдек, В. Н. Костяков, В. Б. Сидак, А. Н. Сушков*  
*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,*  
*Киев*

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ**

В последние годы проявляется большой интерес к жидкофазной восстановительной плавке, позволяющей получать сплавы из различных оксидосодержащих материалов, в том числе из первородного рудного сырья. Эффективность этого процесса плавки подтверждена данными многочисленных исследований. Несмотря на это, данные о влиянии технологических факторов на экономические показатели жидкофазной плавки в литературе отсутствуют.

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины на основе экспериментальных данных выполнена оценка технико-экономической эффективности восстановительной плавки.

Установлено, что на показатели процесса плавки влияет технология плавки. Так, при плавке оксидных материалов на жидком “болоте” металла достигается более высокая степень восстановления металла и низкий удельный расход электроэнергии по сравнению с плавкой в жидком шлаке. При плавке на жидком “болоте” металла удельный расход электроэнергии в 3 раза ниже, а степень восстановления, например, хрома на 11-12 % выше.

Выявлено, что основными технологическими факторами, влияющими на экономические показатели плавки, являются технология ведения плавки, содержание оксидов металла в шихте и качество подготовки шихты. Эти факторы оказывают существенное влияние на энергоёмкость процесса плавки, являющейся основным показателем эффективности плавки.

Так, например, энергоёмкость плавки нержавеющей стали X18H10 из шихты, содержащей углеродистую сталь, оксиды хрома и никеля, по сравнению с обычной плавкой увеличивается на 23 %. Выплавка стали с содержанием хрома 30 % повышает энергоёмкость процесса плавки на 45 %.

Следует отметить, что энергоёмкость жидкофазной плавки будет всегда выше по сравнению с обычной. Однако большая разница в стоимости легирующих элементов в виде ферросплавов и оксидов металла полностью покрывает дополнительные затраты на энергоноситель при восстановительной плавке.

УДК 669.06:621.746.6.001.57

*В. В. Наумик*  
*Запорожский национальный технический университет, Запорожье*

### **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВОК**

Изучили особенности теплопередачи при моделировании процессов кристаллизации, осуществляемом на разработанной и собранной установке, согласно разработанной методике.

В процессе моделирования образец перемещается относительно плоского нагревателя и кристаллизатора. При этом теплопередача от нагревателя через образец к кристаллизатору, а также к окружающему образцу воздуха осуществляется, в основном, за счет теплопроводности.

Для изучения процессов теплопередачи использовали образцы на подложках из меди и нихрома. Первые из них предназначались для моделирования теплофизических условий процессов кристаллизации меди и её сплавов, вторые – жаропрочных сплавов на основе никеля.

Установленные на плоский нагреватель образцы нагревали до температуры 250 °С и циклически перемещали. Длина одного цикла перемещения составляла 10 мм, после чего следовала пауза до стабилизации температуры (обычно 8 – 10 с). Установившаяся температура фиксировалась цифровым милливольтметром в течение восьми циклов, при этом торец образца с закрепленной в нем термопарой удалялся на расстояние 70 мм от края плоского нагревателя.

В результате были получены графики, являющиеся аналогами термограмм охлаждения отливок, соответственно, из меди и жаропрочного сплава в различных условиях отвода тепла.

Представляет практический интерес изучение изменения температуры образцов в процессе их непрерывного перемещения через нагреватель и охлаждающую среду, так как по такой схеме осуществляется ряд технологических процессов при непрерывном литье заготовок. Исследование было выполнено на образцах из меди и нихрома. Характер кривых охлаждения для указанных образцов был практически идентичным.

Рассчитаны продольный и поперечные тепловые потоки, проходящие через образцы с медной и нихромовой подложкой для различных условий охлаждения. Показано, что определяющее влияние на процессы формирования двумерных кристаллов олова при физическом моделировании имели продольный тепловой поток, который зависит от материала подложки и создаёт условия теплопередачи, подобные реальным внутри формирующейся отливки, и поперечный, который определяется интенсивностью отвода тепла кристаллизатором и режимом перемещения образца относительно

него и моделирует условия отвода тепла от литейной формы или изложницы в окружающую среду.

Проведенные исследования особенностей теплопередачи при физическом моделировании показали принципиальную возможность управления тепловыми потоками, определяющими условия образования двухмерных кристаллов олова на подложке из определённого материала.

Согласно разработанной методике на спроектированной и изготовленной установке были проведены эксперименты по моделированию процессов кристаллизации реальных отливок и литых заготовок, полученных в определённых условиях в результате управляемой кристаллизации. Для этого при охлаждении образцов на соответствующей подложке создавали тепловые условия обеспечивающие получение в тонком двумерном слое олова макроструктуры, соответствующей макроструктуре, формирующейся в определённых сечениях и на поверхностях трёхмерных отливок.

Модель направленной макроструктуры была получена при интенсивном охлаждении образца с подложкой из нихрома на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе вначале процесса с последующим его медленным выведением с нагревателя. Применение подложки из материала с низкой теплопроводностью создаёт условия, когда отвод тепла от образца медным водоохлаждаемым кристаллизатором существенно превышает его подвод через образец за счёт его теплопроводности и обеспечивает наличие высокого температурного градиента на фронте кристаллизации, под воздействием которого и формируется направленная макроструктура растущих кристаллов в тонком слое олова.

Макроструктура поперечного сечения массивной медной литой заготовки была получена при медленном выведении с нагревателя образца на нихромовой подложке. Нихром, как материал с малой теплопроводностью, создал условия подобные медленной кристаллизации массивной заготовки.

Охлаждение образца на подложке из нихрома после отключения нагревателя на воздухе дало картину макроструктуры лопатки из жаропрочного никелевого сплава с равноосной структурой. Величина зерна зависит от интенсивности отвода тепла от формирующейся отливки и физической модели и может быть уменьшена за счёт замены материала подложки на медь, обладающую гораздо большей теплопроводностью.

Разработанный метод физического моделирования процессов управляемой кристаллизации отливок и установка для его осуществления внедрены в учебный процесс подготовки специалистов в рамках дисциплины «Теория литейных сплавов» на кафедре «Машины и технология литейного производства» Запорожского национального технического университета.

УДК 621.74.045

*В. В. Наумик, В. В. Клочихин, Э. И. Цивирко, В. В. Лунёв*  
*Запорожский национальный технический университет, Запорожье*

### **ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Для изучения трещиностойчивости из жаропрочных никелевых сплавов ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ управляемой равноосной и высокоскоростной направленной кристаллизацией изготовили пустотелые тонкостенные литые образцы длиной 150 мм с толщиной стенки 2 мм с внутренним стержнем из высокоглинозёмистого практически неподатливого материала (алунда) диаметром 12 мм с толщиной стенки 2 мм.

Визуальным осмотром после удаления огнеупорного покрытия на поверхности всех образцов с равноосной макроструктурой были обнаружены продольные поперечные и косые трещины, имеющие тёмно-жёлтый цвет побежалости, что явно говорит об их горячем происхождении. Травление на макроструктуру показало, что трещины проходят по границам отдельных макрокристаллов.

Примерно 75 % образцов с направленной макроструктурой были получены без видимых дефектов. Визуальным осмотром продольные трещины были выявлены только на отдельных полученных образцах.

Изучение образцов после травления на макроструктуру показало, что горячие продольные трещины образовывались только по границам «паразитных» кристаллов, зарождавшихся уже в процессе кристаллизации цилиндрической части образцов [1]. На образцах с монокристаллической макроструктурой горячих трещин выявлено не было.

Таким образом, при высокоскоростной направленной кристаллизации образцов из жаропрочных никелевых сплавов горячие трещины, вызванные затруднённой усадкой, возникают лишь в отдельных случаях и обусловлены нарушением тепловых условий кристаллизации.

Качественная оценка нетравлённых шлифов показала, что в образцах, полученных в процессе равноосной кристаллизации, карбиды размещались в междендритных пространствах и образовывали своеобразный каркас, что неизбежно приводило к снижению пластичности жаропрочного сплава. В образцах, полученных в результате высокоскоростной направленной кристаллизации, карбиды располагались равномерно и не смыкались вокруг осей дендритов.

Металлографическим анализом материала опытных образцов после травления установлено [2], что в результате направленной кристаллизации, в сравнении с объёмной, произошло существенное измельчение дендритной

структуры жаропрочных никелевых сплавов.

Одновременно наблюдали измельчение эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы. Количество последней в результате изменения условий кристаллизации заметно не изменилось.

Установлено [2, 3], что горячие трещины в образцах с равноосной структурой зарождались по карбидному каркасу перпендикулярно поверхности образца.

В результате направленной кристаллизации опытных образцов, в сравнении с объёмной, заметно повысилась микротвёрдость всех структурных составляющих жаропрочных сплавов. Это свидетельствует о том, что химический состав осей дендритов, межосий и эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы, после направленной кристаллизации существенно отличается от состава тех же структурных составляющих в металле после объёмной кристаллизации. Анализ полученных результатов указывает на большую однородность химического состава материала образцов, полученных в результате высокоскоростной направленной кристаллизации.

Механические испытания показали [2], что образцы сплава ЖС26-ВИ с направленной макроструктурой, в сравнении с равноосной, обладали несколько меньшей прочностью ( $\sigma_B$ , соответственно, 900 и 915 МПа), большей пластичностью при комнатной температуре ( $\delta$ , соответственно, 11,7 и 6,9 %) и значительно большей длительной прочностью при высоких температурах (соответственно, 111 часов до разрушения при 975 °С и  $\sigma = 260$  МПа, и 64,5 часа при 975 °С и  $\sigma = 230$  МПа). Это можно объяснить отсутствием в сплаве после высокоскоростной направленной кристаллизации хрупкого карбидного каркаса, его гораздо более мелкой и однородной дендритной структурой и измельчением эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы.

Таким образом, высокоскоростная направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов, в сравнении с объёмной, приводит к разрушению карбидного каркаса вокруг дендритных осей и равномерному распределению карбидов по структуре сплава, к измельчению дендритной структуры и уменьшению размеров эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы, выравниванию неоднородностей химического состава структурных составляющих. В результате существенно возрастают пластичность и длительная прочность сплавов, устойчивость к образованию трещин в условиях затруднённой усадки и, следовательно, повышаются эксплуатационные свойства изготавливаемых отливок.

#### Список литературы

1. Наумик В. В. Перспективы использования возврата при получении качественных отливок с управляемой кристаллизацией / Наумик В.В., Цивирко Э.И., Лунёв В.В.

// Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 37 – 43.

2. Цивірко Е.І. Об'ємна та спрямована кристалізація нікелевих сплавів / Е.І. Цивірко, В.В. Клочихін, О.Г. Коломойцев, В.В. Наумик // Металознавство та обробка металів. – 2000. – № 3. – С. 5 – 11.

3. Цивирко Э.И. Процессы кристаллизации, структура и свойства отливок из никелевых жаропрочных сплавов / Э.И. Цивирко, П.Д. Жеманюк, В.В. Клочихин, В.В. Наумик, В.В. Лунёв // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 10. – С. 13 – 17.

УДК 621.74

*К. Г. Низяев, Б. М. Бойченко, А. Н. Стоянов*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### **НОВЕЙШАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ АКТИВНЫМИ РЕАГЕНТАМИ, ВОССТАНОВЛЕННЫМИ В ОБЪЕМЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО РАСПЛАВА В ЗОНЕ ЭЛЕКТРОДУГИ**

Наиболее динамично развивающейся областью сталеплавильного производства в настоящее время является внепечная обработка. Применение в структуре сталеплавильного цеха установок типа «ковш-печь» в сочетании с более традиционными методами практически неограниченно расширило возможности внепечной обработки: от производства высоколегированных марок до сталей со сверхнизким содержанием примесей. Вместе с тем практика работы отечественных и зарубежных металлургических предприятий показывает, что существующие технологии обработки металла в ковше многостадийны и достаточно продолжительны во времени. Так, длительность обработки стали с целью корректировки ее температуры и химического состава составляет в зависимости от поставленной задачи от 20 до 80 минут. Это вызывает определенные затруднения организационного характера, особенно в работе конвертерного цеха.

Сократить длительность обработки возможно за счет совмещения операций нагрева стали и корректировки ее химического состава, как в «ковше-печи». Более эффективно можно решить поставленную задачу обработкой металла в ковше погружаемой электрической дугой. Применение погружаемого блока специальной конструкции, наличие в материале, изолирующем электроды от окружающего металла, газообразующих, рафинирующих и (или) легирующих реагентов позволяет совместить нагрев и обработку железоуглеродистого расплава, дозированный ввод и высокий коэффициент усвоения реагентов, наиболее полное использование их реакционной способности.

На кафедре металлургии стали НМетАУ создана принципиально новая

технология регулирования состава стали в ковше за счет обработки высокоактивными реагентами, восстановленными из соответствующих оксидов непосредственно в объеме жидкого металла в зоне электрической дуги.

Сущность процесса состоит в следующем.

Два электрода располагают параллельно друг другу и в процессе формирования помещают в материал, который обеспечивает их защиту и электроизоляцию от жидкого металла и одновременно является исходным материалом для протекания реакций восстановления элементов из их оксидов. При подведении разности электрических потенциалов к свободным концам электродов между их рабочими концами возникает электрический разряд. После этого блок погружают в жидкий чугун или сталь. За счет тепла электрической дуги протекают процессы восстановления реагентов и нагрева. Полученные таким образом парообразные реагенты вступают в реакцию с примесями железоуглеродистого расплава, обеспечивая достижение заданного результата.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлена возможность получения кальция и(или) магния под слоем жидкого металла в зоне дугового разряда и десульфурации металла этими реагентами.

Определены оптимальный химический состав смеси восстановительных блоков, необходимые геометрические размеры, гранулометрический состав, электропроводность смеси. Подобран материал электродов, обеспечивающий подвод необходимой мощности и равенство скоростей разрушения электродов и расходования смеси блоков, а также поддержание рабочей температуры восстановления магния.

Экспериментально установлено, что тепловой КПД нагрева стали в лабораторных условиях составляет 75-80%, а максимальная степень десульфурации чугуна в полупромышленных условиях – 97,2 %, степень использования магния 98,14 %.

УДК 621.74

*А. Н. Овчарук, В. К. Руденко, А. Ю. Таран, А. С. Филев*  
*Национальная металлургическая академия Украины*  
*(НМетАУ), Днепропетровск*

### **ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ ЧЕРНОВОЙ МЕДИ ИЗ ОКИСНОЙ РУДЫ**

Плавку черновой меди осуществляли в крупнолабораторной электропечи, оснащенной силовым трансформатором ТЭС 3-230/0,380.

Использовали графитированные электроды диаметром 110 мм, которые жестко соединены с кареткой. Каретка имеет привод и вместе с электродами вертикально перемещается вдоль металлической стойки (направляющей). Диаметр распада электродов – 0,194 м. Внутренний диаметр ванны печи – 0,504 м. Глубина ванны печи составила 0,35 м. Рабочая площадь поверхности колошника составила 0,199 м<sup>2</sup>, а объем ванны – 0,07 м<sup>3</sup>. Отношение глубины ванны печи к диаметру электрода равнялось 3,18, а отношение этой же глубины ванны к диаметру распада электродов (h<sub>b</sub>/d<sub>p</sub>) – 0,69. Отношение диаметра распада электродов к диаметру электродов – 4,58.

Средняя плотность мощности в сечении ванны составила 0,75 кВт/ м<sup>2</sup>, а плотность мощности в действующем объеме ванны, составила 2,15 кВт/ м<sup>3</sup>.

Медная руда окисная, содержала CuO – 22,53%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11,29%, FeO – 0,2%, SiO<sub>2</sub> – 42,83%, TiO<sub>2</sub> – 0,13%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,78%, CaO – 1,68%, MgO – 3,32%, CoO – 2,67%, MnO – 0,17%, Na<sub>2</sub>O – 0,43%, K<sub>2</sub>O – 0,87%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1,37%, S – 0,4, CO<sub>2</sub> – 5,0%, H<sub>2</sub>O – 3,33%.

В качестве восстановителя использовали отсеvy коксика, содержащие 12% золы, 3,0% летучих веществ, 0,5% серы и 85% твердого углерода. Гигроскопическая влага в используемом восстановителе составила 10,7%.

В процессе выплавки медного сплава образуется большое количество шлака, содержащего 60-65% SiO<sub>2</sub> а для придания этому шлаку основности 0,4 в состав шихты вводится известь (флюс) в количестве 20-21%.

Шихту, состоящую из медной руды, восстановителя и флюса после тщательного смешивания небольшими порциями (по мере ее проплавления) загружали на поверхность колошника под электроды, создавая таким образом конуса. После загрузки последней порции шихты и ее прогревания производим выпуск металла и шлака, при этом фиксировали: время начала и конца плавки, съем электроэнергии за плавку, ступень напряжения, сила тока и напряжение на электроде, масса металла и шлака.

В результате проведения лабораторных плавов был получен металл с средним содержанием меди 89,0% Cu, отвальный шлак содержал 0,24 – 0,47% CuO. Кратность шлака за опытную компанию (9 плавов) составила 3,07. Всего было выплавлено 252 кг медьсодержащего металла и 775 кг

шлака. Удельный расход электроэнергии за опытную кампанию составил 2475 кВт·ч/т.

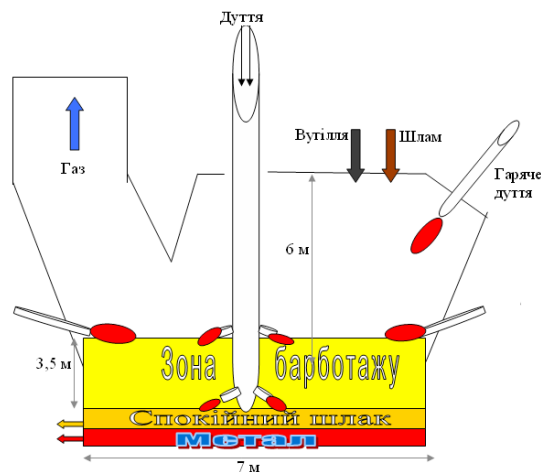
Доказана принципиальная возможность выплавки черновой меди из окисной руды углеродтермическим способом из-под закрытого колошника.

УДК 621.74

*Ю. С. Паніотов, В. С. Мамешин, А. С. Гриценко, С. В. Журавльова*  
Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ

### ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНОЕ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕРВОСОРБНОГО МЕТАЛЛА ПРОЦЕССОМ РИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Разработана технология ридкофазного восстановления не требует коксового угля и окисленной железной руды, может перерабатывать любые технологические отходы, в том числе с высоким содержанием цинка, свинца, луги и других вредных примесей. Она значительно проще в управлении, чем доменная печь. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ сокращаются в 5 – 10 раз по сравнению с коксо-агло-доменной технологией. При переработке больших запасов (по несколько миллионов тонн) замазанной окислы в смеси с шлаками, которые скопились у многих металлургических заводов, обеспечивается экономия чугуна на 10 – 15% ниже, чем при выплавке чугуна в доменной печи. Капитальные затраты на строительство установки меньше на 40%.



Ориентированный объем производства: 300 – 600 тыс. т/год  
Термин внедрения: 18 – 36 месяцев.

Затраты на освоение и промышленное освоение: 65 млн. долларов США.  
Термин окупаемости: 36 – 48 месяцев.

Экономический эффект от внедрения: 1 – 2 млн. долларов США.

УДК 621.745.34

*О. И. Пономаренко, В. Ф. Пелих, А. В. Березная*  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Харьков

### ПОЛУЧЕНИЕ СИНТИКОМА В ВАГРАНКЕ

Синтиком – универсальный шихтовый материал, предназначенный для выплавки высококачественных сталей. В простейшем случае представляет собой чушку, содержащую чугун и оксид железа [1].

К основным преимуществам синтикама следует отнести:  
возможность получения стали ответственного назначения;  
ускорение процесса плавки за счет снижения температуры плавления;  
раннее начало окисления углерода с высокой скоростью;  
улучшение теплового баланса печи за счет непрерывного выделения монооксида углерода;  
быстрое формирование высокоосновного шлака;  
снижение удельных энергозатрат;  
повышение степени дефосфорации стали на 3-5%.

Изготовление синтикама базируется на принципе синтеза с использованием начальных компонентов, имеющих известный состав, характеристики, возникновение и наследственность. Синтиком получают в доменных печах следующим образом: в расплавленный чугун вводят определенное количество дешевого наполнителя, который равномерно распределяется по всему объему. Полученный жидкий материал разливают по литейным формам. Благодаря возможности добавления точного количества определенного наполнителя (оксида железа, углеродсодержащих материалов и других) можно на выходе получить продукт с заранее заданными свойствами.

На сегодняшний день производство синтикама освоено на нескольких предприятиях России, а его испытания были проведены в США, Молдове, Беларуси, Турции, Испании, Чехии.

Предлагается разработать альтернативный способ получения синтикама с использованием не доменного, а ваграночного процесса [2]. Для этого, в первую очередь, необходимо организовать бескоксый ваграночный процесс с использованием дополнительных источников тепла: подогрев дутья,

обогащение дутья кислородом, применение плазмы. А также исследовать физико-химические процессы, происходящие в доменной печи и в вагранке, составить их сравнительную характеристику.

Основное различие между доменной печью и вагранкой состоит в том, что доменная печь – это агрегат восстановительной плавки железорудного сырья с получением чугуна, вагранка же – это агрегат, предназначенный для расплавления металла (в основном – чугуна). Плавка в вагранке является последующим этапом получения металлических изделий на основе железа.

С помощью ЭВМ были произведены теоретические расчеты теплового и материального баланса вагранки при использовании в качестве шихты железорудных материалов. Результаты расчетов показали, что для достижения полной замены шихты вагранки на железорудное сырье необходимо повысить температуру печи. Как отмечалось выше, этого можно добиться при использовании альтернативных источников тепла для вагранки.

#### Список литературы

Дорофеев Г. А., Шахпазов Е. Х., Афонин С. З. и др. Синтиком - первородная металлошихта для электросталеплавильного производства при выплавке качественной стали // Электрометаллургия. – 2008. – №7. – С. 28 – 33.

Найдек В. Л. Оценка перспектив сотрудничества металлургии и литейного производства в Украине // Металлообработка. – 2008. – №1. – С. 2 – 5.

УДК 621.744.3

*О. И. Пономаренко, Н. С. Евтушенко, А. В. Бережная*  
*Национальный технический университет*  
*«Харьковский политехнический институт», Харьков*

### **СТАБИЛИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ОФОС**

Повышение качества формовочных смесей – одна из актуальных задач литейного производства. Для того, чтобы получить отливку, свободную от дефектов, формовочные и стержневые смеси, из которых изготавливают форму и стержни, должны удовлетворять комплексу определенных свойств. Однако, по существующим данным, 40-60% дефектов отливок обусловлено неудовлетворительным качеством формовочных материалов и смесей. Поэтому одним из основных направлений повышения качества отливок, снижения уровня их брака по вине формовочных смесей является стабилизация их свойств.

Решение задачи стабилизации свойств формовочной смеси может быть получено на основе перехода к гибкой системе управления выходными параметрами формовочной смеси, обладающей способностью адаптации к колебаниям характеристик исходных формовочных материалов и параметров приготовления смеси. Практическая реализация этого принципа возможна только на основе надежных математических моделей свойств формовочной смеси.

Для моделирования свойств смеси на основе олигофурфурилоксисилоксанов (смола ОФОС) был проведен полный факторный эксперимент 2<sup>3</sup>, содержащий 8 опытов.

В качестве выходных параметров были выбраны основные физико-механические показатели свойств формовочной смеси: прочность на сжатие и живучесть ( $y_1$  и  $y_2$  соответственно).

Независимыми переменными, определяющими качество песчано-смоляной смеси, приняты: количество ( $x_1$ ) и концентрация ( $x_2$ ) используемого катализатора, количество введенной в смесь смолы ( $x_3$ ). В качестве катализатора использовали пара-толуолсульфоокислоту ПТСК.

В результате обработки полученных данных была получена следующая система уравнений:

$$y_1 = 0,87 + 0,27x_1 - 0,36x_2 - 0,27x_3 + 0,13x_1x_3 + 0,18x_2x_3$$

$$y_2 = 7,24 - 0,9x_1 - 2,09x_2 - 1,325x_3$$

На основе разработанных математических моделей создана номограмма, описывающая зависимости между параметрами технологии и свойствами формовочных смесей.

Использование номограммы в промышленных условиях позволяет: предсказать прочность и живучесть ХТС смеси того или иного состава; для заданной прочности либо живучести определить необходимый состав смеси.

Таким образом, можно сделать вывод, что в составах ХТС на основе ОФОС количество катализатора может колебаться в пределах от 0,5 до 1,25%; концентрация катализатора – 50%-70%; количество смолы – от 0,5 до 2,0%.

Разработанные рекомендации по стабилизации свойств смесей показали практическую целесообразность их использования для решения задачи стабильности и качества смесей на ряде заводов Украины.

УДК 621.744.3

*О. И. Пономаренко, Т. В. Берлизова**Национально технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков***МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ ДЛЯ  
ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩЕЙ СМЕСИ (ХТС) НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО  
СТЕКЛА**

В настоящее время известен ряд способов отверждения ХТС на жидком стекле с помощью  $\text{CO}_2$ . Существенным недостатком таких смесей является плохая выбиваемость, которая обусловлена образованием при температуре более  $700^\circ\text{C}$  легкоплавких силикатов, приводящих к повышению остаточной прочности. Одним из самых эффективных способов улучшения выбиваемости является ввод разупрочняющих добавок. Поэтому применение жидких отвердителей наряду с созданием разупрочняющей добавки, которые позволяли бы отказаться от применения  $\text{CO}_2$ -процесса, а также увеличивали прочность смеси во влажном состоянии и уменьшали остаточную прочность является актуальной задачей литейного производства.

Решение этой задачи может быть получено на основе надежных количественных зависимостей между параметрами приготовления смеси и ее физико-механическими свойствами, т. е. на основе математических моделей [1, 2].

