

Мультифрактальный анализ микроструктур алюминиевых сплавов, обработанных электрогидроимпульсным методом

В. В. Картузов^а, Я. Ю. Дмитришина^б

^аИнститут проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03142, Украина, e-mail: vyk@ipms.kiev.ua

^бИнститут импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpta@iip.com.ua

Проведен мультифрактальный анализ изображений микроструктур алюминиевых сплавов, обработанных электрогидроимпульсным методом. Выявлены взаимосвязь мультифрактальных характеристик с механическими свойствами и общие тенденции в формировании структур алюминиевых сплавов при разных режимах и параметрах обработки. Полученные результаты указывают на возникновение структурных преобразований в расплаве в процессе электрогидроимпульсного воздействия и позволяют определить принципы формирования структуры сплава в результате указанной обработки.

Ключевые слова: электрогидроимпульсная обработка, алюминиевые сплавы, структура, мультифрактальный анализ.

УДК 519.2:621.9

ВВЕДЕНИЕ

Электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) относится к одному из перспективных инструментов влияния на структуру и свойства расплава на предразливочной стадии [1]. Ее задача заключается в генерировании периодически повторяющихся импульсов давления, создаваемых при высоковольтном разряде в воде посредством электроразрядного генератора упругих колебаний (ЭРГУК), и передаче этих импульсов в расплав через волноводно-излучательную систему (рис. 1).

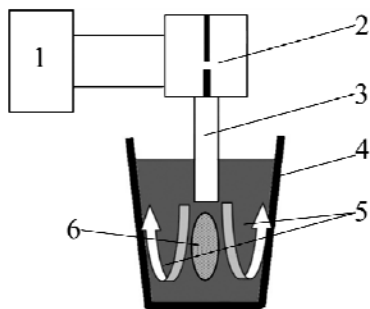


Рис. 1. Схема ЭГИО. 1 – генератор импульсных токов на основе емкостного накопителя; 2 – электроразрядный генератор упругих колебаний; 3 – волновод; 4 – ковш с расплавом; 5 – зоны турбулизации гидродинамических течений; 6 – зона развитой кавитации.

ЭГИО относится к категории многофакторных и многопараметрических технологических методов материаловедения. Это существенно усложняет исследование его воздействия на структуру и свойства расплава, а в итоге – литого изделия, усложняет выбор принципов управления процессами получения качественных отливок. Принцип электрогидроимпульсной обработ-

ки расплава может быть представлен следующим образом. Акустическое поле, генерируемое ЭРГУК, порождает в расплаве гидродинамические течения и мощные акустические волны. Последние вызывают перепад давлений в последнем, что приводит к локальным разрывам сплошности жидкометаллической среды, то есть образованию акустической кавитации. Рост и схлопывание кавитационных пузырьков, как и турбулизация гидродинамических течений, способствуют более интенсивной диссипации энергии в местах их локализации, о чем свидетельствует скачкообразное изменение структуры ближнего порядка и свойств алюминиевых расплавов после ЭГИО [2].

Для изучения сложных стохастических процессов, в том числе и процессов, происходящих во время ЭГИО, чаще всего привлекаются различные вероятностные подходы. В их основе лежат методы статистического анализа случайных величин и функций. В последние годы наряду с этими методами в материаловедении для анализа сложных неравновесных систем и их структур используются методы фрактальной и мультифрактальной параметризации. Они позволяют упростить описание сложных систем с помощью математического аппарата фрактальной геометрии. Мультифракталы отличаются некоторым спектром фрактальных размерностей и как информационные элементы характеризуют процессы структурных перестроек, происходящих под действием внешних условий.

Принципы мультифрактальной параметризации структур достаточно полно описаны автора-

ми [3], поэтому в рамках данной работы излагать их подробно нет необходимости.

