
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING AND DIAGNOSING MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

УДК 620. 179.17

DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868

МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Е. Алтай^{1*}, Д. О. Кузиванов², Д. А. Рождественский³, М. И. Санников³, К. А. Степанова⁴

¹*Национальный центр государственной научно-технической экспертизы, Алматы, Казахстан*
^{*}*aeldos@inbox.ru*

²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

³*НЦМУ „Передовые цифровые технологии“ СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия*

⁴*Научно-технический центр „Эталон“, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Представлены результаты акусто-эмиссионного контроля дефектообразования в изделиях при прямом лазерном выращивании. Рассмотрены особенности применения метода акустической эмиссии и обработки результатов регистрации сигналов акустической эмиссии с использованием каскадной полиномиальной цифровой фильтрации. Приведены результаты экспериментальной апробации метода каскадной фильтрации для обнаружения таких дефектов внутренней структуры, как трещины и поры. Выделены фрагменты амплитудно-временных и частотно-временных диаграмм сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при развитии дефектов в процессе выращивания изделий. Выполнена оценка зависимости сигналов акустической эмиссии от параметров дефектообразования. Установлена взаимосвязь между параметрами сигналов акустической эмиссии и мощностью излучения лазера (характеризует процесс дефектообразования), а также содержанием азота в порошке жаропрочного сплава.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контроль дефектообразования, аддитивное производство, прямое лазерное выращивание, фильтрация, мощность лазера, металлография, хром-никелевый сплав, сигнал

Благодарности: исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению „Передовые цифровые технологии“ СПбГМТУ (соглашение от 20.04.2022 № 075-15-2022-312).

Ссылка для цитирования: Алтай Е., Кузиванов Д. О., Рождественский Д. А., Санников М. И., Степанова К. А. Методы фильтрации сигналов акустической эмиссии при контроле дефектообразования в процессе прямого лазерного выращивания изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 852—868. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868.

METHODS FOR FILTERING ACOUSTIC EMISSION SIGNALS WHEN MONITORING DEFECT FORMATION IN THE PROCESS OF DIRECT LASER GROWTH OF PRODUCTS

Ye. Altay^{1*}, D. O. Kuzivanov², D. A. Rozhdestvensky³, M. I. Sannikov³, K. A. Stepanova⁴

¹*National Center of Science and Technology Evaluation, Almaty, Republic of Kazakhstan*
^{*}*aeldos@inbox.ru*

²*ITMO University, St. Petersburg, Russia*

³World-class Scientific Center of Advanced Digital Technologies SMTU, St. Petersburg, Russia⁴Scientific and Technical Center Etalon, St. Petersburg, Russia

Abstract. Results of acoustic emission monitoring of defect formation in products during direct laser growth are presented. The features of applying the acoustic emission method and results of processing recorded acoustic emission signals with the use of cascade polynomial digital filtering are considered. Results of experimental testing of the cascade filtration method for detecting internal structure defects such as cracks and pores are presented. Fragments of amplitude-time and frequency-time diagrams of acoustic emission signals recorded during the development of defects in the process of growing products are isolated. An assessment is made of the dependence of acoustic emission signals on defect formation parameters. A relationship between the acoustic emission signals parameters and applied laser radiation power is established, which characterizes the process of defect formation, as well as the nitrogen content in the heat-resistant alloy powder.

Keywords: acoustic emission, defect formation testing, additive manufacturing, direct laser growth, filtering, laser power, metallography, chromium-nickel alloy, signal

Acknowledgment: The research was carried out with the financial support of the Russian Ministry of Education and Science as part of the implementation of the program of the world-class Scientific Center in the direction of "Advanced Digital Technologies" of St. Petersburg State Marine Technical University (agreement dated April 20, 2022, No. 075-15-2022-312).

For citation: Altay Ye., Kuzivanov D. O., Rozhdestvensky D. A., Sannikov M. I., Stepanova K. A. Methods for filtering acoustic emission signals when monitoring defect formation in the process of direct laser growth of products. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 852—868 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868.

Введение. В связи с развитием аддитивного производства (АП) возникает потребность в применении методов контроля изделий, изготовленных с использованием аддитивных технологий (АТ), на всех этапах их жизненного цикла [1, 2]. Это обусловлено тем, что надежность и эксплуатационные характеристики зависят от наличия в изделиях, изготовленных с применением АТ, структурных неоднородностей и несплошностей [1]. Основными типами дефектов металлических изделий, изготовленных с применением АТ, являются трещины, пористость, несплавления, неметаллические включения, локальное и общее смещение слоев и избыточная шероховатость. Для металлических изделий АП трещины и пористость наиболее критичны [1], так как могут привести к разрушению изделия в условиях эксплуатационных нагрузок. Появление перечисленных типов дефектов в изделиях АП особенно характерно для прямого лазерного выращивания (ПЛВ).

ПЛВ является одним из перспективных методов АП. Его отличительная особенность — изготовление изделий и прототипов из различных материалов [3]. Суть метода ПЛВ заключается в послойном последовательном выплавлении порошкового металла с помощью лазерного излучения [3]. В качестве наплавочного материала используются различные сферические металлические порошки на основе цинка, бронзы, стали, титана, хрома, никеля и др. [3, 4]. Необходимо подчеркнуть, что качество изделия и образование в нем дефектов влияют не только свойства порошкового материала, но и особенности процесса ПЛВ [5—8]: технологические свойства порошкового материала и технологические параметры ПЛВ, в первую очередь, энергия лазера, скорость сканирования лазерного луча и температура платформы, применяемой для ПЛВ.

Установлено, что при ПЛВ мощность энергии лазерного излучения вносит существенный вклад в избирательное сплавление металлических порошков [6, 8]. Следовательно, основными факторами, определяющими качество изделий ПЛВ, являются мощность излучения лазера, свойства порошка и скорость прохода лазера [8]. Также следует подчеркнуть, что от мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ напрямую зависит состояние расплава металлических порошков и затвердевание расплавленного металла, что оказывает существенное влияние на тип и размер формируемых дефектов, характеристики которых также могут зависеть от технологических свойств металлических порошков [5, 9, 10]. Для изготовления изделий наиболее широко используются жаропрочные хром-никелевые сплавы

следующих видов: ЭП648, ЭП74 и Hastelloy X [5, 11, 12]. Согласно многочисленным исследованиям [5, 9—12], перечисленные сплавы различаются по фракционному составу, массовой доли химических элементов, морфологии частиц и прочим характеристикам. При этом выбор металлического порошка, наиболее подходящего по устойчивости к коррозии, жаропрочности, пластичности и морфологии частиц (не более 50 мкм [7, 11, 12]) для изготовления изделий АП на основе метода ПЛВ, является нетривиальной задачей. Несмотря на выявленные особенности изготовления изделий АП, необходимо подбирать жаропрочный металлический порошок под конкретную задачу, а неразрушающий контроль процесса дефектообразования в выращиваемых изделиях является актуальной и важной задачей, решение которой требует комплексного подхода.

В работах [1, 2, 8, 13, 14] для контроля процесса дефектообразования исследуемых изделий предложены методы акустического и оптического контроля. Наиболее перспективным для контроля внутренних дефектов, а именно трещинообразования и порообразования, проходящих при послойном расплавлении порошкового материала, считается метод акустической эмиссии (АЭ), чувствительный к внутренней перестройке структуры материала изделий в процессе изготовления [13, 14].

Оптический метод контроля процесса дефектообразования считается также перспективным и особенно важным для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов изготовленных изделий [1]. В связи с этим экспериментальные исследования, направленные на изучение процесса образования дефектов в изделиях АП на основе метода АЭ, актуальны и перспективны с точки зрения обеспечения неразрушающего контроля.

Сложность практического применения метода АЭ состоит в неизбежном влиянии помех [15] на информативную составляющую сигналов АЭ [16], что существенно снижает отношение акустического сигнала к влияющей помехе и затрудняет поиск ассоциации параметров АЭ с источником АЭ [17]. Для преодоления этой сложности в настоящей статье обосновано применение ранее разработанного метода полиномиальной цифровой фильтрации сигналов АЭ на основе фильтра верхних частот (ФВЧ) [16, 18], аппроксимированного полиномом Баттервортса второй степени $n = 2$. Этот метод обеспечивает устойчивую фильтрацию натурных сигналов АЭ с требуемыми показателями качества фильтра (время переходного процесса, перерегулирование, коэффициент усиления) [16], что подтверждается размещением корневых локусов (нuleй и полюсов) внутри единичного круга на правой части комплексной плоскости.

