

7. **Быстроохлажденный** комплексный модификатор-раскислитель для внепечной обработки литейной стали / А.Г. Слуцкий [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 2. – С. 115–118.

8. **Пути** повышения эффективности модификаторов-раскислителей / А.Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр. : в 2 ч.* – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 34, ч. 1. – С. 62–71.

9. **Брикет** модификатор-раскислитель для внепечной обработки чугуна и стали : пат. 9521 Респ. Беларусь, / А.Г. Слуцкий, А.С. Калининченко, В.А. Шейнерт, В.А. Сметкин, В.А. Хлебцевич, А.А. Кривопуст ; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № u 20121180 ; заявл. 28.12.12 ; опубл. 03.06.13 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.* – 2013.

*УДК 669, 621.74.08*

**И.В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Д.С. МОРОЗОВ**,  
**А.В. АРАБЕЙ**,  
**И.Г. ШАХЛОВИЧ** (БНТУ)

## **СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ОТ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА**

Эффективность литейного производства определяется себестоимостью и качеством выпускаемой продукции, обусловленных стоимостными показателями и применяемыми технологиями, с должным обеспечением оперативного контроля на всех этапах производства литых изделий.

Благодаря успехам, достигнутым в последние годы в области разработки аппаратных, в том числе микропроцессорных, средств измерений и методов обработки данных, точность и возможности систем контроля качества литейной продукции в режиме реального времени значительно возросли. Тем не менее, практическая реали-

зация и широкое применение систем экспрессного контроля на технологических этапах выплавки и обработки сплавов, используемых для получения литых изделий, сдерживается рядом причин, среди которых, в первую очередь, можно выделить проблемы, связанные с необходимостью постоянной корректировки математических моделей при изменении технологических условий процессов получения сплава (проблема адаптации системы к изменяющимся технологическим условиям); сложностью выделения и интерпретации параметров, используемых для контроля технологических процессов выплавки и обработки сложнелегированных многокомпонентных литейных сплавов (проблемы формализованного описания и интерпретации признаков/параметров объектов контроля).

В рамках проведенной работы установлены корреляционные зависимости частот собственных колебаний отливок из высокопрочного чугуна (тестовые объекты контроля) от соотношений параметров химического состава ( $Si/Mn$ ,  $CE/Mg$ ,  $C/Mg$ ). Получены регрессионные математические зависимости между параметрами структуры (содержание феррита и перлита), механическими свойствами (предел прочности, твердость) и параметрами акустического и химического анализов отливок из высокопрочного чугуна (значений частот собственных колебаний отливок, отношения содержания кремния к марганцу, значений углеродного эквивалента, отношения углеродного эквивалента к магнию).

Формирование тестовых наборов экспериментальных данных акустического анализа (НДАА) проводилось для отливок из высокопрочного чугуна с различным содержанием перлита и феррита. Результатом сбора данных являлись фонограммы, представляющие собой массивы элементов целого типа, содержащих цифровой код мгновенных значений амплитуды акустических колебаний отливки, полученных через равный промежуток времени.

Процесс неразрушающего акустического контроля структуры отливок осуществлялся с применением метода свободных колебаний. Для проведения экспериментальных исследований использовали отливку «Кольцо» (рисунок 1), изготовленную из высокопрочного чугуна марки ВЧ45 методом литья в землю.



Рисунок 1 – Внешний вид отливки для проведения исследований

При формировании НДАА случайным образом отбиралась выборочная партия (выборка) отливок из высокопрочного чугуна объемом 25 шт. с последующим акустическим анализом и определением частот собственных колебаний. В результате анализа акустических параметров было установлено, что большая часть отливок характеризуется наличием основной частоты собственных колебаний (ЧСК) в диапазоне от 2190 до 2262 Гц.

Приготовление образцов для анализа структуры отливок из высокопрочного чугуна проводили после акустического анализа следующим образом. Образцы для приготовления шлифов вырезались из строго определенных мест отливок (в нижней части) для обеспечения требований соответствия толщины стенки и условий затвердевания отливки. Операции шлифования и полирования шлифа проводили до состояния зеркальной поверхности, затем шлифы травились 4-х% раствором азотной кислоты в спирте, после чего проводился металлографический анализ микроструктур. Определение количественных оценок структуры графитной фазы проводилось с использованием процедур цифровой обработки микроструктур материала литых изделий [1, 2].

