

Научная статья
УДК 621.9.079
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187588>
EDN: <https://www.elibrary.ru/INCFHO>



Особенности акустической эмиссии при обычном резании и при обработке концентрированными потоками энергии

Марс Шарифуллович Мигранов^{1✉}, Михаил Павлович Козочкин², Энвер Серверович Мустафаев³,
Евгений Анатольевич Остриков⁴, Сергей Вальдемарович Федоров⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Москва, Российская Федерация

¹ migmars@mail.ru ✉

Аннотация. Повышение эффективности лезвийной обработки резанием с обеспечением требуемых высоких показателей качества обработанной поверхности при изготовлении ответственных деталей силовой части газотурбинных двигателей в условиях современного машиностроительного производства в значительной степени зависит от оперативного диагностирования и контроля контактных процессов. В настоящее время все большее применение находят инновационные методы оперативного контроля. Современные высокопроизводительные экспериментальные информационно-коммуникационные технологии неразрушающего контроля дают возможность диагностировать и прогнозировать процессы на основе регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии (АЭ). Вместе с тем такой динамичный высокопроизводительный процесс, как лезвийная обработка резанием труднообрабатываемых авиационных сплавов для деталей силовых установок, а также их последующая обработка концентрированными потоками энергии (КПЭ): ионно-плазменная, лазерная и т. д. — требует расширения возможностей метода АЭ. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, в ходе которых изучались связи параметров сигналов АЭ с режимами лазерной, электроэрозионной и механической обработки; влияние варьирования режимов лазерных импульсов с регистрацией сигналов АЭ на морфологию обработанной поверхности и энергию внутренних связей структуры материала; влияние удельной амплитуды на разные инструментальные материалы, в том числе синтетические алмазы и высокоэнтропийные катоды — мишени для нанесения износостойких покрытий.

Ключевые слова: лезвийная обработка резанием, лазерная обработка, мониторинг технологических процессов, акустическая эмиссия, концентрированные потоки энергии, плотность мощности, пароплазменный факел, сверхтвердые материалы

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-19-00670 - П.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Козочкин М.П., Мустафаев Э.С., Остриков Е.А., Федоров С.В. Особенности акустической эмиссии при обычном резании и при обработке концентрированными потоками энергии // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 1. С. 177-187. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187588>

Original article

Acoustic Emission Specifics while Conventional Cutting and Machining by the Concentrated Energy Flows

Mars Sh. Migranov¹✉, Mikhail P. Kozochkin², Enver S. Mustafaev³, Evgenii A. Ostrikov⁴, Sergei V. Fedorov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russia

¹ migmars@mail.ru✉

Abstract

Critical products manufacturing technological processes diagnostics and monitoring in the aviation industry, particularly in aircraft industry, helicopter industry, aircraft engine-building, avionics manufacturing, constituent parts etc. are indispensable tools for reliability, safety quality and endurance ensuring of the product being made. The role of the quality formed while producing complex parts of the state-of-the-art gas turbine engines and other power plants is the most pronounced while manufacturing the products being operated under conditions of sharply changing temperatures, aggressive media, under the impact of high dynamic loading, which frequency varies over a wide range. Among the methods for various technological processes operational monitoring and appropriate equipment for aircraft engine building, acoustic diagnostics has long since won its place as a non-destructive control tool. However, even now, all capabilities of the method are not fully revealed, despite the expanding possibilities of the computing technology application. The presented article draws parallels between changes in the acoustic emission (AE) signals parameters while conventional cutting tool machining of difficult-to-machine, aviation-oriented high alloys and relatively new technologies employing concentrated energy flows.

The article presents the results of the experimental research that studied the relationships of the AE signal parameters with the modes of laser, electrical discharge machining (EDM) and mechanical processing. Much attention is given to the relations between the AE amplitude spectrum variations and the power density of the impact on the surface of the machined heat-proof and heat-resistant alloys and steels under different processing technologies. It is emphasized that the tendencies in the AE spectrum changes with varying power density are similar, regardless of the nature of the energy impact. The article adduces experimental data for mechanical processing, where power density varied with the tool wear, as well as with the EDM, where power density decreased with the of erosion products concentration increase. As the result, A conclusion was made that the AE parameters monitoring allows tracking qualitative changes in technological processes of different natures and implementing timely control actions. The second part of the work presents the results of experiments involving the laser pulse modes varying, the AE signals recording, and morphology studying of the machined surface. Information processing by the experiments planning allowed to establishing relationships between the acoustic parameters and processing performance, changes in power density, and the shift of the material removal process towards sublimation or melt formation. Special attention is given to the laser probing of materials, where it was demonstrated that the AE signals reflected such phenomena as the vapor-plasma plume forming, the internal bond energy of the material structure, and laser radiation self-focusing. To assess resistance of the material to the destructive factors, the concept of the specific AE amplitude was introduced, which corresponds to the ratio of the AE amplitude and the volume of the hole formed by the laser pulses. This ratio growth indicates the material greater ability to withstand destructive factors. The article presents experimental data on the specific amplitude for various tool materials, including synthetic diamonds, and high-entropy alloys options, demonstrating a clear advantage of the ultrahard tool materials. Further study of the method capabilities will allow employing it as a tool for rapid analysis of the qualitative characteristics of innovative alloy options for power section components of modern aircraft gas turbine engines (GTE), as well as wear-resistant coatings, without lengthy full-scale experiments involving significant working time and financial resources.

The objectives of this work included experimental studies of the relationships between the AE signal parameters and processing modes in different technological processes, and assessing the possibility of using these parameters for monitoring in automated production environments and as a tool for understanding the processing processes kinetics. The research results demonstrate that the AE parameters may serve as indicators of the processing performance, the resulting surface quality, and the properties of new materials. This opens up prospects for the acoustic diagnostics application in industry, such as for operational monitoring of GTE component processing, properties evaluating of the new alloys, and optimizing technological modes.

