

**И.В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Д.С. МОРОЗОВ**,  
**П.Е. ЛУЩИК**,  
**А.В. АРАБЕЙ** (БНТУ)

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ, ВЫДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ**

Основной задачей металлургических производств машиностроительных предприятий является создание конкурентоспособных изделий, обладающих высоким качеством и минимальной себестоимостью изготовления. Решение этой задачи обеспечивается в значительной степени уже на стадии проектирования технологического процесса производства изделий. Международный опыт использования методов и средств компьютерного моделирования (например, программного комплекса ProCAST и др.) свидетельствует о том, что при использовании специализированных программ моделирования литейных и металлургических процессов обеспечивается существенная экономия материальных ресурсов.

В настоящее время в Республике Беларусь на литейных предприятиях машиностроительного комплекса практически отсутствует научно-техническая база для обеспечения проектных работ с использованием современных информационных технологий, связанных с компьютерным моделированием литейных процессов. В отдельных случаях эти задачи частично решаются инжиниринговыми центрами или предприятиями (в Республике Беларусь – ЗАО «БелВирТел»). Также существуют определенные научно-технические и организационно-кадровые проблемы, связанные с использованием специализированных программных средств для моделирования и оптимизации технологических процессов в условиях литейного производства.

Современные информационные технологии, объединяя возможности оперативного обмена и свободного доступа к информации

пользователей с использованием сети Интернет, обеспечивают коммуникационную основу для развертывания информационных клиент-серверных приложений и использованием реляционных баз данных. Разработка таких приложений является в настоящее время широко распространенной задачей, решаемой как государственными предприятиями и органами управления, так и коммерческими организациями.

Анализ состояния и перспектив разработки современных программных средств для управления информационными потоками в литейном и металлургическом производстве свидетельствует о возможности реализации информационно-аналитической системы, обеспечивающей оперативную обработку технологической информации и ориентированной на принятие оптимальных управленческих решений.

Целью работы являлась разработка системы адаптивного контроля и принятия решений в литейном производстве с использованием методов термического и акустического анализов, обеспечивающих мониторинг состояния технологического процесса приготовления литейного сплава и получения из него литых изделий.

В ходе работы разработан экспериментальный образец адаптивной информационной системы контроля качества продукции литейного производства на базе нейро-нечеткой модели в составе взаимосвязанных компонентов прикладного программного обеспечения и банка данных экспериментальных свойств (параметров) образцов литейных сплавов и литых изделий (БДС). Разработан программный модуль принятия решений на основе данных, используемых для обучения параллельного процессора с программируемой наращиваемой архитектурой, реализующей нейро-нечеткую модель вычислений. Разработанные компоненты интегрированы в единый программный комплекс – тестовую адаптивную информационную систему для неразрушающего контроля, анализа данных и принятия решений в литейном производстве (рисунок 1).

Разработанные программные средства реализуют алгоритм расчета входных параметров модели для контроля свойств литейных сплавов с использованием данных термического анализа, обеспечивающий возможность определения значений объемной доли выделяющейся в процессе затвердевания твердой фазы в зависимости от времени и температуры на основе оценки функции скорости выде-

ления теплоты кристаллизации сплава [1]. Разработанный алгоритм позволяет реализовать автоматический расчет параметров двухфазной зоны в интервале кристаллизации сплава с использованием данных термического анализа.



