

**И.В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Б.М. НЕМЕНЕНОК**, д-р техн. наук,  
**Д.С. МОРОЗОВ**,  
**П.Е. ЛУЩИК**,  
**А.В. АРАБЕЙ** (БНТУ)

## **АДАПТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ И ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ**

При производстве литых изделий большое значение имеет возможность постоянного и строгого контроля металлургических процессов выплавки и обработки сплавов в режиме реального времени, особенно на крупных производствах. На практике для этих целей активно применяют системы на основе метода термического анализа. В этих системах осуществляют отбор и анализ кривых охлаждения технологических проб, полученных путем заливки жидкого металла из плавильной печи. Благодаря применению современных прецизионных термодатчиков и микропроцессорных средств сбора и обработки данных, точность и возможности экспрессных систем контроля металлургических процессов выплавки сплавов значительно возросли. Это дает возможность предсказывать поведение сплава во время затвердевания, обеспечивать оперативными данными о химическом составе и предсказывать механические и физические свойства отливки, степень модифицирования сплава, риск образования макро- и микропористости в отливках, и, что особенно важно, производить корректировку расплава до его выпуска из печи. Использование альтернативных методов определения различных физических свойств, таких как измерение электросопротивления, ультразвуковая диагностика широкого распространения для контроля металлургических процессов выплавки и обработки сплавов не получили, в силу ограниченных возможностей указанных методов при их реализации на производстве.

Широкое применение систем экспрессного контроля металлургических процессов выплавки и обработки сплавов с использованием метода термического анализа, тем не менее, также сдерживается рядом причин. В первую очередь, из-за сложности обработки данных термического анализа при выплавке сложнолегированных сплавов, трудностей определения и интерпретации параметров, используемых для оценки подлежащих контролю свойств, а также необходимости постоянной корректировки математических моделей при изменении технологических условий металлургических процессов выплавки и обработки расплава. Следует особо отметить, что при переходе от одних производственных условий к другим требуется фактически заново производить настройку системы контроля, так как параметры кривых охлаждения находятся в очень сложной зависимости от химического состава и технологических режимов выплавки, модифицирующей и/или рафинирующей обработки расплава. Поэтому разработка принципов построения и математического обеспечения адаптивной системы контроля металлургических процессов выплавки и обработки сложнолегированных сплавов с функциями самонастройки математических моделей, автоматической оценки состояния объекта и принятия решений является актуальной задачей при изменяющихся технологических условиях производства [1, 2].

В настоящей работе представлены принципы разработки и общая методология системы адаптивного контроля качества литых изделий интеллектуального типа, реализующей нейро-нечеткую математическую модель вычислений, как совокупность методов, применяемых на различных стадиях мониторинга состояния технологического процесса приготовления сплава (выплавки и обработки расплава в плавильной печи) [3].

В качестве основных методов мониторинга за состоянием технологического процесса приготовления сплава и получения из него литых изделий использованы термический анализ затвердевающей пробы расплава для определения параметров затвердевания и акустический анализ технологической U-образной пробы для определения частот собственных колебаний. Использование данных методов обеспечивает возможность проведения мониторинга с соблюдением требований активного неразрушающего контроля, при котором не только не должна быть нарушена целостность готовых

литых изделий и их пригодность к дальнейшей эксплуатации, но и обеспечена возможность принятия оптимизирующих управленческих решений в процессе производства отливок. Допускается использование дополнительных методов мониторинга, обеспечивающих возможность сбора/регистрации, хранения и анализа признаков/параметров для описания объекта контроля и принятия решения о его состоянии, например, данных о химическом составе сплава.

Принципиальным отличием разработанной системы является наличие программного идентификатора (интерпретатора измеренных признаков/параметров), реализующего модель нейро-нечетких вычислений для принятия решений о состоянии объекта и дальнейшем управлении, и функции самонастройки модели с активной адаптацией входных параметров. Адаптация системы осуществляется на основе данных текущего (выборочного) контроля литых изделий или технологических проб, с использованием информационных массивов банка данных свойств (параметров) образцов литейных сплавов и литых изделий (БДС).

Совокупность используемых методов мониторинга состояния технологического процесса приготовления сплава и получения из него литых изделий характеризуется общим концептуальным подходом, основанным на использовании обобщенной нейро-нечеткой модели идентификации, являющейся основой математического и программного обеспечения нейро-нечеткого (нейроподобного) процессора в составе вычислительного комплекса реального времени [4, 5].