Выбор этого метода обоснован возможностью проведения высокоточной фильтрации при минимальных искажениях информативной составляющей формы сигнала АЭ [17], а также устойчивостью к искажающему действию помех [16—18] при представлении отфильтрованных сигналов в частотно-временной области.

Одним из способов представления результатов обработки АЭ-данных после их фильтрации является частотно-временной анализ сигналов [15]. Необходимость [19] применения методов частотно-временного анализа связана с возможностью визуализации высокочастотных компонентов сигналов АЭ по времени, а низкочастотных составляющих — по частоте. Для частотно-временной обработки сигналов АЭ широко применяются методы преобразования Фурье, вейвлета и Гильберта—Хуанга [20]. Перечисленные методы аналитически взаимосвязаны [21], но зависят от свойств анализируемого сигнала. Например, вейвлет-преобразование дает возможность анализировать нелинейные и нестационарные участки сигналов [21] и представлять их в виде вейвлетных скалограмм, применение которых расширяет возможности визуализации данных АЭ-контроля [15, 19]. Поэтому в настоящей работе для представления результатов обработки сигналов АЭ в частотно-временной области использованы вейвлет-скалограммы.

В настоящей работе представлены результаты АЭ-контроля процесса порообразования и трещинообразования в изделиях при их ПЛВ на основе использования обработки зарегистри-

рированных зашумленных сигналов АЭ методом полиномиальной каскадной фильтрации с последующим частотно-временным анализом. Также в работе приведена статистическая оценка влияния различных режимов ПЛВ и состава порошка сплава на образование дефектов.

Цель исследований — повышение эффективности обработки и анализа сигналов АЭ при контроле дефектообразования за счет применения полиномиальной цифровой фильтрации, а также разработка модели влияния выбранных факторов на диагностический параметр АЭ.

Статистическая модель, характеризующая влияние различных режимов мощности излучения лазера и химического состава сферического порошка сплава ЭП648, разработана на основе метода регрессионного анализа. Выбор связан с работоспособностью и высокой чувствительностью этого метода к анализируемым данным контроля [22, 23], а также с отсутствием требований по специальному обучению выборок, полученных при контроле [24].

Технологические свойства порошков, используемых в АП. При производстве изделий АП, эксплуатируемых в условиях воздействия высоких температур, широко применяются жаропрочные хром-никелевые сплавы [5, 9—12, 25, 26]. По результатам анализа работ [25, 26] были выявлены основные характеристики сплавов, полученные на основе методов, представленных на рис. 1.

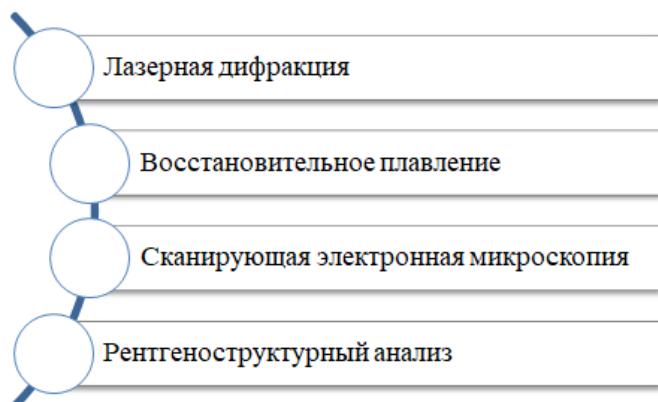


Рис. 1

В результате анализа технологических свойств различных жаропрочных сплавов [5, 11, 12, 25, 26] установлено, что образцы порошков имеют однофазный аустенитный состав с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой из-за содержания легирующих элементов: хрома более 18 % и никеля — 8 % [26]. За счет содержания легирующих элементов и низкого содержания кислорода порошок ЭП648, в отличие от ЭП741 и Hastelloy, устойчив к коррозии, пластическим деформациям и высоким температурам [11, 12, 26], чем и обоснован выбор именно этого сплава. Размер частиц (диаметр) данного сферического порошка не превышает 50 мкм [11, 26], что способствует малому распределению частиц по гранулометрическому составу [7] и уменьшению пористости изготавливаемых изделий [8]. Однако в порошке сплава ЭП648 содержится азот в диапазоне от 0,109 до 0,111 % [12, 26], это может способствовать появлению трещин в готовом изделии [12], что также необходимо учитывать при изготовлении изделий методом ПЛВ. Влияние состава сферического порошка сплавов на изготавливаемые изделия также отмечалось в работах [7, 8, 27]. Для дальнейших этапов исследования обоснован выбор ЭП648 (вследствие объема содержащегося в нем азота) в качестве предиктора, влияющего на процесс трещинообразования. Таким образом, анализ работ [5, 9—12, 25, 26], посвященных оценке хром-никелевых сплавов, показал, что наиболее коррозионностойким, пластичным и жаропрочным является материал ЭП648, поэтому в настоящей работе на нем остановлен выбор для проведения исследований.

Регистрация и анализ зашумленных сигналов АЭ. Для проведения АЭ-контроля в качестве измерительного средства использовалась акусто-эмиссионная система СЦАД 16.10 с комплектом преобразователей акустической эмиссии ПК 0.1-0.7. ПЛВ выполнялось с помощью роботизированной установки ИЛИСТ-L [28], состоящей из производственной камеры, двухосевого вращателя, наплавочной головки, робота-манипулятора, системы подготовки и подачи порошка и наплавочного сопла [28]. При послойном выращивании изделий сигналы АЭ регистрировались непосредственно во время лазерного выращивания.

В рамках экспериментальных исследований были выращены пять образцов в форме параллелепипеда при различных режимах/значениях мощности излучения лазера: 800, 1000, 1200, 1400, 1600 Вт. Каждый образец выращивался на алюминиевой подложке, закрепленной на предметном столе в производственной камере роботизированной установки ИЛИСТ-L (рис. 2) под наплавочной головкой. АЭ-события регистрировались последовательно при выращивании каждого образца. За все время выращивания образцов зарегистрировано 20 натурных сигналов АЭ.

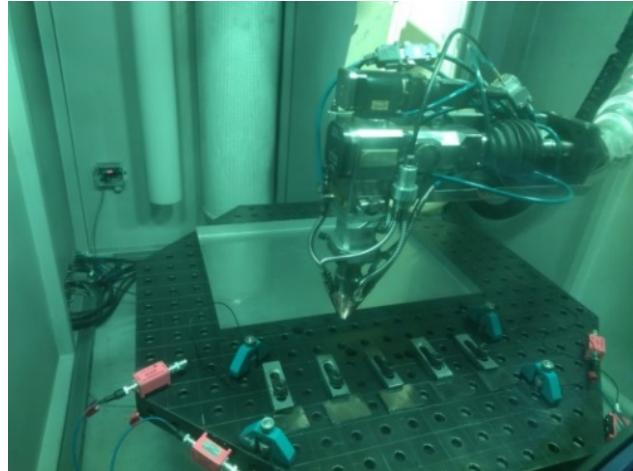


Рис. 2

Для отделения информативной составляющей от помехи предварительно был записан сигнал, возникающий от перемещения манипулятора роботизированной установки ПЛВ (эта помеха наиболее существенно искажает информативную составляющую [29]). На рис. 3 представлены амплитудно-временная диаграмма помехи при ПЛВ (a; q — отсчеты) и ее частотный спектр (б).

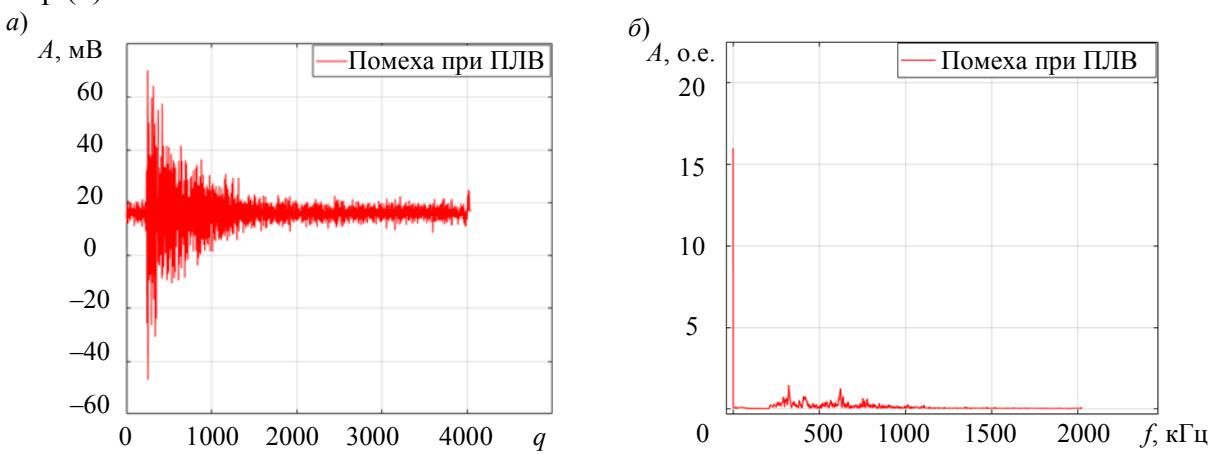


Рис. 3

На рис. 4 проиллюстрированы характеристики одного из зашумленных сигналов АЭ при ПЛВ (а — до фильтрации; б — частотный спектр). Совместный анализ частотных спектров позволил обосновать выбор частоты среза фильтра для проведения обработки и дальнейшего анализа сигналов АЭ.