Математические модели свойств представляет собой систему уравнений, связывающих прочность на сжатие, живучесть, остаточную прочность смеси с управляемыми переменными технологического характера, в качестве которых были приняты: количество жидкого стекла (ЖС) и разупрочняющей добавки: триацетин с фурфуроловым спиртом (ТАЦ:ФС). Составляющие брали в следующем количестве: на основном уровне брали 4% ЖС и 3% добавки ТАЦ:ФС; интервал варьирования между основным, верхним и нижним уровнем составил по 1% для ЖС и ТАЦ:ФС. Основной уровень и интервалы варьирования реализованного плана выбраны на основе предварительных статистических исследований рассеяния параметров технологического процесса приготовления холоднотвердеющих смесей на основе жидкого стекла.

План активного эксперимента представляет собой полуреплику (23-1) полного факторного эксперимента для двух переменных, которая включает 4 опыта. После реализации эксперимента 23-1 получены следующие линейные уравнения регрессии:

$$\sigma_{\text{сжс}} = 0,12 + 0,08X_1 - 0,08X_2 - 0,06X_{12}$$

$$\text{Жив} = 16,25 + 3,75X_1 - 3,25X_2$$

$$\sigma_{\text{ост}} = 3,3 + 2,3X_1 - 2,3X_2 - 1,84X_{12}$$

Была проверена статистическая значимость коэффициентов уравнений регрессии с помощью критерия Стьюдента (t-критерия).

Проверка адекватности полученной математической модели свойств с помощью критерия Фишера показало ее полное количественное соответствие используемым экспериментальным данным. При этом влияние варьируемых факторов на параметры оптимизации соответствует имеющимся данным количественного и качественного характера.

Анализ математических зависимостей показал, что прочность смеси во влажном состоянии, живучесть и остаточная прочность возрастает с увеличением содержания жидкого стекла и уменьшается с увеличением содержания добавки (ТАЦ:ФС). На параметры процесса смесеприготовления также оказывает и парные взаимодействия исходных составляющих.

Результатом работы являются практические рекомендации по использованию математической модели свойств для ХТС на основе ЖС для апробации на заводе ВАТ «Турбоатом».

Список литературы

1. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экспериментов. - М.: Наука, 1965. - 340 с.;
2. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. - М.: Мир, 1967. - 406 с.

УДК 621.74

*А. Ю. Пройдак**Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОФОСФОРА  
УГЛЕРОДОВОССТАНАВИТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МАЛОКАМЫШЕВАТСКОГО ФОСФОРИТА**

При выплавке некоторых марок автоматных сталей и чугунов применяется импортный феррофосфор из-за отсутствия его производства на отечественных заводах. Велика потребность литейного производства в фосфористой меди для изготовления медных контактных щек электрических узлов самообжигающихся электродов ферросплавных дуговых печей.

Минерально-сырьевой базой для производства электротермического фосфора и попутно получаемого феррофосфора являются фосфориты. Наиболее крупные месторождения фосфоритов расположены в фосфоритоносном бассейне Каратау (Казахстан). Однако запасы богатых фосфоритов (27-29%  $P_2O_5$ ) постоянно исчерпываются и ставится задача освоения технологий производства фосфора (желтой модификации) с вовлечением фосфоритов с содержанием 20-22%  $P_2O_5$ .

При производстве фосфора в дуговых электропечах методом восстановления фосфора углеродом и его возгонки в качестве попутного сплава получается феррофосфор.

В странах, не производящих желтый фосфор и, следовательно феррофосфор, последний получают по традиционным ферросплавным технологиям.

В Украине имеется несколько месторождений фосфоритов. В последние годы разведано малокамышеватское месторождение фосфорита с содержанием 13-16%  $P_2O_5$ . В настоящей работе исследован минералогический состав фосфорита методом петрографии и РСМА, выполнены исследования по его обогащению, получен концентрат с содержанием 27%  $P_2O_5$ . В лабораторной печи Таммана проведены поисковые исследования по восстановлению фосфора из фосфорита коксом в присутствии стальной (чугунной) стружки. Подтверждена возможность получения феррофосфора с 15-20% P.

Работа продолжается в направлении получения феррофосфора и его применения для модифицирования чугунных отливок, а также выплавки медьфосфористой лигатуры и его использования для раскисления медных отливок контактных щек электродов ферросплавных электропечей.

УДК 621.74

*А. В. Рабинович, Г. Н. Трегубенко, Ю. А. Бубликов, Г. А. Поляков,  
А. В. Пучиков, А. А. Катрич, Д. В. Лелеко  
Национальная металлургическая академия Украины,  
Днепропетровск*

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ  
С КАРБОНИТРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ДЛЯ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ**

Главным резервом повышения долговечности и надежности продукции машиностроения является применение сталей, обладающих как в литом, так и в деформированных состояниях комплексом высоких технологических и эксплуатационных свойств – прочностью, вязкостью, сопротивлением уста-

лостному разрушению, свариваемостью, хладо- и коррозионной стойкостью.

Основным направлением решения этой задачи в мировой практике является увеличение степени легированности стали, что далеко не всегда обеспечивает их конкурентоспособность в связи с резким ростом стоимости металлопродукции. Именно по этой причине существенно ограничивается область и объемы применения перспективных сталей с карбонитридным упрочнением, в которые вводят не только относительно недорогие марганец и кремний, а и дорогостоящие и дефицитные в Украине хром, никель и, как правило, ванадий.

Независимо от степени легирования сталей этого класса основной вклад в обеспечение комплекса перечисленных выше требований вносят карбонитриды ванадия, регулирующие зеренную микроструктуру металла. При этом дисперсность и количество этой избыточной фазы определяется не столько уровнем концентраций и соотношением фазообразующих элементов, сколько температурными режимами термической обработки.

Нами предложена замена дорогостоящего и дефицитного ванадия в азотсодержащих конструкционных сталях титаном в комплексе с алюминием, что принципиально меняет механизм формирования микроструктуры, так как нитриды титана образуются уже при кристаллизации и регулируют рост зерна литого металла.

Металлографическим и рентгеноспектральными методами показано, что избыточные азотсодержащие фазы в новых литых сталях представлены карбонитридом титана  $Ti(C,N)$ , нитридом алюминия  $AlN$  и комплекса указанных фаз. Их размер колеблется в очень широких пределах: от 10 нм до 10-12 мкм. Относительно крупные частицы карбонитрида титана имеют правильную прямоугольную форму и именно они регулируют размер зерна литого металла при кристаллизации. Очень мелкие частицы  $Ti(C,N)$  размером 15-20 нм частично могут формироваться и в твердом состоянии. Нитриды алюминия образуются при охлаждении уже закристаллизовавшегося металла, а также при горячей деформации или при термической обработке, и имеют размеры от 40 до 200 нм (реже до 500 нм) при максимальном количестве частиц размера 60-100 нм. Комплексные частицы, как правило, представлены высокотемпературным карбонитридом титана в центре с оторочкой из вторичного нитрида алюминия. Результирующий размер этих частиц составляет от 100-150 нм до 1-2 мкм. Мелкие частицы всех трех типов эффективно измельчают ферритное зерно. Их наличие допускает высокотемпературную термическую обработку стали и ее сварку без опасности чрезмерного роста аустенитного зерна и последующего ухудшения комплекса механических свойств металла.

В условиях Кременчугского сталелитейного завода, Миргородского завода литой трубопроводной арматуры ПНЦ в широких промышленных

масштабах подтверждена возможность производства низколегированных хладостойких сталей с карбонитридным упрочнением для литых изделий повышенной прочности.

Установлено, что комплексное модифицирование низколегированных хладостойких сталей (например, 20ГЛ, 15ГСЛ) азотом, титаном и алюминием стабильно обеспечивает:

- измельчение зерна металла до 8 – 9 балла;
- полное отсутствие неметаллических включений II типа;
- увеличение предела текучести в нормализованном состоянии на 30-50 МПа, а после закалки и высокого отпуска – на 60-150 МПа;
- повышение циклической долговечности литого металла не менее чем в 1,7 раза.

По результатам усталостных испытаний опытно-промышленных образцов отливок «Балка надрессорная» и «Рама боковая» из стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением коэффициент запаса усталостной прочности составляет 2,29 и 2,03, соответственно, что отвечает требованиям к грузовым вагонам нового поколения.

Показано, что литые низколегированные стали, комплексно микролегированные азотом, титаном и алюминием (типа АТЮЛ), обладают уникальным комплексом свойств, превосходящим отечественные и зарубежные аналоги. Например, сталь 15ГСАТЮЛ имеет  $\sigma_s > 400$  МПа,  $KCV_{60} > 29,4$  Дж/см<sup>2</sup> при углеродном эквиваленте не более 0,43. При этом высокие значения прочности и ударной вязкости обеспечивают эксплуатационную надежность даже в экстремальных условиях крайнего Севера, а также позволяют существенно уменьшать металлоемкость используемого литья. Низкий углеродный эквивалент литых сталей типа АТЮЛ позволяет проводить сварные работы (например, варку запорной литой арматуры в трубопровод) в «полевых» условиях, исключая подогрев с последующей термообработкой.

УДК 621.74

*А. А. Радченко, А. В. Гальченко*

*АО «Харьковский тракторный завод им. С.Орджоникидзе», Харьков*

### **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ И ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК**

Рост требований к качеству продукции приводит к поиску способов экономии материалов и энергетических ресурсов. Наблюдаемое снижение объемов лома, его загрязнение примесями, влияющими на качество отливок, рост цен на шихтовые материалы приводит к поиску эффективных техно-

логий, раскислителей, флюсов и модификаторов для обработки жидкого металла.

С этой целью в литейных цехах ХТЗ были опробованы предлагаемые в настоящее время новые комплексные модификаторы, содержащие щелочноземельные (ЩЗМ) и редкоземельные металлы (РЗМ).

Приготовленную методом переплава высокомарганцовистую сталь 110Г13Л, жидкий чугун обрабатывали дополнительно в разливочном ковше следующими модификаторами:

- БСК-2 (барий стронций кальций);
- РЗМ-содержащие;
- алюминием или ферросилицием в количестве до 0,5 % от массы жидкого металла.

Сравнительные исследования образцов для определения механических свойств чугуна и стали показали незначительное изменение изучаемых параметров.

Так обработка расплава карбонатами ЩЗМ в разливочном ковше емкостью 300 кг не обеспечивает необходимый временной интервал для полной обработки расплава, ввиду чего на образцах обнаружены крупные неметаллические включения из-за нерастворившегося материала.

Замечено более эффективное влияние модификаторов с РЗМ на повышение жидкотекучести жидкого металла, улучшение микроструктуры и незначительное (на 15%) повышение уровня механических свойств, как стали, так и серого чугуна. Наблюдаемое снижение брака литья в опытных партиях в основном по дефектам газового происхождения.

Для оценки экономических показателей эффективности использования модификаторов необходимо проведение дополнительных работ в данном направлении.

УДК 621 74.04

**С. И. Репах**Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ),  
Днепропетровск**О КОРОбЛЕНИИ ВЫПЛАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК**

Одним из наиболее часто встречаемых дефектов отливок особо ответственного назначения, изготавливаемых методом литья по выплавляемым моделям, является их коробление (искривление). Коробление отливки может быть обусловлено как короблением самой отливки при её охлаждении в форме, так и при охлаждении и хранении её ВМ на воздухе, либо в процессе формирования на поверхности ВМ огнеупорного покрытия. Анализ условий производства отливок особо ответственного назначения показал, что, как правило, основной причиной коробления отливок являются искривления их ВМ. Поэтому повышение и стабилизация точности формы ВМ является актуальной проблемой в части повышения и стабилизации точностных параметров литья особо ответственного назначения, а разработка математической модели, позволяющей прогнозировать уровень коробления ВМ, является актуальной задачей.

Для проведения теоретических исследований в качестве объекта исследования принята ВМ отливки балочного типа несимметричного таврового сечения. Схема сечения исследуемой ВМ представлена на рис. 1.а, а вид этой короблённой ВМ сбоку – на рис. 1.б.

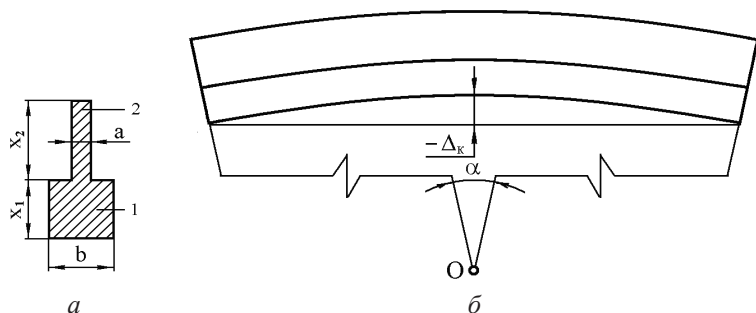


Рис.1. Схемы поперечного сечения ВМ (а, б) и схема вида ВМ сбоку (в): 1 – полка; 2 – ребро.

Величину коробления ВМ определяли, приняв следующие допущения: ВМ затвердевает и охлаждается в неподатливой пресс-форме до комнатной температуры; во время нахождения в пресс-форме затвердевание и охлаждение полки и ребра ВМ проходит независимо друг от друга, как в силовом,

так и тепловом отношении до момента перехода модельного состава в ребре ВМ из пластического в упругое состояние; переход модельного состава из пластического в упругое состояние происходит при постоянной температуре  $t_{ПУ}$ ; величина линейной усадки ребра ВМ предопределяется только её торможением со стороны стенок пресс-формы во время охлаждения; величина линейной усадки полки ВМ предопределяется только её торможением при усадке со стороны ребра; коробление ВМ, извлечённой из пресс-формы, возникает в результате различия величин линейных усадок сопрягающихся (полки и ребра) элементов ВМ; короблённая ВМ имеет дугообразный вид с условным геометрическим центром дуги в точке “О”.

Исходя из принятых допущений, получили следующую формулу:

$$-\Delta_k = \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^n \cdot \left(R_C - \sqrt{R_C^2 - 0,25 \cdot l_1^2}\right), \quad (1)$$

$$R_C = \frac{x_1 + x_2}{2} \cdot \left(\frac{l_2}{l_2 - l_1} - 1\right) - \frac{x_2 + 2 \cdot x_1}{2}, \quad l_1 = l_{ПФ} \cdot (1 - \alpha_1),$$

$$l_2 = l_{ПФ} \cdot (1 - \alpha_2),$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 \cdot \left(1 + \frac{R_1 - R_2}{R_1}\right), \quad \alpha_2 = \alpha_C - \frac{\sigma_{ТР}}{E_0} \cdot \left(\frac{l_{ПФ}}{R_2}\right)^m,$$

$$R_1 = \frac{x_1 \cdot b}{2 \cdot x_1 + 2 \cdot b - a}, \quad R_2 = \frac{x_2 \cdot a}{2 \cdot x_2 + a}$$

где  $l_{ПФ}$  – длина рабочей полости пресс-формы, м;  $\alpha_C$  – коэффициент свободной линейной усадки модельного состава;  $\sigma_{ТР}$  – касательные напряжения в ВМ, обусловленные воздействием на неё внешней нагрузки (силы трения);  $E_0$  – модуль упругости модельного состава;  $m$  – показатель степени.

Сравнительный анализ расчётных и экспериментальных данных о величине коробления реальных ВМ показал их удовлетворительную сходимость, что позволят использовать формулу (1) для теоретической оценки влияния размеров ВМ, параметров модельного состава и давления запрессовки модельного состава в пресс-форму на величину коробления ВМ балочного типа несимметричного таврового сечения.

Применительно к ВМ любой другой конфигурации, в соответствии с

результатами анализа формулы (1), установлена закономерность понижения величины коробления ВМ с уменьшением её протяженности, а также с уменьшением коэффициента свободной линейной усадки модельного состава, используемого для изготовления ВМ.

УДК 621.744.362

**П. В. Русаков**

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

### **ДИНАМИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ НАСЫПНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ**

Для процессов формовки весьма важно оптимально управлять режимами виброуплотнения насыпных литейных форм [1-3]. Специфика процессов формовки дисперсных материалов в определенной степени объясняется наличием в них двух полярных свойств: - гравитационного осыпания массы под действием случайных возмущений и статической устойчивости сжатой смеси в литейной оснастке. Оптимальное регулирование вибрации обеспечивает не только необходимую текучесть песка, но также приводит к такому изменению тиксотропных свойств формовочной смеси, в результате которого дисперсные частицы консолидируются в твердое тело. При формовке число возникающих дефектов также зависит от качества управления процессом вибрационного воздействия, т.к. в процессе сжатия формомассы на поверхности моделей протекают упругопластические деформации. С другой стороны, зарождение внутренних дефектов происходит в переходных колебательных режимах, в основном при вхождении вибрационной машины в зону рабочих частот, и при выходе из этой зоны. Как показали проведенные специальные исследования напряженно-деформированного состояния формы, в переходных режимах вибрационного воздействия динамика изменения напряжений в основном определяется конструктивной жесткостью формы и запасом мощности привода виброформовочной машины. Одновременно проводились исследования режимов вызывающих возбуждение резонансных явлений, деформирование элементов формы в нестационарных режимах вибронегрузения. Таким образом, анализ режимов формообразования показал, что основные причины снижения плотности форм вызваны переходными процессами, действием эффекта Зоммерфельда и критическим деформированием стенок контейнера. В ходе исследований также сформулированы принципы защиты и электромеханической адап-

тации процесса виброформовки применительно к меняющимся внешним условиям [4,5]. Методология синтеза самонастраивающихся вибрационных систем включает оптимизацию конструкций опок-контейнеров грузоподъемностью 0,5 - 5т. Разработан принципиально новый способ вибрационной формовки, обеспечивающий уменьшение отрицательного действия переходных процессов при выходе из состояния вибрационного воздействия.

Список литературы

1. П. В. Русаков. Способ виброформовки насыпных литейных форм с энергетическим отображением процесса дилатансии // Металл и литье
2. П. В. Русаков. Особенности моделирования виброформовочных машин с переменной присоединяемой массой // Процессы литья. 2009. – №3. – С. 35-42.
3. В. Л. Найдек, О. И. Шинский, П. В. Русаков. Энергочастотное управление режимами вибрационной формовки // Процессы литья. 2009. – №4. – С. 69-76.
4. П. В. Русаков, О. И. Шинский, В. В. Здохненко. Модель ЛТС с синхронизированными по частоте вибрационными машинами // Процессы литья. 2010. – №3. – С. 36-45.
5. П. В. Русаков. Некоторые общие принципы дуального управления процессом виброформовки // Процессы литья. 2010. – №4. – С. 35-42.

УДК 621.746.043.3

**В. Ю. Селіворстов, Ю. В. Доценко**

*Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ*

### **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ НА РОЗПЛАВ В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ**

Накопичений вітчизняний і зарубіжний досвід свідчить про перспективність проведення подальших досліджень і отримання результатів, що забезпечують розробку нових процесів, що використовують тиск в якості активного чинника впливу на процес структуроутворення литого металу. Зокрема, актуальною є розробка нових процесів впливу тиском на розплави усередині виливка з використанням міцністних характеристик твердого поверхневого шару металу, що герметизує систему виливок - пристрій для введення газу. Різновидами цього процесу є, відповідно, процеси газодинамічного витиснення розплаву із ливникової системи у виливок після заливки форми металом та газодинамічного впливу на рідку фазу всередині виливка з метою передачі тиску через неї впродовж всього часу твердіння.

Одним з найбільш поширених типів ливникових систем (ЛС), широко використовуваних у ливарному виробництві, є сифонна система підводу металу. При цьому витрати металу на ЛС є досить значними (до 20% маси

виливка). Технологія регульованого газодинамічного витиснення рідкого металу з ЛС у виливок після його заливки в форму забезпечує підвищення виходу придатного литва. Технологічний процес витиснення розплаву з ЛС заснований на ефекті самогерметизації металу. Передбачена можливість регульованої подачі газу та введення фіксованої кількості речовини, при нагріванні якої виділяється газ.

Процес забезпечує живлення усадки осьової зони виливка, а також можливість проводити газоімпульсну обробку розплаву в ливарній формі, продування металу, що кристалізується, інертним газом, газом з порошкоподібними модифікаторами або легуючими.

Технологія газодинамічного впливу (ГДВ) на рідку фазу в герметизованій у ливарній формі системі виливок-пристрій для введення газу забезпечує підвищення якості виливків і злитків при реалізації змінюваного в часі наростаючого газового тиску до повного затвердіння металу в діапазоні від атмосферного до десятків мегапаскалів. Наприклад: після ГДВ тимчасовий опір сталі 35Л збільшується на 10 – 12 %, твердість – на 5 – 12 %, відносно подовження – на 30 – 40 %;

результати механічних випробувань зразків сталі Р18Л, що твердіє в формі ЛВМ при різних режимах газодинамічного впливу, показали збільшення тимчасового опору на 11 – 14 %, твердості – на 9 – 12 %, відносного подовження – на 19 – 21 %. Застосування технології лише при виготовленні литих заготовок для виготовлення ріжучого інструменту замість використання прокату дозволяє в 2 рази знизити собівартість заготовки.

Можливості розроблених технологій [1-4] практично не мають обмежень по масі виливків або злитків, видам сплавів, по різновидам ливарних форм, та можуть бути легко вбудованими в діючий технологічний процес.

#### Список літератури

- Пат. 55301 Україна, МПК (2009) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.С., Доценко Ю.В., Куш П.Д., Савега Д.О.; власник патенту Національна металургійна академія України – № у 201006702; заявл. 31.05.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
- Пат. 46128 Україна, МПК (2009) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.С., Куцова В.З., Міняйло О.В., Савега Д.О.; власник патенту Національна металургійна академія України – № у 200906107; заявл. 15.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23.
- Пат. 37838 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.С., Доценко Ю.В.; власник патенту Національна металургійна академія України – № 200808859; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 23.
- Пат. 28858 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.С., Доценко Ю.В.; власник патенту Селівьорстов В.Ю. – № 200708968; заявл. 03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл. № 21.

УДК 669.715:66.063

*А. И. Семенченко, В. М. Дука, Л. К. Шеневидько,  
А. Г. Вернидуб, И. В. Хвостенко*  
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев

### ГИДРОЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ РАСПЛАВОВ

Выполненные ранее авторами исследования показали, что гидроциркуляционная обработка (ГЦО) расплава может применяться для легко реализуемого механического модифицирования алюминиевых сплавов в условиях традиционных методов литья. Важным преимуществом данного метода обработки металла служит тот факт, что она удобно совмещается с операциями рафинирования и термовременной обработки алюминиевых расплавов. Кроме того, ГЦО является технологически и экономически эффективным инструментарием интенсификации процесса выплавки алюминий-кремниевых сплавов.

Настоящие экспериментальные исследования эффективности воздействия ГЦО расплавов на формирование структуры и свойств, частично закристаллизовавшихся алюминиевых сплавов, проводились на лабораторной установке, состоящей из таких основных узлов: печь-термостат, перемешивающее устройство, блок управления приводом перемешивающего устройства и вакуумная система для отбора опытных образцов.

Блок управления электроприводом установки позволяет регулировать и измерять скорость вращения мешалки от 1 до 2000 об/мин с погрешностью  $\pm 1$  об/мин.

В качестве шихты при выплавке исследуемого расплава использовали чушки развесом  $0,8 \pm 0,1$  кг ранее выплавленного базового сплава. После расплавления и перегрева металла до температуры  $750 \pm 5$  °С проводили экспрессный термический анализ сплава, в ходе которого наряду с контролем химического и фазового состава устанавливали температурные параметры кристаллизации фазовых составляющих сплава и темп выделения твердой фазы в интервале температур кристаллизации металла.

Гидроциркуляционную обработку расплава в печи-термостате производили в интервале температур кристаллизации  $\alpha$ -твердого раствора алюминия при скорости перемешивания  $1280 \pm 20$  об/мин.

Отбор расплава для заливки проб для контроля структуры литого металла производили специальным ковшом с вмонтированной термопарой не прерывая ГЦО. Отобранную порцию расплава при требуемой температуре заливали в стальные вытряхные кокиля с диаметром рабочей полости 20 мм и высотой 50 мм. После порезки опытных образцов на темплеты и соот-

ветствующей подготовки шлифов изучали макро- и микроструктуру литого сплава в поперечном сечении образца.

Структура образцов, полученных при температуре заливки расплава в форму, равной 617 °С, характеризуется наличием первичных  $\alpha$ -Al кристаллов с размерами порядка 0,6-0,8 мм, с дендритно-розеточной морфологией и средним параметром ячейки в 26-30 мкм. Al-Si эвтектика при этом имеет в основном вырожденный характер, располагаясь в пространстве между включениями первичной фазы, но с присутствием эвтектических областей размером 95-130 мкм.

Образцы, полученные при заливке обработанного до температуры 612 °С расплава, характеризуются наличием первичных  $\alpha$ -Al кристаллов с размерами порядка 1,0-1,3 мм. Эти кристаллы имеют крупную ячейку (160-170 мкм), а также искривленные вторичные ветви. При этом распределение таких кристаллов достаточно равномерное по сечению отливок. Остальная масса первичных  $\alpha$ -Al кристаллов имеет средний размер ячейки около 20 мкм.

При дальнейшем снижении температуры обработки и заливки расплава до 602-599 °С структура образцов характеризуется увеличенным содержанием первичных  $\alpha$ -Al кристаллов размером 1,4-1,3 мм, с параметром ячейки 175-190 мкм. При этом в структуре кристаллов наблюдается сливание и округление вторичных ветвей, с образованием розеткоподобных кристаллов. Подобный характер кристаллизации скорее всего является следствием непрерывного перемешивания при достаточно медленном охлаждении и затвердевании сплава. При этом протяженность эвтектических областей при температуре заливки 599 °С значительно увеличивается, достигая размеров 0,5-1 мм.

Таким образом, ГЦО расплава в плавильной печи в интервале температур кристаллизации  $\alpha$ -твёрдого раствора алюминия обеспечивает формирование тиксоструктуры достаточной подвижности для отбора металла разливочным ковшом или методом вакуумного всасывания. Вместе с тем дисперсность включений затвердевшей в условиях медленного охлаждения первичной фазы в металлической суспензии недостаточно высока.