Цель работы – проанализировать взаимосвязь мультифрактальных характеристик микроструктур алюминиевого сплава АК5М2 с режимами ЭГИО и механическими свойствами, а также установление (на основе проведенного анализа) наличия либо отсутствия структурных преобразований в обработанном сплаве и определении принципов формирования структуры расплава при ЭГИО.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Опишем характеристики генератора импульсного тока (ГИТ), определяющие параметры нагружения расплава на торце волновода [1]. От напряжения на обкладках конденсатора U_0 (кВ) и его емкости C (мкФ) зависит запасенная энергия разряда как половина произведения емкости на квадрат напряжения. Величина межэлектродного промежутка определяет режим выделения электрической энергии при разряде: колебательный, согласованный или аperiodический. Эти режимы при $W_0 = \text{const}$ отличаются прежде всего скоростями выделения энергии (мощностью разряда), что является важным фактором при генерировании импульсных процессов, в том числе электроразрядных [4]. Частота следования импульсов f (Гц) вместе с энергией W_0 , с одной стороны, влияет на мощность электроразрядного электротехнического комплекса $N = f \cdot W_0$, а с другой – на совокупность импульсов, которые в свою очередь могут повлиять на релаксационные процессы в расплаве.

Исследовались микроструктуры образцов алюминиевого сплава АК5М2, подвергнутого перед разливкой ЭГИО. В эксперименте варьировались частота посылки импульсов (от 1 до 7 Гц при напряжении 30 кВ и величине межэлектродного промежутка 20 мм), напряжение разряда (от 25 до 50 кВ при частоте 1 Гц и величине межэлектродного промежутка 20 мм) и величина межэлектродного промежутка в электроразрядном генераторе упругих колебаний (от 10 до 30 мм при частоте 1 Гц и напряжении 30 кВ). Емкость конденсатора варьировалась так, чтобы энергия, запасаемая на обкладках последнего, составляла 1,25 кДж. Масса обрабатываемого металла – 800 г.

Анализ полученных контрастных изображений микроструктуры размером 850x850 пикселей (рис. 2) осуществлялся с помощью программы MFRDrom [4].

Результатом компьютерной обработки электронно-микроскопических фотографий является получение канонических спектров и обобщенных размерностей Реньи для исследуемых струк-

тур. С помощью этих спектров определены следующие мультифрактальные характеристики [3]:

- коэффициент упорядоченности структуры отражает относительную степень упорядоченности и нарушения фрактальной симметрии для общей конфигурации исследуемой структуры в целом; указывает на количество периодической составляющей;

- коэффициент однородности структуры – показатель степени однородности исследуемой структуры;

- фрактальная размерность D_0 – это размерность анализируемой структуры;

- фрактальная размерность D_1 – это размерность, основанная на энтропии Шеннона, указывает на меру беспорядка по отношению к масштабу разбиения изображения. Также D_1 можно определить как количество информации, необходимое для установления месторасположения точки в некоторой элементарной ячейке.

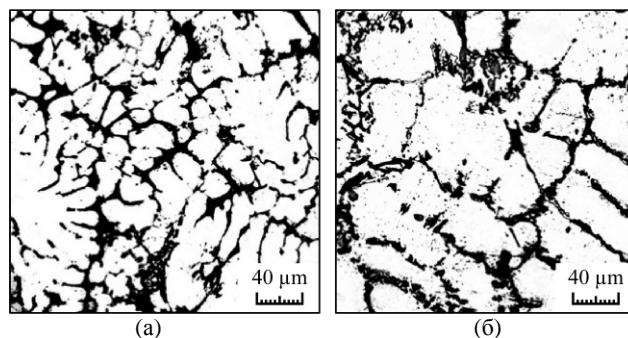


Рис. 2. Контрастные изображения микроструктур при увеличении $\times 125$: (а) – опытный образец; (б) – контрольный.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 и 4 показаны корреляции механических свойств и мультифрактальных характеристик исследованных образцов с режимами обработки. Можно заметить, что мультифрактальные характеристики, как и механические свойства, находятся в нелинейной зависимости от режимов и параметров обработки. При этом наиболее выгодное сочетание механических свойств (достаточно высокий коэффициент относительного удлинения на фоне повышенного показателя предела прочности) соответствует снижению коэффициента однородности и повышению коэффициента упорядоченности структуры.