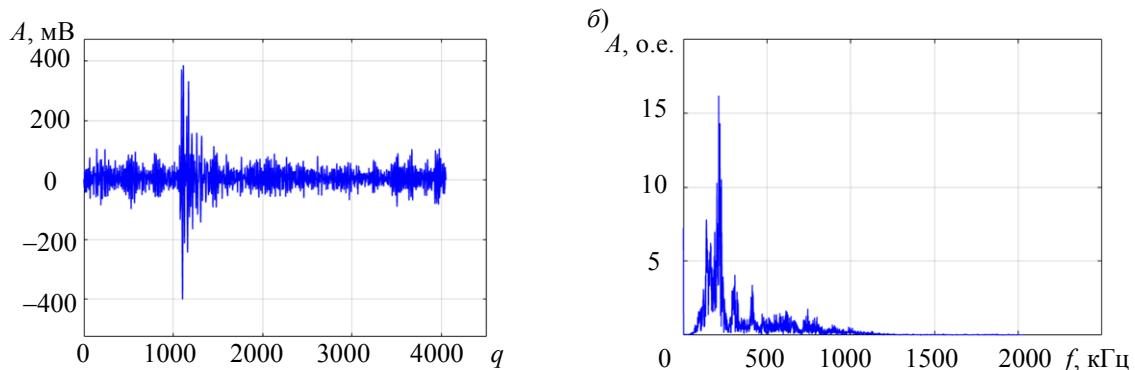


Рис. 4

Сравнительный анализ характеристик зарегистрированных сигналов, представленных на рис. 3 и 4, выявил, что частотная составляющая выше 1000 кГц относится к помехе, а составляющая от 90 до 250 кГц — к информативной. Полученные результаты экспериментальной оценки частоты информативной составляющей сигнала и помехи совпадают с результатами работы [29], в которой отмечено, что частота сигналов, характеризующих процесс трещинообразования, может находиться в диапазоне 100—250 кГц [29].

Согласно многочисленным исследованиям [27, 30, 31], частота сигналов АЭ от порообразования находится ниже уровня 100 кГц. Это позволяет обосновать выбор нижней (до 100 кГц) и верхней (до 250 кГц) границы частотного диапазона для настройки двух ФВЧ с целью выделения сигнала АЭ трещинообразования, порообразования и подавления помех, частот, локализованных на спектре выше 250 кГц.

Обработка и анализ сигналов АЭ, зарегистрированных при дефектообразовании. Обработка сигналов АЭ проводилась в два этапа. *Этап 1* включал расчет передаточных функций ФВЧ и их анализ, разработку схемы каскадной двунаправленной фильтрации для выделения сигналов АЭ от дефектов и их визуализацию в частотно-временной области. *Этап 2* включал в себя анализ и оценку диагностического параметра АЭ, характеризующего процесс дефектообразования.

Этап 1. Рассчитанные передаточные функции непрерывных ФВЧ Баттервортса и их билинейное преобразование представлены в табл. 1.

Таблица 1

Передаточная функция рассчитанных фильтров верхних частот

| Каскад фильтров | Передаточные функции ФВЧ | |
|-------------------------|---|---|
| | непрерывная, $W(s)$ | дискретная, $W(z)$ |
| ФВЧ при $f_c = 100$ кГц | $\frac{s^2}{s^2 + 0,06364s + 0,002025}$ | $\frac{0,9687z^2 - 1,937z + 0,9687}{z^2 - 1,936z + 0,9384}$ |
| ФВЧ при $f_c = 250$ кГц | $\frac{s^2}{s^2 + 0,1768s + 0,01563}$ | $\frac{0,9155z^2 - 1,831z + 0,9155}{z^2 - 1,824z + 0,8382}$ |

П р и м е ч а н и е : s — комплексная переменная непрерывной передаточной функции фильтра; z — комплексная переменная дискретной передаточной функции фильтра

Проведенный анализ показателей качества показал, что цифровые ФВЧ, настроенные на частоту среза 100 и 250 кГц, являются устойчивыми, коэффициент их усиления на частотах среза составляет 0,7. Корни-полюса и корни-нули рассчитанных фильтров локализованы на локусах полюса $p_{1,2} = 0,968 \pm 0,0308i$ для $f_c = 100$ кГц и $p_{1,2} = 0,912 \pm 0,080i$ для $f_c = 250$ кГц, а также на локусах нуля на $z = 0,999 \approx 1$. Анализ подтверждает локализацию корней передаточной функции ФВЧ внутри единичного круга, а именно на правой части комплексной z плоскости, и фильтры считаются устойчивыми для проведения каскадной фильтрации натурных сигналов АЭ.

Каскадная двунаправленная фильтрация реализована в программном продукте MatLab версии R2017b согласно структурной схеме, представленной на рис. 5.

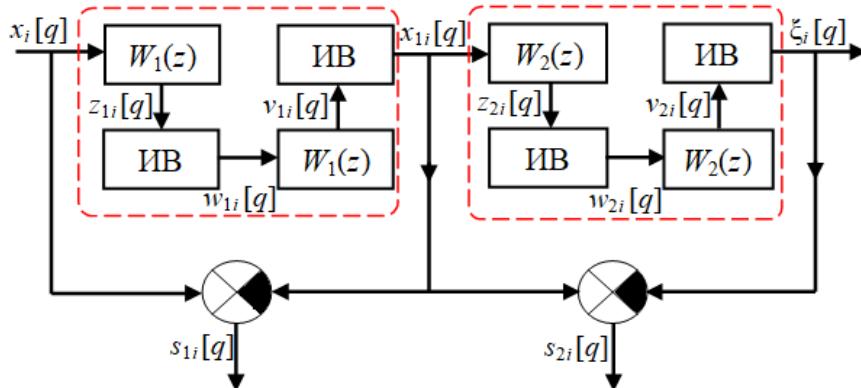


Рис. 5

Согласно разработанной структурной схеме, при двунаправленной фильтрации входная последовательность зашумленных сигналов i АЭ обрабатывается фильтрами $z_{1i}[q]$ и $z_{2i}[q]$ первой и второй последовательности в прямом направлении, затем с помощью блока инверсии времени (ИВ) изменяется порядок следования отсчетов $w_{1i}[q]$ и $w_{2i}[q]$ отфильтрованных сигналов на обратный. Полученные отсчеты сигналов i АЭ обрабатываются в обратном направлении $v_{1i}[q]$ и $v_{2i}[q]$ с помощью $W_1(z)$ и $W_2(z)$, затем окончательная инверсия времени на выходе блока ИВ приводит к изменению порядка следования отсчетов на обратный. На выходе блока ИВ вносимые искажения фильтрами взаимно компенсируются и формируются соответствующие сигналы.

Введение блока „сумматор-вычитатель“ обеспечивает формирование сигналов от дефектов конкретного типа, например, сигнал $s_{1i}[q]$ характеризует процесс порообразования, а $s_{2i}[q]$ — трещинообразования. Сигналы $\xi_i[q]$ являются только высокочастотной помехой, влияющей на характеристики параметров АЭ. Разделение сигналов АЭ на $s_{1i}[q]$ и $s_{2i}[q]$ также позволяет количественно оценить отношение данных информативных сигналов к помехе $\xi_i[q]$ аналогично [17] отношению сигнал/помеха (ОСП). Оцененные таким образом показатели характеризуют повышение качества обработки сигнала на выходе каждой последовательности каскада фильтров. Результат оценки показателя ОСП представлен на рис. 6 в виде диаграммы Тьюки, иллюстрирующей повышение результативности обработки сигнала АЭ.

