

УДК 620.179.17

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ ОБРАЗЫ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

© К. А. Степанова¹, Д. О. Кузиванов², А. В. Федоров²,
И. Ю. Кинжагулов²

¹ Учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации
космической техники»,

197343, Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57, лит. А

² Национальный исследовательский университет ИТМО,

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

E-mail: ledy.xs93@yandex.ru

Представлены результаты формирования акустико-эмиссионных образов процессов, происходящих при прямом лазерном выращивании. В рамках экспериментального исследования на различных режимах проведено выращивание образцов из порошкового сплава ЭП 648 с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии. По результатам анализа параметров зарегистрированных сигналов сформированы их характерные паттерны распределения при лазерном выращивании бездефектных и дефектного образцов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, контроль в процессе производства, неразрушающий контроль.

DOI: 10.15372/AUT20240412

EDN: SMYCVL

Введение. В настоящее время широко распространено применение аддитивных технологий в аэрокосмической и других областях промышленности. Одной из актуальных проблем при производстве крупногабаритных сложнопрофильных изделий, в том числе выполненных технологией прямого лазерного выращивания (ПЛВ) [1], является высокая трудоёмкость проведения неразрушающего контроля (НК) готовых изделий. Возможное решение данной проблемы состоит в автоматизации НК, что ведёт за собой, в свою очередь, снижение точности проводимых измерений. Однако существует и другой подход к снижению трудоёмкости НК — выявление дефектных областей ещё на стадии выплавки изделия, которые могут быть обнаружены с помощью метода акустической эмиссии (АЭ) [2–4].

Целью представленной работы являлось формирование акустико-эмиссионных образов выплавки каждого участка готового изделия, которые существенно снизят затрачиваемое время на выявление дефектов в готовых изделиях.

Методы и материалы. Для проведения исследования составлен экспериментальный стенд (рис. 1), состоящий из следующих технических средств:

- роботизированная установка 1 прямого лазерного выращивания «ИЛИСТ-L»;
- акустико-эмиссионная система СЦАД-16.10;
- четыре преобразователя 4 АЭ (ПАЭ) ПК 0.1-0.7 с полосой пропускания 100–700 кГц, каждый из которых подключался к предусилителю сигналов АЭ с коэффициентом усиления 40 дБ, а затем через кабельные трассы — к измерительной плате СЦАД-16.10;
- пять металлических подложек 3 для выращивания образцов, расположенные на предметном столе 2 установки для ПЛВ;
- металлический порошок из жаропрочной стали ЭП 648.

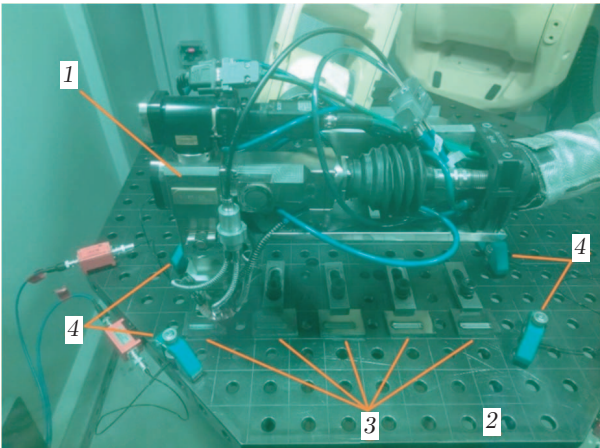


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда

Таблица

Режимы выплавления образцов

Номер образца	Мощность излучения лазера, Вт	Скорость прохода лазера, мм/с
1	800	5
2	1000	
3	1200	
4	1400	
5	1600	

Акустико-эмиссионная система СЦАД-16.10 предназначена для записи АЭ-информации. Среди преимуществ микропроцессорной многоканальной АЭ-системы СЦАД-16.10 следует отметить то, что частота оцифровки сигналов может программно изменяться до 8 МГц, а регистрация сигналов производится с плавающими порогами [5]. Введение плавающих порогов селекции позволяет при увеличении амплитуды входного сигнала автоматически уменьшать коэффициент усиления для того, чтобы каждый измерительный канал не перешёл в режим насыщения. При уменьшении амплитуды входного сигнала коэффициент усиления измерительного канала автоматически увеличивается, что обеспечивает необходимую чувствительность системы [6].

Акустико-эмиссионное оборудование обладает высокой чувствительностью к протеканию химических реакций в процессе структурных изменений материала, в том числе при кристаллизации и застывании сварных соединений [7–9]. Процессы, происходящие в материале при ПЛВ, схожи с процессами при сварке, что обеспечивает потенциальную применимость АЭ-метода контроля для определения роста дефектов в изделии в процессе его выращивания.