В обобщенной математической форме задача идентификации объекта контроля на основе нейро-нечеткой модели вычислений состоит в определении параметров  $p_1$ ,  $p_2$  кусочно-линейной функции нечеткого порога  $Sx$  и оценке степени соответствия признаков/параметров объекта контроля эталонному описанию: при значениях  $Sx > p_2$  принимается решение об отнесении объекта контроля к заданному классу объектов (параметр соответствия  $Q = 1$ ), при значениях  $Sx < p_1$  – к альтернативному классу объектов (параметр соответствия  $Q = 0$ , рисунок 1).

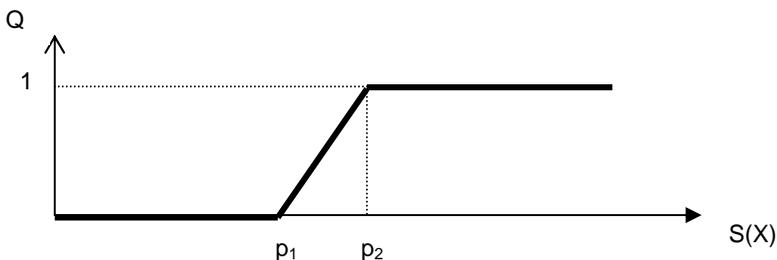


Рисунок 1 – Общий вид кусочно-линейной функции нечеткого порога

Значения кусочно-линейной функции нечеткого порога  $Sx$  (рисунок 2) рассчитываются по формуле:

$$S(X_k) = \sum_{i=1}^n w_i \varphi(x_i, a_i, b_i, c_i, d_i),$$

где  $\varphi(x_i, a_i, b_i, c_i, d_i)$  – значение линейно-аппроксимированной функции принадлежности (диапазон значений от 0 до 1);  $w_i$  – весовые коэффициенты признаков/параметров объекта контроля (диапазон значений от 0 до 1).

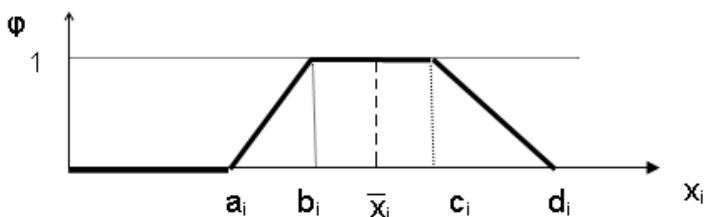


Рисунок 2 – Линейно-аппроксимированная функция принадлежности

Принципиальным отличием разработанной математической модели от обобщенного нейро-нечеткого подхода к идентификации объектов, представленного в работах [3, 4], является то, что для линейно-аппроксимированной функции вносится конкретный смысл: функция  $\varphi$  рассматривается как упрощенная (трапецидальная) функция распределения, характерные (предельные) точки которой вычисляются, исходя из статистических оценок признаков/параметров объекта контроля:

$$a_i = \bar{x}_i - 3\sigma_i, \quad b_i = \bar{x}_i - \sigma_i, \quad c_i = \bar{x}_i + \sigma_i, \quad d_i = \bar{x}_i + 3\sigma_i,$$

где  $\sigma_i$  – среднее квадратическое отклонение  $i$ -го признака от среднего арифметического для каждого  $i$ -го признака.

Эти данные используются для последующей постобработки, в ходе которой реализуется функция принятия финального решения на основе сравнительного анализа значения функции нечеткого порога  $Sx$  для объекта контроля, рассчитанного для характеризующих объект признаков/параметров, с параметрами  $p_1, p_2$ , которые рассчитаны для объектов-эталонов, включенных в банк данных свойств (параметров) образцов литейных сплавов и литых изделий.

Значения весовых коэффициентов признаков  $w_i$  в системе определяются в зависимости от числа ошибок идентификации объектов контроля, к которым приводит использование  $j$ -й совокупности признаков:

$$W'_{ij} = \frac{E_{\Sigma} - E_j}{E_{\Sigma} R_j},$$

где  $E_{\Sigma}$  – сумма всех ошибок классификации;  $E_j$  – число ошибок классификации для  $j$ -й совокупности выбранных признаков;  $R_j$  – размерность  $j$ -й совокупности признаков (число признаков в совокупности).

В рамках разработанной модели решение о принадлежности объекта контроля к заданному классу устанавливается в том случае, если нормированная (по отношению к дисперсии) сумма квадратов отклонений значений признака от среднего арифметического меньше, чем аналогичное значение для альтернативного класса.