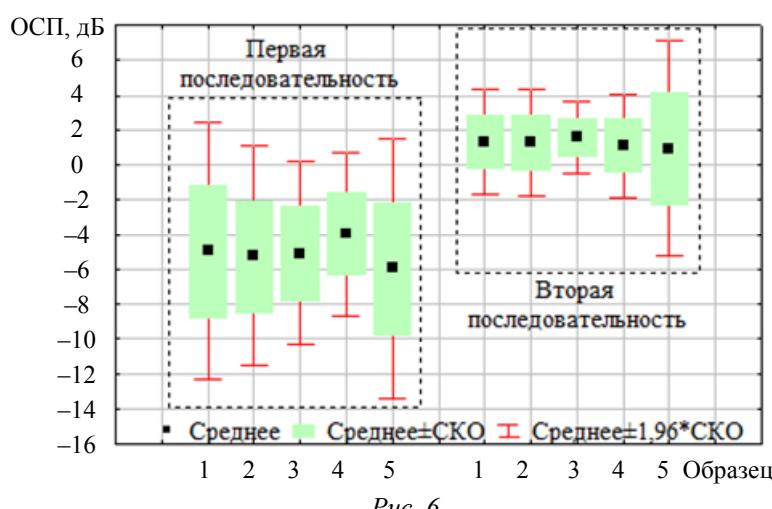


Рис. 6

Результаты каскадной фильтрации показали, что среднее значение ОСП на выходе ФВЧ повышается, что подтверждает различимость значений этого показателя и повышение результативности обработки сигнала. Вместе с тем различимость значений экспериментального показателя ОСП на выходе каждого ФВЧ подтверждается статистикой T -теста (табл. 2;

M — математическое ожидание, СКО — среднеквадратическое отклонение, p — коэффициент статистической значимости), где данные АЭ-контроля от дефектов представлены в виде групп (первая и вторая последовательность).

Таблица 2

**Различие значений показателя ОСП
на выходе каждой последовательности каскада фильтров**

| Образец | $M \pm \text{СКО}$, дБ | | p |
|---------|---------------------------|---------------------------|-------|
| | первая последовательность | вторая последовательность | |
| 1 | $-4,957 \pm 3,779$ | $1,335 \pm 1,519$ | 0,034 |
| 2 | $-5,267 \pm 3,222$ | $1,298 \pm 1,574$ | 0,015 |
| 3 | $-5,093 \pm 2,699$ | $1,593 \pm 1,058$ | 0,013 |
| 4 | $-3,959 \pm 2,396$ | $1,119 \pm 1,518$ | 0,007 |
| 5 | $-5,949 \pm 3,808$ | $0,938 \pm 3,168$ | 0,001 |

П р и м е ч а н и е : показатели статистически значимы при $p < 0,1$

Среднее значение ОСП для каждого образца, рассчитанное на выходе первой последовательности каскада фильтров, статистически значимо отличается от среднего значения ОСП второй последовательности. Следует отметить, что отрицательный показатель ОСП на выходе первой последовательности каскада фильтров обусловлен меньшим значением амплитуды выделенного сигнала АЭ по отношению к амплитуде помехи.

В работе [32] отмечалось, что отрицательное или низкое значение показателя, характеризующего ослабление помехи на выходе каскада фильтров для низкоамплитудных сигналов сложной формы и структуры, обусловлено тем, что амплитуда измеренных сигналов АЭ [33] ниже, чем амплитуда помехи [15]. Это также подтверждает корректность проведенной оценки данного показателя.

Различимость максимальных значений амплитуды сигналов АЭ, полученных от пор и трещин, несложно заметить из рис. 7 (*а—г* — образец № 1; *д—з* — № 5).

Результаты анализа показали, что сигналы АЭ от пор (рис. 7, *б* и *е*) и трещин (рис. 7, *в* и *ж*) по форме и характеристике отличаются друг от друга, а также от зашумленного сигнала (рис. 7, *а* и *д*). При этом максимальная амплитуда сигналов на образце № 5 намного выше, чем на № 1. Форма сигнала АЭ для всех образцов подобна форме сигнала дискретной акустической эмиссии, а форма выделенного сигнала помехи (рис. 7, *г* и *з*) содержит смесь акустической и непрерывной помех, которые обусловлены перемещением манипулятора роботизированной установки и влиянием мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ, что не противоречит результатам [29].

Результаты анализа частотно-временных характеристик сигналов, представленных на рис. 8 (*а—г* — образец № 1; *д—з* — № 5), показали, что на выходе цифровых фильтров идентифицируются сигналы АЭ от порообразования (рис. 8, *б* и *е*) и трещинообразования (рис. 8, *в* и *ж*), где их информативная составляющая (рис. 8, *а* и *д*) „замаскирована“ помеховой.

Вейвлет-скалограмма информативных сигналов АЭ от пор и трещин (рис. 8, *б* и *е*, а также *в* и *ж*) отличается от вейвлет-скалограммы исходного сигнала, так как после фильтрации повышается результативность обработки. Стоит отметить, что частотно-временные домены на диаграммах сигналов помех (рис. 8, *а* и *г*, а также *д* и *з*) совпадают. Это подтверждает корректность всех процедур фильтрации, реализованных внутри разработанной схемы каскадной двунаправленной фильтрации.