В ходе эксперимента выплавлялись пять образцов в форме параллелепипеда с размерами 40 × 40 × 100 мм с режимами работы оборудования для ПЛВ, представленными в таблице. Известно, что завышенное значение мощности излучения лазера приводит к образованию в готовом изделии трещин и пор [10], при этом должны меняться получаемые акустико-эмиссионные образы. Для выплавления каждого из образцов потребовалось 50 одинаковых проходов.

Результаты эксперимента. Перед началом выплавления образцов проведена запись сигналов АЭ-шумов в процессе ПЛВ: подача порошка на металлическую подложку (рис. 2, а, b) и механические шумы при движении оборудования (рис. 2, с, d). Данные свидетельствуют о том, доминантные значения частот АЭ-сигналов, полученных от шумов, не превышают 250 кГц, что видно по их спектрам (рис. 3), а их амплитуда в среднем не

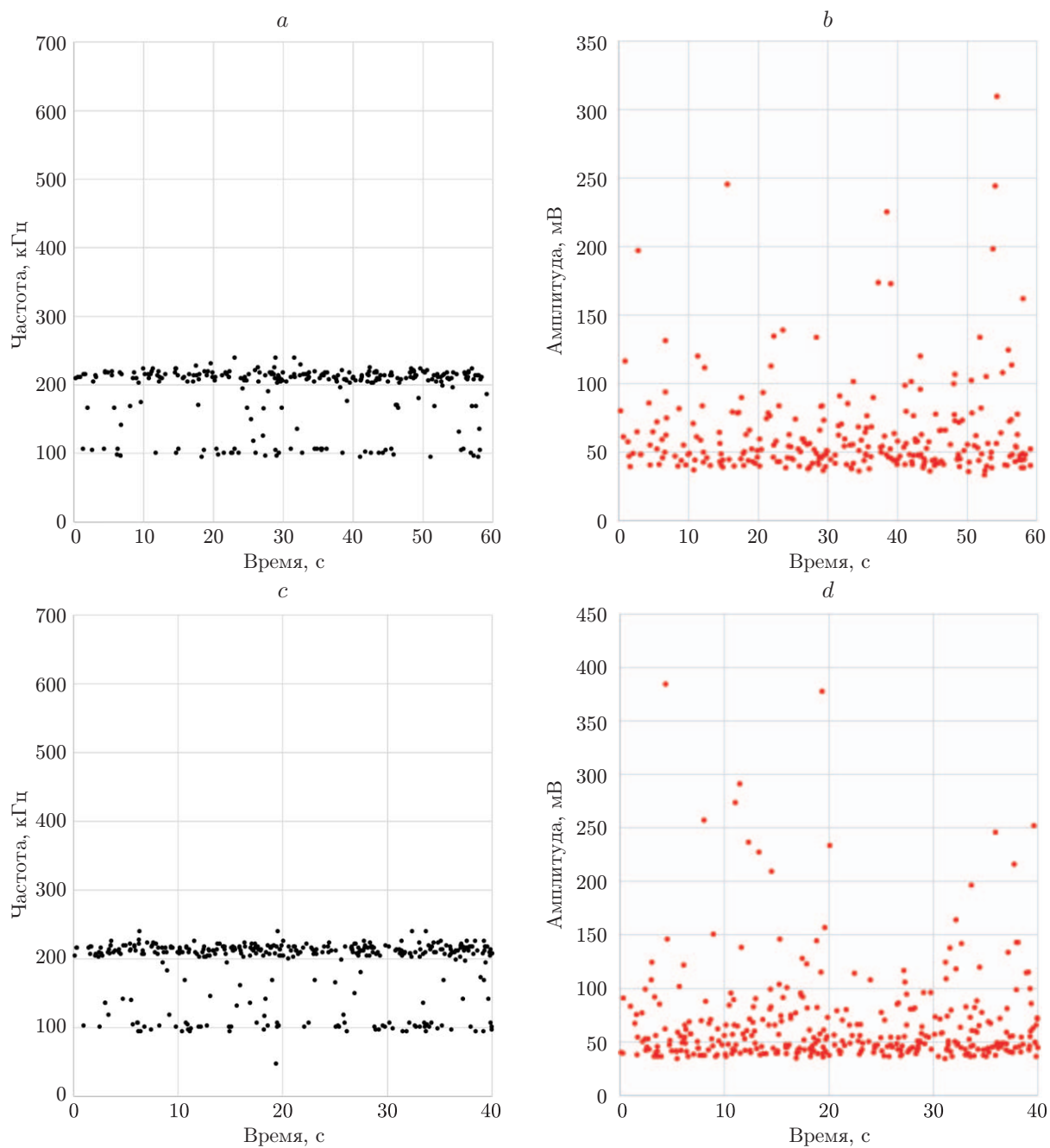


Рис. 2. Распределение значений доминантных частот и амплитуд АЭ-сигналов за время регистрации акустического шума: *a*, *b* — при подаче порошка на металлическую подложку; *c*, *d* — механические шумы при движении оборудования

