

УДК 536.42

Велиев Давид Элманович, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ассистент; gotoindvdum@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕТАЛЛ

Аннотация. Сравнительный анализ различных режимов лазерной обработки металлов, основанный на анализе акустических колебаний из зоны обработки требует интерпретации исходного сигнала, которая позволит получить взаимосвязь полученных данных с показателями качества деталей.

Характер колебаний акустического сигнала из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом связан с его спектральной функцией преобразования Фурье. Данное преобразование описывает взаимосвязь между временными и спектральными характеристиками акустических сигналов одного и того же процесса.

Ключевые слова: Плотность энергии, лазерное излучение, преобразование Фурье, амплитуда, частота, спектр.

Введение. Амплитуда звукового сигнала при импульсной лазерной обработке деталей несёт в себе избыточное количество информации о параметрах технологического процесса обработки непосредственно из зоны воздействия в реальном времени. Амплитуда звукового сигнала характеризует плотность энергии единичного импульса лазерного излучения (ЛИ) и коэффициент его поглощения [1, с.153].

Сравнительный анализ сигнала с выхода при различных параметрах обработки требует выявления временных и частотных характеристик из исходного акустического сигнала. К этим характеристикам относятся временная функция сигнала, спектральная плотность сигнала, энергетический спектр. Эти характеристики позволяют определить параметры сигнала, влияющие на показатели качества технологического процесса: длительность; ширина спектра, особые точки функции спектра, значения частот гармонических составляющих; и энергия сигнала.

Уравнение энергетического баланса при воздействии ЛИ на металл

Процесс воздействия ЛИ на металлы можно описать энергетическим уравнением [2, с.85]:

$$W_{\text{ЛИ}} + W_{\text{наддува}} + W_{\text{свет. давл.}} = W_{\text{плавл.}} + W_{\text{мех. кол.}} + W_{\text{отраж.}} + W_{\text{кин.}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ЛИ}}$ – энергия подводимого ЛИ в зону обработки; $W_{\text{наддува}}$ – давление защитного газа; $W_{\text{свет. давл.}}$ – механическая энергия воздействия ЛИ на поверхность металла; $W_{\text{плавл.}}$ – энергия, затрачиваемая на плавление металла и его испарение; $W_{\text{мех. кол.}}$ – энергия механических колебаний ЛИ; $W_{\text{отраж.}}$ – отраженная энергия из зоны взаимодействия ЛИ с металлом; $W_{\text{кин.}}$ – энергия, затрачиваемая на вылет частиц расплавленного металла.

Подводимые энергии: $W_{\text{ЛИ}}$ – энергия подводимого ЛИ в зону обработки;
 $W_{\text{наддува}} = m v^2 / 2$ – энергия давления защитного газа.

Расходуемые энергии: $W_{\text{плавл.}} = c\gamma(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div } \vec{W}$, где $\vec{W} = -\lambda_T(T) \overrightarrow{\text{grad}} T$ – тепловой поток; λ_T – коэффициент теплопроводности; $W_{\text{отраж.}}$ – отраженная энергия (составляет около 30% от мощности ЛИ, так как температура металла превышает температуру плавления и коэффициент поглощения составляет 0,7); $W_{\text{мех. кол.}} = h\nu_{\text{фот}}$ – энергия, затрачиваемая на возбуждение механических колебаний в металле (составляет 5-6% от мощности ЛИ); $W_{\text{кин.}} = m v^2 / 2$ – энергия, затрачиваемая на вылет частиц расплавленного металла.

Математическая модель температурного поля в зоне взаимодействия.

В общем виде уравнение теплопроводности описывается следующим выражением [3, с.304]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + Q, \quad (2)$$

где Q – удельное количество теплоты, выделяемое тепловым источником; ΔT – изменение температуры.

С учетом начальных и краевых условий, а также нелинейного изменения теплофизических свойств материала, преобразуем выражение (2) в систему уравнений, в состав которой входит дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_T(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] - \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_T(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right] - \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_T(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right] = 0, \quad (3)$$

где $c(T)$ – зависимость теплоемкости от температуры; $l_T(T)$ – зависимость теплопроводности от температуры.