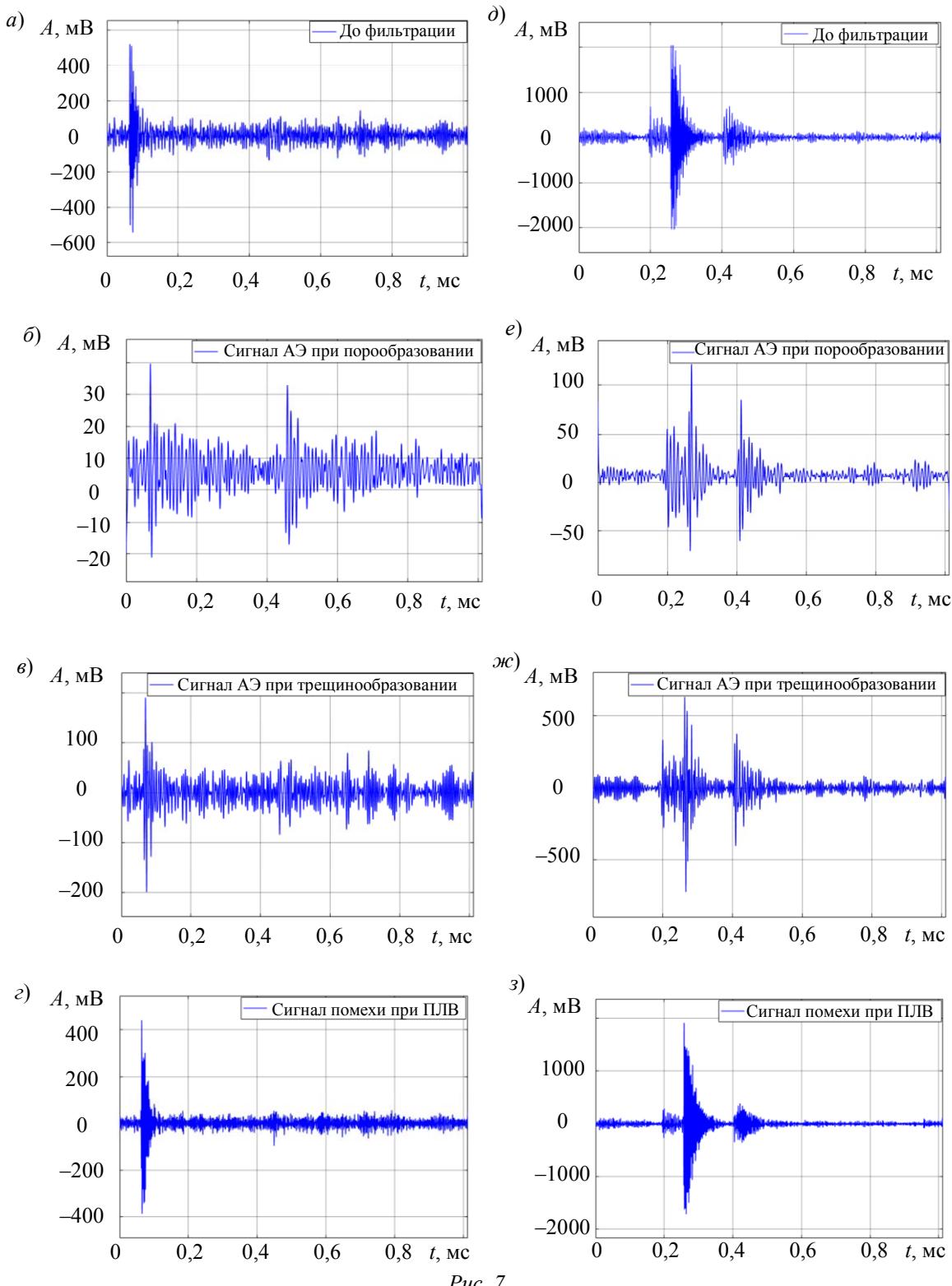


Рис. 7

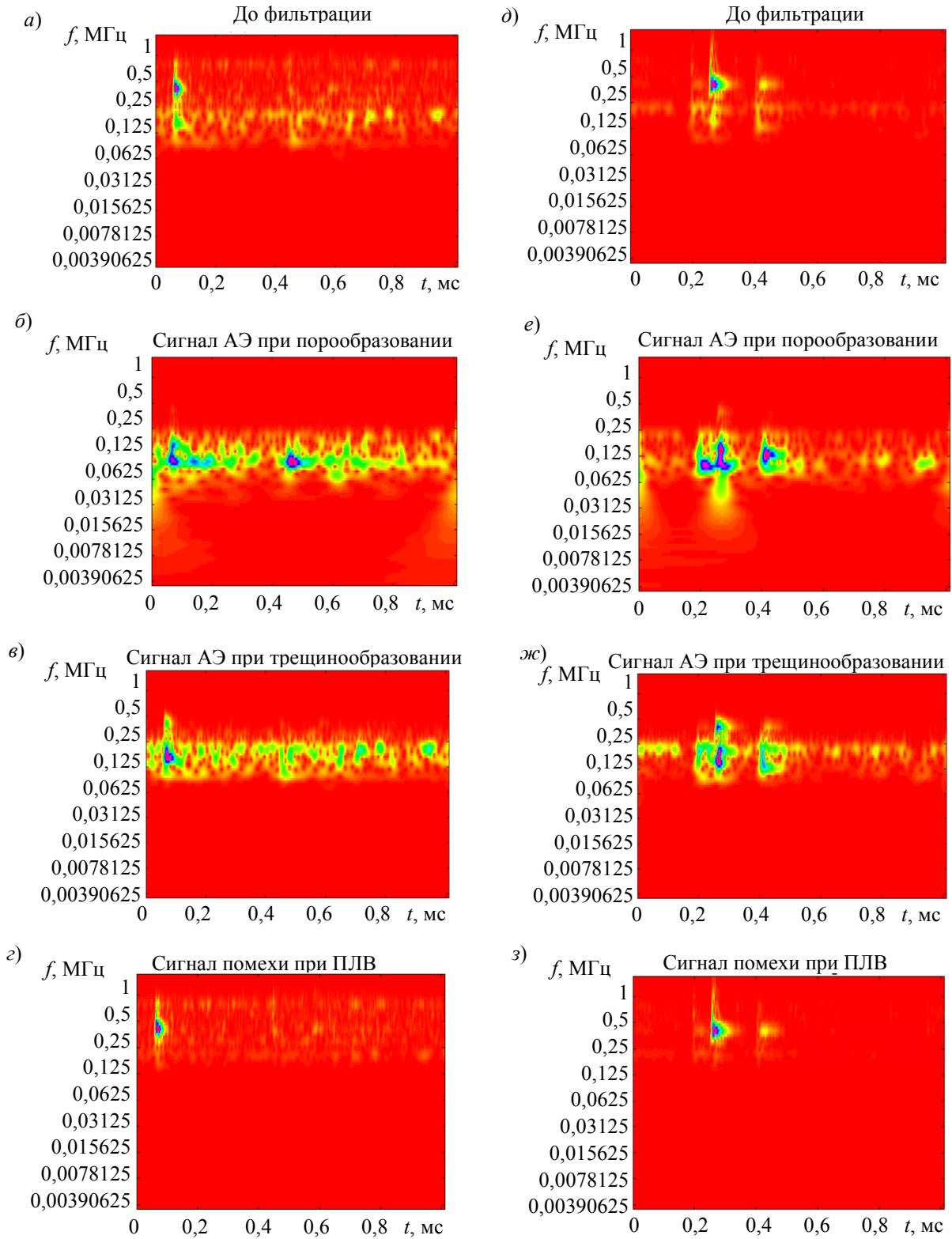


Рис. 8

Этап 2. На этом этапе выявлено, что с увеличением мощности лазера ПЛВ в испытуемых образцах увеличивается число пор и трещин, которые оказывают значительное влияние на параметры АЭ. Это влияние несложно заметить на рис. 9 и 10 (*а* — до обработки; *б* — АЭ от порообразования; *в* — АЭ от дефектообразования), где максимальная амплитуда АЭ для образца № 5 (рис. 10) значительно выше, чем для образца № 1 (рис. 9), что также показывает различимость амплитуды АЭ при сравнении с результатами до фильтрации (табл. 3).

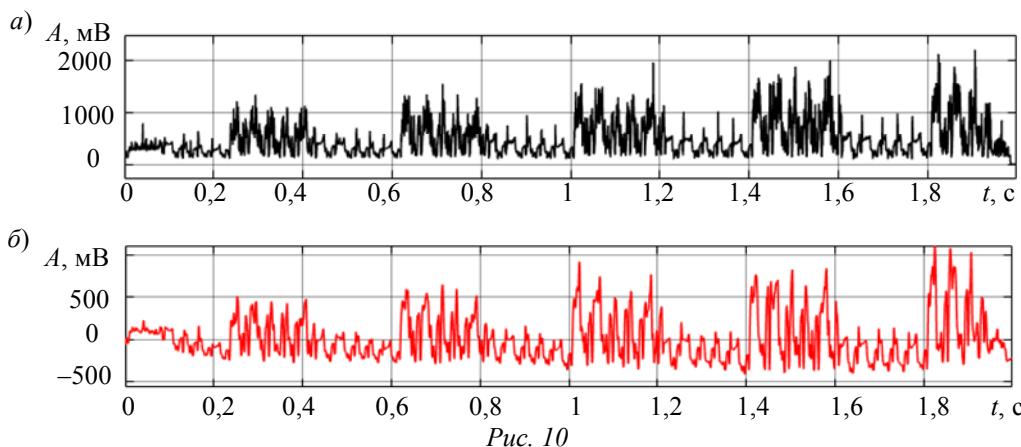
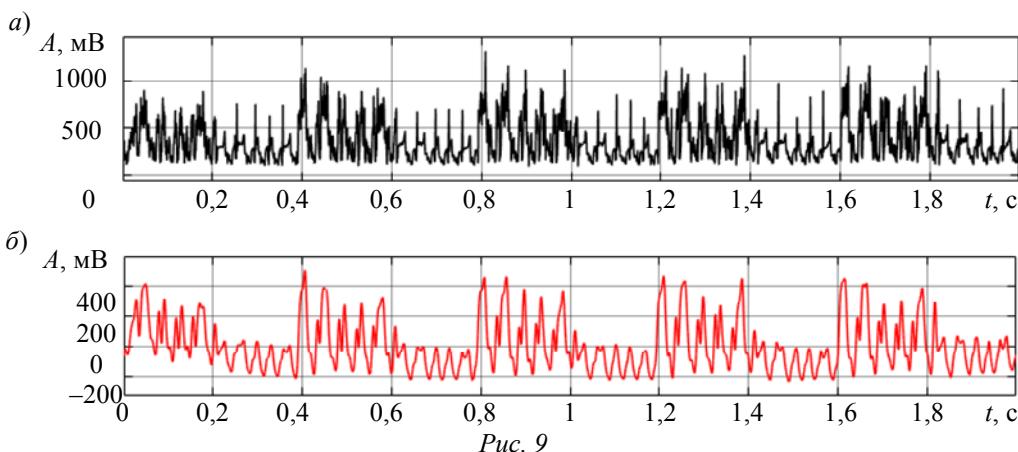
Таблица 3

