

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. С. Ковалевич^{*1}, И. Ю. Кинжагулов¹, К. А. Степанова², Д. О. Кузиванов¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*kovalevi4.a.s@gmail.com

²Научно-технический центр „Эталон“, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследована кинетика разрушения металлических изделий, выполненных с использованием технологий аддитивного производства, а именно селективным лазерным плавлением. Особенности процесса изготовления изделий данным методом приводят к образованию в материале различного рода структурных неоднородностей, которые, в свою очередь, влияют на прочностные характеристики. Использование метода акустической эмиссии при исследовании кинетики разрушения позволяет выявлять в материале зарождение процессов усталостного разрушения.

Ключевые слова: аддитивные технологии, акустическая эмиссия, неразрушающий контроль, селективное лазерное плавление, малоцикловая усталостность

Ссылка для цитирования: 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. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-139-147.

EXPERIMENTAL STUDY OF ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS DURING CYCLIC TESTING OF METAL PRODUCTS OF ADDITIVE MANUFACTURING

A. S. Kovalevich^{*1}, I. Yu. Kinzhagulov¹, K. A. Stepanova², D. O. Kuzivanov¹

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

*kovalevi4.a.s@gmail.com

²Scientific and Technical Center Etalon, St. Petersburg, Russia

Abstract. The kinetics of destruction of metal products made using additive manufacturing technologies, namely, selective laser melting, is studied. Features of this method of products manufacturing process give rise to various kinds of structural inhomogeneities in the material, which, in turn, affect the strength characteristics. The use of the acoustic emission method in the study of fracture kinetics makes it possible to reveal the initiation of fatigue fracture processes in the material.

Keywords: additive technologies, acoustic emission, non-destructive testing, selective laser melting, low-cycle fatigue

For citation: Kovalevich A. S., Kinzhagulov I. Yu., Stepanova K. A., Kuzivanov D. O. Experimental study of acoustic emission parameters during cyclic testing of metal products of additive manufacturing. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 139—147 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-139-147.

Введение. В настоящее время технологии аддитивного производства активно развиваются и находят широкое применение в различных областях промышленности, таких как авиа- и ракетостроение, судо- и машиностроение, автомобильная промышленность [1, 2]. Этот способ изготовления изделий перешел от стадии прототипирования, выпуска экспериментальных образцов и единичных изделий к полноценному серийному промышленному производству изделий. По мнению отдельных ученых и специалистов, в обозримом будущем эти технологии заменят традиционные технологии литья, обработки давлением и резанием. В

пользу этого свидетельствуют успешное применение продуктов аддитивных технологий в реальных объектах техники, а также высокая эффективность новой технологии в конструировании — возможность замены десятков деталей, собираемых в сборочную единицу, на цельное изделие, полученное в одном производственном цикле [3].

Преимущества аддитивных технологий — экономия сырья при производстве деталей, изготовление деталей сложной геометрии, сокращение временных затрат между этапами прототипирования и получения конечного изделия, уникальность характеристик получаемой продукции, придание направленной анизотропии материалу — обуславливают их активное внедрение [4].

Однако наряду с преимуществами этому способу изготовления изделий присущ и ряд недостатков: неоднородность материала получаемого изделия [5—7], высокая стоимость сырья, ограниченный размер изделий.

Специфика процесса получения изделий технологиями аддитивного производства определяет наличие в материале (детали) различных структурных неоднородностей.

Одной из главных закономерностей, установленных при изучении прочностных свойств порошковых металлических материалов, является резкое снижение предельных характеристик прочности, пластичности и разрушение изделия с увеличением размера дефектов.

В работе исследуются зависимости изменения параметров сигналов акустической эмиссии от протекающих в материале процессов [8—12], это обеспечило возможность обнаружения дефектов в материале.

Методика проведения исследований. Развитие дефектов в изделиях аддитивного производства выявлялось с применением средств акустико-эмиссионного контроля (рис. 1), включающих:

— модуль регистрации акустико-эмиссионной информации, включающий систему СЦАД-16.10, собранную на базе промышленной рабочей станции с двумя измерительными платами по четыре канала в каждой, и программное обеспечение, предназначенное для сбора, обработки, хранения и отображения данных, накопленных при проведении контроля;

— комплект преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), предназначенный для регистрации и преобразования в электрический сигнал энергии упругих механических волн, распространяющихся от места зарождения и развития дефекта в объекте контроля.