Поэтому представляется целесообразным выдерживать расплав в раздаточной печи при его ГЦО в температурном интервале в окрестностях температуры ликвидус сплава в квазикристаллическом состоянии или в виде малоцентрированной металлической суспензии с последующей порционной ГЦО металла в разливочном ковше или специальном устройстве.

УДК 669.715:532.74:546.28

*А. И. Семенченко, Л. К. Шеневидько, А. Г. Борисов, И. В. Хвостенко*  
*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,*  
*Киев*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРЯМЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ**

Преимущества литья из жидко-твёрдого состояния, где твёрдая фаза имеет недендритную, розеточную или глобулярную морфологию, необходимую для обеспечения достаточной жидкотекучести расплава, в последнее время вызывают повышенный интерес среди производителей отливок. Не так давно появились работы, в которых недендритная морфология была получена без принудительного перемешивания, путём заливки расплава с определённой температурой в форму, нагретую до заданной температуры [1]. Следует отметить, что с практической точки зрения такой метод представляется наиболее экономически выгодным.

Поскольку в упомянутых выше работах исследования проводились исключительно для сплава типа АК7ч, в рамках настоящей работы была поставлена задача изучить возможность применения такого метода для получения недендритной структуры в сплавах на основе алюминия в широком интервале концентраций кремния.

В предыдущей работе было установлено, что наиболее благоприятными условиями для получения недендритной структуры являются заливка с минимальным перегревом над ликвидусом в кокиль с минимальной толщиной стенок и его температурой. Исходя из этого в настоящем исследовании во всех экспериментах осуществлялась заливка расплава с перегревом 10 °С в холодную металлическую форму. Концентрация кремния менялась от 4, 77 до 10, 4% кремния.

Было установлено, что при указанных выше условиях заливки недендритная структура реализуется во всём исследованном концентрационном интервале. При этом, с увеличением содержания кремния характер структуры меняется от крупнорозеточной с тонкими прослойками эвтектики (рис. 1 а) до структуры мелкоглобулярного вида, распределённой в эвтектической матрице (рис. 1 г)

Таким образом установлена принципиальная возможность применения прямого термического метода для получения недендритной структуры первичной фазы при литье широкой гаммы силуминов.

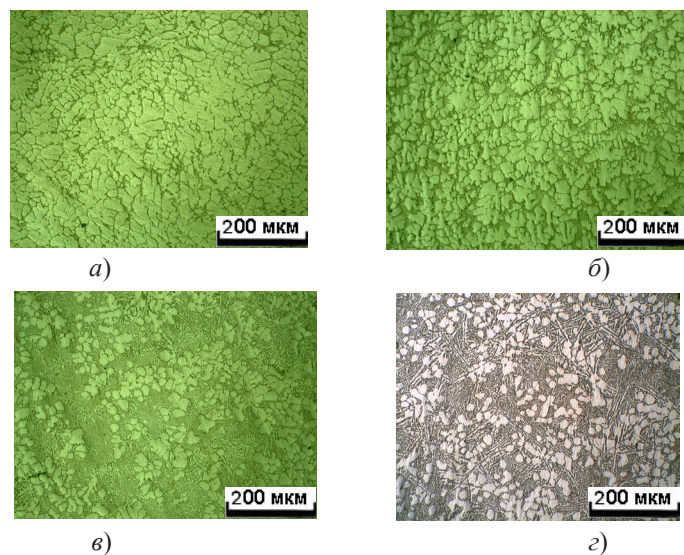


Рисунок 1 – Фотографии структур исследуемых образцов из сплавов на основе алюминия: а – 4,77% Si; б – 6,90% Si; в – 10,20% Si; г – 10,40% Si.

#### Список литературы

1. Brown D.J., Hussey M.J., Carr A.J., Brabazon D. "Direct thermal method: new process for development of globular alloy microstructure", International journal of cast metals research, 2003, v. 16, p.p. 418-426

УДК 621.74.045:669.24:621.984

*О. С. Сергієнко, В. В. Луньов, Г. А. Бялік*

*Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя*

### **ВПЛИВ ГАРЯЧОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ (ГІП) НА РІВНОМІРНІСТЬ РОЗПОДІЛУ Г'-ФАЗИ ТА ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ**

На властивості жароміцних нікелевих сплавів впливає комплекс факторів, серед яких особливу роль відіграє об'ємна доля  $\gamma'$ -фази, розмір і форма її часток, а також особливості розподілу  $\gamma'$ -фази, до яких у першу чергу слід віднести рівномірність її розподілу.

На сьогоднішній день не існує критерію для оцінки рівномірності розподілу  $\gamma'$ - фази у металевій матриці жароміцних сплавів. Але існують металографічні методи, які дозволяють визначити загальний вміст будь-якої фази відносно металевої матриці, наприклад, метод «Л», ГОСТ 1778-80.

Якщо за допомогою цього методу визначити індекс  $\gamma'$ - фази на двох лініях однакової довжини, проведених через зображення мікроструктури, за формулами:

$$I_{\gamma' \min} = \frac{I_{1\gamma'}}{L_{\zeta\alpha\alpha}} \quad I_{\gamma' \max} = \frac{I_{2\gamma'}}{L_{\zeta\alpha\alpha}} \quad (1)$$

де  $I_{i\gamma'}$  - сумарна довжина часток  $\gamma'$ - фази на даній лінії, мм,

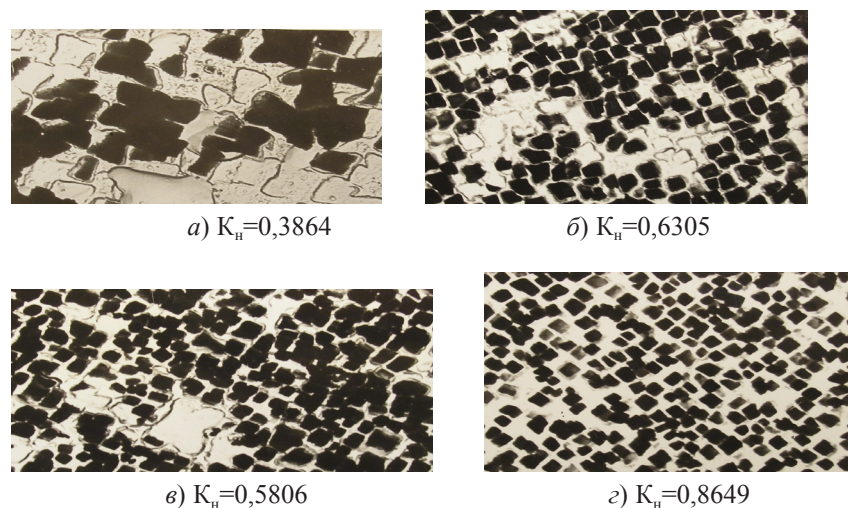
$L$  заг - загальна довжина зразка, що розглядається, мм.

то за критерій рівномірності розподілу  $\gamma'$ - фази можна прийняти відношення

$$K_{i\gamma'} = \frac{I_{\gamma' \min}}{I_{\gamma' \max}} \quad (2)$$

В ідеальному випадку, при цілком врівноваженому розподілі  $\gamma'$ - фази по об'єму металу, індекс  $\gamma'$ - фази, повинен бути однаковим для усіх пересічних ліній. При цьому коефіцієнт розподілу  $K_{i\gamma'} = 1$ .

Для визначення впливу рівномірності розподілу  $\gamma'$ - фази на міцність нікелевих сплавів, використано 4 зразка, виконаних за різними технологіями. Серед них: литий зразок, литий зразок з термообробкою, литий зразок після ГПІ та литий зразок після ГПІ і термообробки.



*a* – литий зразок, *б* – зразок після термообробки,  
*в* – зразок після ГПП, *г* – зразок після ГПП і термообробки.

Рисунок 1 - Морфологія і розмір  $\gamma'$ - фази у зразках, виконаних за різними технологіями.

Розрахунки за методом «Л» підтверджують, що після проведення ГПП рівномірність розподілу часток  $\gamma'$ -фази збільшується відносно литого стану, однак дещо поступається литому зразку після термообробки. Максимальний ефект досягається проведенням ГПП з подальшою термообробкою, у такому випадку коефіцієнт розподілу наближається до одиниці.

Якщо побудувати залежність між міцністю ( $\sigma_B$ ) і рівномірністю розподілу  $\gamma'$ - фази або розміром відстаней між частинками  $\gamma'$ - фази ( $D$ ), розрахункові дані підтверджуються, адже при рівномірному розподілі часток  $\gamma'$ - фази у металевій матриці, відстані між ними менші, ніж при нерівномірному розподілі.

#### Перелік посилань

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД, часть II. – Запорожье: издательство ОАО «Мотор Сич», 2003. – 496 с.

УДК 621.745.56:538.4/5:669-14

*Е. В. Середенко*

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

### ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЛИТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ ЗАКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Литые металлические сплавы с эмульгированной структурой перспективны как трибологические и упрочнённые материалы. Наиболее благоприятная форма включений в таких сплавах сферическая. Для управления структурой эмульгированных сплавов, в частности, применяются постоянные магнитные поля с индукцией ( $B$ ) превышающей 1 Тл, что требует специального оборудования. Под воздействием магнитного поля изменяется форма эмульгированных включений. Особенности этого процесса в настоящее время изучены недостаточно. Целью представленной работы было установление особенностей влияния постоянного горизонтального магнитного поля с индукцией  $0 < B \leq 1$  Тл на форму эмульгированных включений с помощью низкотемпературных сплавов двух типов, где фазы попеременно выступают основой и включениями, при использовании скорости охлаждения, характерной для обычных способов литья.

Для проведения исследований были использованы сплавы Zn – 14 % об. Вi и Вi – 45 % об. Zn, скорость охлаждения 2,5 °C/с, магнитное поле, создаваемое электромагнитом, с индукцией 0, 0,05, 0,1, 0,4, 0,7 и 1,0 Тл. Анализ литых структур сплавов показал, что независимо от величины  $B$  размер ( $L$ ) минимальных эмульгированных включений Вi составлял 5 мкм, Zn – 10 мкм, соотношение длины к ширине ( $b$ ) несферических включений Zn был на уровне 1,0 – 1,5, остальные исследованные параметры литых структур – диапазон размеров включений различных форм ( $L_{\min}$  –  $L_{\max}$ ), их количество ( $Q$ ), соотношение  $L/b$  несферических включений Вi, количество конгломератов включений Zn, образованных в результате коалесценции и коагуляции, существенно зависели от  $B$  (таблица).

Исходя из данных таблицы, для получения сферических эмульгированных включений рекомендуется применение  $B$  порядка 0,1 – 0,4 Тл и создание условий для формирования включений с размерами до 10 мкм.

Таблица

Характеристики эмульгированных включений в литых сплавах  
Zn – Bi и Bi – Zn

В, Тл		0,0	0,05	0,1	0,4	0,7	1,0	
Включения на основе Bi								
Формы включений	Сферическая	$L_{\min}-L_{\max}$ , мкм	5-45	5-45	5-30	5-21	5-6	-
		$Q$ , %	28	37	43	33	1	0
		$L/b$	1,1-1,7	1,3-1,5	1,1-1,3	1,1-1,3	1,7-4,0	2,0-4,0
	Овальная	$L_{\min}-L_{\max}$ , мкм	12-45	12-24	9-30	12-24	5-15	5-6
		$Q$ , %	72	28	50	19	2	3
		$L/b$	-	1,0-1,5	1,0-1,5	1,0-1,3	1,0-4,0	2,0-4,0
	Сложная	$L_{\min}-L_{\max}$ , мкм	-	9-36	15-30	9-36	9-30	6-30
		$Q$ , %	0	35	7	48	97	97
		$L/b$	-	1,0-1,5	1,0-1,5	1,0-1,3	1,0-4,0	2,0-4,0
Включения на основе Zn								
$L_{\max}$ , мкм		45	45	90	45	60	90	
Формы включений	Сферическая	$L_{\min}-L_{\max}$ , мкм	10-45	10-18	10-45	10-18	10-15	-
		$Q$ , %	27	17	27	4,5	8,5	0
		$L/b$	12-45	10-33	10-45	10-27	12-18	10-24
	Овальная	$L_{\min}-L_{\max}$ , мкм	12-45	10-33	10-45	10-27	12-18	10-24
		$Q$ , %	28	22	3,5	17	7	8,5
		$L/b$	21-45	12-45	10-90	15-45	12-60	10-90
	Сложная	$L_{\min}-L_{\max}$ , мкм	21-45	12-45	10-90	15-45	12-60	10-90
		$Q$ , %	33	40	43,5	62,5	75	34
		$L/b$	12	21	26	16	9,5	57,5
Конгломераты	$Q$ , %	12	21	26	16	9,5	57,5	

При получении промышленного медного сплава, упрочнённого эмульгированными включениями хромистого чугуна, был использован специальный режим обработки расплава переменным электромагнитным полем, обеспечившим равномерное образование включений среди которых преобладал размер 3 мкм, и заливка, охлаждение и затвердевание сплава в постоянном магнитном поле с индукцией 0,3 Тл. При этом эмульгированные включения имели сферическую форму. Применение специально организованных электромагнитных воздействий позволило повысить эксплуатационные характеристики сплава в 2,5 раза.

УДК 669.131.5:537.84

В. А. Середенко, С. Г. Голубчик

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В РАСПЛАВЕ ПРИ КОНТАКТНОМ ПОДВОДЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИТЕЙНЫЙ КОВШ

Эффективным способом улучшения служебных характеристик промышленных металлов и сплавов является внепечная обработка расплавов электрическим током [1,2]. Однако режимы обработки характеризуются весьма значительным диапазоном используемых плотностей электроток, пропускаемых по расплавам. Так, для черных металлов рекомендуют как  $5 \cdot 10^1$  А/м<sup>2</sup> [1], так и  $5 \cdot 10^4$  А/м<sup>2</sup> [2].

С целью определения степени отклонения плотности электрического тока в объеме расплава при его обработке в литейном ковше с использованием распространенной схемы подвода (параллельные цилиндрические электроды диаметрально расположенные у стенок ковша проведены исследования на физической модели. Определяющим критерием подобия выбрана относительная напряженность электрического поля  $E = \rho l^2 \rho_3^{-1/2} \eta^{-1/3} \cdot E$ , где  $\rho$  - плотность расплава,  $l$  - характерный размер,  $\rho_3$  - удельное электросопротивление расплава,  $\eta$  - динамическая вязкость сплава;  $E$  - напряженность электрического поля. Расплавленный металл, моделировал 25% водный раствор CuSO<sub>4</sub>. К электродам подводился постоянный ток. Плотность электротока измерялась контактным 2-х электродным датчиком.

В I серии экспериментов электроды были погружены вертикально в жидкость на одинаковую глубину  $h_3 (h_3/h=0,88$ , где  $h$  - высота расплава в ковше) при межэлектродном расстоянии  $l_3$  в безразмерном виде  $l_3/D$  равном 0,88 (где  $D$  - диаметр расплава по зеркалу) при  $E$  до 8,8.10<sup>3</sup>. Плотность тока  $i$  по высоте межэлектродного пространства в плоскости  $xz$  имела одинаковое распределение. В плоскости  $yz$  межэлектродного пространства  $i$  менялась несущественно. При  $E = 9 \cdot 10^2$   $i$  была максимальна непосредственно у электродов и существенно снижалась при удалении от них. Ее минимальное значение (в 8 раз меньше, чем у электродов) зафиксировано на оси  $z_3$  межэлектродного пространства. У дна емкости значение  $i$  было вдвое ниже, чем на оси  $z_3$  на уровне концов электродов, однако ток был распределен у дна равномерно. Значительное увеличение подводимого к электродам напряжения ( $E=8,8 \cdot 10^3$ ) не привело к изменению характера неоднородного распределения электротока в жидкой среде.

Во II серии опытов ( $E=8,8 \cdot 10^3$ ) один электрод был существенно короче другого (заглубление  $h_3/h$  короткого электрода 0,25, длинного 0,88).

Установлено значительное увеличение неоднородности распределения электротока в объеме расплава. Плотность тока у короткого электрода  $i_k$  была в 1,6 раза больше, чем у длинного. Минимальное значение  $i$  на поверхности расплава сместилось от центра к длинному электроду на  $0,25 l_э$  и составило  $0,18 i_k$ . Распределение тока у дна емкости отличалось зеркально от распределения его на поверхности жидкости – от минимального значения под коротким электродом ( $0,05 i_k$ ) до максимального  $0,9 i_k$  на расстоянии  $0,25 l_э$  от длинного электрода и при  $0,36 i_k$  непосредственно возле него.

Таким образом, необходим учет особенностей действия на локальные зоны расплава электротока различной плотности.

#### Список литературы

- Chernega D. Treatment of Metals and Alloys under Solidification by the Direct Current // Proc. 15th Riga and 6th PAMIR Conference of Fundamental and Applied MHD. Latvia – 2005. Vol. 2. – P.53-56.  
Миненко Г.Н. Обработка электротоком модифицированного серого чугуна // Литейное производство. – 2001. – №2. – С. 11.

УДК 669.245: 536.421.4

*В. М. Сімановський, Г.Ф. Мьяльница, І. І. Максюта, Ю. Г. Квасницька, А. С. Притуляк, О. В. Михнян*

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Києв*

### **ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВІТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД З ОРИЄНТОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ**

Актуальною та економічно важливою проблемою вітчизняного газотурбобудування на цей час є налагодження серійного виробництва робочих та соплових лопаток з орієнтованою структурою для транспортних та стаціонарних ГТД, в тому числі, наприклад, ГТД з потужністю 25...45 МВт (розробка ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект», м. Миколаїв).

ФТІМС НАНУ на протязі останніх 10 років проводить роботи зі створення жароміцних корозійностійких сплавів для деталей ГТД та композицій вогнетривкої ливарної кераміки, а також вдосконалює технологічні процеси отримання складнопрофільних виливків, в тому числі робочих лопаток турбіни ГТД з орієнтованою структурою за допомогою нових модифікованих матеріалів для тиглів, оболонкових форм та стрижнів.

В роботі, що виконувалась в лабораторії точного лиття жароміцних сплавів ФТІМС НАНУ та на базі ДП НВКГ «Зоря»- «Машпроект», показана можливість управління фазово-структурними характеристиками, такими як ступінь регулярності структури, дендритний параметр, дисперсність та об'ємна частка зміцнюючих інтерметалідних та карбідних фаз виливків з жароміцного корозійностійкого сплаву типу ХН6ОКМЮВТ (базового - без гафнію та модельного - з 0,2%, мас., гафнію), отриманих шляхом спрямованої кристалізації на промисловій установці УВНК-8П (ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект») в умовах регульованого тепловідводу. Також проведено вибір температурно-часового режиму термічної обробки деталей (робочих лопаток ГТД) з метою підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Для встановлення впливу технологічних параметрів процесу кристалізації на такі характеристики модельних сплавів, як макро- та мікроструктура, склад та морфологія зміцнюючих фаз, пов'язаних з коефіцієнтами ліквідації елементів у рівноважному та орієнтованому стані, проведено серії експериментів з варіюванням швидкості кристалізації на 2-ох рівнях: 5 та 10 мм/хв і градієнтом температур на фронті кристалізації 15-20 °С/см для базового (без гафнію) і модельного (з 0,2%, мас., гафнію) сплавів. Показано, що із збільшенням швидкості кристалізації і при введенні в базовий сплав 0,2% гафнію, збільшується об'ємний зміст інтерметалідної зміцнюючої  $\gamma'$ - фази з одночасним корегуванням розмірів її частинок, а також зростає кількість дисперсних карбідів МС-типу в міждендритному просторі. Таким чином, гафній в досліджуваному типі сплавів сприяє поліпшенню працездатності

матеріалу як за рахунок підвищення температури повного розчинення  $\gamma'$  - фази, також і завдяки зміцненню міжвісних ділянок матриці великою об'ємною кількістю більш стабільних дисперсних виділень карбідів.

В якості матеріалу оболонкових форм застосовувалася багат шарова кераміка на основі електрокорундової суспензії з модифікаторами, що підвищують термічну міцність форм. Як матеріал стрижнів для формування внутрішньої порожнини лопатки були опробувані модифіковані суміші на основі корунду та на основі кварцу.

Для виконання комплексу робіт були використані оптична та електронна мікроскопія, фазовий фізико-хімічний і високотемпературний диференційно-термічний аналіз, хіміко-спектральний метод для визначення хімічного складу, метод мікрорентгеноструктурного аналізу (МРСА) на установці JEOL «Superprobe – 733».

#### Список літератури

1. Симановский В. М., Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Питуляк А. С., Михнян О. В. Процессы формирования ориентированной структуры литых деталей в жаропрочных сплавах на никелевой основе // Процессы литья. - 2010. - №3. - С.69-75.

УДК 669.245: 536.421.4

**В. М. Сімановський, Г.Ф. Мяльниця, І. І. Максютя, Ю. Г. Квасницька,  
О. В. Михнян**

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

### **РАФІНУВАННЯ РОЗПЛАВІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ СПРЯМОВАНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ**

В останні роки увагу вітчизняних науковців – ливарників, у тому числі у ФТІМС НАНУ, привертають можливості підвищення експлуатаційних властивостей жароміцних сплавів комплексним застосуванням відомих технологій, наприклад, спрямованою кристалізацією з одночасним рафінуванням розплаву у печі. За результатами попередніх досліджень, проведених на базі ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект», м. Миколаїв, було показано, що застосування рафінування розплаву методом зонного плавлення одночасно з виплавленням заготовки дало змогу значно підвищити коефіцієнт використання ливарних відходів.

В роботі представлено результати аналізу процесу рафінування від неметалевих включень, шкідливих домішок та газів розплаву, отриманого з

шихти, яка вміщувала 50%, мас., первинної заготовки серійної марки сплаву ЧС88У - ВІ для лопаток ГТД та 50%, мас. вторинних ливарних відходів однойменної марки. Процес здійснювався в горизонтальній печі ПМП-4 виробництва Росії, яка представляє собою прохідну багатозонну вакуумну піч опору, призначену для спрямованої кристалізації. Для одержання заготовок були розроблені спеціальні багаторівневі керамічні форми, виготовлені як за звичайною промисловою технологією, також більш термостійкі форми, одержані за новою технологією з модифікованої кераміки. Також безпосередньо у формах проводилась примусова фільтрація розплаву. Для забезпечення оптимального режиму рафінування було обчислено час перебування форми з металом в різних температурних зонах та визначено температурні показники в кожній з них, тобто визначено температурний режим роботи, при якому під час переміщення форми з металом вздовж окремих зон, було забезпечено пересування плоского фронту кристалізації зі швидкістю в межах 2-4 мм/хв. При цьому встановлений експериментально градієнт температур на фронті кристалізації складав 15-20° С / см при вибраній швидкості кристалізації з урахуванням як марки сплаву, також співвідношення первинної та вторинної шихти, що використано. Вибрані згідно попереднім розрахункам основні технологічні параметри процесу повинні сприяти формуванню стовбчастої дендритної структури, при якій дендрити витягнуті в конкретному кристалографічному напрямку, а неметалеві включення різної дисперсності компактно зосереджуються перед фронтом кристалізації у верхній частині кожної заготовки і є можливість їх повного видалення механічною зачисткою.

Проте, оскільки відходи забруднені великою кількістю неметалевих включень, є доцільним заздалегідь піддавати розплав очищенню фільтрацією, що також передбачається в розробленому способі відновлення відходів за допомогою фільтрів.

Результати досліджень дослідних зразків заготовок показують, що рафінування методом спрямованої кристалізації призводить до істотного (на 30-60%, мас.) зменшення в сплавах змісту кисню і азоту. Важливим є також забезпечення помітного зниження змісту сірки. Оскільки це супроводжується також скороченням вмісту в сплавах марганцю, допустимо припустити, що ефективно зниження сірки може бути частково пов'язано з утворенням летючого з'єднання MnS<sub>2</sub>. Як показало вивчення макро- та мікроструктури шліфів (поперечний перетин), виготовлених зі зразків заготовок з різних зон (по висоті), вибрані температурно – швидкісні режими переміщення фронту кристалізації під час виплавлення сприяли як процесу гомогенізації розплаву, також ефективного рафінуванню від тугоплавких неметалевих домішок, що забруднюють ливарні відходи. Так, кількість неметалевих включень на 1 мм<sup>2</sup> площини шліфів знижувалась з 38-35 одиниць у полі зору у зразках без

рафінування до 8-10 одиниць у зразках після процесу рафінування. Також спостерігалось помітне зменшення їх розмірів – з 12-15 мкм до 5-7 мкм.

УДК 669.18:621.746

*Л. А. Соколовская*

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

### **ВЛИЯНИЕ ДРОБИ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СЛИТКА В ИЗЛОЖНИЦЕ**

Одним из способов улучшения качества слитков (и крупных отливок) является введение оптимального количества дроби в жидкую сталь при ее разливке [1]. В процессе кипения стали в объеме слитка происходит интенсивное перемешивание жидкого металла газовыми пузырьками, которые всплывают в верхнюю часть слитка, что препятствует комкованию введенной в расплав дроби.

Стальная дробь, введенная в расплав при интенсивном перемешивании стали разливочной струей, резко понижает температуру металла в объеме слитка. При затвердевании слитка тепловые потоки от его жидкой сердцевины к корочке уменьшаются, что ослабляет тепловую конвекцию расплава в объеме слитка.

Чтобы улучшить подпитку жидким металлом нижних объемов слитка, в его верхнюю часть дробь не вводится. При этом более горячий расплав из верхних объемов затвердевающего слитка подпитывает охлажденные дробью нижние объемы кристаллизующейся стали, уменьшая зону подусадочной рыхлости.