Keywords: cutting tool machining, laser processing, technological process monitoring, acoustic emission, concentrated energy flows, power density, vapor-plasma plume, ultrahard materials

Funding: the work was financed by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-19-00670 – П

For citation: Migranov M.Sh., Kozochkin M.P., Mustafaev Eh.S., Ostrikov E.A., Fedorov S.V. Acoustic Emission Specifics while Conventional Cutting and Machining by the Concentrated Energy Flows. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(1):177-187. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187588>

List of Figures

- Fig. 1. Examples of K_f dependencies on the processing conditions at turning and laser impact: *a* – the XN77TUP (NiCr20TiAl) steel workpieces turning with various speed (the curves numbers correspond to the turning of the 1-st, 4-th, 27-th and 35-th work correspondingly); *b* – the K_f and effective amplitudes variation in the two octaves under the impact on laser pulses with various q_s on the steel workpiece
- Fig. 2. Experimental data of the deformations intensity (ϵ_{int}) varying along the surface layer depth (δ) for the replaceable plate with different wear (h) along the rear edge: 1 – $h = 0$ mm; 2 – $h = 0,4$ mm; 3 – $h = 0,68$ mm; 4 – $h = 1.1$ mm; 5 – the cutting edge wear limit (*a*); the AE octave signal specters at turning: 1 – sharp edge; 2 – limit wear, on the insertion: the K_f variation depending on surface layer ϵ_{int} at various wear of five cutters (*b*)
- Fig. 3. Examples of effective amplitudes recording of the AE signals in the 2–8 kHz and 23–33 kHz ranges and the K_f parameter while grinding at the first pass (*a*) and the 30th pass (*b*); view of the surface with burn marks after machining with a worn wheel (*c*)
- Fig. 4. Variation of AE parameters during EDM of a hard alloy: *a* – one-third octave spectra in the initial seconds of machining 1 and just before electrode breakage 2; *b* – time variation of AE signal amplitudes in the two frequency ranges and K_f from the start of machining to electrode breakage
- Fig. 5. Relationships between the machining performance of wire EDM on a CUT 30P machine, AE, and pulse duration: *a* – machining zone (1 – the AP2037-100 accelerometer model; 2 – the workpiece made of nickel-based NiCr20TiAl superalloy; wire electrode); *b* – relationship between machining performance S , pulse duration T_{on} (μs), and the AE amplitude in the 4–8 kHz range (S and A are given as percentages of maximum values)
- Fig. 6. The SharpMark Fiber GT 60 laser machine: *a* – general view of the working area with the laser module 1, fixture 2 for samples fixing 3, and installed accelerometers 4; *b* – the studied carbide sample in the vise
- Fig. 7. Examples of AE recordings in the 45–95 kHz range for 200 laser pulses delivered into a single hole: *a* – aluminum alloy; *c* – Al₂O₃ ceramic; *b* – the sketch and formula for the decay rate (δ) determining in percent per second
- Fig. 8. Dependence of the AE signal amplitude decay rate δ on the spacing between holes Δ and the pass number n : *a* – general view of the dependence; *b* – projections of sections with the same pass numbers

List of Tables

Table 1 Experimental data with the T15K6 alloy

Table 2. The AE attenuation rate for the tool materials in %/m

Введение

Метод контроля состояния механических объектов авиационной техники с помощью анализа сигналов акустической эмиссии (АЭ) давно завоевал себе прочное место в ряду технологий неразрушающего контроля [1–3]. При этом было принято относить к сигналам АЭ вибрации, частота которых лежит в ультразвуковом диапазоне и даже выше 50 кГц, а вибрации с частотами до 20 кГц называли виброакустическими колебаниями. С появлением аппаратуры, позволяющей одновременно охватывать оба частотных диапазона, в технической литературе термином «АЭ» часто стали обозначать сигналы вибраций, фиксируемые в любом диапазоне. Сигналы АЭ сопровождают практически любое локализованное движение внутри какой-либо среды с разницей только в частотных диапазонах, их амплитудах и размерах окрестности, доступной для регистрации существующими средствами. От

выбора частотного диапазона для регистрации АЭ зависит информативность и помехоустойчивость акустического мониторинга. Например, с ростом частоты наблюдаемых сигналов АЭ сужается область упругой среды вокруг ядра рабочего процесса деталей современных газотурбинных двигателей, и эти сигналы можно надежно фиксировать. К задачам акустического мониторинга относится дефектоскопия состояния входной кромки лопаток компрессора и турбины с различными покрытиями, а также регистрация ударных нагрузок и импульсов механических напряжений – все эти явления отображаются в широком частотном диапазоне, позволяющем рационально выбирать методику испытаний с использованием современной высокочувствительной аппаратуры.

В настоящее время методики, основанные на контроле сигналов АЭ, являются одними из основных при оценке прочностных свойств инно-

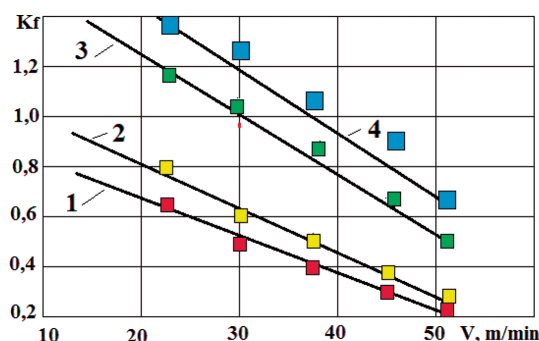
вационных авиационных материалов: выявляются разрушения, возникающие в результате постепенного накопления пластических деформаций, и внезапные разрушения, связанные с формированием и ростом трещин [2–5]; акустическая диагностика используется для выявления причин шума и вибраций аэрокосмического, технологического и другого промышленного оборудования [6, 7]; появились работы, посвященные акустическому мониторингу различных технологических процессов изготовления деталей авиационной техники, в частности процессов лезвийной обработки резанием [8]. Исследуются процессы, связанные с химическими реакциями, растворением, кристаллизацией и фазовыми превращениями, при этом кинетика развития ситуации в ядре процесса изучается с помощью акустического мониторинга [9–12]; промышленные технологии, связанные с обработкой концентрированными потоками энергии (КПЭ), к которым относятся электроэрозионная, лазерная, электронно-лучевая и др.