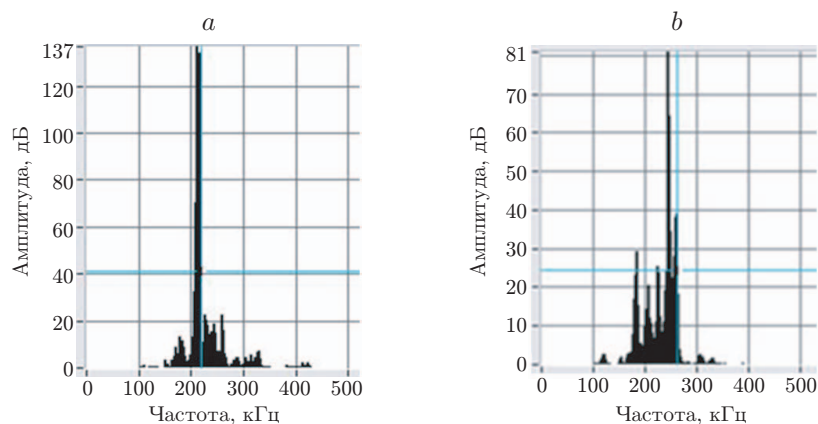


Рис. 3. Спектры АЭ-сигналов, полученных при записи шумов: *a* — при подаче порошка на металлическую подложку, *b* — механические шумы оборудования для ПЛВ

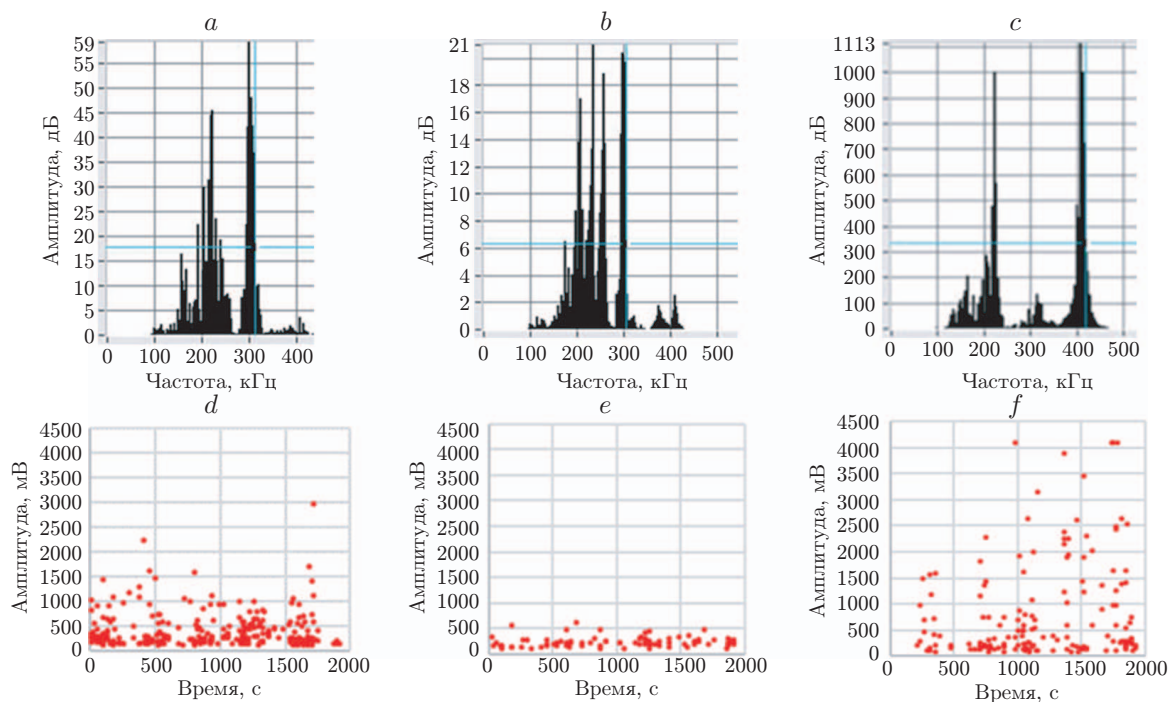


Рис. 4. Акустико-эмиссионные образы при контроле в процессе ПЛВ: *a* — спектр сигналов при контроле образца № 1; *b* — спектр сигналов при контроле образцов № 2–4; *c* — спектр сигналов при контроле образца № 5; *d* — распределение амплитуды сигналов за время регистрации при контроле образца № 1; *e* — распределение амплитуды сигналов за время регистрации при контроле образцов № 2–4; *f* — распределение амплитуды сигналов за время регистрации при контроле образца № 5