Расчеты показали [2 - 6], что в слитке с дробью быстрое снятие начального перегрева стали уменьшает время его затвердевания. Увеличение дозы дроби способствует снижению температуры поверхности стального слитка, рабочей и наружной поверхностей чугунной изложницы. При этом перепады температуры между центральными (осевыми) и периферийными участками поперечного сечения слитка уменьшаются, что расширяет двухфазную зону затвердевания. Это свидетельствует о взаимосвязи между процессами внутреннего теплоотвода от жидкой стали к дробинкам-микрохолодильникам и внешнего теплоотвода от затвердевающего расплава через стенки изложницы в окружающую среду.

Опытная проверка показала [7], что в слитке с введенной в расплав дробью толщина мелкокристаллической корковой зоны плотного металла

увеличивается в 2,5 – 3 раза, а зона сотовых пузырей расположена дальше от поверхности слитка, что исключает окисление внутренних слоев металла при нагреве и прокатке [2]. Протяженность зоны столбчатых кристаллов уменьшается и расширяется зона крупных разориентированных кристаллов в центральной части слитка.

Полученные результаты подтвердили [7], что распределение основных элементов (углерода и марганца) и вредных примесей (серы и фосфора) по толщине и высоте 19,2т слитка кипящей стали, отлитого с введением в расплав 1,3 % дроби, более равномерное по сравнению с обычным слитком без дроби.

Образование дополнительных центров кристаллизации в слитке с дробью приводит к измельчению дендритной структуры литого металла. Изменение дозы дроби, введенной в перегретый расплав, позволяет регулировать внутренний и внешний теплоотвод в системе слиток-изложница-окружающая среда с целью получения более дисперсной структуры литого металла и минимальной ликвации по сечению и высоте стального слитка.

#### Список литературы

- Соколовская Л.А., Мамишев В.А., Осипов В.П. Определение степени влияния дозы и фракции микрохолодильников на температурное состояние затвердевающего слитка методом математического моделирования на ЭВМ // Разливка кипящей стали. – К.: Ин-т проблем литья АН УССР, 1984. – С. 99-106.
- Соколовская Л.А., Осипов В.П., Мамишев В.А., Диук Е.Ф. Особенности теплофизического и физико-химического взаимодействия кипящей стали с введенной в расплав дробью // Процессы литья. – 2000. - № 2. - С. 35 - 37.
- Соколовская Л.А., Осипов В.П. Применение ПЭВМ к обоснованию технологических режимов получения стальных слитков с дробью // Процессы литья. - 2004. - № 1. - С. 34 - 38.
- Соколовская Л.А., Осипов В.П., Мамишев В.А. Использование математического моделирования при исследовании теплофизических процессов взаимодействия расплава с твердыми добавками // Процессы литья. - 2000. - № 4. - С. 72 - 78.
- Соколовская Л.А., Мамишев В.А. О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве // Процессы литья. - 2009. - №2. - С. 24 - 29.
- Соколовская Л.А., Мамишев В.А. Численное моделирование прикладных задач с фазовыми переходами // Праці міжнарод. симпозіуму "Питання оптимізації обчислень" (ПОО-XXXIII). - К.: Ін-т кібернетики НАН України. - 2007. - С. 264 - 265.
- Соколовська Л.А., Осіпов В.П., Мамішев В.А. Особливості формування структури суспензійнолітих зливок киплячої сталі // Металознавство та обробка металів. - 2000. - № 1-2. - С. 16 - 19.

УДК 669.15.26.74 - 196

*О. В. Соценко, И. Ю. Посыпайко, В. С. Савеза*  
 Национальная металлургическая академия Украины,  
 Днепропетровск

### ИЗНОСОСТОЙКИЕ ЧУГУНЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ И ШНЕКОВЫХ ПРЕССОВ

Целью настоящей работы являются исследования по выбору износостойкого сплава для изготовления насадок и накладок для лопастей смесителей и шнеков прессов. В результате предварительных исследований условий работы указанных деталей установлено, что их целесообразно отливать из высокохромистых чугунов. Известно, что такие чугуны наряду с удовлетворительной пластичностью и прочностью характеризуются весьма высокими показателями износостойкости.

Исследование изношенных лопастей показало, что основной причиной выхода лопастей из строя является интенсивный абразивный износ. В процессе работы смесителя по поверхности лопасти происходит непрерывное скольжение абразивных частиц. Под действием давления перемешиваемой массы скользящие частицы вызывают пластическое деформирование поверхностного слоя, а также микрорезание выдавленных по сторонам канавки слоев металла (рис. 1)

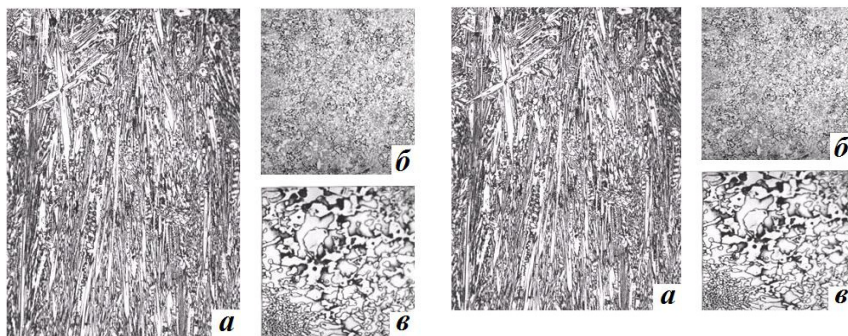


Рис. 1. Деформационные трассы микрорезания в поверхностном слое чугуна (x500): а, в – травлено; б, г – без травления

Рис. 2. Микроструктура высокохромистого чугуна:  
 а – первичные эвтектические карбиды (x300);  
 б, в – продукты распада +  $Me_3C$  и продукты распада +  $Me_7C_3$ ; б – x100; в – x500

Для изготовления износостойких деталей применяются чугуны, содержащие 10-30 % хрома и 1,5 - 3,5% углерода. Первичная структура чугуна и

состав эвтектики зависит от химического состава. Общий объем карбидной фазы изменяется в пределах от 30% до 60% и зависит от соотношения  $Cr/C$  и количества этих элементов. Объем карбидной фазы возрастает примерно на 10% при увеличении содержания углерода на 1% и на 1% при увеличении содержания хрома.

Износостойкость определяется как структурой, так и твердостью сплава, которые в свою очередь зависят от количества вводимых в него легирующих элементов. Легирующие элементы определяют тип карбидов и металлическую основу белых чугунов. Наиболее благоприятное расположение структурных фаз наблюдается, когда твердые структурные составляющие залегают в виде изолированных друг от друга включений в более мягкой и пластичной основе, что в наилучшей мере обеспечивает не только высокую износостойкость, но также прочность и вязкость сплава.

При легировании белого чугуна оптимальным количеством карбидообразующего элемента формируются эвтектические колонии  $\gamma + Me_3C$ , имеющие вид сфероидов. Они состоят из карбидного скелета и сплошной перлитной матрицы, окружающей карбидные иглы.

Износостойкость сплавов повышается особенно при комплексном легировании белого чугуна различными элементами. Структура такого сплава после кристаллизации (рис. 2) состоит из двух видов эвтектик:  $\gamma$  (продукты распада) +  $Me_3C$  с ортогональной решеткой и  $\gamma$  (продукты распада) +  $Me_7C_3$  с тригональной решеткой. При достаточно высоком содержании легирующих элементов образуются устойчивые мелкодисперсные карбиды  $Me_3C$ . В литом состоянии сплав имеет твердость 45-47 HRC. После закалки и отпуска он приобретает твердость 50-60 HRC. Поверхность, подвергаемая износу с такой твердостью, обеспечивает высокую износостойкость.

Опыт применения хромистых чугунов для литья насадок и накладок, показал, что их износостойкость позволяет в 5-7 раз увеличить срок службы лопастей и шнеков в промышленных агрегатах.

УДК 669.15.26.74 - 196

*О. В. Соценко, И. Ю. Посытайко, В. С. Савеза**Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск***ИЗНОСОСТОЙКИЕ ДЕТАЛИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ**

Одним из направлений в обеспечении абразивной износостойкости промышленных смесителей является литье насадок и накладок на лопасти и шнеки из легированных сплавов и отбеленного чугуна. Высокохромистые чугуны с добавкой других легирующих элементов успешно применяются для изготовления таких деталей, что обеспечивает их высокую износостойкость и долговечность.

Объектом исследования на износостойкость являются детали смесительного и прессового оборудования предприятий по производству строительных материалов. Быстрый износ рабочих органов значительно снижает производительность такого оборудования. Так срок службы лопастей смесителей составляет всего 40-70 часов.

Проведенными исследованиями установлено, что в процессе изнашивания рабочая часть лопастей претерпевает большие геометрические изменения. Основными из них являются: укорочение рабочей части, образование площадок износа на передней грани, изменения толщины лопастей, увеличение углов заострения. Для восстановления изношенных лопастей необходимы вынужденные остановки оборудования на значительное время, что снижает производительность агрегата.

Механизм изнашивания шнеков подобен механизму износа лопастей. Изнашивание кромок лопастей шнека приводит к увеличению зазора между наружной частью лопасти и внутренней частью корпуса, который не должен превышать 2-3 мм. Увеличение зазора вызывает возврат массы через зазор и снижает производительность агрегата.

Предлагается область наибольшего износа лопастей защищать насадками из износостойких чугунов, общий вид которых приведен на рис. 1. Основание лопасти изготавливается из стали Ст. 30. Для ориентации насадок первой опытной серии на основании фрезеровали уступ, имеющий форму паза в насадке (рис. 1, *а*). Упрощение монтажа без дополнительной механической обработки основания лопасти достигается путем использования насадок видоизмененной конструкции (рис. 1, *б*). Такая конструкция имеет взаимно перекрывающиеся элементы и позволяет точно воспроизводить криволинейную форму основания лопасти (рис. 1, *в*). Однотипные насадки последовательно насаживают на основание лопасти без дополнительного крепления. Последняя насадка, имеющая монтажное отверстие, крепится к основанию лопасти болтом с потайной головкой.

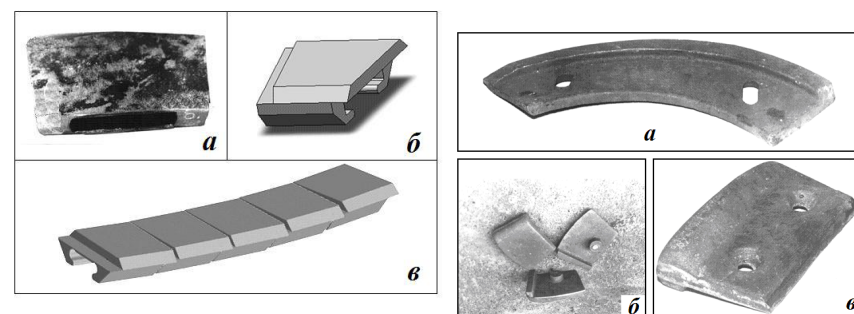


Рис. 1. Виды насадок для лопастей смесителей: *а* – с замкнутой монтажной полостью; *б* – с открытой монтажной полостью; *в* – общий вид комплекта

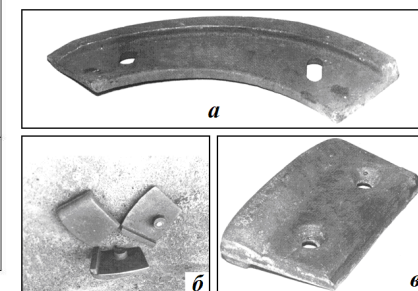


Рис. 2. Виды накладок для лопастей и шнеков: *а* – удлиненные с двусторонней ребордой; *б, в* – с односторонней ребордой

С целью повышения износостойкости, снижения затрат на ремонт и сокращения времени простоя оборудования также предложено на рабочую поверхность лопастей и шнеков устанавливать защитные накладки из износостойкого чугуна. Для установки накладок необходимо срезать слой металла по торцу лопасти равный 20 мм. В этом случае геометрические размеры лопастей и шнеков будут такими же, как и у серийных. Для каждой секции шнека изготавливаются набор накладок, отличающихся друг от друга наружным радиусом и углом наклона витка (рис. 2). Такая разбивка образующей секции шнека предусмотрена для удобства литья накладок. Крепление накладок к лопастям шнека осуществляется двумя болтами с потайными головками. Крепежные отверстия в накладках предусмотрены овальные, что позволяет регулировать радиусы лопастей.

Выводы. Разработаны конструкции и технология литья насадок для лопастей и накладок для шнеков промышленных смесителей и прессов. Проведенные промышленные испытания этих конструкций и технологий литья подтверждают эффективность принятых решений.

УДК 621.74.08

*А. Л. Становский, А. А. Коряченко, И. Н. Щедров*  
*Одесский национальный политехнический университет, Одесса*

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИДЕНТИФИКАТОРЫ НАРУШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В литейном производстве чаще всего используются многофакторные процессы, модели которых, как правило, представляют собой системы сложных дифференциальных уравнений с большим количеством переменных [1, 2]. Практически, все используемые в таких уравнениях коэффициенты, свойства материалов и параметры окружающей среды носят стохастический характер с большим разбросом значений. Часто на рабочих местах используются люди, которые по разным причинам не знакомы с культурой производства, или не желают ее поддерживать.

Это приводит к тому, что производители не всегда могут найти действительную причину возникающего брака: техпроцес неудачно спроектирован, в работе материалы с отклонениями свойств, или сработал «человеческий фактор».

Для решения этих проблем предлагается метод, который состоит во введении в начальные материалы (формовочные смеси, шихту) дополнительных веществ – интеллектуальных идентификаторов, позволяющих ответить на следующие вопросы:

- было ли нарушение технологического процесса;
- если было, то на каком участке;
- было ли нарушение следствием непреодолимых причин или оно представляет собой отклонение от культуры производства;
- что можно сделать, чтобы автоматически компенсировать нарушение для следующих отливок литейного конвейера.

Интеллектуальный идентификатор позволяет в отдельных случаях определить, работал ли на рабочем месте человек, который был нанят на работу для выполнения соответствующей операции.

Идентификация технических нарушений предусматривает введение в формовочную смесь и жидкий металл веществ-идентификаторов. Химический состав, количество и метод введения того или иного вещества определяется перечнем контролируемых параметров, диапазоном изменений каждого из них и другими технико-экономическими факторами. Основные требования к идентификаторам: однозначность и значимость признаков, нетоксичность и относительно небольшая стоимость. Так, например, для контроля температуры внутри песчаной литейной формы в диапазоне 150 – 350 °С можно использовать фенолформальдегидные смолы, поликонденсация которых существенно зависит от кинетики изменения температуры в точке контроля,

а в диапазоне 900 – 1350 °С – смесь порошков окислов, которая в зависимости от температуры по-разному оплавляется и остекловывается.

Идентификация личности рабочего относится к разделу психологии. Самая важная проблема заключается в том, чтобы раскрыть объективные основания тех интегральных психологических свойств, которые характеризуют человека как индивида. Для этого рабочего незаметно для него заставляют выполнять определенные действия, в зависимости от результатов которых система получает набор индивидуальных числовых признаков, по которым проверяет соответствие одним из известных интеллектуальных методов, например, с помощью нейронной сети.

Список литературы

- Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Часть 1. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.  
 Серебро В. С. Процессы тепло- и массопереноса при формировании отливки. – К.: УМК ВО, 1992. – 79 с.

УДК 621.74.041

*А. А. Стрюченко*

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

### **ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРА ПОЛИСТИРОЛА ИЗ ОТХОДОВ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА НА ПРОЧНОСТЬ ЖИДКОСТЕКОВЫХ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ**

В настоящей работе проблема выбиваемости жидкостекловых смесей кардинально решается путем ввода в них наряду с жидким стеклом не как добавки, а на правах равноправного связующего компонента полимера полистирола в виде 40 %-го раствора отходов пенополистирола в живичном скипидаре.

Один из возможных составов жидкостекло-полистирольных формовочных смесей: кварцевый песок 95 %; жидкое стекло 3 %; полимер полистирол 2 % (в виде 40 %-го раствора отходов пенополистирола в живичном скипидаре).

Прочность такой смеси по-сырому на сжатие после продувки CO<sub>2</sub> в течение 1 мин. превышает возможность ее определения на известном рычажном приборе, то есть она значительно выше 1,25 кгс/см<sup>2</sup>, а прочность на разрыв равна 0,04 МПа.

В качестве характеристики выбиваемости этих смесей с жидкостекольно-полистирольным связующим была принята прочность образцов на разрыв в зависимости от температуры нагрева. При этом установлено, что после высушивания при оптимальной температуре 150 °С в течение 1,5 час. прочность такой смеси на разрыв значительно увеличивается с 0,04 МПа до 0,57 МПа, то есть почти в 15 раз. При дальнейшем повышении температуры наблюдается резкое уменьшение прочности смеси, что обусловлено вступлением в роль полимера полистирола, который при 200 °С начинает подвергаться процессам деструкции. Так, если при 170 °С прочность смеси на разрыв заметно уменьшилась с 0,57 МПа до 0,46 МПа, то при 200 °С она резко снизилась до 0,14 МПа. А при 250 °С и 300 °С смесь практически полностью разупрочнилась.

Таким образом при заливке литейной формы металлом уже при сравнительно невысоких температурах нагрева в результате термодеструкции полистирола происходит разупрочнение жидкостекольно-полистирольной формовочной смеси и достаточно надежная легкость выбиваемости полученной отливки.

Интересно отметить, как факт, очень высокое самоупрочнение жидкостекольно-полистирольной формовочной смеси на сжатие при выстаивании стандартных цилиндрических образцов на воздухе. Так, прочность смеси упомянутого выше состава после продувки CO<sub>2</sub> (1 мин.) и выстаивании на воздухе в течение 1 час. была равна 0,32 МПа. После выстаивания через 1 сутки - 1,19 МПа, через 2 суток - 1,94 МПа, через 5 суток - 4,73 МПа, что почти в 15 раз выше, чем при выстаивании в течение 1 часа.

Резко ускорить процесс упрочнения жидкостекольно-полистирольной формовочной смеси возможно при термошоке. Так, стандартный цилиндрический образец (Ø 50 x h50 мм) после термоудара при 250 °С в течение 10 мин. показал прочность на сжатие более 5,4 МПа, т.е. не разрушился под нагрузкой 1056 кг (более 1 т).

Таким образом, применение полимера полистирола из отходов пенополистирола в виде 40 %-го раствора в живичном скипидаре в составах жидкостекольных формовочных смесей позволяет решить проблему выбиваемости этих смесей. При этом содержание в смеси жидкого стекла уменьшается в 2 раза, что также направлено на положительное решение этой проблемы.

УДК 621.743.422

*А. А. Стрюченко, В. С. Дорошенко*

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

## **НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЦИКЛИНГА ОТХОДОВ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА**

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов Национальной академии наук Украины (ФТИМС НАНУ) разработана технология многоцелевого рециклинга отходов пенополистирола через их растворение в живичном скипидаре (ГОСТ 1571-82). В основе технологии живичный скипидар в качестве растворителя этих отходов выбран не случайно. Его предельно допустимая концентрация (ПДК) в атмосфере рабочих помещений равна 300 мг/м<sup>3</sup>, то есть, находится на уровне широко известных и применяемых в быту растворителей – бензина, керосина, уайт-спирита, в которых пенополистирол нерастворим. Кроме того, живичный скипидар обладает еще одним ценным свойством – он имеет низкую летучесть. Все это позволяет разрабатывать новые технологии с учетом живичного скипидара со щадящими санитарными условиями труда.

По нашему опыту, наиболее технологичными для применения в жидком виде и в то же время компактными в процессе сохранения являются 40 %-й растворы отходов пенополистирола. Разработана технологическая схема получения в производственных условиях таких растворов отходов пенополистирола в живичном скипидаре. Этот процесс может быть выделен в отдельное производство, который одновременно может быть одним из способов компактирования этих отходов.

Ряд новых технологий предложено в области литейного производства, где растворы отходов пенополистирола в качестве связующего материала применяются в процессах приготовления и применения формовочных и стержневых песчаных смесей для получения отливок из черных и цветных сплавов. При производстве металлоотливок по моделям из пенополистирола (технология все шире распространяется в литейных цехах) предложенные способы рециклинга его отходов, неизбежно образуемых при изготовлении моделей, дают экономию средств на вывозе отходов и предотвращают загрязнение окружающей среды.

В области химической промышленности пластмасс важное значение имеет технология получения полимера полистирола из отходов пенополистирола в уже пластифицированном состоянии. В этих процессах живичный скипидар является не только растворителем полистирола (пенополистирола), но также одновременно его пластификатором.

Ряд технологий предложено в области строительства. Речь идет об использовании самотвердеющих на воздухе растворов отходов пенополисти-

рола в качестве покрытий для решения проблем гидроизоляции, для получения прочных, водостойких и декоративных лаковых покрытий по дереву, гончарных изделий в быту и др.

В области живописи предложена эффективная технология применения этих растворов на основе синтетического полистирола в качестве картинного лака взамен традиционно применяющихся дорогостоящих лаков на основе натуральных смол, что способствует повышению качества и долговечности произведений живописи.

УДК 621.74

*А. К. Тараканов*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск*

#### **РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА**

Процессы жидкофазного восстановления железа (ПЖВ) являются в перспективе единственной реальной альтернативой коксо-агло-доменной технологии производства чугуна. Существующие технологии твердофазного восстановления железа (Midrex, HYL, SL/RN и др.) и преимущественно твердофазного восстановления (Corex, Finex и др.) занимают определённую технологическую нишу в мировой чёрной металлургии, но по экономическим причинам никогда не станут массовой технологией получения первородного железа из руд.

Процессы жидкофазного восстановления имеют явные преимущества перед традиционной доменной технологией уже хотя бы потому, что не требуют кокса и окускованного железорудного сырья и могут работать на энергетическом угле и любых железосодержащих материалах.

Технология ПЖВ универсальна. Она может использоваться как для преимущественного производства качественного и дешёвого чугуна, так и для преимущественной газификации энергетических углей и выработки горячих восстановительных газов, пригодных, в частности, для парогазового цикла производства электроэнергии с КПД чуть ли не вдвое выше, чем на традиционных тепловых электростанциях. Подобрав соответствующим образом состав шихты для ПЖВ, можно, кроме чугуна, получать шлаковый клинкер для производства суперцемента – щелочного вяжущего. Такая универсальность технологии ПЖВ делает её особенно эффективной при конъюнктурных колебаниях цен на металл на мировых рынках и в период экономиче-

ских кризисов.

Теоретически обоснованные более 100 лет назад ПЖВ долгое время не находили эффективной реализации в связи с двумя главными препятствиями: сильным вспениванием шлака и сложностью подвода теплоты к шлаковой ванне. Впервые реальность и эффективность ПЖВ была практически доказана в 1985 году на промышленной по масштабам, но опытной по сути установке на Новолипецком металлургическом комбинате. Авторами этой технологии, названной впоследствии процессом Ромелт, были сотрудники Московского института стали и сплавов (МИСиС). В настоящее время, кроме процесса Ромелт, готовы к промышленному освоению также процессы Hismelt, DIOS, Ausiron. Тем не менее, ни одна из технологий ПЖВ масштабного промышленного использования пока не получила.

Трудности начального промышленного освоения ПЖВ связаны с тем, что по своей природе – это энергометаллургические процессы. Производимый в агрегатах ПЖВ чугун, действительно, может быть значительно дешевле чугуна доменного, но только при эффективном использовании энергии отходящих газов, главным образом, для производства электроэнергии, что нетрадиционно и требует дополнительных инвестиций. Кроме того, эти новые процессы пытаются реализовывать как 100%-ную альтернативу хорошо освоенному доменному производству, что такжестораживает и сдерживает инвесторов.

Для создания универсальной многоцелевой наиболее эффективной для условий Украины технологии жидкофазного восстановления железа осуществлены:

- разработка методики и компьютерной программы расчётного анализа параметров процесса жидкофазного восстановления с учётом особенностей и ограничений многоцелевого его использования;
- исследование влияния различных факторов на показатели и эффективность универсальной многоцелевой технологии жидкофазного восстановления;
- обоснование технологических и конструктивных параметров универсального многоцелевого агрегата жидкофазного восстановления.

Наиболее реально начальное промышленное освоение ПЖВ можно было бы осуществить в пределах доменного цеха интегрированного металлургического предприятия на месте выводимой из эксплуатации неэффективной доменной печи, с тем, чтобы максимально использовать её инфраструктуру и осуществлять нагрев дутья для ПЖВ за счёт доменного газа в существующих воздухонагревателях. Нагрев дутья позволяет перейти на малоокислородную и даже безокислородную технологию ПЖВ, что значительно повышает её эффективность. Конструктивно ПЖВ можно реализовать при использовании в основном типового оборудования доменных и конвертерных цехов.

УДК 621.74.047:62-412:669-154

*Е. Д. Таранов, \*А. С. Эльдарханов, А. С. Нурадинов**Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев**\*Научный центр «Новейшие материалы и технологии», Москва***ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ  
ЗАГОТОВОК  
В УСЛОВИЯХ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВ**

Современный уровень развития техники предъявляет все возрастающие требования к качеству металлургической продукции, что вызывает необходимость создания эффективных технологий передела жидких металлических сплавов в литую заготовку. Одним из элементов таких технологий является физическое воздействие (в частности, вибрация) на затвердевающие расплавы в процессе формирования литых заготовок. Положительное влияние вибрационной обработки на формирование слитков и отливок подтверждена многочисленными исследованиями [1]. В данной работе изучено влияние вибрации на формирование полунепрерывнолитых заготовок из алюминиевых сплавов.

Влияние вибрации изучали на круглых заготовках Ø 60 мм из сплавов АД 31 и АК5М2, отливаемых на опытной установке. Подвод виброимпульсов осуществляли по двум вариантам: к кристаллизатору и непосредственно к заготовке в зоне вторичного охлаждения. Параметры вибрации имели следующие значения: частота 35-100 Гц, амплитуда 0,5-2,5 мм. Металлографический анализ и механические испытания проводили на образцах, вырезанных из различных структурных зон заготовок.