В связи с потребностями важнейших отраслей промышленности в сплавах, обладающих уникальными специфическими физико-химическими свойствами, обработка подобных материалов с помощью технологии, использующих КПЭ, будет и дальше расширяться. Исходя из вышеизложенного, в задачи настоящей работы входило экспериментальное исследование связей параметров сигналов АЭ с режимами обработки КПЭ и оценка возможности применения этих сигналов для мониторинга в условиях автоматизированного производства, изучение кинетики этих процессов.

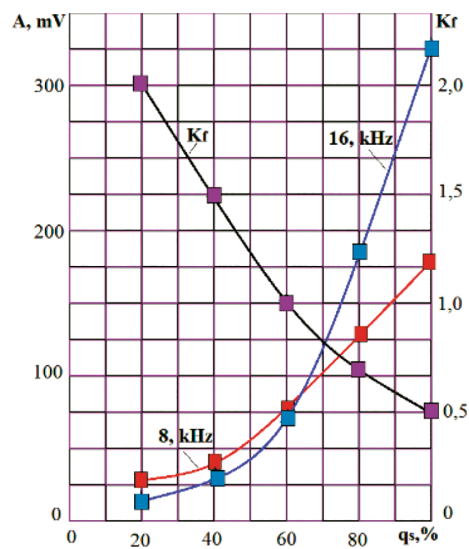
Связь параметров АЭ с плотностью мощности воздействия на материал

Поскольку при обработке КПЭ отсутствует механическое взаимодействие инструмента и заготовки, то представляется, что и параметры АЭ, регистрируемые при разных технологиях, будут существенно различаться. Однако, если обратиться к такому параметру, как плотность мощности (q_s – отношение мощности воздействия на материал к площади воздействия), то в этих технологиях найдется много общих связей с параметрами АЭ. При лезвийной обработке параметр q_s меняется за счет увеличения износа режущей кромки инструмента, а при лазерной обработке – за счет изменения площади фокусного пятна или мощности излучения. В любой технологии увеличение плотности мощности ведет к опережающему росту высокочастотной составляющей АЭ по отношению к низкочастотной [14]. Примеры, демонстрирующие эти связи, приведены на рис. 1. Показано изменение параметра K_f (отношение эффектив-

ных амплитуд в областях высоких и низких частот) при токарной и лазерной обработке. При точении использовались диапазоны 0,5–3 кГц, при лазерной обработке – октавные полосы 8 и 16 кГц. При точении (рис. 1,а) K_f снижается из-за роста мощности при увеличении скорости резания и повышается с ростом износа из-за увеличения площади воздействия. При лазерном воздействии (рис. 1,б) с ростом мощности растет параметр q_s (при постоянстве площади фокусного пятна), увеличиваются эффективные амплитуды в обеих октавах, но в октаве 16 кГц этот рост идет с опережением, что вызывает уменьшение q_s . Мониторинг K_f позволяет следить за износом инструментов и деформациями поверхности заго-



а



б

Рис. 1. Примеры зависимостей K_f от режимов при точении и лазерном воздействии: а – точение заготовок из стали ХН77ТЮР (NiCr20TiAl) с разной скоростью (номера линий соответствуют точению 1-й заготовки, 4-й, 27-й, 35-й соответственно); б – изменение K_f и эффективных амплитуд в двух октавах при воздействии на стальную заготовку лазерных импульсов с разной q_s

товки, при лазерной обработке рост K_f говорит об увеличении доли расплава в удаляемом материале.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов по определению интенсивности деформаций при точении режущими пластинами с разным износом (рис. 2,а) и по определению связей параметров АЭ с увеличением износа (рис. 2,б). Деформация измерялась методом нанесения на поверхность координатных сеток после снятия припуска [15]. В экспериментах использовались пять резцов с разным износом по задней поверхности, показаны наименьший и наибольший износ (рис. 2,а).

Октавные спектры на рис. 2,б получены при точении стали 41CrS4 острым и изношенным резцами (см. фото на рис. 2,а). Можно отметить, что с износом кромки резца амплитуды на высо-

ких частотах уменьшаются, а на низких возрастают, соответственно увеличивается K_f при работе в диапазонах 0,7–1,5 кГц и 4,4–15 кГц. На вставке рис. 2,б представлена зависимость K_f от ϵ_{int} поверхностного слоя при разном износе пяти резцов. Эксперименты показали, что искажение спектра АЭ в виде отношения K_f позволяет использовать его в качестве диагностического признака для контроля состояния инструмента и для ограничения деформаций поверхностного слоя детали [15].

Еще один пример – изменение параметра K_f при обработке на плоскошлифовальном станке – показан на рис. 3. Шлифовались детали из жаропрочного сплава ХН45МВТЮР шлифовальным кругом (электрокорунд) с твердой связкой с зерном F90 (скорость шлифования 1800 м/мин, подача на двойной ход 10 мкм, обработка без смазки). Было выполнено 30 проходов с подачей по 10 мкм, при каждом проходе шлифовального круга амплитуда АЭ в области низких частот повышалась, а в области высоких частот амплитуда не изменялась. Изменения амплитуд на первом и 30-м проходах показано на рис. 3,а и б), там же показано и изменение параметра K_f . Видно, что к 30-му проходу K_f увеличился в два раза. К последнему проходу на поверхности заготовки появляются прижоги (рис. 3,в).

На рис. 4 показаны особенности поведения параметров АЭ при электроэрозионной обработке (ЭЭО) на проволочном вырезном станке при резании сплава W94К6. Рассмотрен цикл от начала резания в чистой рабочей жидкости до момента обрыва электрода из-за избыточной концентрации продуктов эрозии.

На рис. 4 показаны особенности поведения параметров АЭ при электроэрозионной обработке (ЭЭО) на проволочном вырезном станке при резании сплава W94К6. Рассмотрен цикл от начала резания в чистой рабочей жидкости до момента обрыва электрода из-за избыточной концентрации продуктов эрозии.

