

СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППРОКСИМАЦИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

П.К. Ланге, А.Ю. Ярославкин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: k0046979@yandex.ru

Рассмотрена задача определения размера зерна металлического сплава при его кристаллизации, описан аппроксимативный метод определения информативного признака размера зерна.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, кристаллизация, спектральная характеристика, аппроксимация, размер.

Структура металла, главным образом величина зерна кристаллов, влияющая на прочностные характеристики изделия, является одним из важнейших показателей качества кристаллических материалов, поскольку его прочностные характеристики определяют стоимость металла как продукта производства.

Изучение механизма формирования кристаллов металлов и сплавов и их поведения при литье алюминиевого сплава представляет значительные трудности и основано главным образом на оптическом исследовании структуры металлического образца уже после получения готового изделия, а также его химических анализах. Недостатки традиционных методов заключаются в том, что выборочный контроль не охватывает 100 % получаемой продукции в связи с ограничением времени на подготовку образцов и проведение измерения параметров структуры сплава. Традиционные методы таких измерений достаточно трудоемки, на их результаты оказывает значительное влияние человеческий фактор – все это повышает вероятность того, что измеряемые параметры структуры анализируемого слитка будут характеризоваться большой погрешностью.

Одним из перспективных способов оценки структуры металла является использование метода акустической эмиссии кристаллизации (АЭК), основанного на излучении упругих волн, возникающих в процессе перестройки внутренней структуры твердых тел при их кристаллизации и образования участков кристаллической решетки в жидкой фазе, а также роста кристаллов из образовавшихся центров.

В [1] возникновение акустических сигналов при кристаллизации (плавлении) вещества связывается с представлением о скачкообразном характере образования или исчезновения макрослоев и макрообластей на растущей (или плавящейся) поверхности.

Такое представление в известном смысле является прямым следствием кинетики фазовых превращений веществ. Вследствие этого при фазовых превращениях веществ в окружающей среде должны распространяться акустические волны сжатия и разрежения. Для различных веществ акустические сигналы характеризуются широ-

Петр Константинович Ланге (д.т.н., проф.) профессор каф. информационно-измерительной техники.

Александр Юрьевич Ярославкин, аспирант.

ким диапазоном частот – от 20 до 1000 кГц при характерных высотах первых выбросов в 300...500 Па [2]. Частота повторения сигналов возрастает с увеличением градиента температуры в растущей твердой фазе. Скрытая теплота плавления веществ обычно мала по сравнению со скрытой теплотой испарения; для большинства веществ отношение этих теплот составляет 30...40. Из этого можно предположить, что в расплавленном состоянии разорвана лишь сравнительно небольшая часть связей между атомами и молекулами вещества, остальные же остаются соединенными в небольшие группы примерно по 30...40 атомов и молекул с размером порядка 10^{-7} см. Расстояние между атомами и молекулами внутри таких групп такое же, как и в твердой фазе.

При кристаллизации жидкости разорванные связи между этими группами или комплексами восстанавливаются и атомные (либо молекулярные) блоки встраиваются в кристаллическую решетку твердой фазы. Этот процесс восстановления кристаллической решетки идет отдельными цепочками в продольном направлении поверхности кристалла и является стохастическим.

Таким образом, растущий кристалл расширяется кратковременными рывками. Длительность этих рывков является случайной величиной, поэтому процесс возникновения сигналов в среде вокруг зоны кристаллизации является стохастическим. Исследование таких стохастических процессов является достаточно сложной задачей, однако к настоящему времени достаточно четко определена связь между параметрами колебаний АЭК и размерами зерна [2]. Теоретические исследования в [2] показали, что сигнал АЭК при кристаллизации металлов должен представлять собой колебания с частотой порядка 1 МГц, модулированные более низкой частотой, при этом параметры такого сигнала зависят от размера зерна при кристаллизации. В таком случае такие параметры можно считать информативными для определения размера зерна металла.

Однако на практике сигнал АЭК имеет более сложную структуру. В качестве примера можно привести сигнал АЭК с основной частотой порядка 1 МГц, формируемый при кристаллизации олова (рис. 1).