При наложении вибрации на затвердевающий металл существенно усиливается интенсивность теплоотвода от затвердевающего расплава, о чем свидетельствуют расчеты теплового баланса кристаллизатора. Уравнение теплового баланса кристаллизатора приближенно можно представить следующим образом [2]:

$$Q = m_{\text{в}} C_{\text{в}}(T_{\text{к}} - T_{\text{н}}),$$

где  $Q$  – количество тепла, передаваемое кристаллизатору, кДж;  $m_{\text{в}}$  – масса охлаждающей воды, кг;  $C_{\text{в}}$  – теплоемкость воды, кДж/кг\*°С;  $T_{\text{к}}$ ,  $T_{\text{н}}$  – температуры воды на входе и выходе из кристаллизатора, °С.

Интенсивность отвода тепла при подводе виброимпульса к кристаллизатору и к самой заготовке усиливается на 3-4% и 7% соответственно, что, в свою очередь, повышает в среднем на 10% скорость кристаллизации расплава и, как следствие, меняются параметры и дисперсность кристаллической

структуры.

Металловедческие исследования продольных темплетов контрольных и опытных заготовок показали существенное измельчение макроструктуры при наложении вибрации как на кристаллизатор, так и на саму заготовку. Так, протяженность зон столбчатых кристаллов в опытных заготовках из сплавов АК5М2 и АД 31 соответственно в 2 и 3 раза короче, чем в контрольных. При этом дисперсность структуры повышается в зависимости от сплава в 4–10 раз.

Характер кристаллизации сплава в значительной степени влияет на формирование структуры, плотность металла и распределение неметаллических включений. Для контрольных образцов характерно увеличение в их центральных частях количества эвтектической составляющей (как двойной, так и сложных), неметаллических включений и мелких пор. В опытных образцах отмечено более равномерное распределение эвтектической составляющей и неметаллических включений, а также повышение плотности металла.

Вызванные воздействием вибрации на затвердевающие расплавы изменения в макро- и микроструктурах заготовок обусловили заметное повышение пластических характеристик литого металла. Так, относительное удлинение возросло на 33–54% в зависимости от сплава при неизменном или небольшом (до 3%) повышении предела прочности.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность и целесообразность использования вибрации при полунепрерывной разливке металлов с целью управления структурой, повышения механических характеристик металла и производительности МПНЛЗ.

Список литературы

1. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.
2. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики. Справочник. – К.: Наукова Думка, 1989. – 864 с.

УДК 75.023

*Л. Р. Тоцкий, А. А. Стрюченко**Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев***РАСТВОРЫ ОТХОДОВ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В ЖИВИЧНОМ  
СКИПИДАРЕ В КАЧЕСТВЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КАРТИННЫХ  
ЛАКОВ В ЖИВОПИСИ**

В живописи картинные лаки применяются в качестве защитных покрытий, предохраняющих написанные масляными или темперными красками художественные полотна от непосредственного контакта с атмосферой воздуха и, следовательно, с водой, влагой, сыростью, агрессивными газами, возможными механическими повреждениями и т.п. От качества лака в значительной мере зависит долговечность художественного произведения.

В настоящее время в качестве основы картинных лаков применяются мягкие натуральные смолы, типа мастикс, даммара, которые добывают в далеких странах из экзотических растений /1, 2/. Так, смолу даммару добывают в восточной Индии из растений некоторых лиственных пород. Такие смолы труднодоступны, они дефицитны и дороги по стоимости. Кроме того, эти смолы перед их применением требуют дополнительной очистки, обезвоживания, а технологический процесс приготовления лаков с участием этих смол является очень длительным.

Нами предложено в качестве основы картинного лака применять синтетический полимер полистирол из отходов пенополистирола. Полимер полистирол обладает очень важными свойствами в качестве синтетической смолы для картинных лаков. Это прозрачный, бесцветный, твердый и прочный по своим физическим свойствам полимер, который совсем не взаимодействует с водой и, что также очень важно – он не подвержен биологическому разложению.

Технология приготовления картинного лака на основе полимера полистирола состоит в растворении отходов пенополистирола в живичном скипидаре (ГОСТ 1571-82). Концентрация полимера полистирола в таком лаке должна быть 25-30 %. Приготовление полистирольного лака не вызывает затруднений ввиду очень высокой пористости и низкой плотности отходов пенополистирола (0,02-0,035 г/см<sup>3</sup>).

Установлено, что живичный скипидар является не только растворителем отходов пенополистирола, но также пластификатором полимера полистирола /3/. Это обстоятельство указывает на его повышенные эластичные и пластичные свойства, которые недостаточны у даммары. После твердения на воздухе лаковая пленка из отходов пенополистирола содержит в своем составе 30-35 % живичного скипидара, как пластификатора.

Картинный лак с концентрацией 25-30 % придает краскам чистоту и прозрачность. Так, в этюде "Заход солнца" краски как бы подсвечиваются, создается люминесцентный эффект. Необходимо отметить, что применяемый в настоящее время художественный покровный лак такого эффекта не дает, а со временем темнеет и дает клякелюры.

В малых процентах (10-15 %) полистирольный лак хорошо ложится на уже загрунтованное эмульсией полотно, которое становится эластичным, не трескается, не тянет краску, не жухнет, что так важно для долговечности живописи.

Список литературы

1. Д.И. Киплик. Техника живописи. Гос. издат. "Искусство", – М. – Л., 1950. – 504 с.
2. Б. Сланский. Техника живописи. Изд. Акад. художеств СССР, – М., 1962. – 330 с.
3. Патент України на винахід № 89977, опубл. 25.03.2010, Бюл. №6. "Спосіб одержання пластифікованого полістиролу з відходів пінополістиролу". Автори: Шинський О.Й., Найдек В.Л., Стрюченко А.О., Шинський І.О.

УДК 621.74.04:621.746.3

*Т. Л. Тринева**ЧАО «Конструкторско-технологическое бюро верификационного  
моделирования и подготовки производства», Харьков***ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ОСНАТКИ,  
ИЗГОТАВЛИВАЕМОЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ БЫСТРОГО  
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**

Одним из главных направлений научно-технического прогресса в индустриально развитых странах мира является быстрое обновление изделий народного потребления и средств производства, что обуславливает необходимость резкого сокращения сроков подготовки производства. Условия технического прогресса вынуждают к коренным переменам не только предприятий, которые вынуждены обновлять как оборудование, так и программное обеспечение [1-4].

Существующие технологии получения литейной оснастки предусматривают использование сложной механической обработки, что влечет за собой долговременный цикл ее получения.

Создание высокотехнологичной, долговечной литейной оснастки за короткий срок, которая бы обеспечила производство качественных отливок возможно при условии адаптации разновидностей технологий быстрого прототипирования (RP) еще на стадии ее проектирования.

Одним из факторов, влияющих на размерную точность отливок, является линейная усадка заливаемого сплава. Известно также, что на величину усадки можно повлиять, как создавая условия технологические, так и конструктивные [5-9].

При изучении условий работы установок технологий быстрого прототипирования таких как: Vanguard HS-установка селективного лазерного спекания полиамидных и металлических порошков, а также SLA-5000-установка стереолитографии, установлены основные факторы, влияющие на точность, шероховатость поверхности и геометрию поверхности литейной оснастки и других изделий, изготавливаемых на данном оборудовании.

На рис.1 и рис.2 приведены изделия с габаритами  $\approx 1500 \times 700 \times 500$  мм, «выращенные» из полиамидного порошка на установке Vanguard HS.

Параметры поправочного коэффициента отклонений

Наименование установок	Материал	Гарантированный допуск, мм	Поправочный коэффициент отклонений – Ко, %		
			X	Y	Z
SLA-5000	Фотополимерная смола	$\pm 0,05$	$-0,05 \div -0,25$	$0,05 \div 0,15$	$0,10 \div 0,30$
Vanguard HS	Dura Form, Dura Form GH (полиамидный порошок)	$\pm 0,40$	$0,80 \div 1,30$	$0,15 \div 0,45$	$1,15 \div 2,30$
	ST-100 (KMFe-Cr), A6 (KMFe-W) (металлический порошок)	$\pm 0,30$	$0,80 \div 1,10$	$0,35 \div 0,60$	$1,10 \div 2,30$

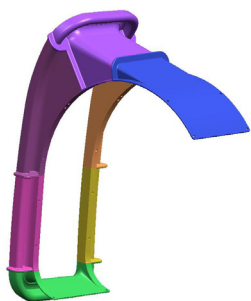


Рис. 1

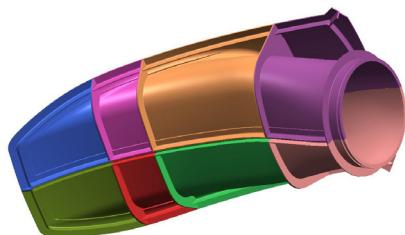


Рис. 2

Установлена взаимосвязь между размерными отклонениями изделий и их расположением по осям X, Y, Z определено, что численные значения размерных отклонений по осям X, Y, Z не одинаковы и их значения отличаются в зависимости от размещения моделей на столе построения и материала оснастки. Для коррекции отклонений введено понятие поправочного коэффициента отклонения и установлены его численные значения, учет которых при проектировании позволяет достигнуть значительно-го повышения размерной точности литейной оснастки при ее изготовлении.

Рекомендуется элементы литейной оснастки располагать так, чтобы выбранные оси элементов построения при проектировании строго совпадали с осями на столе построения.

При проектировании габаритных изделий следует учитывать конструктивные особенности. А именно на изделия, которые будут «выращиваться» на данном оборудовании необходимо предусматривать ребра жесткости на всех разрезных частях. Данные конструктивные решения позволяют избежать термического коробления, а также добиться ужесточения «выращиваемого» изделия.

#### Список литературы

1. Таран Б.П., Тринева Т.Л. Внедрение прогрессивных технологий в литейное производство в сочетании с традиционными // Вестник НТУ «ХПИ». - 2005. № 23. - С. 181-185.
2. Таран Б.П., Витязев Ю.Б., Тринева Т.Л. Реальное применение стерео-литографии в литейном производстве // Процессы литья. - 2003. № 4. - С. 44-46.
3. Трегубов Г.П. Инновационные проблемы модернизации производственной среды для рынка наукоемкой продукции // Литейное производство. - 2004. № 4. - С. 2-4.
4. Тринева Т.Л. Rapid Prototyping (RP). Технологии получения твердотельных 3D CAD моделей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2004. № 6 (12). - С. 37-40.
5. Карножицкий В.Н. Контактный теплообмен в процессах литья. К., 1978. - 300 с.
6. Иванов В.Н., Зарецкая Г.М. Литье в керамические формы по постоянным моделям. М. Машиностроение. 1975. - 133 с.
7. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. М., Машиностроение, 1980. - 256 с.
8. Грузных И.В., Влияние действительной усадки на размерную точность отливок. - Точность и качество поверхности отливок. Под ред. Ф.Д. Оболенцева. М., Mashgiz, 1962. -152 с.
9. Ефимов Л.Д. Усадочные процессы в сплавах и отливках. Под ред. Л.Д. Ефимова. К., 1970. -228 с.

УДК 621.745.435:62-932.2

*А. И. Троцан, В. В. Каверинский, И. Л. Бродецкий*  
*Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЛИТОГО МЕТАЛЛА ТУГОПЛАВКИМИ ДИСПЕРСНЫМИ ИНОКУЛЯТОРАМИ С УЧЕТОМ ИХ РАЗБРОСА ПО РАЗМЕРАМ**

Повышение эффективности модифицирования литейных сплавов дисперсными порошками тугоплавких малорастворимых соединений (модификаторов второго рода), вводимых в расплав для получения мелкозернистой структуры, представляет важную задачу. Одним из путей её решения может быть уменьшение разброса по размерам вводимых частиц, что и показано в настоящей работе.

Для улучшения структурных характеристик литого металла обычно используются ультрадисперсные (наноразмерные) порошки [1]. Однако технологические трудности их применения вынуждают искать способы ввода в расплав более крупных частиц, способных растворяться до размеров близких к размерам центров кристаллизации в момент её начала [2]. При этом, в используемых в работе [2] моделях, размер всех частиц считался одинаковым. Для описания растворения частиц в расплаве с учётом разброса по размерам нами предложена конечноразностная модель их поведения в жидком металле перед началом и в ходе кристаллизации и написана компьютерная программа для её расчета.

Проведенные исследования поведения вводимых в расплав стали с 0,1 % С порошков TiN, TiC, ZrN, NbC, NbN различных фракций показали, что при наличии разброса по размерам, мелкие частицы растворяются быстрее, чем в случае их одинакового размера. В большей мере заметен эффект замедления растворения более крупной составляющей фракции, связанный с интенсивным уменьшением градиента концентраций при растворении мелкой составляющей. Использование данных эффектов позволяет, варьируя распределением по размерам внутри фракции, управлять временем жизни частиц и, соответственно, эффективностью их действия в расплаве (в частности увеличивать долю частиц вводимого в расплав модификатора, способных становиться центрами кристаллизации, за счет снижения доли частиц, образующих неметаллические включения и полностью растворяющихся [3]). Результаты определения оптимальных параметров ввода разных типов модификаторов приведены в таблице.

Таблица - Оптимальные технологические параметры модифицирования

Тип модификатора	Фракция, мкм	Расход, кг/т	Температура расплава, °С
TiN	1,0 – 2,0	0,12	1530 - 1540
TiC	0,5 – 2,0	0,14	
ZrN	2,0 – 5,0	1,10	
NbN	1,5 – 3,0	0,33	
NbC	2,5 – 5,5	1,70	

Применение указанных в таблице технологических параметров позволяет создать в расплаве максимально возможное в данных условиях число дополнительных центров кристаллизации ( $\approx 10^{10} \dots 10^{11}$ ) на тонну, при минимальном количестве и размере образующихся на основе вводимых частиц неметаллических включений.

#### Список литературы

1. Стеценко В. Ю. Особенности процессов модифицирования чугуна и стали / В. Ю. Стеценко, Е. И. Марукович // *Металлургия машиностроения*. – 2006. - №3. – С. 10 – 13.
2. Троцан А. І. Оцінка розмірів тугоплавких часток, що вводяться у розплав, здатних ставати центрами кристалізації / А.І. Троцан, В.В. Каверинський, І.Л. Бродецький // *Металознавство та обробка металів*.-2010.-№4.- С.49-52.
3. А.И. Троцан. Анализ распределения вводимых в жидкий металл дисперсных частиц модификатора по типу их действия в расплаве/ А.И. Троцан, В.В. Каверинский, И.Л. Бродецкий // *Материалы 8-й Межд. научно-техн. конф. «Тепло и массообменные процессы в металлургических системах»*.- Мариуполь.- ПГТУ. - 2010р.- С.211-215

УДК 621.74

**В. З. Тьднюк, Н. А. Тараненко**

*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев,  
Восточно-украинский национальный университет имени Владимира Даля,  
Луганск*

### **ПРОЦЕСС ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗА ПРИ ВСПЕНИВАНИИ ПОЛИСТИРОЛА И ИЗГОТОВЛЕНИИ ГАЗИФИЦИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ**

Как известно, литье по выжигаемым (газифицированным) моделям (ЛГМ), также как и литье по выплавляемым моделям, выполняется в неразъемные формы, а модель удаляется путем выжигания в процессе заливки жидкого металла [1]. Промышленное применение ЛГМ фактически началось в 60-х годах прошлого века, но до сих пор не имеет развитой теоретической базы в виде физико-математических моделей.

После предварительного вспенивания гранул полистирола в горячей воде или паром, и последующей их обработки (высушивания), гранулы засыпаются в форму для изготовления модели и с помощью пара или другим методом (например, токами высокой частоты) происходит процесс окончательного вспенивания полистирола и спекания его гранул в пенополистироловую модель.

Качество отливок зависит от количества материалов после термодеструкции модели, т. е. от пористости пенополистироловой модели без ущерба ее основных прочностных свойств [2]. Поэтому важно приближенное физико-математическое описание процесса выделения газа в первой фазе вспенивания полистирола, а такое описание предваряет феноменологическая модель процесса. Построение такой модели и является основной целью работы.

При промышленном изготовлении гранулы полистирола для ЛГМ наполняются углеводородом пентаном (или изопентаном), который является вспенивающим фактором, и находится в связанном состоянии в гранулах. При вспенивании пентан переходит в летучее состояние и расширяется, вследствие чего расширяются и гранулы полистирола.

Состояние газа в каждой из гранул полистирола при вспенивании можно описать известным уравнением состояния идеального газа. Таким образом, объем газа будет зависеть от давления и массы газа, который выделяется при вспенивании. Сам полистирол при этом до начала процесса спекания и перехода в вязкотекучее состояние находится в высокоэластичном состоянии, которое характеризуется малым значением модуля упругости.

Приближенный анализ такой модели дает возможность полагать, что давление газа внутри гранул полистирола будет определяться лишь упругими постоянными полистирола в высокоэластичном состоянии. Т. е. конечная

пористость пенополистирола зависит, в основном, от процента содержания вспенивающего фактора. Средние же размеры пузырьков воздуха, толщина их стенок и прочностные характеристики пенополистирола в целом весьма зависят от характеристик и режимов процесса вспенивания.

Список литературы

1. В. М. Григорьев. Литье по выжигаемым моделям. – Хабаровск: изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. – 50 с.
2. В. С. Шуляк. Литье по газифицируемым моделям. – Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2007. – 405 с.

УДК 621.74

**В. А. Усенко, В. Н. Ковшов, В. А. Петренко, Р. А. Куприков,  
С. Е. Сулименко**

*Национальная металлургическая академия Украины,  
Днепропетровск*

### **ВОПРОСЫ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ РАБОТЫ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ЗОН ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Рациональное распределение шихты и газа возможно тогда, когда каждой единице обрабатываемого материала в любом поперечном сечении печи соответствует определенное количество газа. Установить это возможно, если известно количественное распределение физических свойств загруженной на колошнике шихты по радиусу печи. Кроме того, распределение газового потока в нижней части доменной печи, определяемое дутьевым режимом, значительно влияет на взаимораспределение шихты и газа в доменной печи. Поэтому необходимо определить газораспределение в нижней и верхней зонах.

В нижней зоне были проведены исследования распределения газового потока по поперечному сечению на физических моделях. В верхней зоне газораспределение зависит в основном от распределения железорудной шихты по радиусу колошника доменной печи.

Радиальное распределение толщины железорудного слоя  $h_a$ , определяющего газодинамику, может быть подсчитано на основе математической модели распределения шихты и выражено полиномом второй степени в общем виде

$$h_a = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (1)$$

где:  $a_0, a_1, a_2$  – постоянные коэффициенты полинома,  $x$  – текущее значение радиуса колошника. Сегрегация шихты по радиусу может быть записана в соответствии с прежними исследованиями

$$d_i = b_0 + b_1 x, \quad (2)$$

где:  $b_0 = d_{cp} (1,12 - 0,073 H)$ ,  $b_1 = d_{cp} (0,23 H - 0,345)$ ,  $d_{cp}$  – средний размер шихты,  $H$  – уровень засыпи.

Неравномерное распределение порозности по радиусу выражено формулой

$$\varepsilon_i = (d_{cp} + \varepsilon_{cp} x) / (d_{cp} + x), \quad (3)$$

Подставим эти выражения в формулу скорости газа по радиусу  $V_{np}$  и получим неравномерное распределение скорости по радиусу колошника:

$$V_{np} = Q / S_{cp} \varepsilon_{cp} (h_{cp} d_i (d_{cp} + \varepsilon_{cp} x) / d_{cp} \varepsilon_{cp} h_a x) 0,5, \quad (4)$$

Здесь  $Q$  и  $S$  – количество колошникового газа и площадь поперечного сечения колошника.

Рассчитаем толщину слоя  $h_a$  по радиусу печи для систем загрузки ААКК↓, КАКА↓, КААК↓ и ККАА↓, как чаще всего применяемые на производстве, по адекватной модели, разработанной на кафедре металлургии чугуна НМетАУ, применительно к доменным печам полезного объема 2000 м<sup>3</sup>. Данные расчетов показывают, что прямые подачи подгружают поперечное сечение печи на расстоянии 0,05 - 0,40 радиуса колошника, считая от стенки, а подачи КААК↓ и КАКА↓ (промежуточные) – 0,20 - 0,75. На этих участках площади газовая нагрузка минимальна. Прямая подача недогружает участок радиуса 0,4 - 0,75, промежуточные – 0 - 0,2. Участок радиуса у оси печи от 0,75 - 1,0 недогружается исследованными порядками скипов, однако прямая подача может загрузить осевой участок при массе подачи более 30 т и уровне засыпи более 1,75 м. Выгодным отличием порядка скипов КАКА↓ от КААК↓ являются более высокие газовые нагрузки в центре и низкие в серединной части радиуса, объясняющиеся меньшей загрузкой оси печи железорудной составляющей.

Изменение массы подачи и уровня засыпи при прямой подаче мало влияют на колебание газовой нагрузки на периферии, но в центре, на участке (0,6 - 1,0)  $R_k$  от стены, она значительно увеличивается. Промежуточные системы загрузки мало откликаются на регулирующие воздействия массой подачи и уровнем засыпи, что позволяет увеличивать массу подачи при таких порядках скипов.

Для полного и более правильного анализа газодинамического режима

необходимо учитывать и перепад давлений в слое. Для его расчета воспользовались уравнением Жаворонкова, из которых видно, что потери давления газа при прохождении через слой, для прямого порядка скипов гораздо выше, причем с увеличением массы подачи и уровня засыпи перепад растет значительно в основном за счет перекрытия центра печи железорудными составляющими. Промежуточные системы загрузки меньше влияют на перепад давлений с изменением их массы и уровня засыпи.

Учитывая газораспределение и потери давления в каждом слое, определили общее газораспределение и потери давления для цикла подач. Суммарное расположение газовых нагрузок по циклу подач просчитаем исходя из условия аддитивности.

Таким образом, метод оценки загрузки печи, основанный на математической модели газодинамики верха доменной печи, позволяет выбрать наиболее рациональный цикл подач и учесть газораспределение в нижней зоне, которое обусловлено длиной циркуляционной зоны горения.

УДК 621.74.04

*Л. В. Усенко, С. И. Репях, О. В. Соценко*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск*

### **О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ УДАЛЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТЛИВОК, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЛВМ**

Проблема повышения качества отливок из алюминиевых сплавов методом литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) продолжает оставаться актуальной. Это обусловлено тем, что при использовании известных способов выбивки и удаления стержней на отливках образуются такие дефекты как повышенная шероховатость, царапины, «забои», «заоваленность» острых кромок и др. По-прежнему при использовании ЛВМ для производства отливок сложной конфигурации, имеющих внутренние полости, карманы и поднутрения, часто возникают затруднения из-за невозможности удаления остатков керамической оболочки и стержней из готовых отливок.

Для удаления стержней из внутренних полостей средне- и крупногабаритных отливок из цветных сплавов используют электрогидравлическую выбивку. Отливки ответственного назначения очищают в пескоструйных, гидроскоструйных, дробеметных и дробеструйных камерах, а также путём химико-термической, электрохимической обработки и др. Основными недостатками очистки отливок абразивными материалами - кварцевым песком, электрокорундом, карбидом кремния и др. - являются значительное пылеобразование и повышение шероховатости поверхности отливок из сплавов на

основе меди и алюминия.

Также применяют метод выщелачивания остатков формы из отливок путём их галтовки в водном растворе щёлочи. Однако этот способ очистки не применим к алюминиевым сплавам, так как алюминий активно взаимодействует со щёлочью (KOH, NaOH).

При химической очистке отливок из алюминиевых сплавов [1, 2] их попеременно погружают в холодный и горячий 30...50%-ный водный раствор бифторида калия. Также известен способ удаления остатков керамической оболочки [3], при использовании которого алюминиевые отливки на 20 мин погружают в нагретый до 500 °С расплав NaOH, содержащий 0,5% Zn. Извлеченные из расплава отливки охлаждают на воздухе и промывают 15...20 с в 3%-ном растворе бихромата калия. После промывки отливки на 5 мин погружают в 16%-ный раствор азотной кислоты и на 20 мин - в кипящий 5%-ный раствор бихромата калия. Затем отливки промывают в холодной воде и просушивают при 150 °С.

Известные методы удаления оболочки формы нередко оказывают негативное механическое или химическое воздействие на материал отливок из алюминиевых сплавов. В частности, может ухудшаться качество поверхности, снижаться размерная точность, но не решается задача полного удаления остатков формы из полостей и отверстий отливки. Поэтому часто возникает необходимость в дополнительных затратных очистных операциях.

Такие операции могут выполняться в несколько этапов - кипячение в чистой воде в течение 40-60 мин, растворение остатков материала формы химически инертными к сплаву отливки растворителями, интенсивная промывка струей воды и др. Все это снижает производительность труда при изготовлении сложных отливок и зачастую не дает ожидаемых положительных результатов [4].

Одним из направлений решения проблемы повышения качества сложных деталей, получаемых методом ЛВМ из алюминиевых сплавов, является разработка новых водорастворимых композиций на основе солей (в частности, поваренной соли) для изготовления объемных форм и стержней.

#### Список литературы

1. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям: Днепропетровск: Лира, 2006. – 1056 с.
2. Специальные способы литья: Справочник / Б. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич и др.; Под общ. ред. В. А. Ефимова. — М.: Машиностроение, 1991. — 436 с: ил.
3. Очистка алюминиевых отливок от остатков оболочки в расплаве щелочи/ В. К. Доценко, В. А. Марченко, Ю. В. Польгуев и др. // Литейное производство. – 1979. - № 4. - С. 26—27.
4. Использование кремнезоля для изготовления форм по выплавляемым моделям / А. Д. Чулкова, Н. А. Шабанова, Ю. И. Растегин и др. // Литейное производство. – 1981. - № 11. – С. 16 -18.

УДК 621.74

*А. Н. Фесенко, М. А. Фесенко*

*Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск*

### **СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ**

Предложен и исследован способ изготовления двухслойных чугуновых отливок с дифференцированной структурой и свойствами из одного базового расплава методом центробежного литья.