Из-за увеличения концентрации продуктов эрозии часть энергии разрядов расходуется на разрушение самих продуктов эрозии. В результате падает плотность мощности, поступающей на заготовку, и значительная часть материала оседает на поверхности в виде расплава, создавая условия для локализации разрядов, ведущей к короткому замыканию и обрыву электрода. Падение плотности мощности проявляется в относительном снижении амплитуды АЭ на высоких частотах и росте K_f . Получается, что поведение параметров АЭ при ЭЭО аналогично таковому при точении, сопровождающемся ростом износа режущей кромки (рис. 2,б) [16]. Импульсы, формируемые в упругой системе технологического оборудования

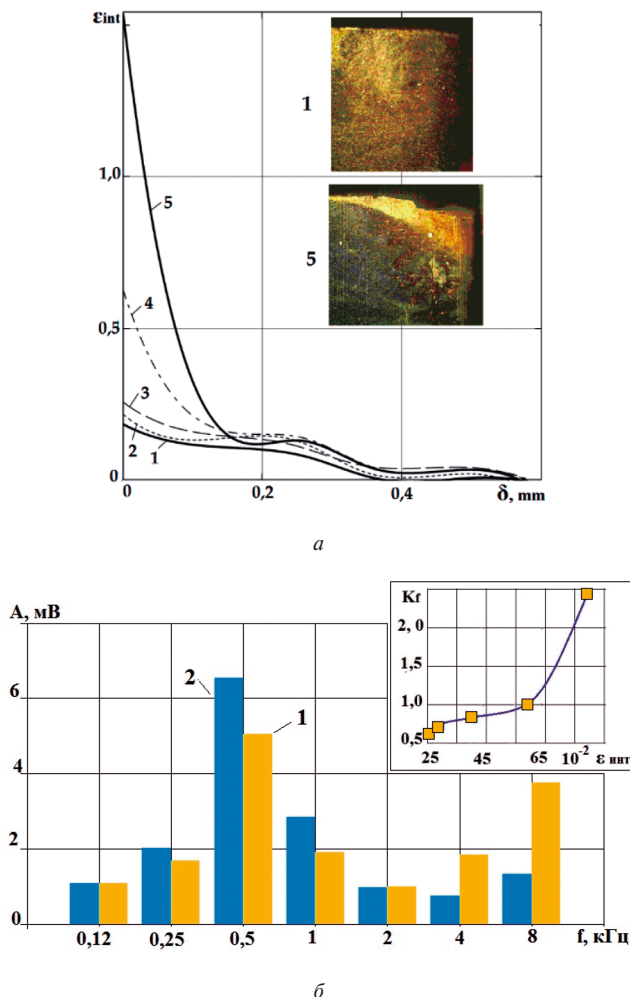


Рис. 2. Экспериментальные данные изменения интенсивности деформаций (ϵ_{int}) по глубине поверхностного слоя (б) для сменных пластин с разным износом (h) по задней грани: 1 – $h = 0$ мм; 2 – $h = 0,4$ мм; 3 – $h = 0,68$ мм; 4 – $h = 1,1$ мм; 5 – предельный износ режущей кромки (а); октавные спектры сигнала АЭ при точении: 1 – острая кромка; 2 – предельный износ, на вставке – изменение K_f в зависимости от ϵ_{int} поверхностного слоя при разном износе пяти резцов (б)

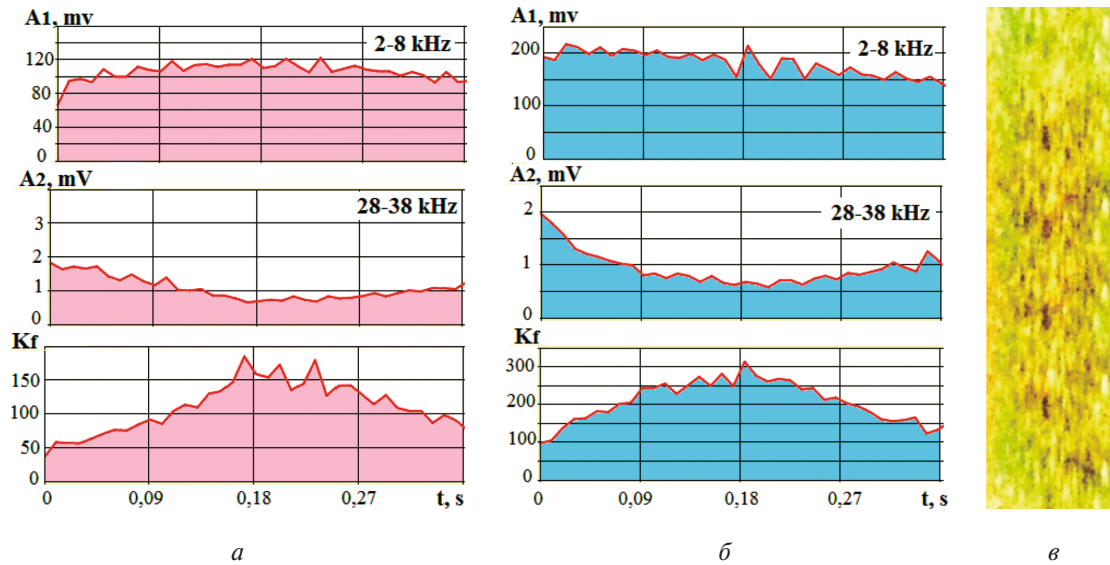


Рис. 3. Примеры записи эффективных амплитуд сигналов АЭ в диапазонах 2-8 кГц и 23-33 кГц и параметра K_f при шлифовании на первом проходе (а) и 30-м проходе (б); вид поверхности со следами прижогов после обработки изношенным кругом (в).

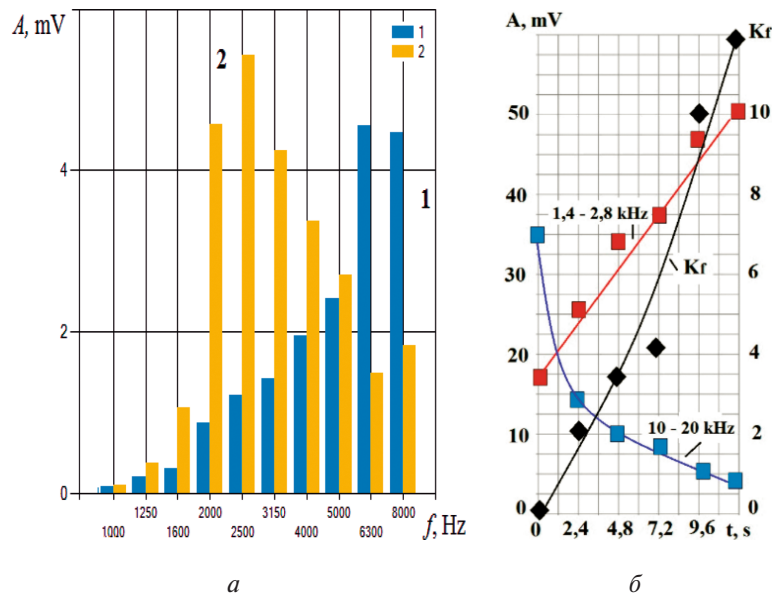


Рис. 4. Изменение параметров АЭ при ЭЭО твердого сплава: а – треть-октавные спектры на первых секундах обработки 1 и перед обрывом электрода 2; б – изменение во времени амплитуд сигнала АЭ в двух частотных диапазонах и K_f от начала обработки до обрыва электрода