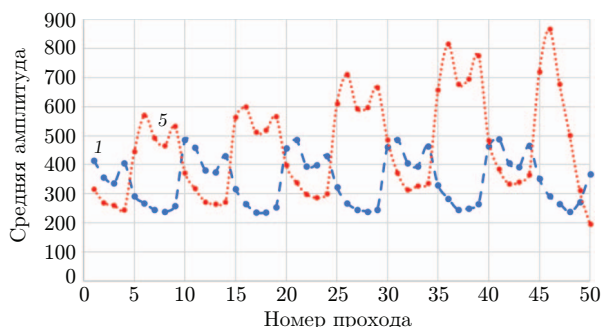


Рис. 5. Акустико-эмиссионные образы среднего значения АЭ-амплитуды за каждый проход при выплавлении образцов (1 и 5 — данные при контроле образцов № 1 и 5 соответственно)

превышает 100 мВ. Сигналы схожего характера целесообразно отфильтровать при постобработке полученных данных.

Данные, полученные после регистрации акустико-эмиссионных данных при выращивании образцов, приведены на рис. 4. Время регистрации АЭ-данных совпадало с временем выращивания образцов. Установлено, что спектры зарегистрированных сигналов при контроле образцов № 1–4 имеют характерную схожесть: доминантные значения частот расположены в диапазоне 300 ± 20 кГц. При этом амплитуда сигналов, зарегистрированных при выращивании образцов № 2–4 значительно ниже, чем при контроле образца № 1, что объясняется их отдалённостью от ПАЭ. Если же сравнивать АЭ-данные при контроле образцов № 1 и № 5, выращивание которых происходило на одинаковом расстоянии от ПАЭ, можно отметить, что амплитуда сигналов АЭ при контроле образца № 5 за время регистрации 1000–2000 с значительно выше, а значение доминантных частот данных сигналов располагается в диапазоне 410 ± 20 кГц.

При анализе счёта и амплитуды АЭ за каждый проход выплавления установлено, что счёт АЭ за время регистрации каждого из проходов оставался практически неизменным, однако среднее значение амплитуды АЭ (рис. 5) и суммарная амплитуда АЭ при контроле проходов выращивания образца № 5 выше (на 70 и 100 % соответственно), чем при контроле образца № 1, что говорит о возможном образовании дефектов в образце № 5. Распределение среднего значения амплитуды АЭ при контроле проходов выращивания образцов № 1–3 составило 200–300 мВ.

Для подтверждения результатов контроля и отмеченных закономерностей проведён металлографический анализ микрошлифов темплетов всех образцов, изображения которых приведены на рис. 6. На рисунке видно наличие двух трещин в образце № 5, протяжён-

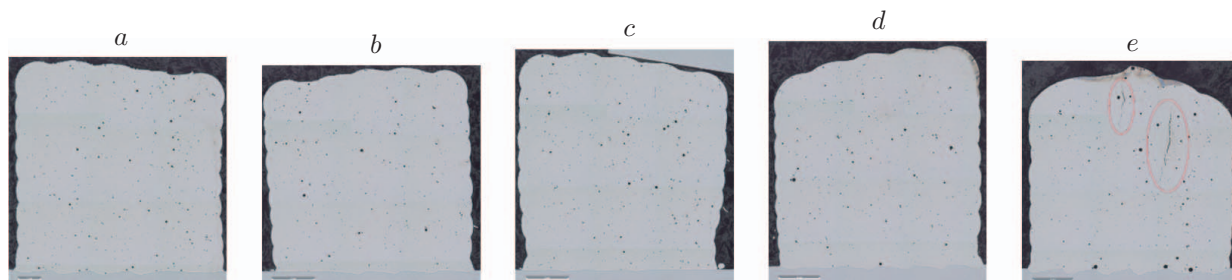


Рис. 6. Металлографический анализ образца: а — № 1; б — № 2; в — № 3; д — № 4; е — № 5