На рис. 5 представлена взаимосвязь фрактальных размерностей микроструктуры образцов с их механическими свойствами. Обобщая рис. 5а–в можно заключить, что размерность D_1 , отражающая степень хаотичности структуры, в результате обработки всегда возрастает с 1,65 до 1,95 и держится примерно на том же уровне при дальнейшем воздействии ЭГИО. Это означает, что структура обработанных образцов сформирована в неравновесных условиях с повышенной

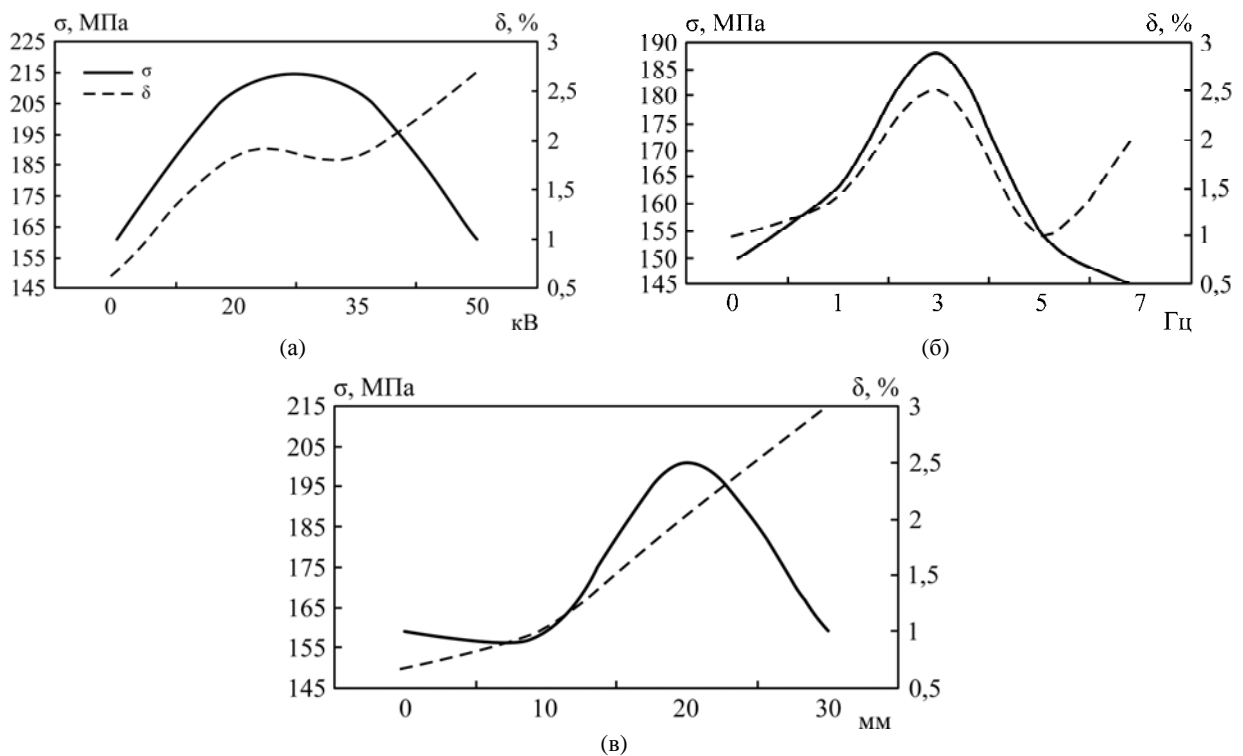


Рис. 3. Влияние параметров обработки на механические свойства сплава АК5М2: σ – предел прочности; δ – коэффициент относительного удлинения.

