

САМООРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКЕ: АКУСТИЧЕСКИЙ СЕНСОРНЫЙ КОНТРОЛЬ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время в технологиях микросистем все шире применяются интенсивные методы обработки, в основу которых положено использование концентрированных источников энергии и вещества: лазерных, электронных, ионных, плазменных. При интенсивном воздействии на обрабатываемое изделие его поверхностный слой в короткое время поглощает значительное количество энергии, которая при аккумуляции образует в нем неравновесные диссипативные структуры. С течением времени данные структуры переходят в более устойчивое состояние термодинамического равновесия, при котором свободная энергия поверхностного слоя минимальна. Аккумулятивная структурами внутренняя энергия также уменьшается, а связанная энергия системы (представляющая собой произведение температуры на энтропию) возрастает. Происходящие при этом в поверхностном слое различные процессы самоорганизации (особенно при наложении их друг на друга), а также совместные воздействия внесенных и трансформированных потоков энергии и вещества ведут к образованию комплекса сложных структур.

Для изучения и понимания явлений самоорганизации в поверхностном слое при интенсивном воздействии на него в процессе обработки необходимо использование эффективных способов сенсорного контроля. Одним из таких способов служит измерение акустических колебаний, источником которых являются физические эффекты, сопровождающие выброс расплавленного материала из кратера, а также процессы в парогазовом канале над кратером. Возбуждаемые акустические колебания имеют широкий спектр частот, а их спектральная плотность зависит от параметров высокоэнергетического воздействия. Прием акустических колебаний производится с помощью пьезоэлектрического преобразователя, спектральная характеристика которого имеет достаточно сложную зависимость от частоты. В связи с вышеизложенным представляют интерес результаты исследования частотных характеристик пьезопреобразователя в режиме приема шумоподобных акустических колебаний. Высокую значимость имеет также решение задачи создания и изучения метода контроля самоорганизационных процессов путем установления корреляции между параметрами акустических сигналов и характеристикой поверхностных явлений при высокоэнергетической обработке.

Прием шумоподобных акустических колебаний пьезопреобразователем: анализ его спектральной характеристики. Выполнен расчет акустоэлектрических параметров плоского пьезоэлемента, наиболее часто используемого в сенсорном контроле акустических колебаний. При анализе работы плоского пьезопреобразователя в режиме приема шумовых акустических колебаний считается, что данные колебания, распространяющиеся в контролируемом образце, действуют только на одно из оснований пьезоэлемента ($z = 0$). Для установления распределения механического смещения по толщине пьезоэлемента решалось волновое уравнение

$$\rho \partial^2 \xi_z(z, t) / \partial t^2 = \bar{\mu} \partial^2 \xi_z(z, t) / \partial z^2 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} \xi_z(z, t) |_{z=0} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Xi_z(0, \omega) e^{j\omega t} d\omega, \\ (\partial \xi_z(z, t) / \partial z) |_{z=d} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где ρ — плотность материала; $\bar{\mu} = \mu + j\omega\eta$ — эффективный модуль упругости среды с потерями; η — эффективная вязкость среды; $\xi_z(z, t)$ — механическое смещение пьезоэлемента вдоль координаты z , перпендикулярной плоскости пьезоэлемента; t — время; d — толщина пьезоэлемента; ω — частота. Здесь $\Xi_z(0, \omega)$ — функция спектра Фурье возникающего механического смещения основания пьезоэлемента, удовлетворяющая условию:

$$\langle \Xi_z^*(0, \omega) \Xi_z(0, \omega') \rangle = S_{\xi_z}(0, \omega) \delta(\omega - \omega'), \quad (3)$$

$S_{\xi_z}(0, \omega)$ — спектральная плотность механического смещения основания пьезоэлемента.

Решение волнового уравнения (1) позволяет установить распределение спектральной плотности механического смещения по толщине пьезоэлемента в режиме приема:

$$S_{\xi_z}(z, \omega) = C[\cos^2(k(z-d)) + \text{sh}^2(\alpha(z-d))], \quad (4)$$

где $C = S_{\xi_z}(0, \omega) / [(\cos^2(kd) + \text{sh}^2(\alpha d))]$. Без учета акустических потерь в материале пьезоэлемента выражение (4) имеет вид:

$$S_{\xi_z}(z, \omega)|_{\alpha=0} = D \cos^2(k(z-d)), \quad (5)$$

где $D = S_{\xi_z}(0, \omega) / \cos^2(kd)$.