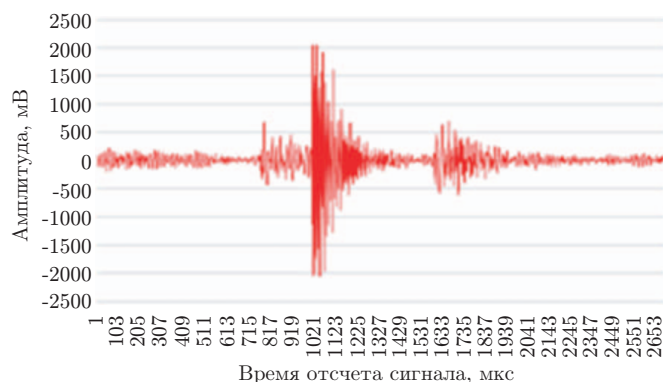


Рис. 7. Форма АЭ-сигнала, зарегистрированного при достижении значения амплитуды АЭ 4095 мВ

ность которых составляет 207 (под поверхностью образца) и 440 мкм (на глубине 112 мкм от поверхности образца), причём их положение в образце говорит о том, что дефектная область образовалась примерно во второй половине времени, которое было затрачено на выплавление, что соотносится с временем регистрации высокоамплитудных сигналов АЭ с частотным спектром, приведённым на рис. 4, с.

В результате анализа форм сигнала АЭ зафиксировано, что по истечении 1000 с (половины времени выращивания образца) происходит повышение доли импульсов АЭ высокой амплитуды с малой длительностью переднего фронта. Данные параметры АЭ-импульсов характерны для источников АЭ, связанных с развитием трещин в условиях механического нагружения образцов из исследуемых материалов. Характерная форма сигналов АЭ, зарегистрированных при достижении значения амплитуды АЭ 4095 мВ (порог регистрации системы) в процессе контроля ПЛВ образца № 5, приведена на рис. 7.

Заключение. В ходе работы выявлены АЭ-образы шумов при ПЛВ, по которым была проведена фильтрация сигналов после выплавления пяти образцов, в одном из которых по результатам металлографического анализа обнаружены две трещины. Время регистрации высокоамплитудных сигналов АЭ при контроле образца № 5 соотнесено с выращиваемой в это же время областью дефектного образца, что подтверждает как применимость полученных АЭ-образов, так и применимость метода АЭ при контроле изготавливаемых методом ПЛВ образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 57589-2017.** Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы – часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. Введ. 2017-09-08. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
2. **Kouprianoff D., Yadroitsava I., Plessis A. et al.** Monitoring of Laser Powder Bed Fusion by Acoustic Emission: Investigation of Single Tracks and Layers // *Front. Mech. Eng.* 2021. **7**. P. 1–17.
3. **Eschner N., Weiser L., Häfner B., Lanza G.** Development of an acoustic process monitoring system for selective laser melting (SLM) // *Proc. of the 29th Annual Int. Solid Freeform Fabrication Symposium — An Additive Manufacturing Conference.* Austin, USA, 13–15 Aug., 2018. P. 2097–2117.
4. **Khairallah S. A., Sun T., Simonds B. J.** Onset of periodic oscillations as a precursor of a transition to pore-generating turbulence in laser melting // *Addit. Manuf. Lett.* 2021. **1**. 100002.

5. **Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С.** Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки. Новосибирск: Наука, 2018. 272 с.
6. **Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И.** Акустико-эмиссионная система для регистрации непрерывных и дискретных сигналов // Датчики и системы. 2010. № 8. С. 55–59.
7. **Пат. 2156456 РФ.** Способ обнаружения в процессе сварки дефектов в сварных швах и определения их местоположения по акустическим сигналам / В. А. Гуменюк, Ю. Г. Иванов, Н. А. Казаков, О. М. Палий, В. М. Пашин, В. Е. Спиро, В. А. Сульженко, А. В. Яковлев. Опубл. 20.09.2000.
8. **Степанова Л. Н., Канифадин К. В., Лазненко С. А.** Исследование источников сигналов акустической эмиссии при остывании сварного шва с использованием кластерного анализа // Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 73–82.
9. **Баринов А. В., Федоров А. В., Кинжагулов И. Ю. и др.** Контроль качества сварных соединений в процессе сварки с применением метода акустической эмиссии // Науч.-техн. вестн. ИТМО. 2013. **87**, № 5. С. 144–148.
10. **Shevchik S. A., Kenel C., Leinenbach C., Wasmer K.** Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks // Add. Manuf. 2018. **21**. P. 598–604.

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 14.05.2024

Принята к публикации 05.07.2024