Рисунок 1 – Форма запуска программного комплекса ТАИС НКВДПР

Для информационного обеспечения разработанной системы были сформированы массивы данных, включая: результаты термического анализа алюминиевых сплавов АК12, АК12М2MgH (11,10–11,79 % Si; 0,84–0,96 % Mg; 0,33–0,36 % Mn; 1,60–1,85 % Cu; 0,57–0,70 % Fe; 0,14–0,23 % Zn), АК9 (9,94–11,75 % Si; 0,25–0,32 % Mg; 0,20–0,31 % Mn; 0,33–0,84 % Cu; 0,47–0,70 % Fe; 0,08–0,17 % Zn), АК9ч, АК5М4 (5,15–5,80 % Si; 0,39–0,50 % Mg; 0,28–0,60 % Mn; 3,13–3,76 % Cu; 0,50–0,61 % Fe; 0,64–1,06 % Zn), АД31, оловянистой бронзы БрО10Ф1 (9–11 % Sn; 0,5–1,0 % P), сплава на основе железа (3,77–4,02 % C, 1,7–2,0 % Si); данные акустического анализа литых образцов алюминиевых сплавов АК12М2MgH, АК9, АК9ч, АК5М4 и высокопрочного чугуна (3,21–3,53 % C; 2,31–2,9 % Si; 0,4–0,53 % Mn; 0,1–0,16 % Cu; 0,04–0,06 % Mg; 0,03 % P). Информационные массивы для экспериментального банка данных представлены на рисунке 2.

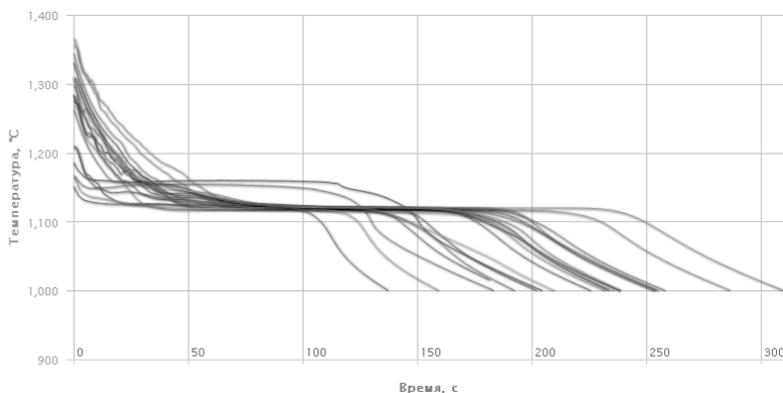
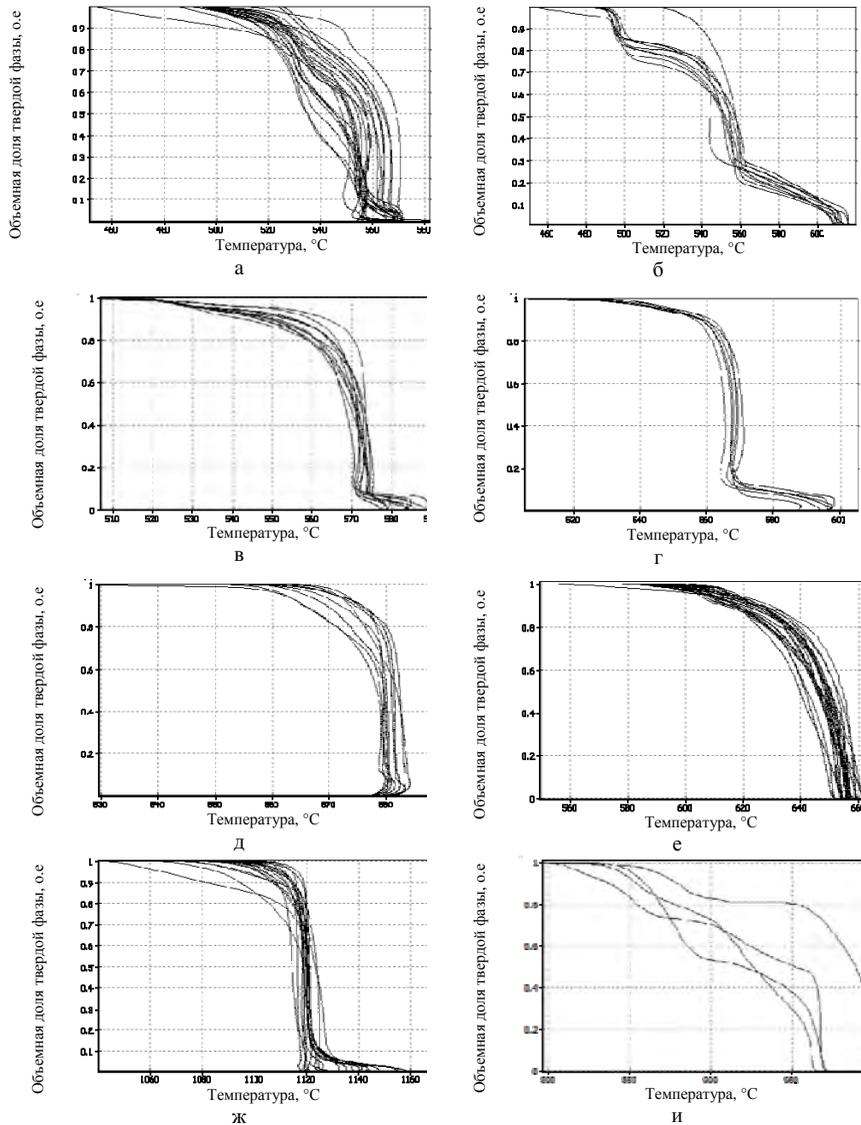