Выражения, описывающие тепловой обмен на границах тела с окружающей средой, выглядят следующим образом:

$$q_T = \begin{cases} \alpha_T(T)(T-T_0), x=l_x, y=l_y, z=l_z, \\ -\alpha_T(T)(T-T_0), \{z=0, (x,y) \notin g\}, x=-l_x, y=-l_y, \\ 0, y=0 \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha_T(T)$ – зависимость коэффициента полной поверхностной теплоотдачи от температуры; T_0 – температура окружающей среды; T – температура поверхности; q_T – удельный тепловой поток вблизи границы тела.

Математическая модель температурного поля с учетом допущений позволяет без ущерба для точности получаемых результатов заменить трехмерную задачу плоской.

Расчеты, проведенные по математической модели, позволили выявить диапазон изменения технологических параметров лазерного технологического комплекса, таких как энергия, диаметр пятна ЛИ, распределение интенсивности излучения в зоне нагрева для заданных технических характеристик ЛТК [3, с.305]. Здесь представлены термические циклы элементарных объемов материала на различной глубине от поверхности.

Проведенный анализ возможных путей управления параметрами термических циклов показал, что наиболее эффективным способом является изменение распределения плотности энергии и длительности импульса ЛИ в пятне нагрева.

Сравнительные параметры сигнала.

Амплитудный спектр типичного акустического сигнала из зоны обработки представлен на рисунке 1. Над исходным сигналом было выполнено дискретное преобразование Фурье и произведен переход в частотную область сигнала.



Рис. 1. Амплитудный спектр сигнала

Амплитудный спектр сигнала имеет характерный вид затухающей функции с основным лепестком, в котором сосредоточена большая часть энергии сигнала, на фоне других сигналов в спектре и шумов.

Сигнал, полученный из зоны обработки, имеет конечную длительность, которая ограничена временным интервалом, определяемым длительностью импульса лазерного излучения, а его спектральная функция ограничена преобразованием Фурье на оси частот [4, с.9]. Ширину спектра сигнала выбираем исходя из соотношения U_c к $U_{ш}$, поэтому характеристикой информационного сигнала является эффективная ширина спектра, определяющая информативность и качество системы управления.

При анализе сигнала из зоны обработки основное требование предъявляется к обнаружению информативного сигнала, несущего в себе информацию о качестве технологического процесса [5, с.47].

Для восстановления сигнала по его спектру в эффективной полосе частот необходимо выполнить обратное преобразование Фурье, и совершить, таким образом, переход из частотной области сигнала во временную. Исходный и отфильтрованный сигнал на интервале частот, в котором сосредоточена большая часть энергии, показан на рис. 2.

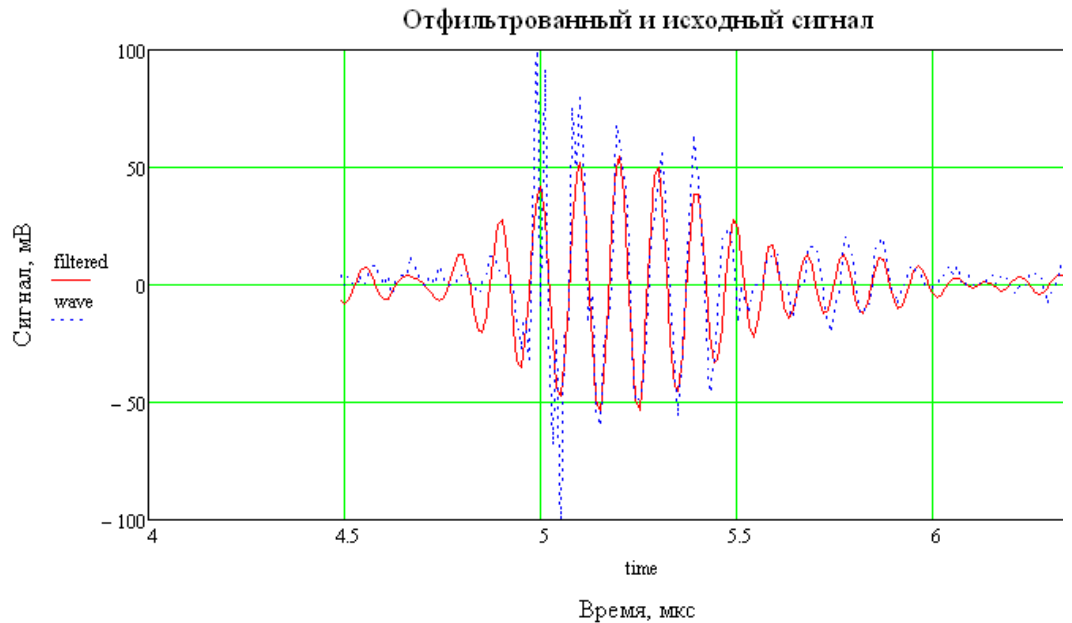


Рис. 2. Отфильтрованный и исходный сигнал

Обработка и анализ данных.