Дифференциация структуры и свойств получаемых центробежнолитых заготовок достигается за счет обработки базового (исходного) расплава разными по функциональному назначению и воздействию на структуру и свойства металла модифицирующими, легирующими или другими добавками во время последовательной заливки вращающейся изложницы исходным расплавом.

Для реализации предложенного способа была спроектирована и изготовлена установка центробежного литья с горизонтальной осью вращения изложницы. Конструкцией указанной установки предусмотрен заливочный блок (модуль), располагающийся над перемещающимся вдоль продольной оси вращающейся изложницы заливочным желобом, по которому происходит заполнение полости изложницы жидким металлом. Заливочный блок (модуль) представляет собой разовую или полупостоянную литейную форму, обеспечивающую возможность в процессе заливки изложницы проводить обработку базового (исходного) расплава внутри литейной формы разными по функциональному назначению и воздействию на структуру и свойства металла мелкодисперсными, зернистыми, гранулированными, брикетированными, чипсообразными добавками, которые располагаются в проточных реакционных камерах автономных литниковых систем литейной формы (заливочного модуля).

Предложенный способ позволяет устранить основные недостатки, присутствующие существующим способам получения биметаллических и многослойных отливок из жидкого металла, а именно, исключить необходимость выплавки двух и более разнородных сплавов или же выплавки базового сплава, с последующей дополнительной обработкой части расплава в миксере, в ковше, на желобе, в струе металла перед заливкой в литейную форму.

Способ опробован при изготовлении из базового белого и серого чугунов экспериментальных двухслойных отливок-штуков с наружным диаметром 100 мм и длиной 250 мм со структурой белого чугуна в наружном слое и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом – во внутреннем слое.

Предложенный способ может быть использован для получения двухслой-

ных и многослойных центробежнолитых заготовок с дифференцированной структурой и свойствами металла в разных слоях с сочетанием слоев, например, белый чугун – серый чугун, белый чугун – высокопрочный чугун, высокопрочный чугун – серый чугун или же белый чугун – серый чугун – высокопрочный чугун и т.п., при использовании технологии карбидостабилизирующей, графитизирующей и сфероидизирующей внутриформенной обработки базового чугуна эвтектического, доэвтектического и заэвтектического состава.

УДК 621.74

*М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко*

*Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск*

#### **УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК**

Современный этап развития литейного производства характеризуется совершенствованием известных и созданием принципиально новых технологических процессов производства отливок, позволяющих повысить качественные характеристики литых деталей.

На сегодняшний день среди существующих сплавов, из которых изготавливаются литые детали, лидирующие позиции занимает чугун. Широкое применение данного конструкционного материала обусловлено сочетанием в нем хороших технологических и механических свойств, а также технико-экономических показателей. Поэтому одним из первостепенных требований современного литейного производства является повышение качества чугунных отливок, так как это позволит увеличить срок службы изделий, снизить их металлоемкость, сократить потребность в стальных поковках, сортоном прокате и отливках из стали и цветных сплавов.

Одним из эффективных способов целенаправленного улучшения качества, структуры и свойств чугунных отливок является внепечная модифицирующая обработка жидкого чугуна.

Для получения более высоких показателей механических и эксплуатационных свойств чугунных отливок на практике применяется двойное модифицирование (двойная обработка) чугуна. Чаще всего данный процесс реализуется путем сочетания предварительной ковшевой обработки расплава и вторичной обработки внутри литейной формы при ее заливке. Определенный интерес, особенно при изготовлении отливок на автоматических литейных линиях, представляет технология двойного модифицирования (двойной обработки) чугуна внутри литейной формы, когда и первичная и вторичная обработка расплава осуществляется непосредственно в литейной форме.

Однако информация, касающаяся данного технологического процесса, в литературе практически отсутствует.

В работе предложена и исследована технология двойного внутриформенного модифицирования чугуна, которая заключается в первоначальной обработке исходного жидкого чугуна карбидостабилизирующей добавкой, с последующей вторичной обработкой сфероидизирующей лигатурой, которые размещаются в двух проточных реакционных камерах литейной системы, расположенных друг за другом на пути движения расплава к полости литейной формы.

В качестве базового (исходного) расплава применяли серый чугун близкого к эвтектическому составу, склонный к кристаллизации с выделением свободного графита, выплавленный в индукционной тигельной печи типа ИСТ 006. Литейные формы, выполненные из песчано-глинистой смеси, заливались базовым жидким чугуном при температурах 1420, 1450 и 1480 °С из ручного разливочного ковша конического типа.

В качестве карбидостабилизирующей добавки применяли феррохром марки ФХ200, а в качестве сфероидизирующей добавки – ферросилициймагниеую лигатуру VL63(М). Модифицирующие добавки с размером частиц 1,0...2,5 мм в количестве 2,0 % от массы обрабатываемого чугуна размещались в промежуточных проточных реакционных камерах, выполненных из пенополистироловых оболочек, которые вставлялись в разовые литейные формы при их сборке.

Результаты экспериментальных исследований показали, что двойная обработка исходного жидкого серого чугуна в проточных реакционных камерах внутри литейной формы сначала карбидообразующей добавкой с последующей обработкой сфероидизирующей добавкой способствует кристаллизации чугуна с формированием структуры, состоящей из перлита-цементитной металлической основы и включений графита шаровидной формы. Такая структура обеспечивает повышение твердости чугуна в экспериментальных образцах на 40...45 %, уменьшение абразивного износа в среднем на 35 % по сравнению с теми же показателями для исходного чугуна. При этом также было установлено, что с увеличением температуры заливки базового чугуна эффект двойного внутриформенного модифицирования усиливается.

УДК 621.74

*А. С. Филев, И. В. Цветков, А. Н. Овчарук, В. А. Тутык*  
Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ),  
Днепропетровск

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ВКЛЮЧАЮЩИХ Si3N4 ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СЛИТКОВ СОЛНЕЧНОГО КРЕМНИЯ**

При получении слитков солнечного кремния с использованием электронно-лучевых технологий рафинирования, встает задача получения керамических изделий пригодных для эксплуатации в условиях динамических тепловых, электрических нагрузок.

Обычно при производстве кристаллического кремния солнечного качества используют керамику, выполненную из кварца. Расплавленный кремний вступает в реакцию с тиглем из SiO<sub>2</sub>, который находится в контакте с ним, образуется моно оксид кремния и кислород, при этом разрушается тигель, а кислород загрязняет расплав кремния.

Задача повышения качества тиглей решается различными методами, прежде всего включение в состав массы для формирования тигля различных компонентов решающих задачи повышения реакционной и термической стойкости. Для получения керамического изделия готовят шихту, формируют заготовку и осуществляют ее термообработку, в состав шихты включают порошки, содержащие кварц, нитриды и карбиды различных элементов (алюминия, кремния, бора, ниобия, иттрия и др.). Полученная керамика отличается повышенной термостойкостью, механической прочностью, пониженным удельным объемом, высокой термостабильностью объема при повышенных температурах, но требует дополнительных затрат на предварительное получение карбид и нитрид содержащих порошков. Кроме того, не всегда удается исключить загрязнение расплава кремния материалом тигля.

Более перспективным направлением является формирование многослойных тиглей, при этом не исключается возможность формирования слоев из многокомпонентных материалов, но преобразование компонентов в слое эффективнее производить непосредственно перед применением тигля для переплава и кристаллизации. Расплавление кремния осуществляется в кварцевых или многокомпонентных тиглях содержащих помимо кварца нитриды и карбиды, с толщиной стенок ~30 мм, при этом внутренняя поверхность тиглей покрывается защитным слоем толщиной ~300 мкм из нитрида кремния или многокомпонентным слоем, включающим как чистый кремний, так и нитрид кремния. Покрытие внутренней поверхности тигля позволяет на порядок снизить концентрацию металлических примесей в слитке мультикремния и повысить время жизни неравновесных носителей заряда.

Для формирования защитного слоя на поверхности тиглей применяют

различные технологии и материалы. Например, при получении кремния солнечного качества возможно использование многокомпонентного покрытия, содержащего нитрид кремния и хлорид кальция, которое наносится слоем от 150 до 300 мкм на графитовый тигель. При этом нанесение может быть осуществлено при помощи химического осаждения из газовой фазы, при помощи плазменного напыления, при помощи пиролиза на стенках тигля, в виде коллоидной суспензии в водном неорганическом растворе, с помощью высокотемпературной огневой обработки и другими способами

Покрытие, в состав которого входит нитрид кремния, необходимое для исключения реакцию кремния с тиглем из кварца должно быть достаточно большой толщины порядка 300 мкм. Операция нанесения покрытия требует времени, при этом покрытие из нитрида кремния нанесенное различными способами может быть механически слабым и отслаиваться или шелушиться во время использования или даже до начала использования.

Рекомендуется наносить покрытие в самый последний момент перед использованием, то есть на оборудовании, на которое возлагается задача, как нанесения покрытия, так и плавления кремния, в работе для решения этой задачи, предложено использовать электронный пучок газоразрядной электронной пушки с полым анодом [1], работающей в низком вакууме, что упрощает технологический процесс. Формирование слоя нитрида кремния и кремния на поверхности тигля, происходит из порошкового кремния при использовании в качестве газовой среды N<sub>2</sub>, непосредственно перед началом расплавления кремния в установке. Опробованные ранее технологические схемы получения нитрида кремния с использованием низковакуумных газоразрядных пушек показали возможность осуществления данного технологического решения [2]. По предложенной технологии удастся создавать на поверхности тигля прочный слой, состоящий из кремния и нитрида кремния, обеспечивающий предъявляемые требования по стойкости и реакционной способности.

#### Литература

1. Tutyk V. A. Low-vacuum gas-discharge electron guns on the basis of high-voltage glow discharge // Problems of atomic science and technology. – 2008. — №6. – P. 156 -158.
2. Цветков И. В., Тутык В. А. Исследование применения газоразрядной электронной пушки при получении азотированного ферросилиция // Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 2008. – №4. – С. 29-31.

УДК 621.74.04:669.131.7

*А. В. Хазанов, Л. Х. Иванова**Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

В последнее время валки исполнения СШХН имеют низкую степень «шаровидности» графита в чугуне, несоответствующую требованиям действующих технических условий, что вызвано, очевидно, снижением качества шихтовых материалов.

Как известно, возможными причинами недостаточной «шаровидности» графита у структуру валковых чугунов являются:

1. Вредные примеси. Согласно литературным данным, такие элементы, как висмут, сурьма, и свинец нейтрализуют действие чистого магния при модифицировании расплава. Эти вредные примеси могут быть нейтрализованы малыми присадками РЗМ. Наиболее технологичным является – использование РЗМ-содержащей лигатуры.

2. Высокое остаточное содержание серы. Остаточное содержание серы в валковых чугунах превышает 0,01%, что приводит к избыточному образованию сульфидов магния, блокирующих образование шаровидного графита.

3. Недостаточное графитизирующее модифицирование. Известно, что графитизирующее модифицирование позволяет улучшить форму графита, увеличить количество глобулей, а также замедлить процесс старения модифицирующего эффекта магния. Графитизирующее модифицирование тем эффективней, чем более оно удалено во времени от сфероидизирующего модифицирования.

Целью исследований была стабилизация модифицирующего эффекта магния.

Для решения этой задачи использовали модификаторы производства компании «Elkem AS» (расход модификаторов приведен в табл. 1, химический состав – в табл. 2).

Таблица 1

Расход модификатора и место его ввода

Тип модификатора и место его ввода	Elkem Preseed (Пресид) (в печь)	Elkem Elmag 5800 (Элмаг) (в карман ковша)	Elkem Foundrisil 75 Inoculant, (Фондрисил) (на струю металла)
Кол-во, %	0,1%	1,1-1,3%	0,2%

Таблица 2

Химический состав модификаторов и их назначение

Название по сертификату	Химический состав, масс. %							Назначение
	Si	Mg	Ca	РЗМ	Al	Ba	Fe	
Elkem Preseed Preconditioner (Пресид)	66,7	-	1,33	4,39 (Zr)	4,16	+	остальное	Графитизирующий модификатор для создания подложки
Elkem Elmag 5800 (Элмаг)	45,0	5,80	1,0	1,0	0,7	-	остальное	Сфероидизирующий модификатор
Elkem Foundrisil 75 Inoculant (Фондрисил)	75,0	-	1,13	-	1,0	1,15	остальное	Графитизирующий модификатор

В заливочном ковше для модифицирования выложили «карман», для этого площадь дна ковша разделили на две равные части с помощью шамотного кирпича с высотой кладки 250-350 мм. В «карман» перед выпуском расплава засыпали ровным слоем присадку модификатора Elmag 5800, а сверху на этот слой давали мелкую чугунную стружку (толщиной ~ 50 мм). Выпуск расплава производили так, чтобы первая порция металла попала в часть ковша, противоположную «карману» (сливали ~ 2/3 металла). После окончания реакции чугуна с магнием, сливали остальной расплав и одновременно присаживали на струю металла графитизирующий модификатор Foundrisil 75.

В результате проведенных экспериментов в структуре бочек валков был получен шаровидный графит более высокого балла (ШГф 4,5 изредка ШГф3), чем в валках, модифицированных чистым магнием.

УДК 621.746.047

*А. Ю. Хитько, Л. А. Шапран, Л. Х. Иванова, М. Н. Хитько*  
 Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

### ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТЫХ РОЛИКОВ МНЛЗ

Условия работы роликов в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ характеризуются: малой скоростью вращения (до 1 об/мин), значительными и переменными термическими и механическими нагрузками, интенсивным абразивным и гидроэрозионным износом, ударами при прохождении холодного конца заготовки. Максимальная температура поверхности роликов достигает 550°C, перепад температуры по сечению до 470°C, по длине – 220°C. В итоге в роликах развиваются сетка разгара, кольцевые трещины, износ поверхности или происходит налипание материала заготовки на поверхность роликов. Все перечисленные повреждения сокращают срок службы роликов, а, следовательно, и снижают межремонтный срок работы МНЛЗ.

Оптимальное сочетание служебных свойств может быть достигнуто при изготовлении роликов из нескольких сплавов, в частности, составными. Из большого количества возможных сочетаний металлов, составляющих биметаллические пары, наиболее распространение получили стали и сплавы на основе железа, например, сталь – сталь, сталь – чугун.

Целью исследования являлся выбор сплавов, отвечающих условиям службы роликов МНЛЗ.

Результаты исследований и их обсуждение.

Для рабочего слоя роликов целесообразно применять материалы с высоким сопротивлением термическому, абразивному и коррозионному разрушению, а для внутреннего – несущего слоя – материалы, обеспечивающие высокую конструкционную прочность ролика.

При выборе химического состава стали рабочего слоя роликов, определении структурного класса стали ставились следующие основные задачи:

- получение структуры, стабильной в зоне рабочих температур поверхности ролика при длительной эксплуатации (15...550°C);
- отсутствие фазовых превращений в этом интервале температур, что гарантирует низкую склонность к налипанию материала сляба;
- устойчивость свойств при кратковременных нагревах до 700...850°C, например, при остановке МНЛЗ или отсутствии охлаждения;
- антикоррозионные свойства;
- сохранение при длительной эксплуатации достаточно высокой твердости, прочности и ударной вязкости.

С учетом предъявленных требований, для наружного слоя была выбрана сталь типа 20Х25Н19С2Л, а для внутреннего – сталь 20Л. В промышленных условиях была отлита партия биметаллических заготовок размером

330x(35+45)x3650 мм.

Исследованием структуры отрезанных колец в переднем и заднем конце заготовки установлено, что надежное соединение слоев биметалла достигается при заливке второго металла на незатвердевший первый в диапазоне температур на его свободной поверхности на 10...150 ниже температуры ликвидус. С увеличением этой температуры происходило увеличение смешивания двух металлов, а с уменьшением появляется несвариваемость на границе двух металлов. При этом температура заливки второго металла должна иметь перегрев 50...700 над температурой его ликвидус.

Механические свойства определяли на стандартных образцах, вырезанных из внутреннего и наружного слоев биметаллических заготовок. Испытание на растяжение проводили на машине для испытания разрывных образцов ЦД-10/90, ударную вязкость – на маятниковом копре по ГОСТ 10066-80. Результаты выполненных испытаний материала биметаллических заготовок в литом состоянии (задний конец заготовки) представлены в таблице.

Номер заготовки	Марка стали	Номер плавки	Механические свойства				
			$\sigma_g$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCV, МДж/м <sup>2</sup> х10 <sup>-2</sup>
1.	20Х25Н19С2Л 20Л	13934	511	297	57,3	27,3	49,0
		24377	622	539	3,80	2,95	24,5
2.	20Х25Н19С2Л 20Л	13934	528	266	30,8	43,7	104,5
		24377	828	813	1,30	2,60	25,5
3.	20Х25Н19С2Л 20Л	13939	452	304	16,7	15,6	11,1
		24382	912	892	0,80	7,60	14,7

Как видно сталь наружного слоя заготовок имеет высокий уровень прочностных характеристик  $\sigma_g = 452...511$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 304...297$  МПа при достаточно высокой пластичности, ударная вязкость стали меняется в широких пределах. Сталь внутреннего слоя при высокой прочности отличается низкими значениями пластических свойств и ударной вязкости. Пестрота механических свойств внутреннего слоя заготовок объясняется смешиванием наружного и внутреннего слоев в процессе отливки.

Установлено, что механические свойства сплавов переходной зоны, образовавшиеся в результате смешивания двух металлов, занимают промежуточные значения по сравнению со свойствами отдельных сплавов каждой биметаллической пары.

Опытные ролики были установлены в кассеты и испытаны вместе с серийными. Максимальный износ по диаметру бочек опытных роликов составил 0,2...0,4 мм, что в 10...20 раз меньше износа серийных, изменение диаметра которых составило 3,5...4,0 мм.

При визуальном осмотре поверхностные дефекты, налипание на бочках опытных роликов не обнаружено. У сравниваемых серийных роликов имелась сетка разгара и полосчатое налипание.

УДК 621.74:075.8:034.3

*О. Н. Хорошилов*

*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков*

### **ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ**

При производстве непрерывно-литых заготовок из медных сплавов возникает задача повышения их механических характеристик. Для решения этой задачи необходимо определить влияние на механические характеристики заготовки следующих технологических факторов: частоты движения заготовки в кристаллизаторе при поступательном и реверсивном движении заготовки.

В качестве механических характеристик будем определять временное сопротивление на разрыв образцов из медных сплавов, для чего была выбрана бронза марки Бр. О10Ф. Зависимости для определения временного сопротивления на разрыв строили на основе уравнения:

$$\sigma_{ТЕК} = \sigma_{0,1} - k\sigma_{ТЕК}$$

где  $\sigma_{ТЕК}$  - текущее значение предела прочности на разрыв, МПа;

$\sigma_{0,1}$  - значение предела прочности заготовки на разрыв при значении параметра повреждаемости равном  $\omega = 0,1$ , МПа;

$k$  - эмпирический коэффициент.

В результате проведения экспериментальных исследований по определению предела прочности образцов из бронзы марки Бр. О10Ф было выявлено следующее:

- при реверсивном движении заготовки, увеличение частоты движения в кристаллизаторе от 2,5 до 7,5 [мин-1] приводит к увеличению предела прочности заготовки от 220 до 250 МПа;

- при поступательном движении заготовки, увеличение частоты движения в кристаллизаторе от 2,5 до 7,5 [мин-1], приводит к уменьшению предела прочности заготовки от 217 до 180 МПа [1].

Таким образом, было определено, что для увеличения предела прочности заготовки необходимо поступательное движение заготовки, осуществляемое по циклограмме: «пауза – движение - пауза», заменить реверсивным движением заготовки, осуществляемым по циклограмме: «пауза – обратное движение – прямое движение».

Список литературы

1. Бреславский Д. В. Хорошилов О. Н. Пономаренко О. И. Управление качеством непрерывно-литых заготовок // Вісник ДДМА. 2010 № 3 (20) - С.41 – 46.

УДК 620.192.3

*В. Е. Хрычиков, Е. В. Меняйло*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАЛИВКИ И СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК**

Образование значительной части дефектов в отливках происходит при затвердевании в интервале температур ликвидус-солидус (TL-TS). Влияние теплоты выделения скрытой теплоты кристаллизации в интервале TL-TS на затвердевание отливок практически не изучено. Поэтому целью работы является установление влияния скрытой теплоты кристаллизации и температуры заливки на затвердевание чугуновых отливок, в частности прокатных валков.

Моделировали процесс затвердевания прокатного валка из доэвтектического чугуна, бочка которого охлаждается в кокиле, а верхняя и нижняя шейки – в песчаной форме. Модель основана на сопряженном численном решении двумерного нестационарного уравнения теплопроводности в областях жидкого и затвердевающего металла. Процесс затвердевания описывали в рамках квазиравновесной теории двухфазной зоны. Скрытую теплоту кристаллизации учитывали эффективным коэффициентом теплоемкости. Кинетику выделения скрытой теплоты кристаллизации в интервале температур TL-TS устанавливали согласно результатам экспериментальных исследований процесса затвердевания прокатного валка массой 2,2 т из ВЧ и замеров на высокотемпературном дифференциальном термическом анализаторе. Установлено, что расчетные кривые охлаждения соответствуют экспериментальным, если при вблизи TL выделяется ~20% твердой фазы, вблизи TS - 70%, а остальные 10% внутри интервала температур TL-TS .

Кроме того, согласно результатам экспериментальных исследований введена поправка, учитывающая выделение теплоты фазового перехода при эвтектидном превращении. Изменение толщины воздушного зазора между отливкой и кокилем рассчитывали в зависимости от толщины затвердевшего слоя металла. Массоперенос, вызванный “дождем кристаллов” в нижнюю шейку, в тепловом расчете учитывали соответствующим уменьшением на 20% значения теплоты фазового перехода объема металла, заключенного в нижней шейке вала. Все это позволило достаточно точно адаптировать результаты экспериментальных замеров и компьютерного моделирования.

При моделировании изменяли температуру заливки чугуна с 1270, 1320, 1370 до 1420 °С и скрытую теплоту кристаллизации различных частей отливки. Установлено, что при температуре заливки 1320 °С бочка вала диаметром 450 мм, охлаждающаяся в кокиле, затвердевает за ~70 мин., в 2 раза быстрее нижней Ø 320 мм и в 2,6 раза быстрее верхней шейками вала Ø 330 мм, которые охлаждаются в песчаной форме.

Сравнение температур затвердевания центральной части бочки вала с нижней и верхней шейками показало, что сразу после окончания заливки температура во всем объеме отливки практически выравнивается. Однако неожиданно уже через 3-4 мин и до ~50 мин в осевой зоне бочки температура выше, чем в шейках. И это несмотря на то, что продолжительность затвердевания шеек 2,0-2,6 раза больше. Причем, разность температур между центрами бочки, верхней и нижней шейками непостоянна. Установлено, что разность температур выше при температурах ликвидус и солидус в период кристаллизации бочки вала.

Поэтому можно считать, что в микрообъемах расплава на границе затвердевания в момент перехода сплава из жидкого в твердое состояние выделение скрытой теплоты кристаллизации создает «тепловой экран» и замедляет теплоотвод из осевой зоны бочки в кокиль. Избыточное тепло отводится в литейную форму и в затвердевший слой металла, но не повышает температуру металла выше TL и TS. Образование разветвленных дендритов (фрактальной структуры), обеспечивает максимально повышенный сток тепла от фронта затвердевания в литейную форму. Поэтому при резком увеличении количества выделившейся скрытой теплоты кристаллизации происходит остановка затвердевания до момента полного отвода тепла из микрообъемов расплава на фронте затвердевания.

УДК 621.74.04

*Г. Д. Хуснутдинов, Б. Г. Зеленый*

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

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ОБРАБОТКИ ЧУГУНА НИТРИДОМ МАГНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЙ**

Развитая поверхность контакта расплава и реагента является непременным условием интенсивного расходования реагента, содержащего нитрид магния (РНМ). В лабораторных экспериментах использовали различные приемы увеличения контактной поверхности РНМ с целью установить их эффективность и применимость в производственных условиях. Критериями оценки эффективности служили максимальное достигаемое содержание магния в расплаве и необходимая для этого продолжительность обработки.

Эксперименты проводили на высокочастотной плавильной печи, обрабатывая расплав чугуна в плавильном тигле. Во всех опытах масса расплава составляла 10 кг. Температура расплава при обработке поддерживалась в пределах 1400 – 1500°С периодическим подогревом. С целью упрощения оценки усвоения магния минимизировали расход магния на десульфурацию расплава, используя низкосернистый чугун (содержание серы в исходном чугуне не более 0,02 %).

Увеличение контактной поверхности РНМ с расплавом достигали тремя способами. В первом, изменяя форму брикета реагента, увеличивали его открытую поверхность. В этом случае брикет целиком принудительно погружается в расплав. В производственных условиях такой прием возможен при формировании брикета непосредственно на днище литейного ковша. Экспериментом установлена принципиальная возможность получения брикета РНМ закрепленного на подложке в виде слоя толщиной 0,4 – 0,5 см при нагревании смеси порошков магния и графита. Однако формирование такого брикета на футеровке литейного ковша требует уточнения технологии нагрева порошковой смеси.

За счет развития поверхности контакта брикета реагента с расплавом содержание магния в чугуне, гарантирующее сфероидизацию графита (более 0,03 %) может быть достигнуто в течение 1,5 мин. За все время обработки, длившееся 3 мин, массовая доля магния повысилась до 0,038 %, что сопоставимо с интенсивностью поступления магния в чугун при использовании традиционных магниевых присадок.

Во втором варианте брикет реагента разделили на фрагменты с максимальным размером в поперечнике 6 – 10 мм. Это позволяло существенно увеличить контактную поверхность реагента и его полное расходование, если обеспечивалось «омывание» расплавом каждого в отдельности фрагмента.

После расплавления и перегрева чугуна до 1500<sup>0</sup>С на его зеркало компактно размещали фрагменты реагента. До начала взаимодействия с расплавом их накрывали графитовым колоколом и погружали в глубину металлической ванны. Максимальная массовая доля магния в чугуне достигается в течение трех минут и составляет 0,033 %.