Углеродный эквивалент определяли с учетом содержания кремния и фосфора:

$$CE = C + 0,3(Si + P) , \quad (1)$$

В связи с тем, что на структуру высокопрочного чугуна большое влияние оказывают соотношения элементов химического состава,

влияющих на количество феррита и перлита (Si, Mn, Cu), а также на степень модифицирования чугуна (Mg), в качестве входных параметров также использовали следующие соотношения: Si/Mn; CE/Mg; Si/(Mn + Cu).

Анализ полученных результатов показал, что у чугуна с шаровидным графитом эвтектического и заэвтектического составов (CE свыше 4,3 %) в литом состоянии формируется преимущественно ферритная (70–90 % феррита) металлическая основа с получением чугунов ферритного класса. Понижение углеродного эквивалента до значений CE = 4,0 % способствует формированию феррито-перлитной металлической основы (40–70 % феррита). При дальнейшем уменьшении углеродного эквивалента формируется структура перлитно-ферритной и перлитной металлической основы, с получением чугунов перлитного класса (рисунок 2).

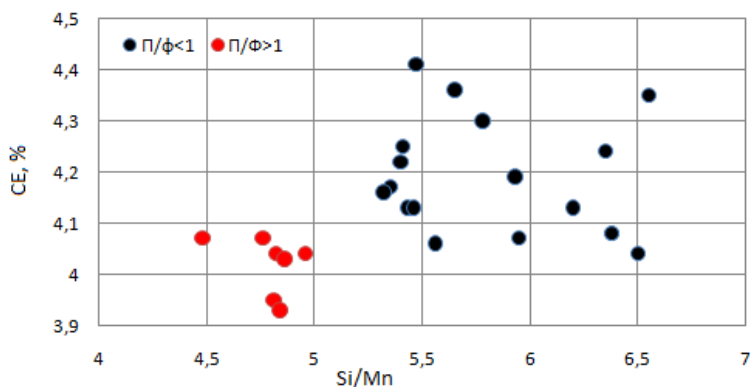


Рисунок 2 – Диаграмма распределения отливок «Кольцо» из высокопрочного чугуна с различным соотношением феррита и перлита

Зависимости частот собственных колебаний для отливки «Кольцо» из высокопрочного чугуна от соотношений Si/Mn, CE/Mg, C/Mg представлены на рисунках 3–6.

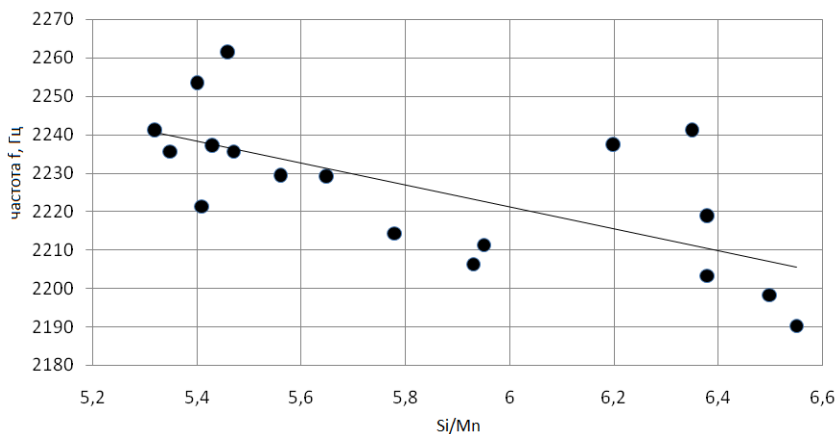


Рисунок 3 – Статистическая зависимость частот собственных колебаний отливок ферритного класса «Кольцо» от соотношения Si/Mn ( $\Pi/\Phi < 1$ , коэффициент линейной парной корреляции =  $-0,7$ )