Рассчитаем электрическое напряжение $U(t)$, возникающее на электродах пьезоэлемента в первоначальный момент после воздействия на одно из его оснований акустических колебаний образца. Для этого используем уравнение пьезоэффекта для одномерного случая:

$$E_z(z, t) = \varepsilon_0 \varepsilon D_z(z, t) - h_{33} \sigma_z(z, t), \quad (6)$$

где $E_z(z, t)$ — компонента напряженности возбуждаемого электрического поля вдоль координаты z ; $D_z(z, t)$ — компонента электрического смещения вдоль координаты z ; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная; h_{33} — пьезо-константа. Учитывая, что $D_z(z, t)$ равно поверхностной плотности свободных зарядов, а за счет пьезоэффекта на электродах преобразователя возникают связанные заряды, в данном случае принимаем $D_z(z, t) = 0$. Проинтегрировав уравнение (6) по z от 0 до d , получим выражение для определения электрического напряжения на электродах пьезоэлемента:

$$U(t) = h_{33} [\xi_z(z, t)|_{z=d} - \xi_z(z, t)|_{z=0}]. \quad (7)$$

Переходя к спектральной плотности электрического напряжения, получим:

$$S_u(\omega) = Ch_{33}^2 (\text{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2, \quad (8)$$

или без учета акустических потерь:

$$S_u(\omega)|_{\alpha=0} = 4Dh_{33}^2 \sin^4(kd/2). \quad (9)$$

Как источник электрических сигналов пьезоэлектрический сенсор в режиме приема аналогичен конденсатору, емкость которого равна емкости заторможенного пьезоэлемента \tilde{N}_0 .

Учитывая это, можно найти ток $J(t) = \dot{N}_0 \partial U(t) / \partial t$, а также спектральную плотность тока $S_J(\omega)$, протекающего через пьезопреобразователь в режиме короткого замыкания:

$$S_J(\omega) = -Ch_{33}^2 \omega^2 (\text{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2. \quad (10)$$

Без учета потерь выражение (10) упрощается:

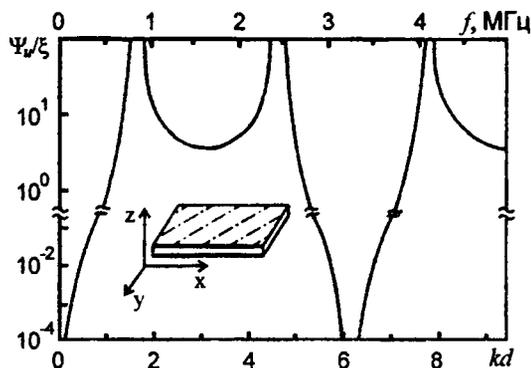


Рис. 1. Зависимость коэффициента трансформации спектра пьезоэлектрического сенсора от частоты колебаний.

$$S_J(\omega)|_{\alpha=0} = -4Dh_{33}^2 \omega^2 \sin^4(kd/2). \quad (11)$$

С целью анализа эффективности приема широкополосных акустических колебаний определим коэффициент трансформации спектра, равный отношению спектральной плотности электрического напряжения, возникающего на электродах, к спектральной плотности колебательного смещения основания пьезоэлемента:

$$\psi_{u/\xi} = S_u(\omega) / S_{\xi z}(0, \omega) h_{33}^2. \quad (12)$$

Подставив в (12) значение $S_u(\omega)$ из (8), получим:

$$\psi_{u/\xi} = [(\text{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2] / [\cos^2(kd) + \text{sh}^2(\alpha d)], \quad (13)$$

или без учета акустических потерь:

$$\psi_{u/\xi}|_{\alpha=0} = 4 \sin^4(kd/2) / \cos^2(kd). \quad (14)$$

Результаты расчета значений $\psi_{u/\xi}$ при разных kd для случая $\alpha = 0$ приведены на рис. 1, здесь же показана дополнительная шкала частот для конкретных параметров пьезоэлемента (ЦТС-19; $\bar{n} \approx 3,3 \cdot 10^3$ м/с; $d = 0,001$ м). Эффективность приема пьезопреобразователем акустических колебаний широкого спектра частот максимальна вблизи значений $kd = (2n-1)\pi/2$, которые соответствуют частотам $f_n = c(2n-1)/4d$. Для пьезоэлемента, рассматриваемого в качестве примера, эти частоты составляют 0,82; 2,47; 4,11, ... МГц.