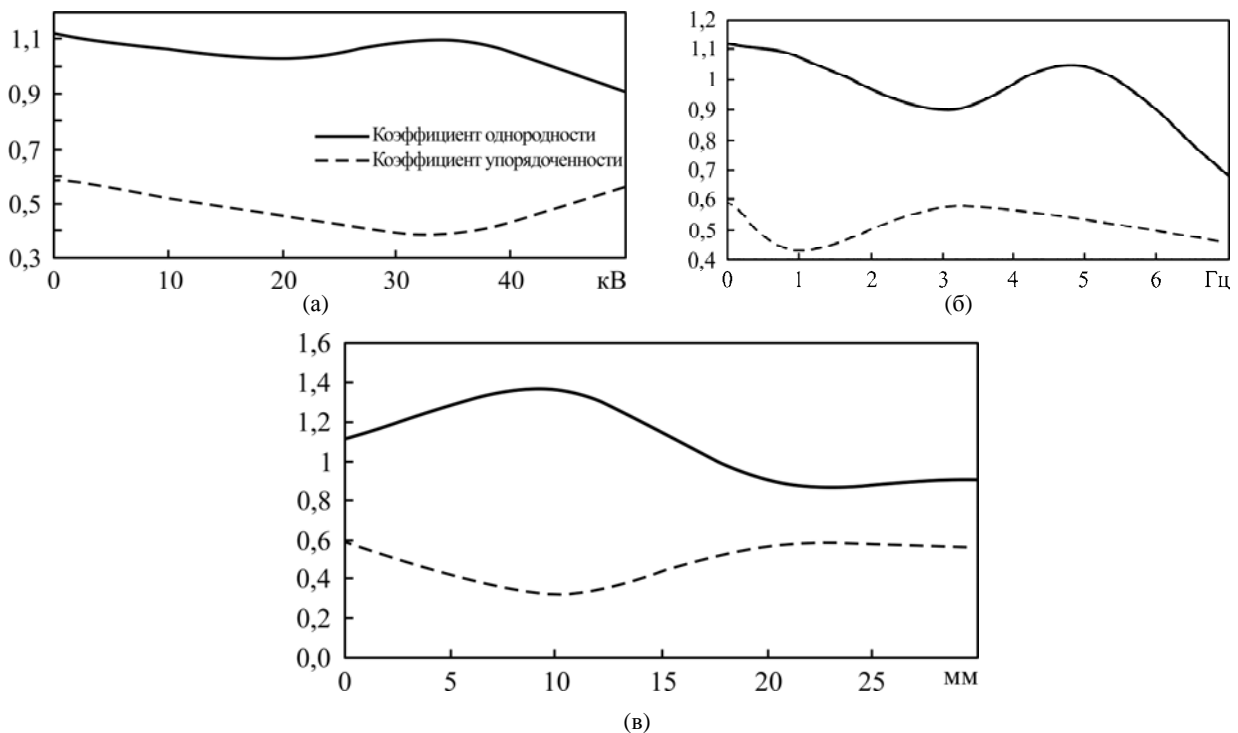


Рис. 4. Влияние параметров обработки на мультифрактальные характеристики.

энтропией. Фрактальная размерность структуры D_0 с ростом количества разрядных импульсов увеличивается незначительно, однако начинает превышать 2 (рис. 5а), что может свидетельствовать о ее усложнении по сравнению со структурой изображения контрольного образца.

Наличие характерных перегибов на рис. 3а и 4а является признаком структурных преобразований в расплаве в результате ЭГИО. Наиболее упорядоченные и неоднородные структуры, об-

ладающие повышенным уровнем механических свойств, чередуются со структурами более однородными и неупорядоченными с заметно более низкими механическими свойствами. Это означает, что состояния, соответствующие повышенному уровню механических свойств, достигаемые при различных параметрах ЭГИО, неустойчивы и являются локальными. Согласно принципу локального равновесия [5] эволюция такой системы может быть рассмотрена как переход