Структурно-логическая схема компонентов программного обеспечения для адаптивного контроля качества продукции, реализующего нейро-нечеткую модель вычислений, с использованием данных термического и акустического анализов представлена на рисунке 3.

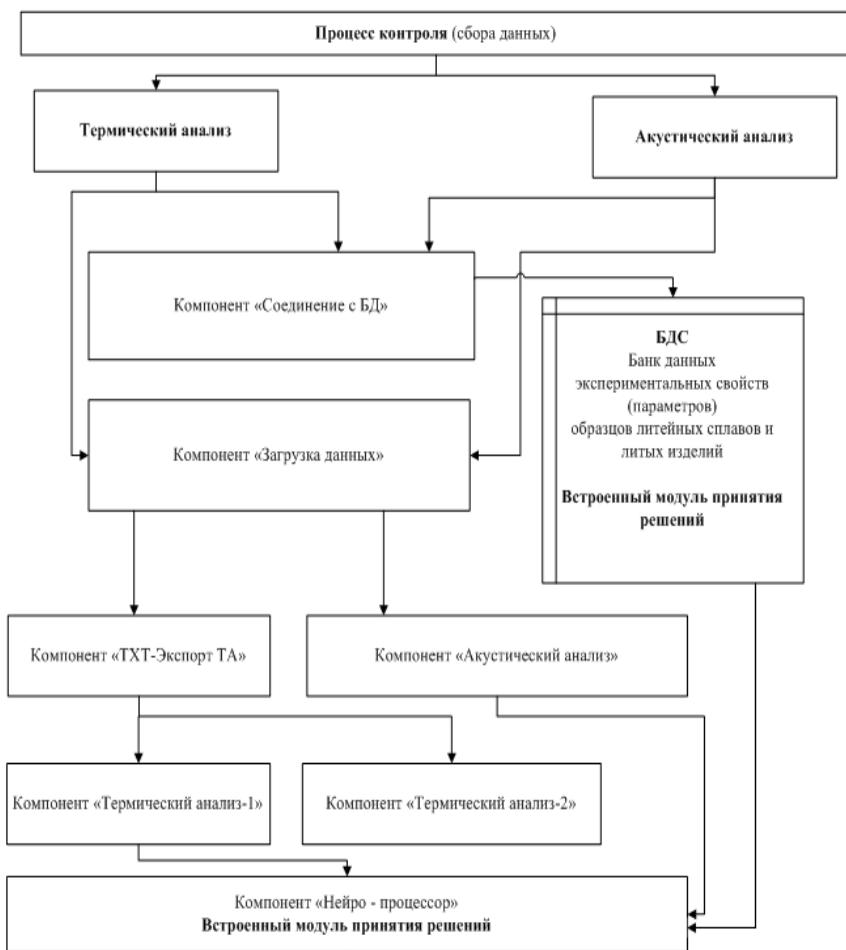


Рисунок 3 – Структурно-логическая схема использования компонентов программного обеспечения системы адаптивного контроля качества, реализующего нейро-нечеткую модель вычислений, с использованием данных термического и акустического анализов

В условиях литейного цеха ОАО «Минский моторный завод» проведена апробация разработанных компонентов программного обеспечения с использованием данных термического и акустического анализа для оценки степени модифицирования поршневого

сплава АК12М2МгН после модифицирующей обработки жидким флюсом. Степень модифицирования сплава оценивали по результатам цифрового металлографического анализа технологических проб расплава, взятых после модифицирующей обработки жидким флюсом и соответствующих различному времени выдержки. Отбор проб расплава проводился для проведения термического анализа в разовые технологические стаканчики [6], а также в постоянную и разовые формы для получения U-образной технологической пробы для проведения акустического анализа (рисунки 4, 5).



а



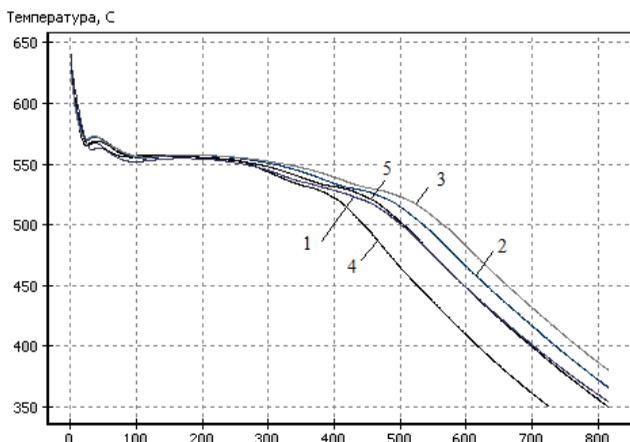
б

Рисунок 4 – Постоянная металлическая (а) и разовые (б) формы для получения U-образной технологической пробы для проведения акустического анализа



Рисунок 5 – Образцы U-образных технологических проб сплава АК12М2Мг для акустического анализа

Кривые охлаждения технологических проб сплава АК12М2МгН после модифицирующей обработки жидким флюсом с различным временем выдержки представлены на рисунке 6.