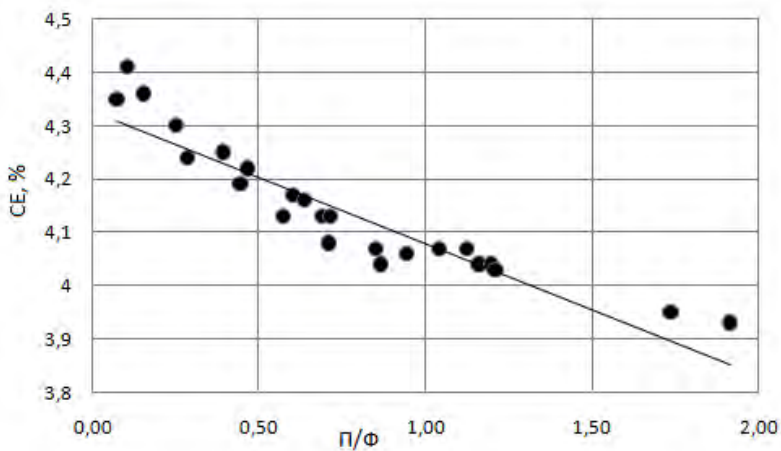


Рисунок 4 – Статистическая зависимость между углеродным эквивалентом CE и соотношением перлита к ферриту П/Ф для отливки «Кольцо» из высокопрочного чугуна (коэффициент корреляции  $-0,9$ )

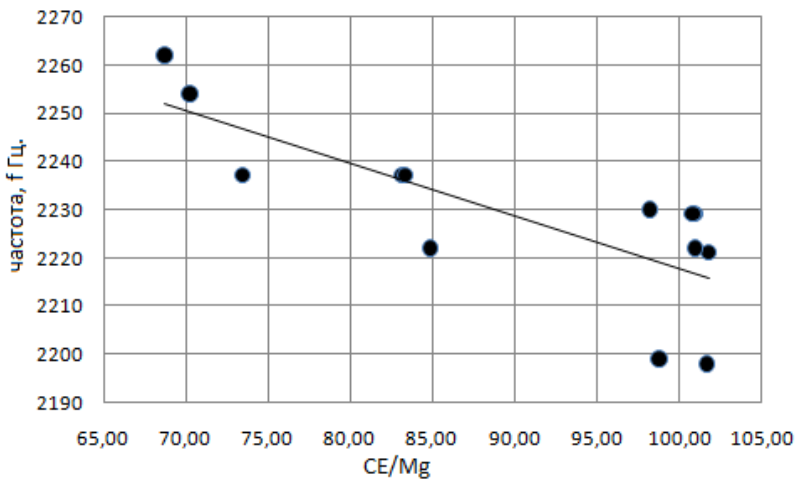


Рисунок 5 – Статистическая зависимость частот собственных колебаний отливки «Кольцо» от соотношения  $CE/Mg$  (при соотношении  $Si/[Mn + Cu] = 3,64-4,3$ ; коэффициент парной корреляции  $-0,78$ )

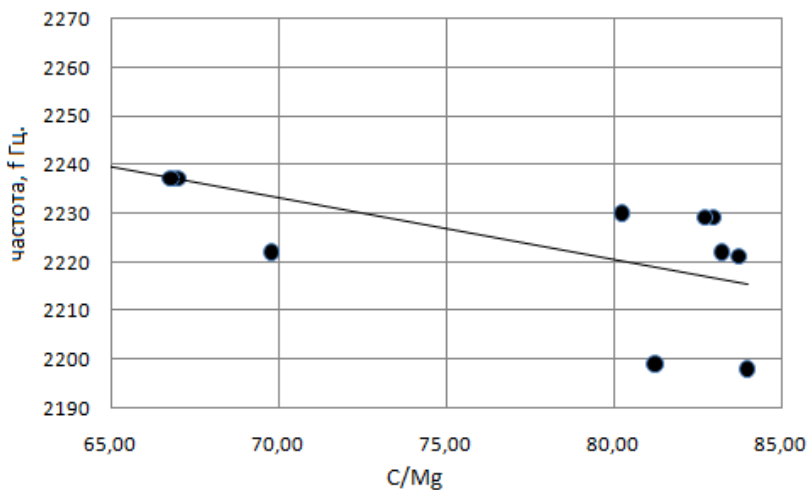


Рисунок 6 – Статистическая зависимость собственных колебаний отливки «Кольцо» от соотношения  $C/Mg$  (при соотношении  $Si/[Mn + Cu] = 3,64 - 4,3$ ; коэффициент парной корреляции  $-0,78$ )