Для регистрации сигналов акустической эмиссии в ходе АЭ-контроля с помощью программы нагружения объектов контроля использовалась универсальная испытательная машина LFM-150 кН (рис. 2).



Рис. 1



Рис. 2

Для экспериментальных исследований акустико-эмиссионного контроля качества изделий, выполненных селективным лазерным сплавлением, были изготовлены экспериментальные образцы с имитацией внутренних макро- и микродефектов типа „усадочные пустоты“ (раковины, пористость) и „трещины“. Экспериментальные образцы (2 шт.) для циклических испытаний были изготовлены из материала Inconel 718 согласно требованиям ГОСТ 1497-84 с имитацией в рабочей части микро- и макродефектов (рис. 3, табл. 1).



Рис. 3

Таблица 1

Экспериментальные образцы для циклических испытаний на растяжение

Номер образца	Описание (указаны размеры САD-моделей образцов)	Название САD-модели	Чертеж рабочей части образцов с дефектами
I-0-1 I-0-2	Пропорциональный плоский образец без дефектов	Образец пропорциональный плоский	
II-45°-1 II-45°-2	С треугольной призмой внутри рабочей части образца: протяженность 10 мм, угол при вершине 45°, длина грани основания призмы 3 мм	Пластина с внутренним дефектом	
II-20°-1 II-20°-2	С треугольной призмой в рабочей части образца: протяженность 10 мм, угол при вершине 20°, длина грани основания призмы 3 мм	Пластина с дефектом на поверхности с углом 20 градусов	
III-0,2C-1 III-0,2C-2	С имитацией пористости с рабочей части образца с диаметром сфер, имитирующих поры d = 0,2 мм	Пластина со сферами d = 0,2 мм	

Степень влияния микро- и макродефектов на прочностные свойства изделий экспериментально оценивалась в ходе статических испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84 для оценки:

- предела текучести условного $\sigma_{0,2}$;
- предела прочности (временного сопротивления) σ_B ;
- относительного удлинения δ .

На рис. 4 приведена диаграмма нагружения при испытаниях объектов контроля. Сбор АЭ-данных осуществлялся непрерывно во время каждого этапа нагружения.

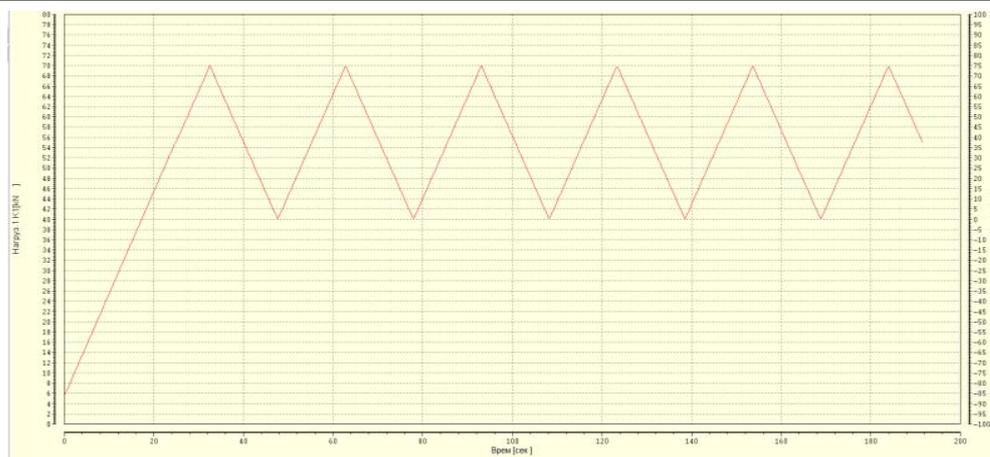


Рис. 4

Результаты. В ходе экспериментальных исследований относительное удлинение δ бездефектного образца составило 9,0 %. Разрушение образца произошло при нагрузке 153 кН на этапе нагружения до 155 кН.

В ходе циклических испытаний образца П-20°-1 относительное удлинение δ составило 1,7 %. Разрушение образца произошло на втором цикле испытаний при условиях нагружения: 105 ± 15 кН, максимальная нагрузка до разрушения составила $F_{\max} = 120$ кН. Разрушение произошло в месте расположения искусственно заложенного дефекта.