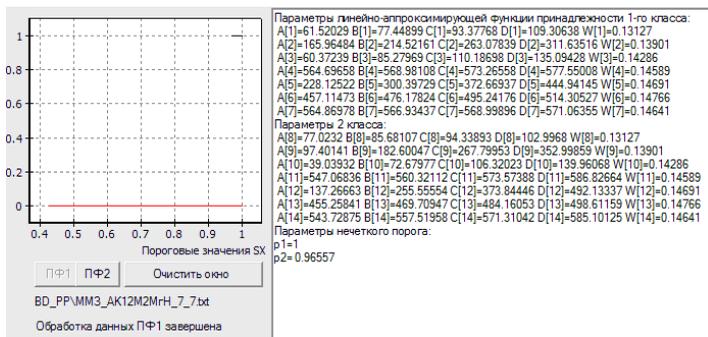
1 – исходное состояние, без модифицирующей обработки; 2 – после модифицирующей обработки, без выдержки; 3, 4 и 5 – после модифицирующей обработки и выдержке 15, 30 и 90 мин

Рисунок 6 – Температурно-временные зависимости сплава АК12М2МгН с различным временем выдержки расплава после модифицирующей обработки жидким флюсом

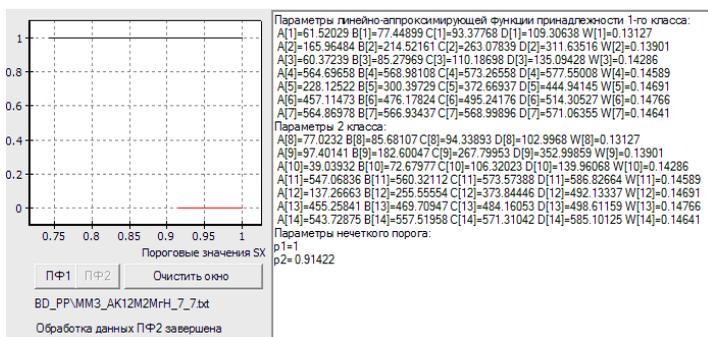
Анализ микроструктур показал, что в процессе обработки расплава АК12М2МгН жидким флюсом модифицированная структура обеспечивается при значительном времени выдержки расплава после его обработки (свыше 30 мин) в тонкостенных частях образцов проб, полученных при литье в кокиль, преимущественно, за счет высокой скорости охлаждения. В технологических пробах, полученных при литье в разовые формы, и в толстостенных частях технологических проб, полученных при литье в кокиль, модифицирующий эффект гарантированно обеспечивается при условии, что время после обработки флюсом расплава не превышает 20–30 мин.

Для решения задачи идентификации модифицированных сплавов использовали температуры и время начала и окончания фазовых превращений при затвердевании технологических проб. Однако проведенный анализ полученных данных показал, что использование параметров термического анализа технологических проб сплава АК12М2МгН при различных режимах модифицирующей обработки

жидким флюсом не позволяет однозначно идентифицировать модифицированные сплавы, то есть получить решение задачи, при которой для параметров кусочно-линейной функции нечеткого порога  $Sx$  обеспечивается условие  $p_1 < p_2$  (рисунок 7).



а



б

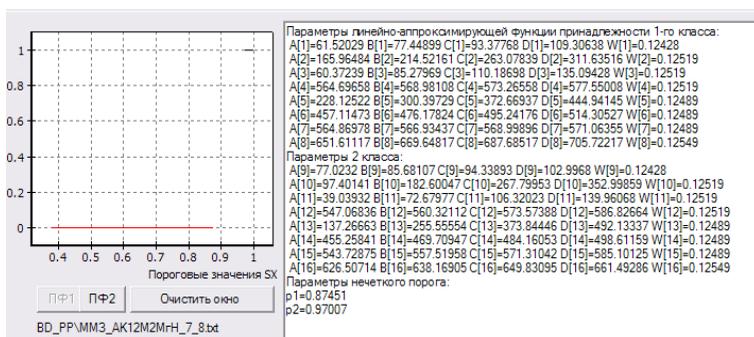
а – расчет на основе параметров функций принадлежности первого класса (немодифицированные сплавы); б – расчет на основе параметров функций принадлежности второго класса (модифицированные сплавы)