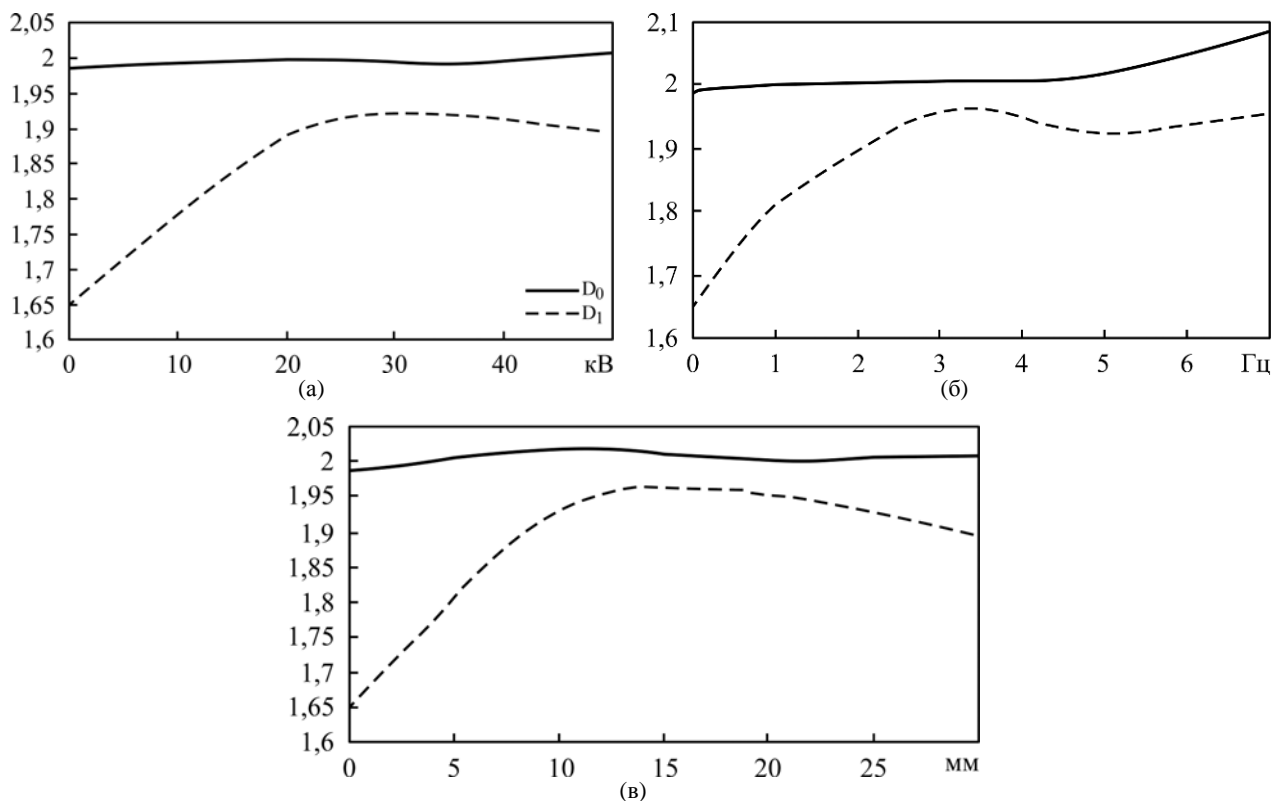


Рис. 5. Влияние параметров обработки на фрактальные размерности.

через ряд квазиравновесных состояний и описана в рамках уравнений классической термодинамики для бесконечно малых элементов системы, например на субмикро- и/или мезоуровне.

Соотношения количества разрядных импульсов с плотностью энергии, запасенной в конденсаторе, которые необходимы для достижения структурных превращений

W_0 , кДж	m , кг	Плотность энергии, кДж/кг	n , шт.	φ , кДж·имп·кг ⁻¹
0,75	0,3	2,5	160	400
1,25	0,8	1,5625	180	281,25
1,25	0,4	3,125	90	281,25
1,8	100	0,018	900	16,2
1,8	200	0,009	1500	13,5
2,5	7,5	3	135	405
2,5	800	0,003125	1800	2,25

Для выявления общих тенденций в изменении механических свойств и мультифрактальных характеристик структуры алюминиевых сплавов в результате ЭГИО исследованы мультифрактальные характеристики алюминиевых сплавов, обработанных при разных значениях запасенной в конденсаторе энергии W_0 (0,75, 1,25, 1,8 и 2,5 кДж). Необходимо отметить, что результаты исследований как для различных алюминиевых сплавов, так и для чистого алюминия указывают на возникновение структурных превращений. Для разных значений запасенной энергии эти превращения наступают при различном коли-

честве разрядных импульсов. Очевидно, что для разной плотности запасенной энергии существуют определенные соотношения (обозначим их φ) количества разрядных импульсов n (шт.) с плотностью энергии, запасенной в конденсаторе, которые необходимы для достижения структурных превращений:

$$\varphi = W_0 \cdot n / m. \quad (1)$$

Для каждой плотности энергии определим эти соотношения (см. таблицу).

На рис. 6 точками показаны зависимости необходимого для структурных преобразований количества импульсов от плотности запасенной энергии (см. таблицу), штрихом обозначена предполагаемая идеализированная зависимость. Из рисунка следует, что с увеличением плотности запасенной энергии количество импульсов, необходимых для достижения структурных преобразований, уменьшается, но эта зависимость не линейна, а подобна экспоненциальной. Количество импульсов возрастает не пропорционально для больших и малых масс расплава. И это свидетельство того, что эффективность обработки обусловлена активацией таких процессов, как кавитация и турбулизация гидродинамических течений в локальных зонах расплава. Например, кавитация, как показали исследования в работе [6], становится более развитой при обработке больших объемов расплава.