Образцы из материала Сталь 45 обрабатывались импульсным лазерным излучением длительностью 0.5 мкс. Плотность мощности лазерного излучения в ходе эксперимента менялась от $7.87 \cdot 10^8$ до $1.28 \cdot 10^{10}$ Вт/см², диаметр фокуса луча — 0.5 и 1 мм. Плотность мощности была рассчитана по формуле:

$$G = \frac{E \cdot 4}{\tau \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (5)$$

где E — энергия лазерного излучения, τ — длительность импульса, d — диаметр пятна лазерного излучения.

Полученные данные были преобразованы и обработаны по предложенному методу. Выполнив регрессионный анализ, были получены данные, показанные на рисунках 3 и 4.

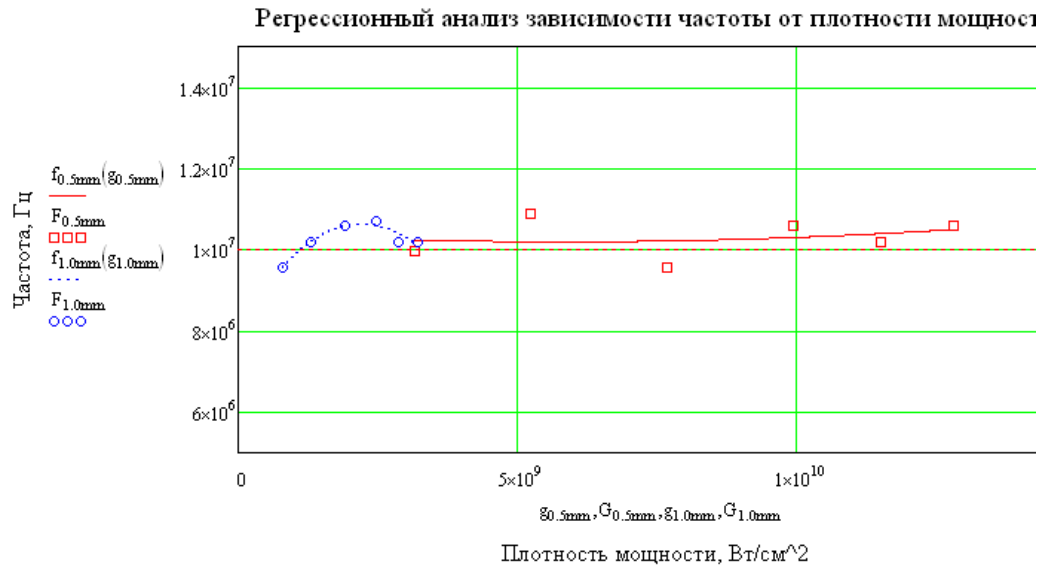


Рис. 3. Регрессионный анализ зависимости частоты от плотности мощности лазерного излучения