В ходе проведения испытаний на малоцикловую усталость до разрушения образца П-45°-1 относительное удлинение δ составило 2,1 %. Разрушение образца произошло в ходе первого этапа испытаний при условиях нагружения: 110 ± 15 кН, максимальная нагрузка до разрушения составила 123 кН. Разрушение произошло в месте расположения искусственно заложенного дефекта.

Относительное удлинение образца III-0,2С-1 δ составило 8,7 %. Разрушение образца произошло при нагрузке 157 кН на этапе нагружения до 155 кН.

Механические характеристики, полученные в ходе испытаний, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний по определению предела прочности

Номер образца	Число циклов до разрушения	$\sigma_{0,2}$, МПа	F_{\max} , кН	σ_B , МПа	$\Delta\sigma$, %	δ , %
I-0-2	60	972	153	1093	2,4	9,0
I-0-3	75		157	1120	0	10,1
II-20°-1	42	764	120	857	23,5	1,7
II-20°-2	50		125	893	20,3	2,2
II-45°-1	45	782	123	879	21,5	2,1
II-45°-2	44		122	872	22,1	2,0
III-0,2С-1	72	951	157	1121	0	8,7
III-0,2С-2	70		148	1068	4,6	8,7

В результате испытаний установлено, что разность расчетных и экспериментальных значений прочностных характеристик ($\sigma_{0,2}$, σ_B) составила ≈ 10 %, что обусловлено изменением фактических размеров внутренних дефектов относительно закладываемых в САД-моделях прототипов образцов для последующего выращивания методом SLM, а также наличием порошковых гранул в закрытых полостях имитаторов дефектов, претерпевающих частичное расплавление на границе сплавления.

Отмечено, что имитация пористости путем периодического расположения сферических полостей в рабочей части позволила улучшить характеристики пластичности образцов ($\sigma_{0,2}$, δ) с сохранением предела прочности на уровне основного металла.

Число импульсов АЭ, зарегистрированных на этапах испытаний образцов при нагружении (+ ΔP) и разгрузке ($-\Delta P$), представлено в табл. 3.

Таблица 3

Статистические результаты испытаний образцов

Номер этапа	$P_0 \pm \Delta P/2$, кН	Число импульсов АЭ N_{Σ}							
		I-0-2		II-20°-1		II-45°-1		III-0,2С-1	
		+ ΔP	- ΔP	+ ΔP	- ΔP	+ ΔP	- ΔP	+ ΔP	- ΔP
1	50±15	440	—	2143	400	271	122	816	212
2	55±15	1214	—	119	62	340	114	460	115
3	65±15	201	—	230	54	970	374	374	109
4	80±15	634	250	793	223	1251	430	332	90
5	85±15	76	12	405	94	211	114	845	92
6	90±15	149	116	59	15	501	265	325	105
7	95±15	80	29	330	64	280	154	293	72
8	100±15	71	45	65	17	239	70	318	88
9	105±15	183	55	117	6	430	164	270	90
10	110±15	31	6					297	107
11	115±15	82	17					77	8
12	120±15	45	8					245	60
13	125±15	110	21					284	45
14	130±15	137	26					98	5
15	135±15							255	25

Анализ распределения основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуда U_m , энергия $E_{AЭ}$, активность \dot{N}_{Σ} , доминантная частота f_d) выполнялся для каждого этапа нагружения.

На рис. 5 приведены диаграммы распределения средней активности $\bar{\dot{N}}_{\Sigma}$ на этапах испытаний образцов (n — номер этапа и цикла нагружения): a — I-0-2; b — I-0-3; v — II-20°-1; z — II-20°-2; d — II-45°-1; e — III-0,2С-1. На рис. 6 представлены диаграммы распределения амплитуды импульсов АЭ U_m на этапах испытаний, предшествующих разрушению образцов: a — I-0-2; b — II-20°-1; v — II-45°-1. Распределение амплитуды импульсов АЭ U_m на этапе испытаний, при котором произошло разрушение образцов, проиллюстрировано на рис. 7: a — I-0-2; b — I-0-3; v — II-20°-1; z — II-20°-2; d — II-45°-1; e — III-0,2С-1.