Характеристики амплитуды АЭ по каналам

| Образец | $M \pm \text{СКО}$, мВ | | | |
|---------|--|--|--|--|
| | до обработки | порообразование | трещинообразование | помехи |
| 1 | 2402,000 \pm 1217,335 $p = 0,029^*$ | 632,068 \pm 467,251 $p = 0,073^*$ | 418,181 \pm 292,325 $p = 0,064^*$ | 155,288 \pm 695,665 $p = 0,020^*$ |
| | $p = 0,019^{**}$ | | $p = 0,024^{**}$ | $p = 0,048^{**}$ |
| 2 | 1712,500 \pm 706,873 $p = 0,016^*$ | 467,817 \pm 132,935 $p = 0,005^*$ | 422,652 \pm 93,120 $p = 0,002^*$ | 993,767 \pm 453,865 $p = 0,022^*$ |
| | $p = 0,024^{**}$ | | $p = 0,026^{**}$ | $p = 0,011^{**}$ |
| 3 | 2000,750 \pm 794,011 $p = 0,015^*$ | 492,749 \pm 216,329 $p = 0,019^*$ | 428,969 \pm 504,904 $p = 0,013^*$ | 106,367 \pm 440,299 $p = 0,016^*$ |
| | $p = 0,013^{**}$ | | $p = 0,015^{**}$ | $p = 0,013^{**}$ |
| 4 | 2205,750 \pm 995,030 $p = 0,021^*$ | 600,711 \pm 101,621 $p = 0,001^*$ | 504,904 \pm 116,576 $p = 0,003^*$ | 131,271 \pm 586,070 $p = 0,020^*$ |
| | $p = 0,045^{**}$ | | $p = 0,046^{**}$ | $p = 0,022^{**}$ |
| 5 | 2433,500 \pm 1492,962 $p = 0,047^*$ | 872,869 \pm 914,056 $p = 0,012^*$ | 646,229 \pm 688,105 $p = 0,015^*$ | 164,222 \pm 107,397 $p = 0,055^*$ |
| | $p = 0,032^{**}$ | | $p = 0,036^{**}$ | $p = 0,032^{**}$ |

П р и м е ч а н и е : * — различие средних значений амплитуды между каналами,

** — различие амплитуды до и после реализации метода фильтрации



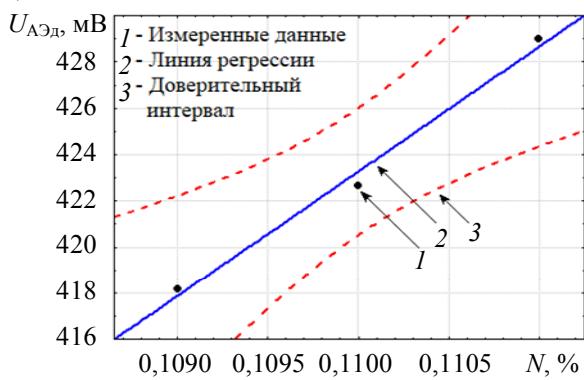
Из табл. 3 видно, что среднее значение измеренных сигналов АЭ каждого канала при контроле каждого образца статистически значимо отличается от среднего значения сигналов в другой группе. Различие средних значений зашумленных и отфильтрованных сигналов обусловлено высокой результативностью метода цифровой фильтрации. Из табл. 3 также следует, что значение амплитуды АЭ от образца к образцу увеличивается, это обусловлено перестройкой внутренней структуры материала, следовательно, сигнал дискретной АЭ характеризует

процесс кристаллизации сплава ЭП648 под воздействием мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ.

Известно [34], что наличие дефектов в кристаллической решетке (КР) или разрушение внутренних структурных связей изделий вызывает необратимые смещения соседних связей КР. При этом прочность и устойчивость структурных связей в КР в большей степени также зависит от характера дефектов [35]. Вместе с тем наличие дефектов в КР изделий может являться не единственной причиной, влияющей на характеристики сигналов АЭ. Также на амплитуду дискретной АЭ может существенно влиять содержание примесей азота в сферическом порошке ЭП648, тесная взаимосвязь этих параметров позволяет установить причину возникновения дефектов в выплавляемых изделиях.

Оценка влияния факторов ПЛВ на процесс дефектообразования. Существенное влияние на качество изготавливаемых изделий оказывают мощность излучения лазера (рис. 11, б) и процентное содержание азота N в порошке ЭП648 (рис. 11, а).

а)



б)

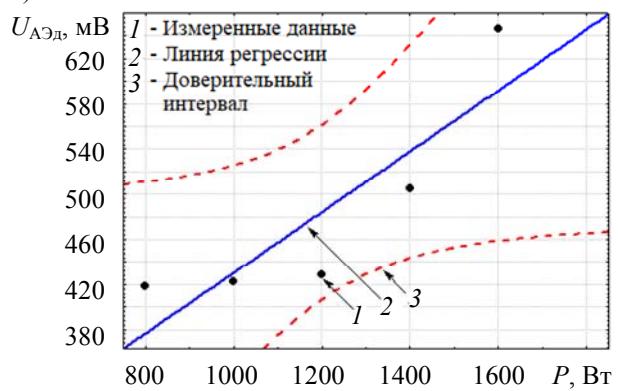


Рис. 11

Вид графических зависимостей, представленных на рис. 11, и результаты корреляционно-регрессионного анализа, представленные в табл. 4, свидетельствуют о том, что процентное содержание азота и мощность излучения лазера статистически значимо влияют на амплитуду дискретной АЭ.

Таблица 4

Результаты корреляционно-регрессионного анализа

| Фактор | Показатели | | Уровень влияния, % |
|-----------------------------|---|--|--------------------|
| | до обработки | после обработки | |
| Мощность лазера | $r = 0,292; R^2 = 0,085;$ $p = 0,632$ | $r = 0,874; R^2 = 0,765;$ $p = 0,052$ | 76 |
| Процентное содержание азота | $r = -0,579; R^2 = 0,335;$ $p = 0,606$ | $r = 0,995; R^2 = 0,990;$ $p = 0,062$ | 99 |

Результаты корреляционно-регрессионного анализа (см. табл. 4) также свидетельствуют о том, что до применения разработанной схемы каскадной обработки из-за наличия помех существует слабая и отрицательная статистически незначимая корреляция, которая в два—три раза повышается после фильтрации.

Значения коэффициентов корреляции и статистической значимости между мощностью излучения лазера и амплитудой дискретной АЭ составили $r = 0,874$ при $p = 0,052$, а также $r = 0,995$ при $p = 0,062$ между процентным содержанием азота и амплитудой дискретной АЭ. Сопоставив эти данные с зависимостями на рис. 11, можно утверждать, что увеличение содержания азота в порошке ЭП648 и мощности излучения лазера на различных стадиях ПЛВ приведет к повышению амплитуды дискретной АЭ, характеризующей процесс дефектообразования. Значение коэффициента корреляции между предиктором и зависимой переменной составило более 0,8, что по оценочной шкале Чеддока считается весьма высокой и неслучайной взаимосвязью, так как $p < 0,1$.

В настоящей работе также проведена оценка корреляционной связи между амплитудой дискретной АЭ, вызванной порообразованием, трещинообразованием и помехами. Результаты показали, что между амплитудами АЭ при порообразовании и трещинообразовании также существует неслучайная высокая корреляционная связь $r = 0,896$, $R^2 = 0,804$ при $p = 0,039$. Наличие этой взаимосвязи характеризует структурные преобразования в материале образцов.

Важным представляется отсутствие четкой статистически незначимой связи между амплитудами дискретной АЭ, обусловленной дефектами и влияющей помехой. В работе [36] отмечается, что для преобразователей АЭ в диапазоне 250—400 кГц прослеживаются резонансные частоты от доминирующей частоты 160 кГц, обусловленной помехами, возникающими при движении манипулятора роботизированной установки ПЛВ. Отсутствие четкой взаимосвязи показателей $r = 0,211$ (от порообразования) при $p = 0,435$ и $r = 0,103$ (от трещинообразования) при $p = 0,597$ между амплитудой дискретной АЭ и помехой свидетельствует в пользу того, что частотные составляющие информативных сигналов дискретной АЭ отличны от составляющих помех, следовательно, процесс не является коррелированным.

Корреляционная связь, обусловленная влиянием на амплитуду дискретной АЭ от дефектов, описывается уравнением линейной регрессионной модели (P — мощность, N — процентное содержание азота):

- для мощности лазера $U = 0,269P + 161,179$ при $r = 0,874$, $R^2 = 0,765$, $p = 0,052$;
- для содержания азота $U = 5394N + 170,072$ при $r = 0,995$, $R^2 = 0,990$, $p = 0,062$.

Результат регрессионного анализа позволяет сделать вывод, что при увеличении мощности лазера на 1 Вт следует ожидать повышения амплитуды на 0,269 мВ. Следовательно, при увеличении содержания азота на 1 % следует ожидать повышения амплитуды дискретной АЭ на 5,394 В. Металлографический анализ микрошлифов темплетов изготовленных изделий подтвердил влияние вышеперечисленных факторов на образование трещин и пор. На рис. 12 представлены изображения, полученные по результатам металлографического анализа микрошлифов темплетов образцов № 1 (а) и 5 (б).