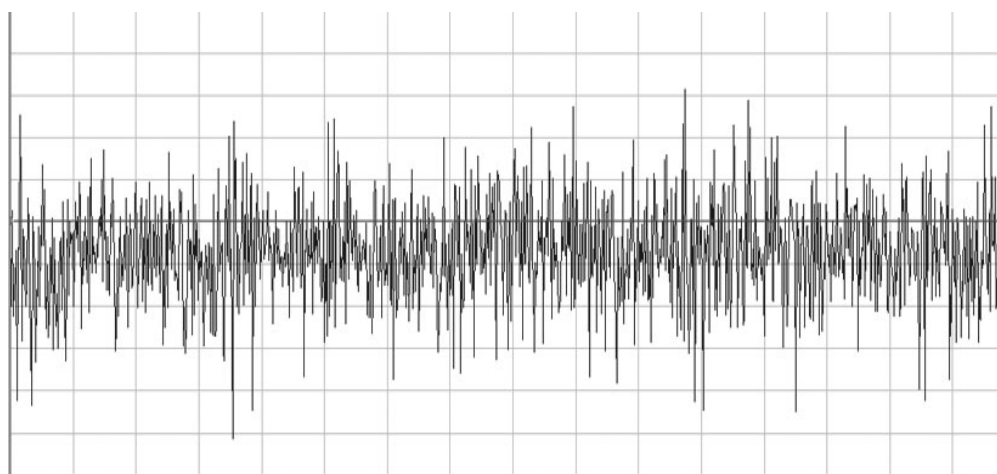


Рис. 1. Сигнал акустической эмиссии при кристаллизации олова

Как видно из рассмотрения этого рисунка, спектр сигнала АЭК достаточно сложен, что свидетельствует о необходимости учета большого количества составляющих такого спектра с использованием современных методов спектрального анализа.

При обработке акустической информации используются различные методы спектрального анализа акустических сигналов. Одним из наиболее распространенных на практике методов является Фурье-преобразование сигнала, позволяющее по его временной реализации получить спектральную характеристику.

В основе метода лежит известное соотношение

$$I(\omega) = \frac{1}{T} \left[\int_0^T x(t) \cos \omega t dt + \int_0^T x(t) \sin \omega t dt \right]^2, \quad (1)$$

где $x(t)$ – преобразуемый сигнал; T – период его обработки.

Если сигнал представлен дискретными значениями, то в этом выражении интеграл заменяется суммированием. В реальной практике использование (1) приводит к необходимости реализации большого числа вычислений.

Рассмотрим возможность реализации выражений вида (1) с использованием аппроксимаций функций $x(t)$ и $\sin(\omega t)$.

Основу выражения (1) составляет интегральный член вида

$$S_d = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) f_2(t) dt, \quad (2)$$

где $f_2(t)$ – гармоническая функция (функция \sin или \cos).

Рассмотрим возможность определения члена S_d при использовании аппроксимирующей функции

$$f_1(t) \approx x(t),$$

дающей возможность определения значений сигнала внутри интервалов дискретизации. В этом случае выражение (2) может быть определено через значения коэффициентов функции, аппроксимирующей сигнал $x(t)$.

Для аппроксимации сигнала часто используются сплайн-функции, представляющие собой гладкие кривые, «сшитые» на границах участков аппроксимации вместе со своими несколькими производными. Коэффициенты параболических и кубических сплайн-аппроксимирующих функций определены на основе информационного критерия [3].

В частности, алгоритм для четырехточечной параболической сплайн-аппроксимации имеет вид

$$\begin{aligned} a_0[n] &= -\frac{1}{16} \left(U_x \left[n - \frac{3}{2} \right] + 9U_x \left[n - \frac{1}{2} \right] + 9U_x \left[n + \frac{1}{2} \right] - U_x \left[n + \frac{3}{2} \right] \right); \\ a_1[n] &= \frac{1}{8t_\partial} \left(U_x \left[n - \frac{3}{2} \right] - 11U_x \left[n - \frac{1}{2} \right] + 11U_x \left[n + \frac{1}{2} \right] - U_x \left[n + \frac{3}{2} \right] \right); \\ a_2[n] &= \frac{1}{16t_\partial^2} \left(-U_x \left[n - \frac{3}{2} \right] + 12U_x \left[n - \frac{1}{2} \right] - 22U_x \left[n + \frac{1}{2} \right] + 12U_x \left[n + \frac{3}{2} \right] - U_x \left[n + \frac{5}{2} \right] \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $a_0[n]$, $a_1[n]$, $a_2[n]$ – значения коэффициентов параболической аппроксимации; $x[n]$ – значение аппроксимируемого сигнала в n -й точке аппроксимации.

В этом случае на n -м участке дискретизации сигнал аппроксимируется параболой

$$f_1(t) = a_2[n]t^2 + a_1[n]t + a_0[n]. \quad (4)$$

Аналогичным образом на тех же участках дискретизации функции синуса или косинуса, входящие в интегральные члены выражения (1), могут быть аппроксимированы функцией $f_2(t)$.