Многokратное увеличение контактной поверхности РНМ с расплавом может быть достигнуто путем измельчения реагента, а эффективное использование измельченного реагента требует дозированной его подачи в расплав, исключая чрезмерно активное взаимодействие. Должно быть учтено два характерные качества РНМ: плохая смачиваемость расплавом и начало взаимодействия только после некоторой выдержки реагента в расплаве. Устройство для ввода порошкового РНМ в расплав представляет собой графитовый стакан с глухим дном. Погружную штангу закрепляли внутри по центру стакана с помощью винта. Порошок реагента засыпали в пространство между стенками стакана и погружной штангой и утрамбовывали. После нагревания чугуна до 1500<sup>0</sup>С стакан с реагентом медленно погружали в расплав, перемещая к донной части плавильного тигля. В процессе погружения уплотненный порошок реагента не всплывает, поскольку из-за плохого смачивания расплав не проникает в толщу порошка. К моменту предельного погружения в контактной поверхности РНМ с расплавом начинается их взаимодействие и частицы реагента послойно всплывают из внутреннего пространства стакана в расплав. За 7,5 мин реагент был израсходован полностью. Конечное содержание магния достигло 0,041 %.

Результаты опытов позволяют сделать заключение, что при использовании порошкообразного РНМ в производственных условиях необходимо решить достаточно тривиальную задачу: доставить реагент в придонную зону металлической ванны и удерживать его в этой зоне до начала взаимодействия с расплавом.

Решения могут быть традиционными с некоторой корректировкой, учитывающей специфику РНМ. Рассмотрим, например, вариант обработки чугуна в ковше, аналогичный «сендвич»-процессу. При коэффициенте усвоения магния, равном 50 % и содержании серы в исходном чугуне 0,05 % для получения высокопрочного чугуна в ковше емкостью 1 т потребуется 3 кг РНМ. Эта масса РНМ содержит около 1 кг магния и занимает в порошкообразном состоянии объем, равный 3 дм<sup>3</sup>. Такой объем реагента можно разместить в нескольких нишах, выполненных в футеровке днища ковша. Вместимость каждой ниши определяет их количество, а форма (диаметр и глубина) влияют на интенсивность обработки.

Вместо ниш в футеровке ковша возможно применение расплавляемой чугунной «решетки» соответствующей конфигурации.

УДК 621.74

*И. В. Цветков, М. И. Гасик*  
Национальная металлургическая академия  
Украины (НМетАУ), Днепропетровск

### **ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ФЕРРОСИЛИЦИЯ НА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ**

В настоящее время на ряду с повышением качества материалов, снижения материальных и энергетических затрат, одним из приоритетных направлений развития металлургической отрасли, является повышение экологической безопасности производства. В тоже время применяемые в литейной, сталеплавильной промышленности высококремнистые марки ферросилиция вызывают ряд проблем небезопасных для здоровья персонала. Ферросилиций подвержен самодиспергированию результатом, которого является ухудшение потребительских качеств, изменение фракционного состава, а так же выделение вредных ядовитых газов, иногда приводящее к трагическими последствиям.

Явление рассыпания ферросилиция известно сравнительно давно, но, как свидетельствуют данные [1-3], продолжает иметь место, при его транспортировке и при хранении. Самодиспергирование в значительной степени связано со структурой и физико-химическими характеристиками высококремнистого ферросилиция.

В работе проведена оценка влияния структуры, химического состава и воздействия внешних факторов - увлажнение морской (предложенная методика) и дистиллированной водой (определяемая в соответствии с ГОСТ 19433-88), на параметры образования газовой фазы содержащей ядовитые газы РН<sub>3</sub> и АsН<sub>3</sub>. Обобщены данные аналитического обзора методик испытания и механизма рассыпания ферросилиция с газовой выделением. Выполнено оценка влияния морской воды на скорость газовой выделении при увлажнении высококремнистого ферросилиция, проведено сравнение данных с результатами полученными по стандартной методике с использованием дистиллированной воды. Установлено, что морская вода увеличивает скорость и полноту взаимодействия в сравнении с дистиллированной водой.

Проанализированы методы оценки склонности высококремнистого ферросилиция к газовой выделению и повторяющиеся случаи отравления (иногда с летальным исходом) членов экипажей морских судов, транспортирующих фракционированный ферросилиций. Так в 2001г. имело место отравление экипажа судна «Мунир-Коч» (Бердянск морской порт). По причине рассыпания ферросилиция с выделением ядовитых газов произошло групповое отравление 12 членов экипажа теплохода «Фрост» в морском порту Таганрога в ноябре 2005г. В январе 2007г было 2 летальных исхода и отрав-

ление 8 членов экипажа судна «Одиск» шедшего из порта Керчь в Турцию с ферросилицием.[4].

Выполнен аналитический обзор литературных источников о структуре и свойствах промышленного высококремнистого ферросилиция (65-75% Si) машинной разливки. Выявлены особенности фазовых превращений в ферросилиции марки ФС65 с выделением при кристаллизации фазы первичного кремния, а при охлаждении ниже 937° С – вторичного кремния по механизму эвтектоидного превращения  $Fe_xSi_2 \xrightarrow{937^\circ C} FeSi_2 + Si$ . Электронной микроскопией и РСМА в представительных образцах ферросилиция марки ФС65 установлено, что из-за низкой растворимости примесных элементов Ca, Al, P в силицидах железа ( $FeSi$ ,  $Fe_xSi_2$ ), а также в фазе чистого первичного кремния, эти элементы концентрируются в виде эвтектических выделений по границам зерен матричных фаз. Микроанализ основных и избыточных фаз выделения в плоскости свежих изломов образцов ферросилиция показывает, что содержание кремния и примесных элементов (Al, Ca, P) существенно различаются, и повышенному содержанию фосфора в фазах соответствуют более высокие концентрации кальция и алюминия, что, по-видимому повышает активность взаимодействия ферросилиция с влагой.

Проведены сравнительные испытания ферросилиция марки ФС65 на склонность к газовыделению по стандартной и опытной методике. Экспериментально установлено, что при прочих равных условиях (параметрах испытания ферросилиция по стандартной методике) количество образующих газов и скорость газовой выделению при увлажнении проб морской водой выше в 1,4-1,72 раза в сравнении со стандартными показателями при использовании дистиллированной воды.

Рекомендовано испытания ферросилиция на газовой выделении производить с применением не дистиллированной воды как предусмотрено ГОСТ 19433-88 а морской водой, а для проведения экспресс анализа использовать фракцию 0-0,125мм и время испытания сократить с 7 до 1 часа. Предложенные испытания в большей степени соответствуют реальным промышленным условиям транспортировки, хранения и использования.

#### Литература

Жучков В. И., Гасик М. И., Шешуков О. Ю. Структура и свойства ферросплавов. - Сб. докладов Литейного консалиума №2 «Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из чьрных сплавов» - Челябинск: Челябинский Дом печати, 2007 - с. 84.

Гасик М. И. Проблемы рассыпания высокопроцентного ферросилиция с образованием токсичных ядов //Сталь. 1996. №8 С. 26 – 30

Моряки отравились токсичными испарениями сыпучего груза // газета «Коммерсантъ» № 17 (735) от 01.02.1995

Белобров Е. П., Репетей В. Д. Авария на т/х «Одиск» на рейде порта Ялта – нетехнологическая утечка чрезвычайно токсического газа фосфина из трюма № 1 и гибель моряков при перевозке ферросилиция навалом // Бюллетень Госфлотинспекции Украины. – № 6 (43). – 2007. – С. 117 – 120.

УДК 621.74.045

*А. Г. Черныш, В. А. Болюх*

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

### **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

Технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) позволяет получать сложные по конфигурации массивные отливки с высоким классом точности и низкой степенью шероховатости. Однако процесс получения крупногабаритных разностенных моделей спеканием их в автоклаве из гранул пенополистирола имеет ряд особенностей. На основании исследований проведенных ФТИМС НАН Украины (при консультациях с проф. Шинским О. И.) по отработке технологии изготовления пенополистироловой модели стальной отливки “Задвижка газовая” с габаритным размером 0,6 м получены следующие практические выводы и рекомендации, позволяющие стабилизировать качество разовых полистироловых моделей для отливок сложного типа и упростить сам процесс их получения.

Процесс спекания модели в пресс-форме, заполненной исходным материалом - гранулированным подспененным полистиролом и помещенной в камеру автоклавной установки, будет наиболее технологичным, если пресс-форма, а также получаемая модель представляют равностенные конструкции. В этом случае, благодаря влиянию перегретого пара, происходит равномерный нагрев, расширение пенополистирола и слияние его гранул в единое целое - готовую модель.

Необходимым условием получения годной модели является выполнение ряда технологических операций: выдержка пресс-формы в автоклаве строго заданный интервал времени (до 7 мин. в нашем случае), контроль давления пара в камере автоклава, помещение пресс-формы в камеру в заданном положении, которое должно быть всегда постоянным и т. д. При спекании моделей с разной толщиной стенки, для предотвращения перепекания наиболее тонких частей модели использовали многослойную хлопчатую ткань в качестве покрытия, которую накладывали на требуемую часть пресс-формы в качестве местного теплоизолятора при ее нагреве в среде перегретого пара.

При этом также учитывали направление циркуляции пара в камере, если пресс-форма имеет внутреннюю полость, то покрытие не должно закрывать эту полость, препятствуя прохождению по ней пара. При наличии в пресс-форме внутреннего стержня без полости, желателен его предварительно нагревать, так как внутренняя часть пресс-формы прогревается дольше внешней, а это затрудняет равномерное спекание модели. В камеру автоклава пар должен поступать по перфорированным трубкам с разных сторон для более равномерного нагрева всех частей пресс-формы.

Практически выявлено, что использование полистирола мелкой фракции ведет к более стабильным результатам, чем использование его крупных гранул, оптимальная плотность предварительно вспененного полистирола равна 25-30 кг/м<sup>3</sup>. Для упрощения извлечения модели из пресс-формы на поверхность ее полости предварительно наносили слой разделительного покрытия, в качестве которого использовали водный раствор ПАВ - солей высших жирных кислот (мыльного раствора), снижающий адгезию материала модели к пресс-форме. Этот раствор легко удаляется с поверхности модели перед последующей операцией нанесения противопожарной краски, поскольку для хорошего осаждения краски на модель, ее поверхность должна обладать достаточной шероховатостью, и смазка здесь нежелательна. Последующая заливка металлом форм, содержащих модели, полученные описанным способом, подтвердила пригодность технологии для передачи ее в литейный цех для серийного производства отливок корпусов задвижек.

УДК 669.11/15:576.2

*Т. Г. Цір, А. Г. Борисов*

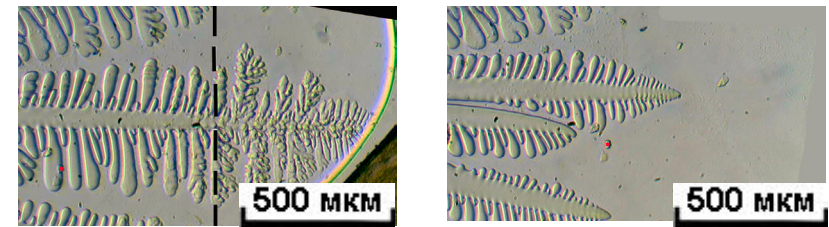
*Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ*

### **ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ НА МОРФОЛОГІЮ СПЛАВУ**

Велика кількість різновидів литва частково закристалізованих сплавів зумовлена сучасною тенденцією до якісних змін і зменшення затрат на виробництво. Реолитво являє собою спосіб, де в кінцевому виробі існує недендритна – розеткова або глобулярна структура. В даній технології для отримання відповідної морфології використовується перемішування рідкого сплаву. Але можливо для появи такої морфології сплаву існують і інші причини, які не пов'язані з механічним перемішуванням, наприклад, у випадку впливу концентраційної неоднорідності на зміну переважного росту дендрита в розплаві.

В роботі [1] було описано зміну переважного росту дендрита з орієнтації

«100» при 25% Zn на «110» при 55% Zn в сплаві Al-Zn. На цій підставі можливо зробити припущення, що існує певна проміжна концентрація, за якої «переважність» напрямку «100» вже зменшилась, а «переважність» «110» ще не проявилась, і за такої ситуації замість дендритних кристалів мають спостерігатись якісь розгалужені розетки - подібні форми кристалів. З метою перевірити вплив концентрації на зміну переважного росту був поставлений дослід на прозорих модельних речовинах з прогнозуючим результатом на отримання зміни напрямку переважного росту дендрита. Використовували дві модельні речовини (камфен і сукцінінотрил) в рівних об'ємних частках, які були розміщені на склі одна біля одної. Слід зауважити, що межа розподілу сукцінінотрил-камфен після розплавлення змістилась в бік камфена. Ріст сукцінінотрилу до первинної межі розподілу відповідав традиційному дендритному росту (Рис.1 а).



а – ріст дендрита сукцінінотрилу; б – розгалуження гілок сукцінінотрилу в області присутності іншого препарату. Чорним пунктиром зазначена первинна межа розподілу сукцінінотрил-камфен в рідкому стані.

Рис.1 - Вплив концентраційної неоднорідності

Після перетину межі і потрапивши в область, де попередньо був камфен, почалось хаотичне розгалуження гілок сукцінінотрилу (Рис.1 б). Звідси можна зробити висновок, що деяка кількість камфена потрапила в рідкий сукцінінотрил і, створивши концентраційну неоднорідність, вплинула на характеристику росту. Хоча очікуваного результату по зміні переважного росту дендрита під впливом концентрації і не було отримано, хаотичне розгалуження бічних гілок також може бути причиною формування недендритних структур в металевих сплавах, наприклад, коли концентрація залишкового розплаву внаслідок росту первинної фази наближається до евтектичної.

Перелік літератури

1. Tomog Naxhimali, Alain Karma, Frederic Gonzales, Michel Rappaz Orientation selection in dendritic evolution. ADVANCE ONLINE PUBLICATION/www.nature.com/naturematerials

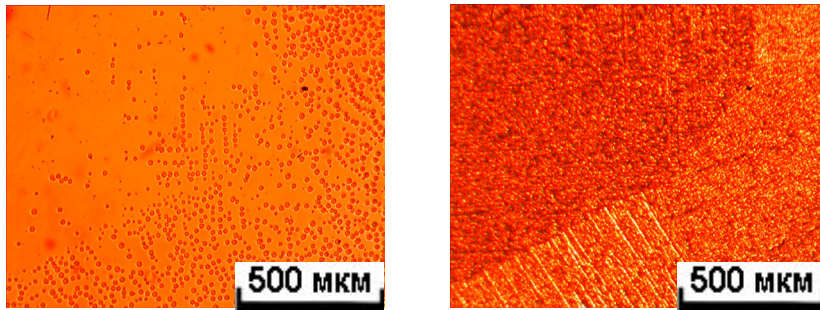
УДК 669.018.28:576.2:536.413

*Т. Г. Цір, В. М. Дука, А. Г. Борисов**Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ***ДІЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ НА МОРФОЛОГІЮ СПЛАВУ**

Для зменшень енергосилових затрат при литві алюмінієвих сплавів сучасний промисловий світ використовує ряд технологій (тиксо- і реолитво). В основі таких технологічних процесів є використання сплавів з присутністю частки твердої фази глобулярної форми. Однак, існує і обмеження по використуванню технології тиксолитва – це обов'язкова наявність заготовок з попередньо заданою недендритною структурою.

Дана робота була спрямована на перевірку гіпотези про те, що недендритна структура являється наслідком фрагментації дендритів [1]. Був проведений дослід з фізичного моделювання на прозорих модельних речовинах (камфен), при якому досліджувався вплив теплового потоку. Використовувався плоский модельний препарат товщиною 50 мкм. В експерименті модельний препарат нагрівався з однієї сторони при постійній температурі  $T_{\text{cons}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , а з іншої була температура навколишнього середовища  $T_{\text{н.с.}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ , таким чином був створений тепловий потік відповідної величини. Під дією теплового потоку дендритна структура почала фрагментуватися, приймаючи глобулярну форму (Рис.1 а, б).

З отриманих результатів можливо зробити висновок, що існують певні умови, за яких первинна дендритна структура в принципі може фрагментуватися з отриманням компактної глобулярної структури. Таким чином, виникає можливість уникнути складної і кошовної традиційної технології виготовлення тиксозаготовок шляхом безперервного литва з електромагнітним перемішуванням.



а – закристалізований препарат (дендритна структура); б – глобулярна форма твердої частки в кінці плавлення.

Рис.1 - Вплив теплового потоку

Перелік літератури:

1. Flemings M. C., Yurko J. A., Martines R. A. "Semi-solid forming – our understanding today and its implication for improved processes". Symposium in Honor of Wilfred Kurtz, Charlotte, NC, USA, March 14-18, 2004, p.p. 3-14

УДК 621.375.826

*А. П. Шатрава, В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Л. А. Бондарь**Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ***НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНЫХ МАШИН**

В условиях промышленной эксплуатации рабочих органов дробильно-размольных машин типов СМД и ММТ при использовании биметаллических молотков, наряду с изнашиванием их ударной части, происходит интенсивное разрушение несущих боковых и истирание присоединительных поверхностей конструкции данных изделий. Поэтому защита от изнашивания всех рабочих поверхностей этих деталей позволяет значительно повысить срок их эксплуатации.

Для повышения ресурса эксплуатации таких деталей, при изнашивании конкретных рабочих поверхностных участков, целесообразно использовать лазерное поверхностное упрочнение, высокая производительность которого, возможность регулирования тепловых процессов, универсальность, позволяет получать поверхностные структуры с широким спектром служебных свойств.

Информация о тепловом состоянии материала в процессе обработки является исходной для анализа геометрии зоны термического влияния (ЗТВ), характера и степени фазовых превращений, конечной структуры материала, напряженно-деформированного состояния, свойств упрочненной поверхности. Экспериментальные методы измерения температуры нагрева материала при лазерном воздействии (термопары, пирометры) не нашли широкого применения из-за своей неспособности быстро реагировать на быстротечные процессы лазерного нагрева и охлаждения. Поэтому наиболее продуктивными и информативными методами анализа теплового состояния поверхности обрабатываемого материала являются методы теоретического (расчетного) анализа.

Тепловая задача сформулирована и решена для нагрева твердых тел объемным источником тепла при постоянном распределении интенсивности

излучения в пятне нагрева.

Исходя из технологических особенностей данного технологического процесса, в работе принимались следующие значения основных параметров: мощность излучения ( $P$ ) – 500...900 Вт; диаметр пятна фокусирования ( $d_{\text{п}}$ ) – 0,3...0,6 см; поглощательная способность ( $A$ ) – 0,5; скорость движения луча ( $V$ ) – 1...1,2, см/с; материалы – стали марок: 25л, 30л, 45л, 35ХГСЛ, 35ХМЛ, 25ГСЛ, 30ХГТ, 30Х2МЛ, 35ХНЛ. Основными параметрами зоны термического воздействия служили ширина ( $b$ ) и глубина  $z$ . При этом, одной из основных задач при проведении вычислительных экспериментов являлось установление качественных связей и количественной зависимости между параметрами зоны термического воздействия  $b$ ,  $z$  и характеристиками лазерного излучения  $W_p$  ( $P/Sd_{\text{п}}$ ),  $d_{\text{п}}$ ,  $V$ .

Исходя из полученных данных заметно увеличение температуры с увеличением мощности лазерного излучения и времени обработки. При этом гораздо большее влияние на температуру образцов имеет плотность мощности лазерного излучения, которая напрямую зависит от диаметра пятна фокусировки лазерного луча  $d$ . Из полученного массива данных, выбрав необходимое значение диаметра пятна фокусировки, можно провести дальнейшую оптимизацию режимов обработки в зависимости от технологических особенностей обрабатываемых деталей. Упрочнение структуры данного материала происходит при достижении температур от  $T_{\text{зак}}$  до  $T_{\text{пл}}$ . В данном случае (для углеродистых и низколегированных сталей) следует выбирать температуру поверхности, находящейся в пределах или несколько превышает 1450 °С.

Таким образом, выбирая диаметр пятна фокусировки  $d = 4$  мм, а скорость передвижения лазерного излучения относительно образца  $V = 11$  мм/с, мы «попадаем» в область температур 826...1706 °С, которые являются оптимальными с точки зрения поставленной задачи.

УДК 621.742.4

*А. И. Шейко, В. А. Клименко*  
*Национальный технический университет Украины*  
*«Киевский политехнический институт», Киев*

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА НАПОЛНИТЕЛЯ ФОРМОВОЧНЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ СМЕСЕЙ**

На технологические свойства формовочных и стержневых смесей влияют такие характеристики, как число контактов зерен наполнителя в единице объёма, геометрический размер связей между ними и их прочность. Большинство расчётов и формул, описывающих процессы уплотнения, формирование прочности смесей и др., основаны на представлении формовочной смеси состоящей из зерен наполнителя в виде системы идеальных шаров, связанных мостиками связующего. Хотя подобная «шаровая» модель смеси имеет ряд недостатков связанных с неправильной формой зёрен наполнителя, трудностью учёта их размеров, сложностью экспериментального моделирования реальных условий, она до сих пор является одной из основных при исследованиях механизма формирования прочности формовочных и стержневых смесей.

На основании исследований, проведённых с использованием ЛПт регулярных планов, были построены статистические модели формирования прочности, осыпаемости, газопроницаемости и плотности формовочных и стержневых смесей, что позволило учесть перечисленные недостатки «шаровой» модели смеси.

Анализ проведенной многокритериальной оптимизации и оценка полученных результатов позволили установить, что, зёрна наполнителя, несмотря на их неправильную форму, располагаются в объёме уплотнённой смеси в виде пяти правильных тел Платона (тетраэдр, куб, октаэдр, икосаэдр и додекаэдр). Варьируя соотношением размерных фракций наполнителя смеси, и тем самым изменяя количество таких геометрических построений зёрен наполнителя в объёме смеси, можно управлять технологическими свойствами формовочных и стержневых смесей в широких пределах.

На основании проведенных исследований были получены математические модели, позволяющие в столь сложных системах определять оптимальные составы формовочных и стержневых смесей в зависимости от зернового состава наполнителя и требуемых технологических свойств. Корреляция расчётных данных с практическими результатами значительно превосходила традиционные методы.

Проведенные лабораторные исследования позволили определить оптимальные составы пластичных формовочных и стержневых смесей с кварцевым песком фракций 01, 016, 02, 0315 и 04 в качестве наполнителя и

бентонитом Дашуковского месторождения и показали хорошую воспроизводимость результатов исследований.

УДК 621.74.045

*О. И. Шинский, В. С. Дорошенко*

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

### **СУХИЕ ПЕСЧАНЫЕ СМЕСИ, ТВЕРДЕЮЩИЕ ПРИ ПРОПИТКЕ РАСПЛАВОМ МОДЕЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК ПО ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ**

ФТИМС НАН Украины патентует три разновидности способа изготовления по разовым ледяным моделям песчаных оболочковых форм из сыпучего формовочного материала путем получения самотвердеющих композиций в составе «связующее + отвердитель». 1-й вариант: ледяная модель служит носителем связующего, а сухая песчаная облицовочная смесь содержит отвердитель. Во 2-м - ледяная модель служит носителем отвердителя, а облицовочный слой песка — связующего. Наиболее экологически благоприятный 3-й вариант: модель замораживается из чистой воды, которая не вступает в реакции отверждения формовочной смеси с добавками реагентов отвердителя и связующего, но без воды эти реакции не идут. Во всех трех способах подбирали составы связующих композиций с максимальной скоростью твердения, зачастую выискивая в технической литературе отвергнутые составы холоднотвердеющих песчаных смесей (ХТС) по причине их малой «живучести».

При изготовлении оболочковой формы путем засыпки песка в контейнер с ледяной моделью, виброуплотнения, таяния модели и пропитки песка получали песчаную корку толщиной 4...8 мм и более. При этом в составе оболочки находится не более 0,3...0,4% связующего от массы песка в контейнере, что на порядок меньше, чем в традиционных формах из ХТС. В исследованиях упор сделан на применение неорганических связующих.

Составы ледяных моделей, в которых один реагент связующего находится в модели, а другой - в окружающей ее песчаной смеси, показали достаточно хорошую технологичность получения оболочковых форм путем пропитки водным составом от тающей модели. Например, для ледяных моделей из водного раствора жидкого стекла плотностью 1,08 г/см<sup>3</sup> использовали песчаную смесь с добавлением быстротвердеющего цемента, продолжительность твердения получаемой оболочки от начала таяния модели (модельного

блока) массой 0,2...0,5 кг составляла 6...10 минут. После расплавления остаток модельной композиции, не пропитавший окружающий песок, выливали из затвердевшей оболочки, а оболочковую форму направляли на подсушку, или обрабатывали заливку металлом в сухом наполнителе с вакуумированием формы.

Созданием и отработкой способов получения оболочковых форм с противопригарной и мелкозернистой облицовкой (покрытием) вокруг разовой ледяной модели формируется новая крио- (крио-вакуумная) технология литья мелких и средних металлозаготовок. Она исключает или сводит к минимуму использование органических полимеров: связующего для песка оболочковой литейной формы, заменяет пенопластовые или парафино-стеариновые модели на ледяные. Такая криотехнология литья по разовым моделям соответствует экологически чистым безотходным технологиям с использованием принципа "просто добавь воды".

В описанной технологии отсутствуют дорогостоящие материалы и оборудование, что позволяет ее рекомендовать (еще на стадии отработки до промышленного уровня) в качестве приемлемой методической тематики для выполнения НИР, курсовых и дипломных работ для студентов в учебных институтах. Замораживают модели при температурах не ниже минус 15...18 град. С (для ускорения последующего таяния их в форме), для чего достаточно бытовой морозильной камеры. Наблюдение образования кристаллов в прозрачной модели, формовка в сухом песке, удаление модели, извлечение из сухого наполнителя и сушка оболочки охватывают (включая процессы кристаллизации) почти все процессы модельно-формовочной тематики с рядом фазовых переходов, физико-химической компоновкой связующих композиций, процессов тепло-массопереноса и поверхностных явлений. А ознакомление с инновационными крио- вакуумными технологиями, оценка их экологичности, энерго- и ресурсосберегаемости даст преимущества молодым специалистам для о применения их на производстве.