Рисунок 2 – Массивы кривых охлаждения высокоуглеродистого сплава на основе железа ( $3,77 \leq C \leq 4,02$ ), используемого при получении высокопрочного чугуна марки ВЧ40

Для сплавов на основе алюминия марок АК12, АК12М2МгН, АК9, АК9ч, АК5М4, АД31, оловянистой бронзы БрО10Ф1, высокоуглеродистого сплава на основе железа (3,77–4,02 % С, 1,7–2,0 % Si) установлены зависимости объемной доли твердой фазы, выделяющейся при затвердевании сплавов в интервале их кристаллизации, от температуры (рисунок 3).

Проведена проверка возможности использования разработанных программных средств для подготовки и экспорта данных в САЕ-системы имитационного моделирования литейных процессов на предприятии ЗАО «БелВирТел» (г. Минск) при моделировании технологических процессов литья сплавов на основе алюминия. Расчеты проводили с использованием информационных массивов данных термического анализа, полученных для сплавов АК9, АК9ч, АК5М4, АК12М2МгН.

Установлено, что использование данных, полученных с применением разработанного программного обеспечения, снижает трудозатраты на калибровку компьютерных моделей в системе ProCAST. При этом информативность указанных компьютерных моделей существенно повышается, так как в качестве критериев сравнительного анализа, кроме общей картины брака, используются еще и температурно-временные характеристики процесса.



а – АК12М2МgН; б – АК5М4; в – АК9; г – АК9ч; д – АК12; е – АД31;  
 ж – высокоуглеродистого сплава на основе железа ( $3,77 \leq C \leq 4,02$ ), используемого  
 при получении высокопрочного чугуна марки ВЧ40; и – оловянистых бронз марки БрО10Ф1

Рисунок 3 – Массивы зависимостей выделяющейся твердой фазы  
 от температуры для сплавов

Полученные результаты подтвердили возможность эффективно-го практического использования в условиях действующих литейных производств разработанных программных средств при компьютерном моделировании процессов литья с целью повышения качества отливок и устранения литейных дефектов.

### Литература

**1. Лущик, П.Е.** Расчет двухфазной зоны в интервале кристаллизации алюминиевых сплавов с использованием термического анализа / П.Е. Лущик, И.В. Рафальский // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 1 (64). – С. 79–83.

**2. Express testing** of cast iron by the computer cooling curve analysis (CA-CCA) / I. Shetyuk [et al.] // *Proceedings of International Doctoral Seminar*. – Trnava: AlumniPress, 2011. – P. 360–364.