Сигналы $f_1(t)$ и $f_2(t)$ изображены на рис. 2.

В этом случае выражение (2) может быть представлено в следующем виде:

$$S_d = \sum_{n=0}^m S_d[n] = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^m \int_0^{t_d} f_1(t) f_2(t) dt, \quad (5)$$

где m – число участков дискретизации сигналов.

Рассмотрим задачу определения значения на n -м интервале дискретизации t_d интегрального члена

$$S_d = \sum_{n=0}^m S_d[n] = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^m \int_0^{t_d} f_1(t) f_2(t) dt, \quad (6)$$

являющегося основным в выражении (5).

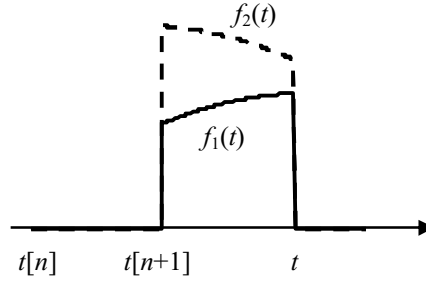


Рис. 2. Сигналы на одном интервале дискретизации

Подставляя в выражение (6) параболические функции вида (4) с коэффициентами $a_i[n]$, $b_i[n]$, получаем:

$$\begin{aligned} S_d[n] &= \frac{1}{T} \int_0^{t_d} (a_2[n]t^2 + a_1[n]t + a_0[n]) (b_2[n]t^2 + b_1[n]t + b_0[n]) dt = \\ &= \frac{t_d}{T} \left(\frac{a_2[n]b_2[n]}{5} t_d^4 + \frac{a_1[n]b_2[n] + a_2[n]b_1[n]}{4} t_d^3 + \frac{a_2[n]b_0[n] + a_0[n]b_2[n] + a_1[n]b_1[n]}{3} t_d^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_1[n]b_0[n] + a_0[n]b_1[n]}{2} t_d + a_0[n]b_0[n] \right). \end{aligned}$$

Общее интегральное значение такого выражения, определенное для периода T обработки сигнала по его m дискретным выборкам на этом периоде, равно

$$\begin{aligned} S &= \sum_{n=1}^m S_d[n] = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \left(\frac{a_2[n]b_2[n]}{5} t_d^4 + \frac{a_1[n]b_2[n] + a_2[n]b_1[n]}{4} t_d^3 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_2[n]b_0[n] + a_0[n]b_2[n] + a_1[n]b_1[n]}{3} t_d^2 + \frac{a_1[n]b_0[n] + a_0[n]b_1[n]}{2} t_d + a_0[n]b_0[n] \right). \quad (7) \end{aligned}$$

Оценка свойств алгоритма, определяемого этим выражением, в наиболее простом случае может быть произведена на примере гармонических сигналов

$$f_1(t) = \sin \omega t; ,$$

$$f_2(t) = \sin(\omega t + \varphi),$$

где φ – угол сдвига по фазе между этими сигналами.

Представляет практический интерес анализ относительной погрешности определения значения интегрального члена с помощью выражения (7) относительно его «истинного» значения, вычисляемого с помощью выражения

$$S_u = \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt. \quad (8)$$

Относительное значение методической погрешности в этом случае определяется выражением

$$\delta = \frac{S_u - S}{S_{\max}},$$

где S_{\max} – максимальное значение выражения (8) (это значение равно 0,5 при сдвиге фаз φ , равном нулю).

Зависимость этой погрешности от угла сдвига фаз при 8 интервалах дискретизации на период сигнала приведена на рис. 3.

Численная оценка показала, что при такой сравнительно редкой дискретизации погрешность определения параметра S зависит от сдвига по фазе между сигналом и функцией $f_2(t)$ в (5), но не превышает 8 %, что является вполне допустимым значением при спектральной обработке сигналов.

Представляет также интерес сравнение разработанного алгоритма с классическим алгоритмом, использующим при вычислении интегрального члена операции суммирования и перемножения данных:

$$S_d = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^m f_1[n] f_2[n]. \quad (9)$$

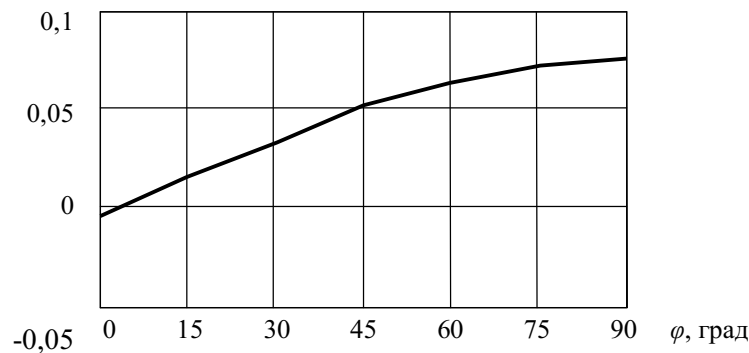


Рис. 3. Зависимость погрешности δ определения интегрального члена от угла сдвига фаз