Акустический контроль процесса самоорганизации поверхностных явлений при электронной обработке. В данном случае при постановке задачи по созданию метода акустического сенсорного контроля процесса электронной обработки учитывается сравнительно высокая сложность контролируемого объекта. Так, контролю подлежит относительно небольшой объем обрабатываемого электронным лучом материала – порядка 10 мм^3 . В указанном объеме обрабатываемого материала имеет место высокая концентрация энергии электронного потока – до 100 кВт. Далее, зона обработки как объект сенсорного контроля характеризуется наличием

твердой, жидкой и паровой фазы, а также непрерывными межфазовыми превращениями. Существенной особенностью, принимаемой во внимание всеми исследователями, является наличие турбулентного движения расплава в канале электронного воздействия. В свою очередь турбулентные перемещения материала порождают хаотические колебания в потоках квантов энергии и облаках микрочастиц, покидающих зону электронно-лучевой обработки. Анализ рассматриваемых физических процессов позволяет объяснить повышенный интерес к изучению частотного спектра акустических колебаний, возбуждаемых указанными потоками.

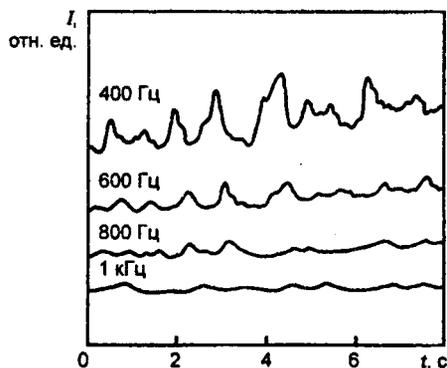


Рис. 2. Временное изменение выходного сигнала пьезопреобразователя в зависимости от частоты измерения.

Выполнялось изучение количественных зависимостей между параметрами акустических колебаний и геометрическими характеристиками продольного шва на поверхности экспериментальных образцов. Измерялся электрический сигнал с выхода плоского акустоэлектрического преобразователя из пьезокерамики ЦТС-19, помещаемого на поверхность экспериментальных образцов из конструкционной стали и алюминия. Указанные образцы подвергались обработке электронным лучом на установке EVS6015 Leybold Heraeus с параметрами $U_a=60$ кВ, $I_d \sim 40-60$ мА при скорости перемещения образца порядка 600 мм/мин. Размеры образцов составляли: длина – 200 мм, толщина – 20 мм; глубина проплавления при варьировании режимов обработки изменялась в пределах 2-20 мм. Электрические сигналы с выхода пьезопреобразователя записывались на магнитный носитель, а затем их параметры исследовались с помощью анализатора спектра. Спектральная плотность измерялась в частотном диапазоне от 0.2 до 600 кГц, ширина полосы сканирования составляла 400 Гц. Изменение выходного сигнала пьезопреобразователя со временем в зависимости от частоты измерения показано на рис. 2. На частотах ниже 1 кГц наблюдается ярко выраженное наложение инфразвуковых колебаний на измеряемый сигнал, причем инфразвуковая модуляция сигнала усиливается с понижением частоты наблюдения. Уменьшение амплитуды низкочастотных пульсаций и сглаживание временной зависимости выходного сигнала на частотах выше 1 кГц наблюдалось во всех опытах.

Наблюдается также взаимосвязь между амплитудой низкочастотных вариаций измеряемого сигнала и высотой рельефа продольного шлифа зоны обработки. Данный рельеф формируется при затвердевании жидкого металла, выбрасываемого из кратера в зоне электронной обработки. В предположении линейной регрессии между пульсациями рассматриваемых величин определяли коэффициент их корреляции, который в зависимости от выбора начальной точки сопоставляемых функций находится в пределах от 0,52 до 0,68. Предположение линейной регрессии оправдывается наилучшим образом при условии, когда акустический сигнал опережает сопоставляемую с ним точку профиля шва примерно на 250 мсек. Введение данного условия физически правдоподобно, так как продвижение теплового фронта при остывании металла после энергетического воздействия происходит медленнее, чем распространяются акустические колебания от зоны обработки.