Рисунок 7 – Результаты расчета параметров функции нейро-нечеткого порога для модифицированных и немодифицированных сплавов АК12М2Мn (в качестве признаков использованы параметры кривых охлаждения)

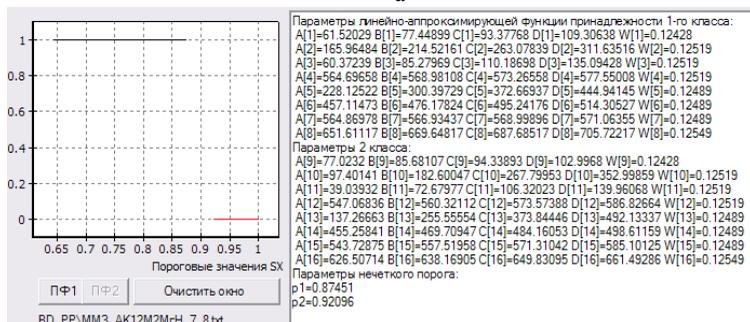
Проблема идентификации модифицированных сплавов с использованием данных термического анализа объясняется тем, что при обработке жидким флюсом расплава активно протекают процессы химического взаимодействия компонентов сплава и модифицирующего флюса, прежде всего, кремния и магния с фторсодержа-

щими солями, входящих в состав флюса. Это сопровождается изменениями химического состава сплава и, как следствие, изменениями температур фазовых превращений. Значения параметров затвердевания в этом случае оказываются зависимыми не только от содержания элементов-модификаторов, но и от изменений состава сплава и количественного соотношения образующихся при затвердевании фаз.

Использование параметров акустического анализа U-образных проб сплава АК12М2MgH совместно с параметрами кривых охлаждения сплава позволило однозначно идентифицировать модифицированные сплавы, то есть получить решение задачи, при которой для параметров кусочно-линейной функции нечеткого порога  $Sx$  обеспечивается условие  $p_1 < p_2$  (рисунок 8).



а



б

а – расчет на основе параметров функций принадлежности первого класса (немодифицированные сплавы); б – расчет на основе параметров функций принадлежности второго класса (модифицированные сплавы)

Рисунок 8 – Результаты расчета параметров функции нейро-нечеткого порога для модифицированных и немодифицированных сплавов АК12М2MgH (в качестве признаков использованы параметры термического и акустического анализов)

Таким образом, полученные результаты подтвердили возможность практического использования разработанных программных средств с использованием данных термического и акустического анализа U-образной технологической пробы на основе нейронечеткой модели вычислений для контроля металлургических процессов выплавки и обработки сложнолегированных алюминиевых сплавов в производственных условиях.

## Литература

**1. Pelayo, G.** A Case Based Reasoning aluminium thermal analysis platform for the prediction of W319 Al cast component characteristics / G. Pelayo, J.H. Sokolowski, R. Lashkari // *Journal of Achievements in Materials and manufacturing Engineering*. – 2009. – Vol. 36, Issue 1. – P. 7–17.

**2. Рафальский, И.В.** Экспрессный контроль содержания кремния в сплавах системы Al-Si с использованием методов метрической классификации / И.В. Рафальский, Д.С. Морозов, А.В. Арабей // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.:* в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 34, ч. 1. – С. 120–131.

**3. Свидетельство** о регистрации компьютерной программы «Программный комплекс для адаптивного контроля качества продукции и принятия решений в литейном производстве» № 490 от 25.04.2013 г.

**4. Татур, М.М.** Классификаторы в системах распознавания: прикладные аспекты синтеза и анализа / М.М. Татур, Д.Н. Одинец. – Минск: Бестпринт, 2008. – 165 с.

**5. Synthesis** and analysis of classifiers based on the generalized identification model / Tatur [et al.] // *Advances in Intelligent and Soft Computing*. Springer. – 2010. – Vol. 71. – P. 529–536.

**6. Theoretical** and experimental study of the solidification process of melts in computer aided thermal analysis (CA-CCA) / Rafalski I. [et al.] // *International Doctoral Seminar. Proc. Trnava: AlumniPress*. – 2010. – P. 435–446.