при плавлении материала, более растянутые во времени по сравнению с импульсами, формируемыми в процессе парообразования. Это искажает амплитудный спектр АЭ, позволяя вести мониторинг изменения плотности мощности. При механической обработке острая кромка инструмента отделяет стружку за счет формирования хрупких трещин, создающих короткие импульсы АЭ, что и приводит к аналогичному изменению в спектре сигналов АЭ [15].

Связь параметров АЭ с производительностью обработки КПЭ

Энергия сигналов АЭ связана с интенсивностью возмущающих воздействий на упругую систему станка при удалении материала и с амплитудой сигнала АЭ монотонной зависимостью. Много зависит от выбранного частотного диапазона и вариаций режимов обработки, что подтверждается экспериментами при лезвийной обработке и при использовании КПЭ [17, 18]. На рис. 5,б видно,

что при всех значениях длительности импульса (T_{on} , мкс) сохраняется монотонная зависимость между амплитудой АЭ и производительностью. При значениях А более 30% с небольшой погрешностью сечения зависимости $S(A, T_{on})$ по линиям с постоянными значениями T_{on} могут приближаться линейными зависимостями с незначительным превышением погрешности.

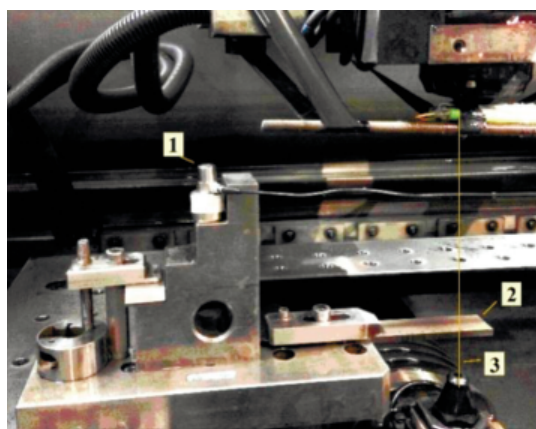
Связь параметров АЭ с параметрами лазерных импульсов

Для изучения сигналов АЭ, сопровождающих воздействие лазерных импульсов на различные композиции материалов из твердых сплавов и ке-

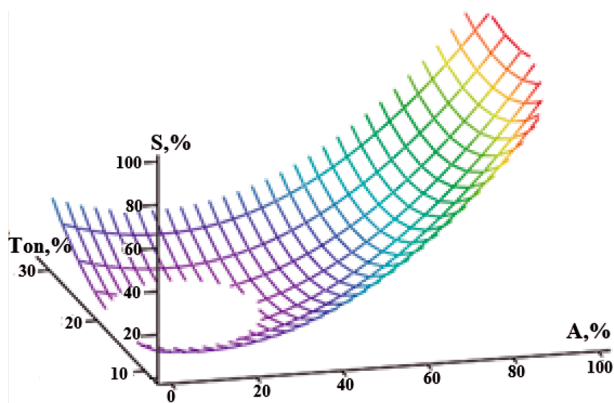
рамики, использовался экспериментальный стенд (рис. 6) [19].

Целью испытаний была оценка связей параметров АЭ с производительностью лазерной обработки и качеством получаемых поверхностей при различных мощностях и длительности воздействия на поверхность твердосплавных пластин (Т15К6). В табл. 1 представлены 12 режимов обработки пластины из Т15К6 (79% WC, 15% TiC). Лазерные импульсы подавались с частотой 2 кГц, с разной длительностью и мощностью, при этом формировалась строчка из 10 лунок, по этим лункам делалось пять проходов с выбранными режимами.

По данным табл. 1 с использованием методики планирования экспериментов получены математические модели (программа MathCAD 14) и построены графики, показывающие зависимости параметров АЭ от длительности и мощности лазерных импульсов. Рассмотрены особенности влияния обрабатываемых материалов на сигналы АЭ при лазерном воздействии. Известно

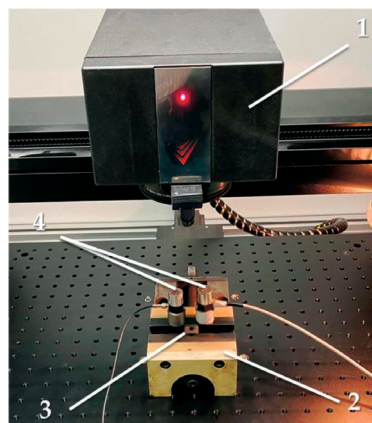


а

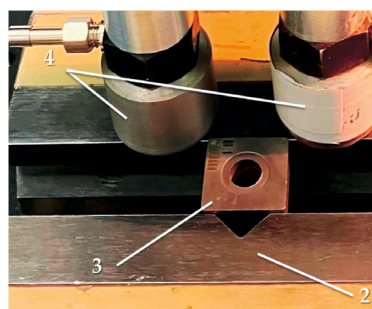


б

Рис. 5. Связи производительности электроэрозионной обработки на проволочном вырезном станке CUT 30P с АЭ и длительностью импульсов: а – зона обработки (1 – акселерометр модель AP2037-100; 2 – заготовка из жаропрочного сплава на никелевой основе NiCr20TiAl; 3 – проволочный электрод); б – зависимость производительности обработки S от длительности импульсов T_{on} (мкс) и амплитуды АЭ в диапазоне 4–8 кГц (S и A выражены в процентах от максимальных значений)