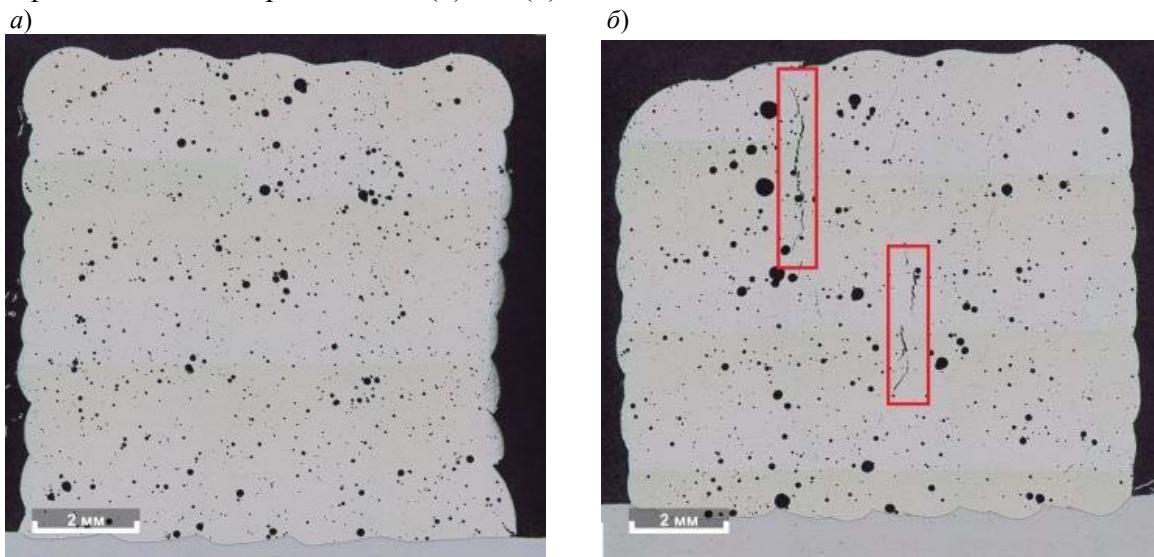


Рис. 12

Наличие трещин несложно заметить в микрошлифе образца № 5, который выращивался при $P = 1600$ Вт. Кроме того, наличие пустот в микрошлифах подтверждает образование пор, вызванное морфологией частиц (50 мкм) сферического порошка ЭП648. Влияние размера частиц порошка сплавов на образование пор подтверждено в работах [8].

Заключение. В настоящей статье представлены результаты акусто-эмиссионного контроля образования дефектов в образцах, изготовленных методом ПЛВ. Для обработки

данных АЭ-контроля предложено использовать метод каскадной фильтрации. Результаты апробации метода показали, что:

- значение показателя „отношение сигнал/помеха“ после фильтрации в среднем выше 1,5 дБ характеризует устойчивость сигналов АЭ к влияющей помехе;
- трехкратное возрастание коэффициента корреляции между мощностью излучения лазера и амплитудой дискретной АЭ, процентным содержанием азота и амплитудой дискретной АЭ после фильтрации характеризует результативность обработки;
- мощность излучения лазера и процентное содержание азота в исходном порошке материала оказывают влияние на процесс дефектообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov A. D., Minaev V. L., Vishnyakov G. N. Non-destructive optical testing of the products obtained using additive manufacturing // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2019. Vol. 85. P. 76—82.
2. Ковалевич А. С., Кинжагулов И. Ю., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Экспериментальное исследование параметров акустической эмиссии при циклических испытаниях металлических изделий аддитивного производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 139—147.
3. Каплан М. А., Кирсанкин А. А., Смирнов М. А., Калайда Т. А., Севостьянов М. А. Содержание примесей в образцах сферических порошков коррозионностойких сталей // Сб. матер. 4-го междисциплинарного науч. форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии". 2018. С. 130—131.
4. Литунов С. Н., Слободенюк В. С., Мельников Д. В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 // Омский научный вестник. 2016. Т. 145, № 1. С. 12—17.
5. Wei Q., Xie Y., Teng Q., Shen M., Sun S., Cai C. Crack types, mechanisms, and suppression methods during high-energy beam additive manufacturing of nickel-based super alloys: a review // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2022. Vol. 1. P. 100055.
6. Yang G., Xie Y., Zhao S., Qin L., Wang X., Wu B. Quality control: internal defects formation mechanism of selective laser melting based on laser-powder-melt pool interaction: a review // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2022. P. 100037.
7. Попкова И. С. Селективное лазерное плавление как инновационная технология изготовления сложнопрофильных изделий // Сб. XVI междунар. науч.-техн. Уральской школы металловедов-молодых ученых. Ч. 2. Екатеринбург, 2015. С. 276—279.
8. Zhang B., Li Y., Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 30. P. 515—527.
9. Grange D., Bartout J. D., Macquaire B., Colin C. Processing a non-weldable nickel-base super alloy by selective laser melting: role of the shape and size of the melt pools on solidification cracking // Materialia. 2020. Vol. 12. P. 100686.
10. Shahwaz M., Nath P., Sen I. A critical review on the microstructure and mechanical properties correlation of additively manufactured nickel-based super alloys // Journal of Alloys and Compounds. 2022. P. 164530.
11. Смирнов М. А., Каплан М. А., Кирсанкин А. А., Калайда Т. А., Севостьянов М. А. Фракционный анализ сферических порошков жаропрочных сплавов // Сб. матер. 4-го междисциплинарного науч. форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии". 2018. С. 307—310.
12. Каплан М. А., Кирсанкин А. А., Смирнов М. А., Севостьянов М. А. Содержание примесей в сферических порошках из жаропрочных материалов // Сб. матер. 4-го междисциплинарного науч. форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии". 2018. С. 131—132.
13. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Kannan V. P., Mrooy D. K. Acoustic emission and deep learning for the classification of the mechanical behavior of AlSi10Mg AM-SLM specimens // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. P. 189.
14. Wang C., Tan X. P., Tor S. B., Lim C. S. Machine learning in additive manufacturing: state-of-the-art and perspectives // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 36. P. 101538.

15. Барат В. А. Развитие метода акустической эмиссии за счет автоматизации обработки данных, повышения помехоустойчивости и достоверности обнаружения трещиноподобных дефектов металлоконструкций: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 40 с.
16. Altay Y. A., Fedorov A. V., Stepanova K. A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method // Proc. of the 2022 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg, 2022. P. 1320—1326.
17. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Экспериментальное определение значимости статистической оценки параметров, характеризующих вторичные диагностические показатели акустической эмиссии // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 735—746.
18. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Оценка взаимосвязи информационных составляющих и помех сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 6. С. 36—45.
19. Чернова В. В. Разработка методики акусто-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии их развития в изделиях из композиционных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 21 с.
20. Rastegaeva I. I., Rastegaev I. A., Agletdinov E. A. The comparison of the main time-frequency transformations of spectral analysis of acoustic emission signals // Frontier Materials and Technologies. 2022. N 1. P. 49—60.
21. Altay Y. A., Kremlev A. S. Comparative analysis of ECG signal processing methods in the time-frequency domain // Proc. of the 2018 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2018. P. 1058—1062.
22. Altay Y. A., Kuzivanov D. O. Descriptive analysis and acoustic emission signals parameters assessments: signal processing data // Proc. of the 2023 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg, 2023. P. 1320—1326.
23. Zakharov L. A., Martyushev D. A., Ponomareva I. N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 253. P. 23—32.
24. Elforjani M., Shanbr S. Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning // IEEE Transactions on industrial electronics. 2018. Vol. 65, N 7. P. 5864—5871.
25. Smirnov M. A., Kaplan M. A., Sevostyanov M. A. Receiving finely divided metal powder by inert gas atomization // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018. Vol. 347. P. 012033.
26. Smirnov M. A., Kaplan M. A., Kirsankin A. A., Kalaida T. A., Nasakina E. O., Sevostyanov M. A. Investigation of the properties of heat-resistant spherical powders // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 525. P. 012076.
27. Tempelman J. R., Wachtor A. J., Flynn E. B., Depond P. J., Forien J. B., Guss G. M., Matthews M. J. Detection of keyhole pore formations in laser powder-bed fusion using acoustic process monitoring measurements // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 55. P. 102735.
28. Прямое лазерное выращивание [Электронный ресурс]: <http://www.ilwt-stu.ru/upload/publications/DMD_ru.pdf>.
29. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Vimalathithan P. Acoustic emission descriptors for the mechanical behavior of selective laser melted samples: an innovative approach // Mechanics of materials. 2020. Vol. 148. P. 103448.
30. Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Loge R., Wasmer, K. Analysis of time, frequency and time-frequency domain features from acoustic emissions during laser powder-bed fusion process // Procedia CIRP. 2020. Vol. 94. P. 392—397.
31. Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Le-Quang T., Loge R., Wasmer K. Semi-supervised monitoring of laser powder bed fusion process based on acoustic emissions // Virtual and Physical Prototyping. 2021. Vol. 16. P. 481—497.
32. Алтай Е. А., Кремлев А. С. Оценка точности обработки электрокардиосигнала методом каскадной широкополосной режекторной фильтрации // Вестн. Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 2. С. 18—28.
33. Расtegaев И. А. Мерсон Д. Л., Расtegaева И. И. Подходы к анализу шумоподобной акустической эмиссии при беспороговом режиме ее регистрации // Сб. матер. Всерос. конф. „Актуальные проблемы метода акустической эмиссии“. Тольятти, 2018. С. 103—104.