УДК 621.785:681.785.369:681.785.789

*И. В. Шляпин, Г. Ш. Кирия, Л. Х. Иванова**Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАТВЕРДЕВАЮЩИЙ ЧУГУН

В настоящее время продолжается развитие исследований в области создания технологии на основе взаимодействия информации в различных процессах. Авторами [1] отмечается, что энергоинформационные технологии приведут к созданию материалов с уровнем свойств, приближенных к их теоретическим пределам. Наиболее чувствительными к энергоинформационному воздействию являются метастабильные системы [2]. К таким системам можно отнести и чугун.

Целью исследования было экспериментально оценить влияние энергоинформационного воздействия (ЭИВ) на затвердевающий чугун.

Объектом исследования были чугунные образцы диаметром 32 мм и высотой 10 мм, вырезанные из средней части двух литых заготовок диаметром 35 мм и высотой 100 мм. Отливки получали в одной песчаной форме из одного металла. При этом металл одной отливки с момента начала заполнения формы и до извлечения из формы подвергался энергоинформационному воздействию (ЭИВ) с помощью формоактивного генератора.

Такая методика получения образцов позволила обеспечить чистоту эксперимента, исключив неконтролируемое влияние на исследуемый металл таких технологических параметров литья, как химический состав, перегрев металла перед заливкой, скорость и время заливки, скорость охлаждения в форме и температура отливок при извлечении из формы.

Отливки получали из электропечного чугуна следующего усредненного состава, % по массе: 2,47 углерода; 1,94 кремния; 0,16 марганца; 0,15 серы; 0,07 фосфора; 0,21 хрома; 0,015 никеля; 0,031 молибдена; 0,023 титана; 0,02 вольфрама; тысячные доли сурьмы, свинца и ванадия.

Химический состав чугуна в центральной и приповерхностной зонах отливок определяли методом спектрального анализа на приборе «Лесо». В этих же зонах измеряли твердость по Шору и микротвердость отдельных структурных составляющих чугуна (перлита и цементита). Микротвердость цементита и перлита измеряли на приборе ПМТ-3 (№ 59586) при нагрузке 0,49Н и увеличении  $\times 485$ . Величину микротвердости определяли по результатам 51 замера, точность замера диагонали отпечатка индентора  $\pm 0,07$  мкм.

Микроструктуру чугуна опытных плавок исследовали с помощью оптического микроскопа МИМ-8 при увеличениях 100 и 200. Микроструктуру чугуна образцов оценивали по ГОСТ 3443-87. Для более точной оценки

структуры количество структурных составляющих определяли точечным методом Глаголева А.А. [3]: окуляр Гюйгенса 7х с квадратной сеткой (289 узловых точек), 25 полей зрения при увеличении 420х. Абсолютная погрешность составила  $\pm 1$  при доверительной вероятности  $P=0,5$ .

В исходном состоянии чугун был половинчатым, структура которого характеризовалась баллами: содержание графита – ПГф2-ПГд45-ПГр6-ПГ6, содержание цементита – Ц4-Цп6000, металлическая основа – Пт1-П(Ф0)-ПД0,5.

Показатели	Отливки	
	не подвергались ЭИВ	подвергались ЭИВ
1. Анализ структурных составляющих чугуна		
Форма графита	ПГф2, Пластинчатая завихренная	ПГф2, Пластинчатая завихренная
Размер графитовых включений Распределение графита Количество графита, % Количество перлита, % Дисперсность перлита, мкм Количество цементита, %	ПГд45 ПГр6, Сетчатое 8,63 84,77 0,58 6,60	ПГд45 ПГр6, Сетчатое 16,74 74,52 0,58 8,74
2. Свойства чугуна		
Твердость по Шору, HSD Микротвердость, МПа: - перлита - цементита	39 4120 7690	40 4110 5500

В результате проведенных исследований установлено, что на форму графитных включений ЭИВ влияния не оказывало (табл.). Размер включений графита и их распределение также оставались неизменными после ЭИВ. Однако количество графитной составляющей в структуре чугуна увеличивалось в 1,94 раза – от 8,63 до 16,74%.

Количество цементитной составляющей структуры чугуна также увеличилось, но только в 1,32 раза – с 6,60 до 8,74%. Микротвердость цементита снижалась на 28,5% после ЭИВ.

Количество же перлита в структуре чугуна уменьшалось в 1,1 раза – с 84,77 до 74,52%, дисперсность перлита и его микротвердость – практически не изменялись. Исследование твердости чугунов до и после ЭИВ не показало существенных изменений.

Таким образом, установлено существенное влияние ЭИВ на количествен-

ные показатели структуры исследуемого чугуна и микротвердость цементита, а на такие показатели, как размер, форма и распределение графитных включений ЭИВ влияния не оказывало. При этом твердость чугуна после ЭИВ также не изменялась.

Выводы:

Энергоинформационное воздействие привело к значительному (в 1,94 раза) увеличению количества графита в структуре чугуна, количество перлита уменьшилось в 1,1 раза, а цементита увеличилось в 1,4 раза. При этом микротвердость цементита уменьшилась на 28,5%. На форму и размер графитных включений, дисперсность перлита, твердость по Шору и микротвердость перлита ЭИВ практически не повлияло.

Список литературы

1. Долженков И.Е., Клименко Л.П., Карнаух А.И., Андрианова И.И. К вопросу об энергоинформационных технологиях // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 1. – С. 42–47.
2. Вейник А.И. Термодинамика реальных процессов. – Минск: Наука и техника, 1991. – 576 с.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография: Стереология металлических материалов. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.

УДК 621.745:669.719

*В. А. Щерецкий, А. С. Затуловский*

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

### **РАЗВИТИЕ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Эффективным способом повышения антифрикционных, механических и специальных свойств материалов, является их армирование высокомолекулярными тугоплавкими частицами и короткими волокнами. В силу тенденции удорожания цветных промышленных сплавов, исследование методов получения КМ и изучение их свойств, является одним из наиболее динамично развивающихся направлений технической науки в мире. Основными проблемами производства алюмоматричных композиционных материалов (КМ) являются: неравномерное распределение компонентов наполнителя и их плохая адгезионная связь с матрицей. При этом с увеличением количества дискретных армирующих частиц и уменьшением их

фракционных размеров, решение задачи получения качественных КМ отливок существенно усложняется. На современном уровне науки и техники наиболее эффективно в области производства КМ себя зарекомендовали методы порошковой металлургии (ПМ). Традиционно материалы, изготавливаемые порошковыми методами, имеют малые припуски, но для приобретения «полной» плотности и комплекса желаемых свойств такого материала требуются применения специальных технологий ПМ (с применением сверхвысоких нагрузок, вакуумных систем прессования и т.д.) использовать которые в промышленности затруднительно, или же экономически не целесообразно. Литейные подходы получения МКМ с дискретными частицами, по способу формирования армирующей составляющей в матрице делят на две большие группы экзогенные и эндогенные. В каждой из этих групп существует множество методик ввода в металлическую матрицу армирующей составляющей или реагентов, но практически все эти литейные подходы не позволяют получать КМ с высоким содержанием армирующей составляющей и с равномерным распределением мелкой фракции наполнителя. В отделе композиционных материалов была разработана и запатентована [1] литейная технология получения ЛКМ методом вакуумно-компрессионной пропитки (ВКПП) порошковой формы-изложницы (преформы), объединяющей литейный и порошковый подходы консолидации расплава матрицы и твердых частиц наполнителя. Основная идея предложенного метода заключается в пропитке преформы, которая содержит порошковую металлическую составляющую, металлическим расплавом-инфильтратом. В процессе пропитки могут быть реализованы два механизма кристаллизации расплава-инфильтрата: диффузионный и температурный. В зависимости от исходных материалов и поставленных целей, пропитка может быть осуществлена в равновесном, неравновесном и квазиравновесном режимах.

Метод ВКПП позволяет использовать все преимущества подходов ПМ при этом в комбинации с относительно более дешевыми литейными технологиями. Это позволяет получать материалы с «полной» плотностью при меньших производственных затратах, а также производить алюмоматричные КМ, равномерно упрочненные композиционным наполнителем, в широких пределах концентрации (до 70 %) дискретными частицами различных фракций, в том числе ультрадисперсными (до 3 % мас.).

Список литературы

1. Патент №36091 Украина МПК6 B22F 3/00, C22C 1/00 «Спосіб одержання композиційних матеріалів з різним фракційним та хімічним складом компонентів наповнювача»/ В.А. Щерецкий, С.С. Затуловский, опуб. 10.10.2008 г.

УДК621.74:669.711.715

*В. П. Гаврилюк, В. Н. Бондаревский, К. В. Гаврилюк, С. В. Хлистул,  
Д. Д. Панасенко*

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

### ВЛИЯНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛИГАТУРЫ $\text{Cu-7\%P}$ НА ДИСПЕРСНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ ПЕРВИЧНОГО КРЕМНИЯ В ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОМ СИЛУМИНЕ

Заэвтектические силумины применяются и являются перспективным материалом для автодвигателестроения. Одно из основных условий обеспечивающих физико-механические и эксплуатационные характеристики заэвтектических силуминов есть достаточная степень дисперсности кристаллов первичного кремния (КПК) (верхняя граница 20-30 мкм).

Получение комерческих сплавов данного класса непременно связано с использованием алюминий-кремнистых лигатур, являющихся по существу глубоко заэвтектическими алюминиевыми сплавами-носителями грубых КПК (1500-4000 мкм), наследственно создающие трудности получения требуемой степени дисперсности их в конечном сплаве.

Выполнены исследования по определению влияния модифицирующей обработки медь-фосфористой лигатурой на дисперсность КПК в алюминий-кремнистом сплаве с соотношением  $\text{Al:Si}=1:1$ . Медь-фосфористую лигатуру использовали в двух состояниях:

- сандартном, в виде плитки („шоколадка”);
- микрокристаллическом („чипсы” толщиной до 200 мкм).

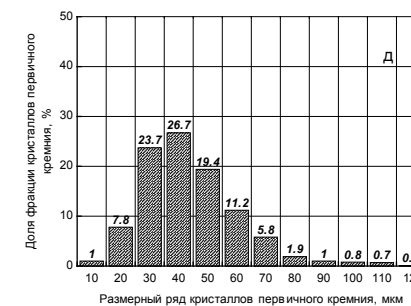
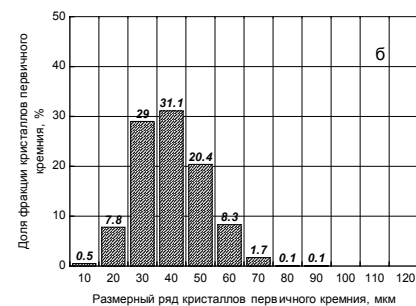
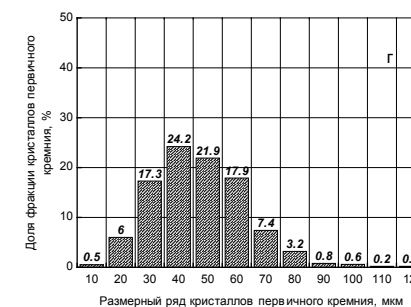
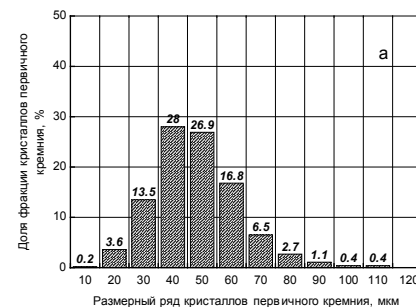
Температура модифицирования расплава  $1000^\circ\text{C}$ . Образцы для исследования изготавливали из ступенчатой пробы, заливаемой в кокиль. Количество вводимой лигатуры 3% от массы металла.

Таблица. Описательная статистика дисперсности кристаллов первичного кремния

Состояние модифицирующего сплава	Толщина образца, мм	К-во измеренных включений, шт	Размеры кристаллов первичного кремния, мкм			
			Среднее	Минимальное	Максимальное	Средн. квадр. отклонение
без обработки	20	230	348.47	15.55	1782.11	269.22
	12	314	311.91	11,00	2049.95	270.98
	6	661	170.21	11.59	1064.97	106.24

стандартное	20	1234	52.94	5.00	111.50	15.94
	12	1465	43.11	1.21	114.21	16.78
	6	1079	39.23	7.22	203.93	22.15
микрокристаллическое	20	851	42.17	1.89	102.13	14.43
	12	965	35.07	8.01	93.54	12.21
	6	1168	22.27	0.94	51.92	7.78

Из приведенных в таблице и на рисунке 1 данных видна эффективность влияния как структурного состояния медь-фосфористой лигатуры так и скорости кристаллизации на степень дисперсности КПК. Анализ показывает, что в случае использования микрокристаллической медь-фосфористой лигатуры для модифицирования заявленного глубоко заэвтектического алюминий-кремнистого сплава, возможно получение степени дисперсности КПК до 30 мкм при их доле более 85%. Применение таких сплавов в технологии получения коммерческих заэвтектических силуминов позволит существенно повысить характеристики последних, даёт перспективу конструирования новых сплавов.



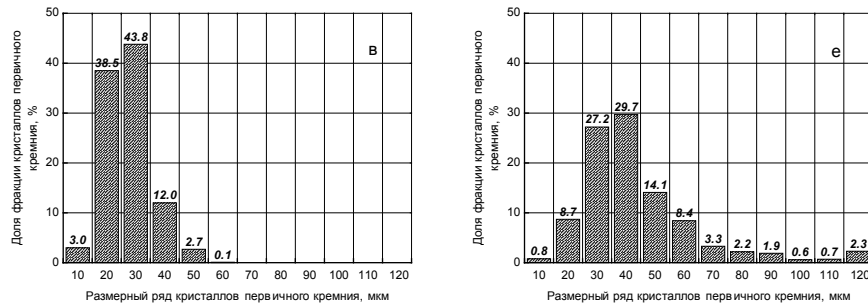


Рис.1. Доля фракций кристаллов первичного кремния в сплаве 50%Al-50%Si в зависимости от состояния модифицирующей лигатуры Cu-P и скорости кристаллизации.

а, б, в – обработка микрокристаллической Cu-P лигатурой;

г, д, е - обработка стандартной Cu-P лигатурой;

а, г - толщина стенки заливаемого образца 20 мм;

б, д - толщина стенки заливаемого образца 12 мм;

в, е - - толщина стенки заливаемого образца 6 мм;

УДК 621.745.5:669.715

*В.П. Гаврилюк, В.А. Локтионов-Ремизовский, К.В. Гаврилюк*  
 Физико-технологический институт металлов и сплавов, Киев

### К ВОПРОСУ ОБ УРОВНЕ СВОЙСТВ СТАНДАРТНЫХ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Применение литейных алюминиевых сплавов для изготовления деталей узлов и конструкций самолетов, железнодорожного и автомобильного транспорта получило широкое распространение в мировой практике. В частности, за 50 лет масса алюминиевых сплавов на один автомобиль увеличилось с 20 до 160 кг. Уровень литейных технологий позволяет изготавливать из алюминиевых сплавов весьма сложные фасонные отливки, к которым относятся отливки блока цилиндров двигателей внутреннего сгорания (ДВС) современных автомобилей. Был проведен сопоставительный анализ уровней свойств стандартных литейных сплавов с уровнями разброса свойств сплава в отливке. При анализе использовали литейные сплавы, применяемые для изготовления отливок ДВС, и регламентированные стандартами развитых стран. Установлено, что разброс свойств сплавов в отливках равен и может

превышать разность уровней свойств разных стандартных сплавов.

Согласно диаграмме «состав – литейное свойство» сплавов наилучшие уровень и сочетание литейных свойств сплавов находятся в области эвтектических составов. На диаграмме «состав – механические свойства» сплавов наблюдается два максимума: первый соответствует пределу насыщения твердого раствора, а второй в области «металл – упрочняющая фаза» эвтектических составов.

Системы Al – Si – Cu и Al – Si – Mg являются базовыми для построения стандартных литейных сплавов, используемых для отливок блока цилиндров ДВС. Комплекс дополнительного легирования в исследованных стандартных сплавах включает Mn, Cr, Ni и Ti+ Zr.

Построены диаграммы «состав – структура – свойство (прочность и предел текучести и удлинение при растяжении, модуль упругости)» сплавов выбранных базовых систем с указанным комплексом дополнительного легирования. Диаграммы представлены в виде топографической проекции поверхности свойств на концентрационные треугольники и проекцию поверхности ликвидус выбранных диаграмм базовых систем. Установлено наличие концентрационных областей на диаграммах, которым соответствуют максимумы либо минимумы свойств сплавов выбранных базовых систем.

Установлены пределы концентраций основных легирующих элементов алюминия и магния сплавов базовой системы Al – Si – Mg при которых значение модуля упругости сплавов достигает 120000 МПа. На диаграммах «состав – структура – свойство» базовой системы Al – Si – Cu имеется область концентраций основных легирующих элементов кремния и меди в которой модуль упругости сплавов достигает значения 90000 МПа.

Процесс распада пересыщенного твердого раствора сплавов базовой системы Al – Si – Mg при отжиге более чувствителен ко времени выдержки, чем к температуре. Линия максимума на поверхности твердости сплава ориентирована практически вдоль оси температуры.

Распад пересыщенного твердого раствора сплавов базовой системы Al – Si – Cu инициируется более температурой, чем временем выдержки. Линия максимума на поверхности твердости сплава, ориентирована практически вдоль оси времени.

Оптимизацию (конструирование) составов сплавов целесообразно проводить путем сопоставления требований к сплаву с диаграммами «состав – структура – свойство» сплавов. Выбор и назначение режимов термической обработки отливки и детали из конкретного сплава следует проводить на основе диаграмм «температура – время – свойство».

Использование банка данных по диаграммам «состав – структура – свойство» и «температура – время – свойство» сплавов позволяет применить современные технологии расчета и оптимизации состава сплава при кон-

струировании новых сплавов с учетом условий изготовления и эксплуатации детали, что, в свою очередь, существенно снижает трудоемкость разработки.

УДК 621.74:669.714

*В.В. Ласковець, В.П. Гаврилюк, К.В. Гаврилюк, К.Ю. Гзовський*  
 Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

### **ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Cu-Ti-Zr НА ПРОЦЕС КРИСТАЛІЗАЦІЇ, СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ**

Підвищення рівня технологічних та експлуатаційних властивостей висококомірних ливарних алюмінієвих сплавів дає можливість розширити області їх використання та замінити сталі в багатьох конструкціях та машинах і, як наслідок, вплинути на коефіцієнт їх корисної дії, знизити енерговитрати та підвищити конкурентоздатність виробів вітчизняного машинобудування на зовнішньому ринку.

Однак ливарні висококомірні сплави мають ряд недоліків, серед яких можна виділити нестабільність структури при литві, схильність до утворення гарячих тріщин, нестабільність механічних властивостей. Вирішення цих проблем можливо за рахунок отримання дрібнозеренної структури при литві.

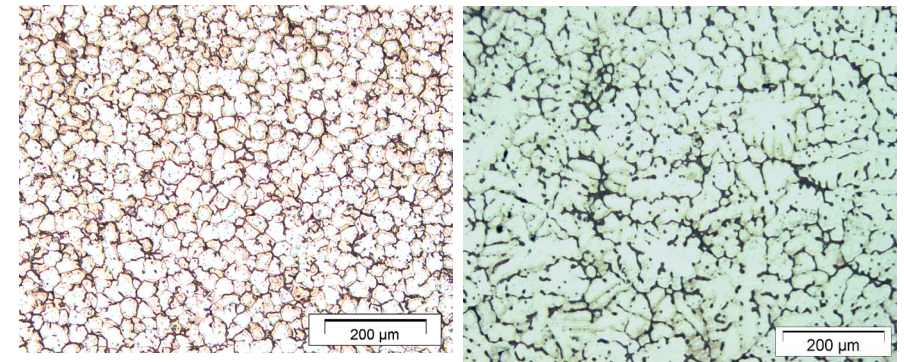
Однією з актуальних проблем металознавства є встановлення механізмів формування дрібнозеренної структури. Особливо актуальною ця проблема є для високолегованих сплавів, що пов'язано з необхідністю врахування взаємодії компонентів в рідкому стані.

Сумісне легування сплавів системи Al-Cu-Mn титаном та цирконієм є ефективним засобом здрібнення зерна, зниження схильності сплавів щодо утворення гарячих тріщин та підвищення рівня механічних властивостей.

Встановлено, що оптимальним співвідношенням титану та цирконію Ti/Zr для здрібнення зерна при високих швидкостях кристалізації та зниження схильності сплавів до утворення гарячих тріщин в атомних долях відсотка є таке, що відповідає складу кластеру Ti<sub>8</sub>Zr<sub>5</sub>. Сплави, складу яких відповідають даному співвідношенню титану та цирконію, характеризуються: високою схильністю до переохолодження, „спадковою” (що зберігається при переплавах та перегрівах розплаву) схильністю до утворення дрібнозернистої структури (до 30 μm) (рис. 1), мінімальною різницею в розмірі зерна при різних швидкостях кристалізації, мінімальною схильністю до утворення гарячих тріщин як при литві в металеві форми так і при литві у пісчано-глиняні форми, мінімальним розміром метастабільної інтерметалічної фази AlxTi(Zr) компактної форми (при її утворенні), високою схильністю до

утворення перенасичених твердих розчинів, максимальним рівнем межі пропорційності та твердості після термічної обробки (закалки та старіння) при випробуваннях як при кімнатній так і при підвищених температурах.

Наслідком утворення кластерів із високою щільністю упакування стає зміна механізму кристалізації та зерноздрібнення, а саме: перехід від механізму „кристалізація на частках нерозчинних домішок” до механізму „кристалізація в переохоложеному розплаві” та „кристалізація на частках метастабільної первинної фази”, утворення дрібнокристалічних структур та перенасичених твердих розчинів, підвищення технологічних та механічних властивостей.



*a* *б*  
 Рис. 1. Мікроструктури сплавів системи Al-Cu-Mn-Ti-Zr:  
*a* – оброблений 1% лігатурою AlTi<sub>3</sub>Cu<sub>0,15</sub>; *б* – оптимізований сплав.

УДК 621.763: 621.74.047

*Е.С. Титова, Н.И. Тарасевич\*, Т.М. Титова, И.Н. Тарасевич\**

*\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев  
Днепродзержинский государственный технический университет,  
Днепродзержинск*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ МАЛОМЕРНЫХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СТАЛЕМЕДНЫХ ЗАГОТОВОК**

Представлены результаты работы, касающиеся проблемы получения высококачественных биметаллических заготовок – важнейшего класса композитных материалов, сочетающих комплекс физико-механических свойств принципиально отличающийся или превосходящий свойства их составляющих компонентов. По мнению авторов, актуальность указанной проблемы обусловлена неуклонно растущим рынком биметаллической металлопродукции и ужесточением требований к ее качеству. Одним из возможных вариантов решения задачи увеличения объема производства слоистых биметаллов является создание технологий широкомасштабного производства такой продукции, например, с использованием непрерывного и полунепрерывного литья заготовок.

Цель работы состояла в оптимизации параметров технологии получения маломерных сталемедных полунепрерывнолитых заготовок. Объектом исследования являлся процесс твердожидкого взаимодействия фаз, осуществляемый в цилиндрической графитовой форме, расположенной в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

Реализация поставленной цели достигнута посредством привлечения метода математического моделирования, что позволило избежать энергетических, материальных, финансовых расходов, имеющих место при проведении натурных экспериментов. При этом задача математического моделирования состояла в определении скорости затвердевания, интенсивности теплоотвода, характера теплообмена между различными составляющими системы. В качестве математической модели процессов теплообмена решена двухмерная задача нестационарной теплопроводности в осесимметричной постановке.

Рассмотрены теплофизические процессы, сопровождающие затвердевание биметаллической заготовки в кристаллизаторе. В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что ход затвердевания биметалла на начальном этапе времени определяется воздействием двух противонаправленных тепловых потоков: к стальной проволоке и графито-

вой формообразующей вставке, которые обусловлены разностью температур между последними и медным расплавом. По мере прогрева стальной проволоки и перемещения формирующейся сталемедной заготовки ход затвердевание ее в значительной мере определяется объемом, занимаемым стальной проволокой. При этом возможны варианты, когда стальная проволока является макрохолодильником и тогда фронт кристаллизации продвигается в двух направлениях или когда проволока превращается в аккумулятор тепла и наращивание слоя меди осуществляется только в одном направлении – противоположном направлению теплоотвода к поверхности кристаллизатора.

Обнаружено, что во всех случаях скорость затвердевания медного расплава достигает максимального значения непосредственно в момент контакта его со стальной проволокой и с поверхностью графитовой формы. При этом первоначально, независимо от размера, стальная проволока является макрохолодильником, а ее последующее возможное превращение в место теплостока определяется соотношением слоев стали и меди в биметаллической заготовке. Рассмотрены особенности теплообмена между различными составляющими системы. Выполнен расчет температурно-скоростных параметров затвердевания в зависимости от соотношения слоев биметалла (25-75% стали). На основании обработки результатов вычислительного эксперимента, получено уравнение, представляющее аналитическую зависимость времени затвердевания медного расплава от толщины затвердевающего слоя при различной высоте жидкой металлической ванны (5 см, 10 см, и 12 см). Обнаружено хорошее совпадение результатов, полученных в результате вычислительного эксперимента и рассчитанных по уравнению регрессии.

**Материалы Промышленного Инвестиционного Форума**

Выпуск подготовлен к печати Запорожской торгово-промышленной палатой, 2011

Тираж 150 экз.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

# Партнеры форума



Размещает: отель «Соборный»