Таким образом, установлена связь ЧСК исследованных отливок с параметрами химического состава и структуры металлической матрицы (содержания феррита и перлита), что позволяет обеспечить возможность проведения неразрушающего контроля структуры отливок данного типа.

Разработка математических моделей осуществлялась с использованием метода регрессионного анализа. При построении моделей использовали полиномиальные уравнения второго порядка:

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_1^2 + b_3 \cdot X_2 + b_4 \cdot X_2^2 + b_5 \cdot X_3 + b_6 \cdot X_3^2 + \dots \\ \dots + b_{2n-1} \cdot X_n + b_{2n} \cdot X_n^2, \quad (2)$$

где  $b_0$ – $b_n$  – коэффициенты модели;  $Y_i$  – зависимая переменная, соответствующая контролируемому параметру.

В качестве входных параметров модели использовали частоту собственных колебаний ( $X_1$ ), отношение кремния к марганцу ( $X_2$ ), значение углеродного эквивалента ( $X_3$ ), отношение углеродного эквивалента к магнию ( $X_4$ ). Выходными параметрами моделей являлись характеристики структуры (количество феррита и перлита) и механические свойства (предел прочности, твердость) отливок из высокопрочного чугуна.

Структурная идентификация модели (выбор параметров модели) осуществлялась на основе анализа расчетных значений коэффициентов множественной корреляции между входными и выходными параметрами. Адекватность моделей проверяли с помощью значений F-критерия (Фишера), принятых для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  [3, 4].

Коэффициенты полученных адекватных полиномиальных моделей для оценки характеристик структуры и механических свойств отливок из высокопрочного чугуна от параметров акустического анализа и химического состава сплава, представлены в таблице.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных значений содержания перлита и феррита, твердости, предела прочности показал, что полученные модели могут быть использованы для оценки характеристик структуры и механических свойств отливок в автоматизированных системах неразрушающего контроля при производстве отливок из высокопрочного чугуна при использовании данных акустического анализа и химического состава сплава.

Таблица – Коэффициенты полиномиальных моделей для оценки характеристик структуры и механических свойств отливок из высокопрочного чугуна от параметров акустического анализа и химического состава сплава

Коэффициент	Выходной параметр модели			
	Предел прочности $\sigma_B$	Феррит, %	Перлит, %	Твердость, НВ
$b_0$	41,863	2379,263	-2414,054	20534,203
$b_1$	3,804	-2,248	2,372	-19,494
$b_2$	-0,001	0,001	-0,001	0,004
$b_3$	108,666	6,027	-6,171	4,160
$b_4$	-11,710	-0,056	0,062	0,504
$b_5$	-1946,727	-25,543	21,89	498,143
$b_6$	231,248	15,248	-15,115	-62,046
$b_7$	13,558	-0,362	0,403	2,628
$b_8$	-0,083	0,002	-0,003	-0,012

## Литература

1. **Development** of elements of an automated system for digital metallographic analysis / D. Morozov [et al.] // International Doctoral Seminar. Proc. Trnava: AlumniPress. – 2010. – P. 356–361.

2. **Морозов, Д.С.** Разработка алгоритмов цифрового металлографического анализа для определения объемной доли фаз / Д.С. Морозов, И.В. Рафальский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Восьмой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, май 2010 г. / Белор. нац.техн. ун-т. – Минск, 2010. – Т. 1. – С. 283.

3. **Спирин, Н.А.** Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекций / Н.А. Спирин, В.В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

4. **Сидняев, Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие / Н.И. Сидняев. – М.: Изд.-во Юрайт; ИД Юрайт, 2011. – 399 с.