а



б

Рис. 6. Лазерный станок SharpMark Fiber GT 60: а – общий вид рабочей зоны с лазерным модулем 1, приспособлением 2 для крепления образцов 3 и установленными акселерометрами 4; б – исследуемый образец из твердого сплава в тисках

Таблица 1. Данные эксперимента со сплавом Т15К6

№	τ , нс	N , Вт	A_1 , мВ	A_2 , мВ	Q , мкм ³	V , %
1	500	60	166	100	25900,0	12
2	500	50	110	70	20277,9	13
3	500	40	60	35	12079	25,2
4	500	30	22,2	13	5966	45,7
5	350	60	84,7	42,4	12999	22,9
6	350	50	49,7	26,2	9670	25,3
7	350	40	22,4	12,8	4857	50,2
8	350	30	7,7	4,14	781,8	157,5
9	250	60	72,4	42	10819	7,3
10	250	50	40,1	27,5	6456	44,1
11	250	40	15,4	12,8	3258	62,8
12	250	30	3	2,3	346	211,6

Примечание: τ – длительность импульса; N – мощность лазерного импульса; A_1 – RMS сигнала АЭ в диапазоне 10–28 кГц; A_2 – RMS сигнала АЭ в диапазоне 32–70 кГц; Q – объем лунки; V – объем выбросов материала на поверхность в процентах от Q

[15, 17–20], что при воздействии мощности лазерного излучения происходят нагрев, плавление, испарение вещества мишени, а при высокой интенсивности облучения в парах вещества мишени формируется плазменный факел, который способен экранировать поверхность мишени от лазерного излучения. Экранирующее и поглощающее свойства плазменного факела влияют на производительность лазерных импульсов и, соответственно, на параметры сигналов АЭ. При этом разные материалы формируют пароплазменное облако с разной скоростью и с разными свойствами. Поглощающее свойство проявляется в скорости уменьшения амплитуды АЭ, которая зависит от материала мишени и от расстояния между лунками. Записи сигналов АЭ при подаче в каждую лунку 200 лазерных импульсов (60 Вт, 500 нс) для алюминиевого сплава и керамики Al_2O_3 представлены на рис. 7, где показано, что скорости затухания в разных материалах резко различаются. Если для алюминиевого сплава амплитуда в течение 4 мс падает до уровня помех, то для керамики уменьшение амплитуды едва заметно. Скорость затухания δ удобно оценивать в %/мс в соответствии с эскизом на рис. 7,б. При близком расположении лунок пароплазменное облако соседних лунок влияет на скорость затухания амплитуды АЭ в точке обработки. Зависимости скорости затухания АЭ в диапазоне 55–95 кГц при формировании лунок в мишени из сплава Т15К6 показаны на рис. 8. Условия эксперимента аналогичны рис. 6, но 200 импульсов последовательно подавались в 24 лунки, проход повторялся пять раз.

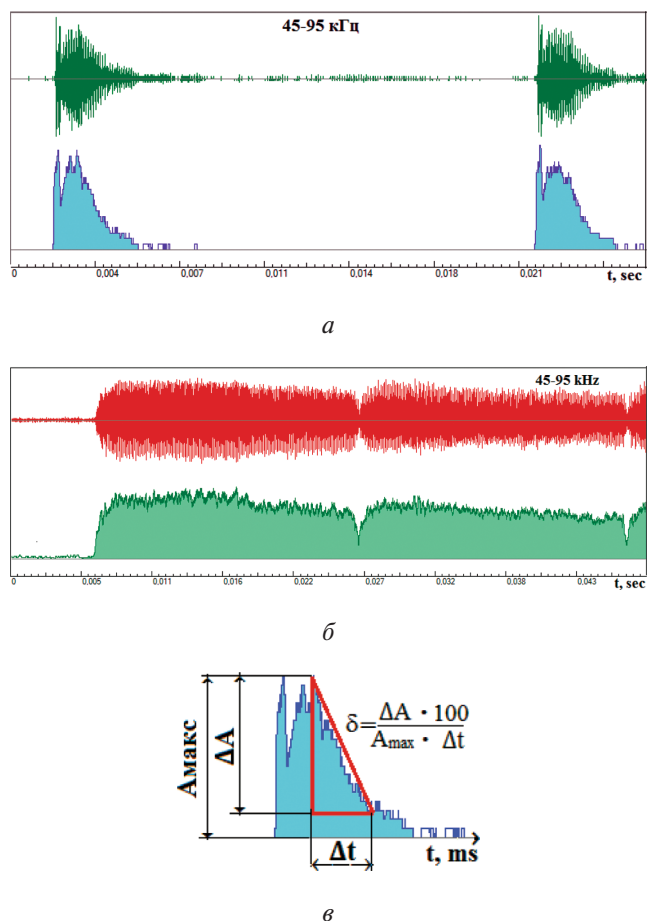


Рис. 7. Примеры записей АЭ в диапазоне 45–95 кГц при подаче 200 лазерных импульсов в одну лунку: а – алюминиевый сплав; б – керамика Al_2O_3 ; в – эскиз и формула для определения скорости затухания (δ) в процентах в секунду

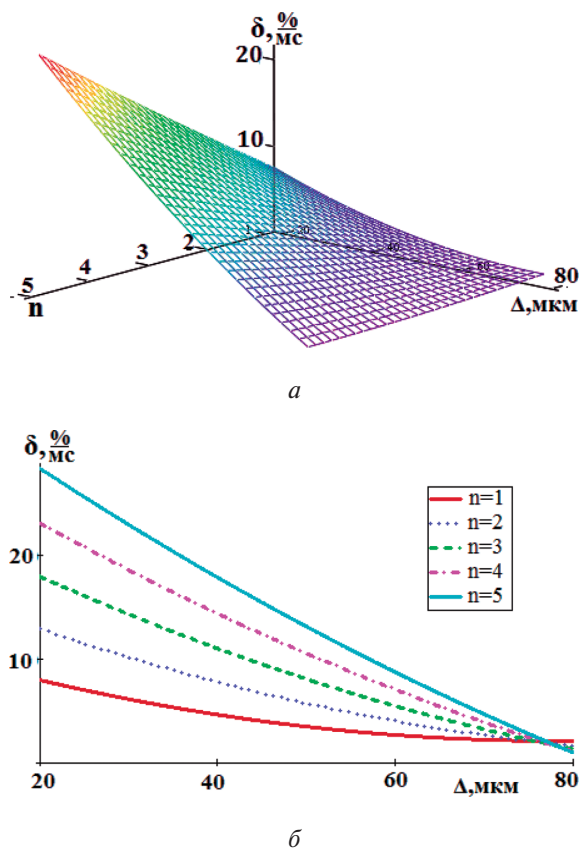


Рис. 8. Зависимость скорости затухания амплитуды сигнала АЭ (δ) от шага между лунками Δ и номера прохода n :
а – общий вид зависимости;
б – проекции сечений с одинаковыми номерами проходов