34. Махутов Н. А., Иванов В. И., Соколова А. Г., Васильев И. Е., Чернов Д. В., Скворцов Д. Ф., Бубнов М. А. Мониторинг разрушения волокон композитных материалов с применением системы акустической эмиссии, виброанализатора и высокоскоростной видеосъемки // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 14—23.
35. Фролов А. В., Мухина И. Ю., Дуюнова В. А., Уридия З. П. Влияние легирующих элементов и структурных факторов на жаропрочность магниевых сплавов // Тр. ВИАМ. 2015. № 9. С. 57—63.
36. Zhang W., Jia H., Gao G., Cheng X., Du P., Xu D. Backing layers on electroacoustic properties of the acoustic emission sensors // Applied Acoustics. 2019. Vol. 156. P. 387—393.

Сведения об авторах**Ельдос Алтай**

- канд. техн. наук; Национальный центр государственной научно-технической экспертизы, департамент государственной научно-технической экспертизы; главный менеджер; E-mail: aeldos@inbox.ru

Дмитрий Олегович Кузиванов

- аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Данила Александрович Рождественский

- Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ, отделение аддитивных технологий; специалист технологического отряда аддитивных технологий; E-mail: DanRo@alpost.ru

Максим Игоревич Санников

- Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ, отделение аддитивных технологий; инженер технологического отряда аддитивных технологий; E-mail: sannmaks96@gmail.com

Ксения Андреевна Степанова

- канд. техн. наук; Научно-технический центр „Эталон“; ведущий научный сотрудник; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.04.23; одобрена после рецензирования 04.05.23; принята к публикации 28.08.23.

REFERENCES

1. Ivanov A.D., Minaev V.L., Vishnyakov G.N. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2019, vol. 85, pp. 76–82.
2. Kovalevich A.S., Kinzhagulov I.Yu., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 2(66), pp. 139–147, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-139-147. (in Russ.)
3. Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Smirnov M.A., Kalaida T.A., Sevostyanov M.A. *Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii* (New Materials and Advanced Technologies), Collection of materials of the 4th Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation, 2018, pp. 130–131. (in Russ.)
4. Litunov S.N., Slobodenyuk V.S., Melnikov D.V. *Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 1(145), pp. 12–17. (in Russ.)
5. Wei Q., Xie Y., Teng Q., Shen M., Sun S., Cai C. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, vol. 1, pp. 100055.
6. Yang G., Xie Y., Zhao S., Qin L., Wang X., Wu B. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, pp. 100037.
7. Popkova I.S. *Sbornik XVI mezdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy Ural'skoy shkoly metallovedov-molodykh uchenykh* (Collection of the XVI International Scientific and Technical Ural School of Metallurgists and Young Scientists), Part. 2, Ekaterinburg, 2015, pp. 276–279. (in Russ.)
8. Zhang B., Li Y., Bai Q. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30, pp. 515–527.
9. Grange D., Bartout J.D., Macquaire B., Colin C. *Materialia*, 2020, vol. 12, pp. 100686.
10. Shahwaz M., Nath P., Sen I. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, pp. 164530.
11. Smirnov M.A., Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Kalaida T.A., Sevostyanov M.A. *Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii* (New Materials and Advanced Technologies), Collection of materials of the 4th Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation, 2018, pp. 307–310. (in Russ.)
12. Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Smirnov M.A., Sevostyanov M.A. *Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii* (New Materials and Advanced Technologies), Collection of materials of the 4th Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation, 2018, pp. 131–132. (in Russ.)
13. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Kannan V.P., Mpoyi D.K. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, p. 189.
14. Wang C., Tan X.P., Tor S.B., Lim C.S. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 36, pp. 101538.
15. Barat V.A. *Razvitiye metoda akusticheskoy emissii za schet avtomatizatsii obrabotki dannykh, povysheniya pomekhoustoichivosti i dostovernosti obnaruzheniya treshchinopodobnykh defektov metallokonstruktsiy* (Development of the Acoustic Emission Method by Automating Data Processing, Increasing Noise Immunity and Reliability of Detection of Crack-Like Defects in Metal Structures), Extended abstract of Doctor's thesis, Moscow, 2019, 40 p. (in Russ.)
16. Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Proc. of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St. Petersburg*, 2022, pp. 1320–1326.
17. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 10(65), pp. 735–746, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746. (in Russ.)

18. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Control. Diagnostics*, 2022, no. 6(25), pp. 36–45. (in Russ.)
19. Chernova V.V. *Razrabotka metodiki akustiko-emissionnogo kontrolya defektov na ranney stadii ikh razvitiya v izdeliyakh iz kompozitsionnykh materialov* (Development of a Technique for Acoustic Emission Monitoring of Defects at an Early Stage of Their Development in Products Made of Composite Materials), Extended abstract of candidate's thesis, Tomsk, 2017, 21 p. (in Russ.)
20. Rastegaeva I.I., Rastegaev I.A., Agletdinov E.A. *The comparison of the main time-frequency transformations of spectral analysis of acoustic emission signals*. *Frontier Materials and Technologies*, 2022, no. 1, pp. 49–60.
21. Altay Y.A., Kremlev A.S. *Proc. of the 2018 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering*, IEEE, 2018, pp. 1058–1062.
22. Altay Y.A., Kuzivanov D.O. *Proc. of the 2023 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, St. Petersburg, 2023, pp. 1320–1326.
23. Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 23–32.
24. Elforjani M., Shanbr S. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2018, no. 7(65), pp. 5864–5871.
25. Smirnov M.A., Kaplan M.A., Sevostyanov M.A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018, vol. 347, pp. 012033.
26. Smirnov M.A., Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Kalaida T.A., Nasakina E.O., Sevostyanov M.A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 525, pp. 012076.
27. Tempelman J. R., Wachtor A.J., Flynn E.B., Depond P.J., Forien J.B., Guss, G.M., Matthews M. J. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 55, pp. 102735.
28. http://www.ilwt-stu.ru/upload/publications/DMD_ru.pdf. (in Russ.)
29. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Vimalathithan P. *Mechanics of materials*, 2020, vol. 148, pp. 103448.
30. Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Loge R., Wasmer K. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 94, pp. 392–397.
31. Pandiyan V., Drissi-Daoudi R., Shevchik S., Masinelli G., Le-Quang T., Loge R., Wasmer K. *Virtual and Physical Prototyping*, 2021, vol. 16, pp. 481–497.
32. Altay Y.A., Kremlev A.S. *Bulletin of the Russian New University Complex Systems: models, analysis and management*, 2020, no. 2, pp. 18–28. (in Russ.)
33. Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I. *Aktual'nyye problemy metoda akusticheskoy emissii* (Actual Problems of the Acoustic Emission Method), Collection of materials of the All-Russian Conference, Tolyatti, 2018, pp. 103–104. (in Russ.)
34. Makhutov N.A., Sokolova A.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Skvortsov D.F., Bubnov M.A., Ivanov V.I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, no. 12(56), pp. 960–970.
35. Frolov A.V., Muhina I.Yu., Duyunova V.A., Uridiya Z.P. *Proceedings of VIAM*, 2015, no. 9, pp. 57–63. (in Russ.)
36. Zhang W., Jia H., Gao G., Cheng X., Du P., Xu D. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 156, pp. 387–393.

Data on authors**Yeldos Altay**

- PhD; National Center of Science and Technology Evaluation Department of Scientific and Technological Expertise; Chief Manager; E-mail: aeldos@inbox.ru

Dmitry O. Kuzivanov

- Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Danila A. Rozhdestvensky

- St. Petersburg State Maritime Technical University, Institute of Laser and Welding Technologies, Department of Additive Technologies; Specialist of the Department; E-mail: DanRo@alpost.ru

Maksim I. Sannikov

- St. Petersburg State Maritime Technical University, Institute of Laser and Welding Technologies, Department of Additive Technologies; Engineer of the Department; E-mail: sannmaks96@gmail.com

Ksenia A. Stepanova

- PhD; Scientific and Technical Center Etalon; Leading Scientific Researcher E-mail: ledy_xs93@yandex.ru

Received 16.04.23; approved after reviewing 04.05.23; accepted for publication 28.08.23.