С учетом обнаруженной взаимосвязи акустического сигнала с геометрическими параметрами шва проведена совместная обработка функций амплитуды изменения данного сигнала и высоты поверхности как временных рядов в предположении их стационарности и эргодичности. После высокочастотной фильтрации и дискретизации полученные данные обрабатывались с использованием компьютерной программы, позволяющей разделить запись сигналов на оп-

тимальные подинтервалы и провести сглаживание их краев. На следующем этапе обработки выполнялась быстрая Фурье-трансформация и грубая оценка спектра для каждого подинтервала. Затем производится приложение спектрального окна Гудмена и сглаживание по подинтервалам и, наконец, по частотам. В графической форме выводится значимая оценка спектра с высокой степенью свободы (более 30). Полученные указанным образом спектры при $U_a = 60$ кВ, $I_r \sim 60$ мА, скорости перемещения образца 600 мм/мин и неизменной фокусировке электронного луча представлены на рис. 3.

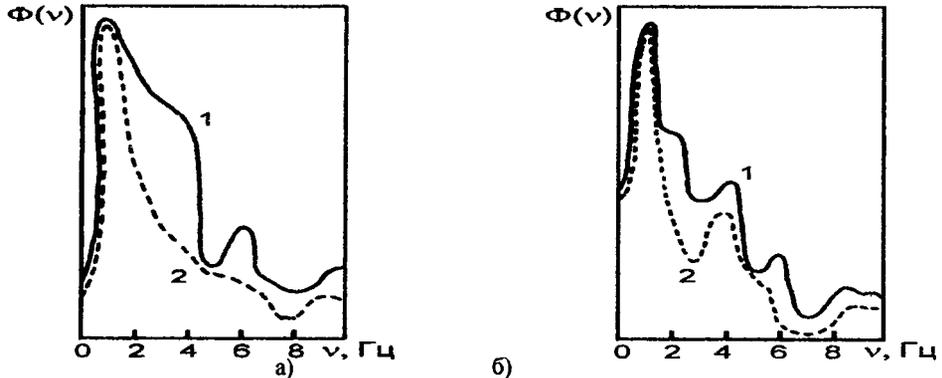


Рис. 3. Спектры функций, характеризующих изменение амплитуды акустического сигнала (кривые 1) и профиль шва (кривые 2) при электронной обработке стали (а) и алюминия (б)

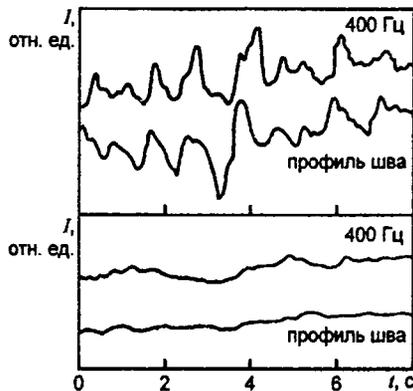


Рис. 4. Корреляция флуктуаций амплитуды акустических колебаний с изменениями профиля шва

Характерная особенность полученных зависимостей заключается в том, что для обоих обрабатываемых материалов мощность спектров имеет максимальное значение при частоте 1 Гц, при этом они демонстрируют высокую точность совпадения двух временных рядов. Это говорит о тесной причинной связи между процессом выбрасывания жидкого металла из кратера при электронно-лучевом воздействии и возникающими при этом акустическими колебаниями в образце. Взаимосвязь указанных процессов предопределяет высокую достоверность акустического сенсорного контроля явлений самоорганизации в зоне электронного воздействия. Наличие локального максимума на частоте порядка 6 кГц обусловлено вибрациями установки для электронно-лучевой обработки, которые порождаются ее движущимися частями и механизмами. Для примера на рис. 4 приведено изменение амплитуды акустических сигналов, полученных при электронно-лучевой обработке в двух режимах: при формировании шва с достаточно большими выбросами с частотой порядка 1 Гц (а); при образовании шва с мелкими и частыми чешуйками (б). В обоих случаях флуктуации амплитуды акустических колебаний низкой частоты хорошо коррелируют с изменениями величины выступов и впадин в профиле шва. Если учесть, что наличие различных дефектов шва, например, пор и пустот, связано с его профилем, то можно сделать вывод, что измерение акустических колебаний, параметры которых коррелируют с профилем шва, является эффективным методом сенсорного контроля качества электронной обработки.