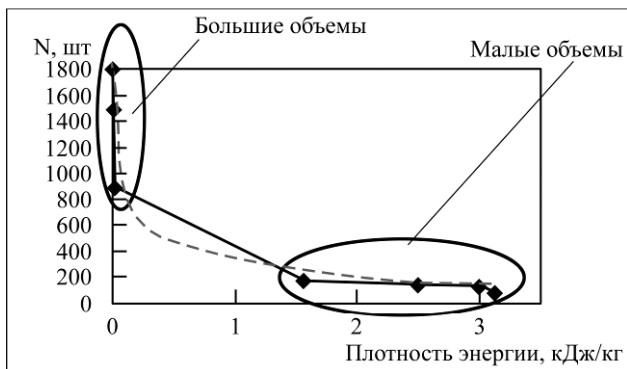


Рис. 6. Отношение количества разрядных импульсов, необходимых для достижения структурных преобразований в расплаве, к плотности запасенной энергии.

ВЫВОДЫ

При анализе мультифрактальных характеристик микроструктур алюминиевого сплава АК5М2, обработанного электрогидроимпульсным методом, установлена взаимосвязь этих характеристик с механическими свойствами в зависимости от параметров обработки. Структуры, соответствующие сочетанию повышенных механических свойств, наиболее упорядочены и неоднородны.

Характерные перегибы на графиках рис. 3б, 4б и 5б свидетельствуют о наличии структурных преобразований во время ЭГИО. Чередование упорядоченных и неоднородных структур с неупорядоченными и однородными в зависимости от частоты посылки разрядных импульсов свидетельствует об установлении в расплаве локального равновесия.

Исследование мультифрактальных характеристик алюминиевых сплавов, обработанных при разных значениях плотности запасенной энергии, показало существование областей структурных преобразований для различных масс расплава при разном количестве разрядных импульсов. Полученные зависимости указывают на неоднозначную роль процессов, возникающих при ЭГИО (кавитация, турбулизация гидродинамических течений), в формировании упорядоченных структур с повышенным уровнем механических свойств. Таким образом, данные мультифрактального анализа микроструктур алюминиевых сплавов позволяют выбрать принципы описания эволюции их формирования с целью дальнейшего изучения и выявления способов управления структурой и, следовательно, эксплуатационными свойствами литого металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуркин В.Н., Грабовый В.М., Синчук А.В. Функциональные возможности ЭГИ обработки расплава в ковше. *ЭОМ*. 2006, (5), 55–61.
2. Базин Ю.А., Бутаков Б.И., Тишкин А.П. Влияние электрогидроимпульсной обработки на структуру ближнего порядка расплава многокомпонентного сплава на основе алюминия. *Расплавы*. 1992, (3), 89–91.
3. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. *Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов*. Москва. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 112 с.
4. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. Расчетная методика для определения влияния параметров разряда на характеристики акустического поля в расплаве при электрогидроимпульсной обработке. *ЭОМ*. 2004, (1), 82–87.
5. Vstovsky G.V., Kolmakov A.G., Terentjev V.F. Using Multifractal Information for Quantitative Evaluation of Broken Symmetries of Materials Structure. *Materials Science (Medžiagotyra)*. Kaunas, Technologija, 1999, 9(2), 62–65.
6. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. *Синергетика и фракталы в материаловедении*. М.: Наука. 1994, 384 с.

Поступила 16.09.13
После доработки 15.11.13

Summary

Multifractal analysis of the aluminum alloys microstructure treated by the electrohydropulse method is performed. The correlations between the multifractal characteristics with mechanical properties and general trends in the structure formation of aluminum alloys under different conditions and processing parameters are identified. The results indicate the occurrence of structural changes in the melt during electrohydropulse treatment and allow determining principles of the structure formation of the alloy resulting from the said processing.

Keywords: electrohydropulse treatment, aluminum alloys, structure, multifractal analysis.