Результаты сравнения относительной погрешности этого алгоритма с погрешностью разработанного алгоритма, определяемого выражением (7), для гармонических функций $f_1(t)$ и $f_2(t)$ при разном числе отсчетов на периоде этих функций приведены на рис. 4.

Из рассмотрения рис. 4 видно, что разработанный алгоритм имеет существенно меньшую погрешность определения выражения (2) по сравнению с алгоритмом (9)

простого суммирования и перемножения, особенно при малом числе интервалов дискретизации на период.

В частности, при 6 отсчетах на период соответствующие погрешности составляют около 10 и 20 % соответственно.

Предлагаемый метод определения значения интегрального выражения (8) позволяет применять его не только при спектральной обработке в соответствии с выражением (1) с использованием гармонических сигналов, но и в случае использования сигналов другого вида, образующих ортогональные ряды.

Это обусловлено тем, что в рассмотренном методе используется сплайн-аппроксимация ортогональных сигналов (в данном случае – гармонических), которые в общем виде могут иметь произвольную форму.

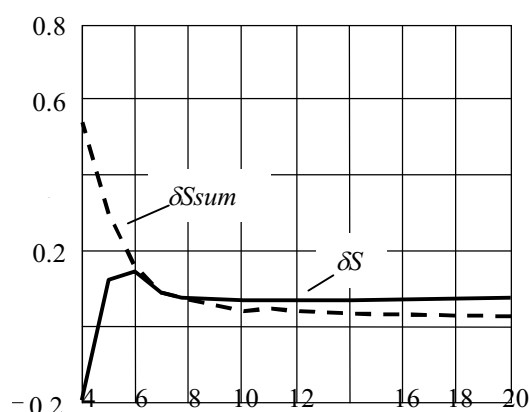


Рис. 4. Зависимость погрешности определения выражения (10) обычным (δS_{sum}) и аппроксимационным (δS) методом от числа интервалов дискретизации m на периоде перемножаемых функций

Определение значения интегрального члена (2) на конкретной частоте ω_i гармонической функции $f_2(t)$ с использованием предложенного метода позволяет вычислить на основе выражения (1) значение спектра сигнала на этой частоте.

Аналогичные вычисления, выполненные на ряде частот $f_i(t)$, позволяют определить дискретные значения этого спектра, несущего информацию об амплитудах и фазах спектральных компонент с частотами

$$f_i = \frac{i}{T_H}, \quad i = 0, \dots, \frac{n}{2},$$

где T_H – длительность интервала наблюдения сигнала;

n – число дискретных отсчетов сигнала на этом интервале.

Таким образом, использование аппроксимационного подхода с применением сплайн-аппроксимаций сигнала АЭК и ортогональных функций позволяет снизить погрешность его спектрального анализа, а также определения информативных параметров зерна металла при его кристаллизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Задумкин С.Н., Хоконов Х.Б., Шокаров Х.Б. // ЖЭТФ, 1975. – Т. 68. – Вып. 4. – С. 13.
2. Жекамухов М.К., Шокаров Х.Б. О механизме возникновения акустической эмиссии при кристаллизации и плавлении вещества. II часть // Инженерно-физический журнал. – Минск, 2000. – Т. 73. – № 5. – С. 1073-1079.

3. *Ланге П.К.* Сплайн-аппроксимация дискретных значений сигналов с применением методов цифровой фильтрации // Сб. трудов Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. –2003. – Вып. 19. – С. 134-138.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2012 г.

SYSTEM FOR MEASURING GRAIN SIZE OF METAL ALLOY USING APPROXIMATION SPECTRAL ANALYSIS OF SIGNAL OF ACOUSTIC EMISSION CRYSTALLIZATION

P.K. Lange, A.Ju. Jaroslavkin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443076

The problem of definition of the grain size of the metal alloy during its crystallization is considered in the paper. The approximation method of the spectral analysis of the signal of acoustic emission crystallization is described.

Keywords: *acoustic emission, crystallization, spectral characteristic, approximation, size.*

*Petr K. Lange (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander Ju. Jaroslavkin, postgraduate student.*