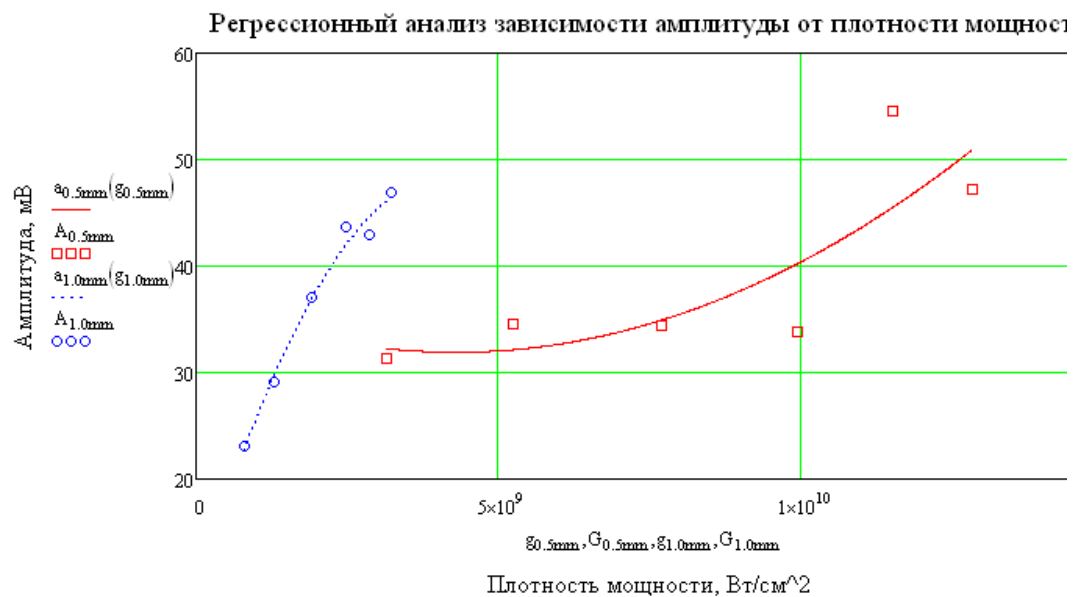


Рис 4. Регрессионный анализ зависимости амплитуды от плотности мощности лазерного излучения

Из полученных данных видно, что изменение плотности мощности излучения слабо отражается на частоте акустических колебаний, ее значение колеблется около положения в 10^7 Гц. Амплитуда, в отличие от частоты,

напрямую зависит от плотности мощности. Подобные зависимости частоты и амплитуды согласуются с математическими расчетами и численным моделированием.

Заключение.

В статье рассмотрен способ проведения анализа акустического сигнала из зоны взаимодействия лазерного излучения с металлом и получения его частотных, временных и энергетических параметров – длительность, ширина спектра, особые точки спектра, значения частот гармонических составляющих, энергия сигнала. Анализ полученных в ходе экспериментов данных показал, что изменение плотности мощности лазерного излучения при обработке металлического образца слабо отражается на частоте акустического сигнала из зоны обработки, но напрямую влияет на рост давления акустического сигнала. Выявленные зависимости частоты и амплитуды сигнала от плотности мощности соответствуют теоретическим исследованиям в данном направлении и позволяют в дальнейшем использовать полученные данные для автоматизации управления процессом обработки лазерным излучением, повышения эффективности такой обработки и прогнозирования показателей качества выполняемого технологического процесса.

Литература.

1. Велиев Д.Э. Сравнительный анализ экспериментальных данных акустических колебаний при лазерной термообработке металлов / Велиев Д.Э., Звездин В.В., Галанина Н.А. // «Научная дискуссия: вопросы технических наук»: материалы VIII международной заочной научно-практической конференции. (04 апреля 2013 г.) – Москва: Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. – 152 с.
2. Звездин В.В. Позиционирование лазерного излучения относительно сварного шва как показатель качества технологического процесса / В.В. Звездин, А. В. Хамадеев, Р. Г. Загиров, И. Р. Шангараев // Вестник КГТУ им. Туполева, 2008. –

№ 3. – С. 84 – 85.

3. Шангараев И.Р. Способ управления процессом лазерной прошивки отверстий в сталях на основе анализа ультразвуковых колебаний / Шангараев И.Р., Велиев Д.Э., Галанина Н.А., Звездин В.В. // Вестник Чувашского университета. 2013. № 3. — Чебоксары: Изд. «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», 2013г. – с. 302-306.
4. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б. Спектральный и временной анализ импульсных и периодических сигналов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 95.: ил.
5. Israphilov I.H. Management electrostatic field depth laser hardening in metals / I.H. Israphilov, V.A. Pesoshin, V.V. Zvezdin, D.A. Bashmakov // Herald KSTU. A.N. Tupolev. - 2010. №2 - pp 47-48

Veliev David Elmanovich, Kazan Federal University Naberezhnye Chelny Institute, assistant; gotoindvdum@gmail.com

STUDY OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF THE ACOUSTIC SIGNAL IN PULSE LASER RADIATION EFFECTS ON METAL

Annotation. Comparative analysis of various modes of metal laser processing based on the analysis of acoustic vibrations from the machining area requires interpretation of the original signal which allows revealing the interrelation of the data received with indicators of the parts quality.

The nature of acoustic signal oscillations from the area of laser radiation interaction with the metal is connected with its spectral function of the Fourier transform. This transformation describes the relationship between time and spectral characteristics of the acoustic signals of the same process.

Keywords: Energy density, laser radiation, the Fourier transform, amplitude, frequency, spectrum.