Из рис. 8 следует, во-первых, что пароплазменное облако влияет на обработку соседнего участка при расстоянии между лунками до 80 мкм, а далее отсутствует; во-вторых, что пароплазменное образование устойчиво во времени: промежуток от прохода до прохода составляет около 0,5 с, но влияние пароплазменного облака сохраняется.

В табл. 2 представлены примеры оценки скорости затухания сигналов АЭ в разных частотных диапазонах при разной мощности подаваемых импульсов в разных материалах.

Сплав Т15К6 не относится к керамическим материалам, скорость затухания в нем резко отличается от таковой в других материалах, в которых скорость затухания значительно меньше, а в простых метал-

лах эта скорость еще выше (в алюминиевом сплаве может достигать 35–40 %/мс).

Выводы

Исследования акустического отклика различных технологических процессов показали, что параметры АЭ содержат много полезной информации о кинетике самих процессов, что несмотря на различие способов энергетического воздействия при реализации этих процессов, параметры АЭ аналогично реагируют на изменение плотности мощности энергетического воздействия. В частности, было установлено, что изменение плотности мощности энергетического воздействия аналогично влияет на деформацию амплитудного спектра АЭ. Это позволяет рассматривать сигналы АЭ как инструмент для мониторинга и познания не только традиционных процессов лезвийной обработки, но и применительно к технологиям, использующим КПЭ. Это особенно важно, поскольку инструментов, позволяющих вести мониторинг качества обработки КПЭ, не так уж много. Большинство методов контроля процессов традиционной обработки при использовании КПЭ становятся недоступными.

Приведенные результаты экспериментов позволяют надеяться, что сигналы АЭ могут быть использованы для мониторинга в режиме on-line и процессов обработки КПЭ. В статье дано представление о связи параметров АЭ с текущей производительностью процесса лазерной обработки, со смещением процесса в сторону увеличения доли расплава удаляемого материала или в сторону его испарения.

Рассмотрены отдельные вопросы, связанные с лазерным зондированием материалов с целью исследования их свойств с точки зрения возможного применения. Была выдвинута гипотеза, что параметры сигнала АЭ, сопровождающего процесс воздействия на материал лазерных импульсов, тесно связаны с внутренней энергией структуры материала. Проверка на примерах известных материалов, применяемых в инструментальной промышленности, это положение подтверждает. Но дальнейшее развитие направления потребует более тщательных исследований в условиях, определяющих назначение новых сплавов. Привлекательность направления заключается в том, что его реализация может

Таблица 2. Скорость затухания АЭ в инструментальных материалах, %/мс

Частота	Т15К6		Al ₂ O ₃		ВОК60		Сиалон	
	60 Вт	30 Вт	60 Вт	30 Вт	60 Вт	30 Вт	60 Вт	30 Вт
5–35 кГц	24,1	29,4	2,06	4,92	4,0	4,7	1,9	1,4
35–75 кГц	26,0	19,4	2,44	5,0	4,1	4,5	3,1	2,9

позволить оперативно оценивать свойства новых композиций сплавов путем сравнения акустических показателей при лазерном зондировании.

Список источников

1. Grigoriev S.N., Kozochkin M.P., Porvatov A.N., et al. Features of Changes in the Parameters of Acoustic Signals Characteristic of Various Metalworking Processes and Prospects for their Use in Monitoring // Processes and Prospects for Their Use in Monitoring. Applied Sciences. 2024. Vol. 14. No. 1: 367. DOI: 10.3390/app14010367
2. Grigoriev S.N., Kozochkin M.P., Porvatov A.N., et al. Acoustic Features of the Impact of Laser Pulses on Metal-Ceramic Carbide Alloy Surface // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 16: 5160. DOI: 10.3390/s24165160
3. Seleznev M., Gustmann T., Friebel J., et al. In situ detection of cracks during laser powder bed fusion using acoustic emission monitoring // Additive Manufacturing Letters. 2022. Vol. 3: 100099. DOI: 10.1016/j.addlet.2022.100099
4. Wang H., Li B., Xuan F.Z. Acoustic emission for in situ process monitoring of selective laser melting additive manufacturing based on machine learning and improved variational modal decomposition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 122, pp. 2277-2292. DOI: 10.1007/s00170-022-10032-6
5. Григорьев С.Г., Козочкин М.П., Мастеренко Д.А. Акустический мониторинг технологических процессов обработки материалов концентрированными потоками энергии. М.: Издательские решения, 2024. 188 с.
6. Chua C., Liu Y., Williams R.J., et al. In-process and post-process strategies for part quality assessment in metal powder bed fusion: a review // Journal of Manufacturing Systems. 2024. Vol. 73. No. 2, pp. 75-105. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.01.004
7. Ma Z.X., Cheng P., Ning J., et al. Innovations in monitoring, control and design of laser and laser-arc hybrid welding processes // Metals. 2021. Vol. 11. No. 12: 1910. DOI: 10.3390/met11121910
8. Kundiya R., Pawade R., More S., et al. Acoustic emission signal correlation with micro-machining characteristics of Ti-6Al-4V alloy // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2025. Vol. 19. No. 4, pp. 2909-2923. DOI: 10.1007/s12008-024-01956-2
9. Papanias M. Bayesian monitoring of machining processes using non-intrusive sensing and on-machine comparator measurement // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 137. No. 3, pp. 1929-1942. DOI: 10.1007/s00170-025-15174-x
10. Schmidt L., Römer F., Böttger D., et al. Acoustic process monitoring in laser beam welding // Procedia CIRP. 2020. Vol. 94. No. 43, pp. 763-768. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.139
11. Prem P.R., Sanker A.P., Sebastian S., et al. A review on application of acoustic emission testing during additive manufacturing // Journal of Nondestructive Evaluation. 2023. Vol. 42. No. 4: 96. DOI: 10.1007/s10921-023-01005-0
12. Алтай Е., Кузванов Д.О., Рождественский Д.А. и др. Методы фильтрации сигналов акустической эмиссии при контроле дефектообразования в процессе прямого лазерного выращивания изделий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 10. С. 852-868. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868
13. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 362 с.
14. Ciaburro G., Iannace G. Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: a review // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 20: 10476. DOI: 10.3390/app122010476
15. Hassan F., Mahmood A.K., Yahya N., et al. State-of-the-art review on the acoustic emission source localisation techniques // IEEE Access. 2021. Vol. 9, pp. 101246-101266. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3096930
16. Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф. Метод анализа акустических сигналов при диагностике композиционных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 2. С. 106-112. DOI: 10.31857/S0235711920020030
17. Самуйлов А.О. Модель оценки наличия и степени опасности дефектов на основе инвариантов акустической эмиссии // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 94-103. DOI: 10.34759/vst-2022-4-94-103
18. Петрова Л.Г., Белашова И.С., Александров В.А. и др. О возможности получения наноструктурированных покрытий на стальных изделиях модифицированием поверхности // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 2. С. 75-82.
19. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш. и др. Эффективность наноструктурированных износостойких покрытий при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 188-195. DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
20. Рыжова Т.Б., Петронюк Ю.С., Мороков Е.С. и др. Применение акустических методов для выявления и характеристики предвестников тотального разрушения углепластика при экспериментальном исследовании прочности // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 92-104. DOI: 10.34759/vst-2020-4-92-104

References

1. Grigoriev SN, Kozochkin MP, Porvatov AN, et al. Features of Changes in the Parameters of Acoustic Signals Characteristic of Various Metalworking Processes and Prospects for their Use in Monitoring. *Processes and Prospects for Their Use in Monitoring. Applied Sciences*. 2024;14(1):367. DOI: 10.3390/app14010367
2. Grigoriev SN, Kozochkin MP, Porvatov AN, et al. Acoustic Features of the Impact of Laser Pulses on Metal-Ceramic Carbide Alloy Surface. *Sensors*. 2024;24(16):5160. DOI: 10.3390/s24165160
3. Seleznev M, Gustmann T, Friebel J, et al. In situ detection of cracks during laser powder bed fusion using acoustic emission monitoring. *Additive Manufacturing Letters*. 2022;3:100099. DOI: 10.1016/j.addlet.2022.100099
4. Wang H, Li B, Xuan FZ. Acoustic emission for in situ process monitoring of selective laser melting additive manufacturing based on machine learning and improved variational modal decomposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;122:2277-2292. DOI: 10.1007/s00170-022-10032-6
5. Grigoriev SN, Kozochkin MP, Masterenko DA. *Acoustic monitoring of technological processes for processing materials with concentrated energy flows*. Moscow: Izdatel'skie resheniya; 2024. 188 p. (In Russ.).
6. Chua C, Liu Y, Williams RJ, et al. In-process and post-process strategies for part quality assessment in metal powder bed fusion: a review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024;73(2):75-105. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.01.004
7. Ma ZX, Cheng P, Ning J, et al. Innovations in monitoring, control and design of laser and laser-arc hybrid welding processes. *Metals*. 2021;11(12):1910. DOI: 10.3390/met11121910
8. Kundiya R, Pawade R, More S, et al. Acoustic emission signal correlation with micro-machining characteristics of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2025;19:2909-2923. DOI: 10.1007/s12008-024-01956-2
9. Papananias M. Bayesian monitoring of machining processes using non-intrusive sensing and on-machine comparator measurement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025;137(3):1929-1942. DOI: 10.1007/s00170-025-15174-x
10. Schmidt L, Römer F, Böttger D, et al. Acoustic process monitoring in laser beam welding. *Procedia CIRP*. 2020;94(43):763-768. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.139
11. Prem PR, Sanker AP, Sebastian S, et al. A review on application of acoustic emission testing during additive manufacturing. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2023;42(4):96. DOI: 10.1007/s10921-023-01005-0
12. Altay E, Kuzivanov DO, Rozhdvestvensky DA, et al. Methods for filtering acoustic emission signals when monitoring defect formation in the process of direct laser growth of product. *Journal of Instrument Engineering*. 2023;66(10):852-868. (In Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-852-868.
13. Ivanov VI, Barat VA. *Acoustic emission diagnostics*. Moscow: Spektr; 2017. 362 p. (In Russ.).
14. Ciaburro G, Iannace G. Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: a review. *Applied Sciences*. 2022;12(20):10476. DOI: 10.3390/app122010476
15. Hassan F, Mahmood AK, Yahya N, et al. State-of-the-art review on the acoustic emission source localisation techniques. *IEEE Access*. 2021;9:102680-102702. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3096930
16. Akhmetkhanov RS, Dubinin EF. Analysis of acoustic signals for diagnostics of composite materials. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;49(2):170-175. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0235711920020030
17. Samuilov AO. A model for defects hazard degree assessing based of the acoustic emission invariants. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(4):94-103. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2022-4-94-103
18. Petrova LG, Belashova IS, Alexandrov VA, et al. The possibility of obtaining of nano-modified layers and coatings on steel products by surface engineering methods. *Aerospace MAI Journal*. 2014;21(2):75-82. (In Russ.).
19. Grigor'ev SN, Volosova MA, Migranov MS, et al. Nano-structured wear-resistant coatings effectiveness at titanium alloys high-speed milling. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(2):188-195. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
20. Ryzhova TB, Petronyuk YuS, Morokov ES, et al. Application of acoustic methods for identification and characterization of full destruction harbingers of carbon fiber-reinforced polymers while strength experimental study. *Aerospace MAI Journal*. 2020;27(4):92-104. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2020-4-92-104

Статья поступила в редакцию / Received 29.01.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 24.02.2026
Принята к публикации / Accepted 25.02.2026