Установлено, что активность АЭ \dot{N}_{Σ} в момент разрушения образцов без дефектов и с имитацией внутренних дефектов более чем в два раза превышает среднюю активность АЭ в предшествующих циклах $\bar{\dot{N}}_{\Sigma}$. Однако данное явление не выявлено при разрушении образцов с дефектом, выходящим на поверхность. Отличительное свойство этих образцов — отсутствие заполнения областей несплошностей порошковыми гранулами.

Вследствие движения порошковых гранул в результате деформации рабочей части образца под нагрузкой происходит трение частиц между собой и со сплавленным металлом. Аналогично явлениям трения и зернограничного скольжения в объеме деформируемых жаропрочных сплавов данные процессы являются источниками АЭ и сопровождаются генерацией акустических импульсов.

Наличие большого числа элементарных источников АЭ, локализованных на относительно малом участке (в области несплошностей) рабочей части образца, сопровождается генерацией сигнала АЭ вследствие их взаимодействия. Этот фактор обуславливает повышение средних значений активности в области экстремумов диаграммы нагружения, а также приводит к изменению частотно-энергетических параметров АЭ-сигналов.

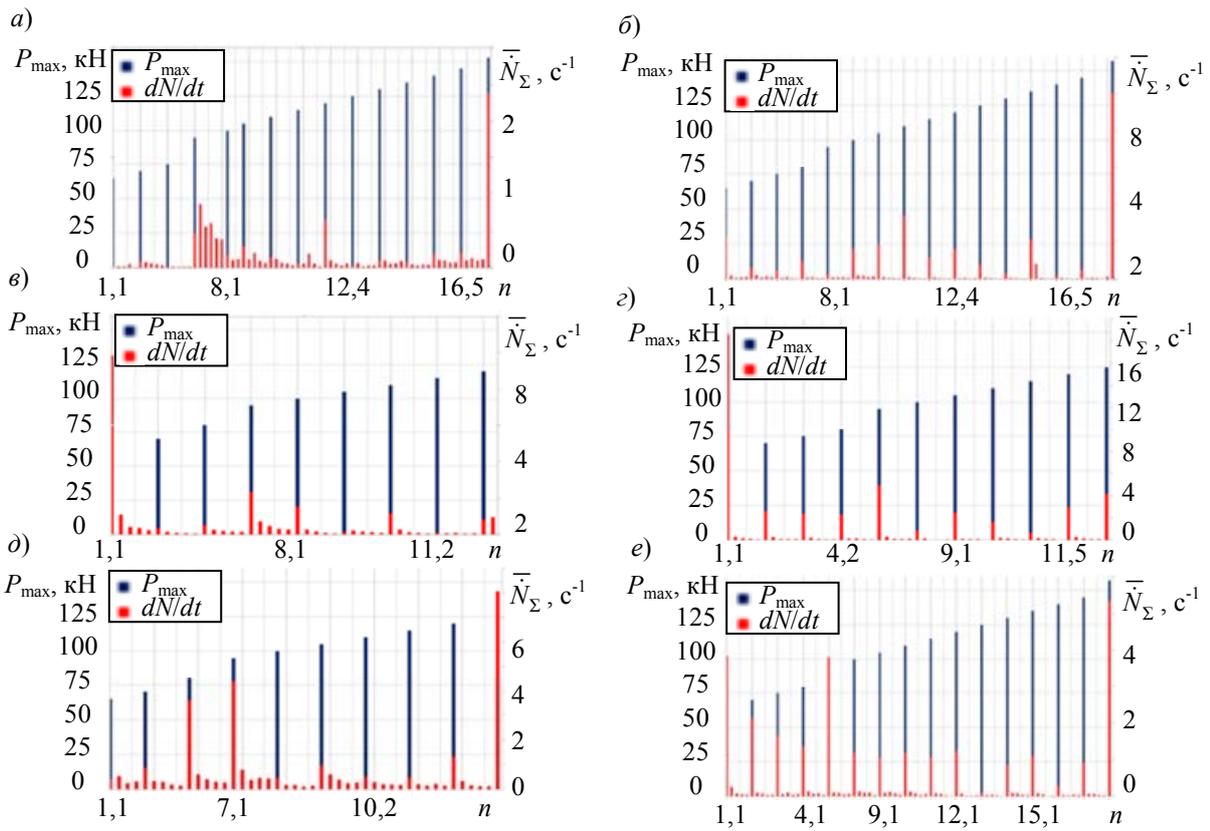


Рис. 5

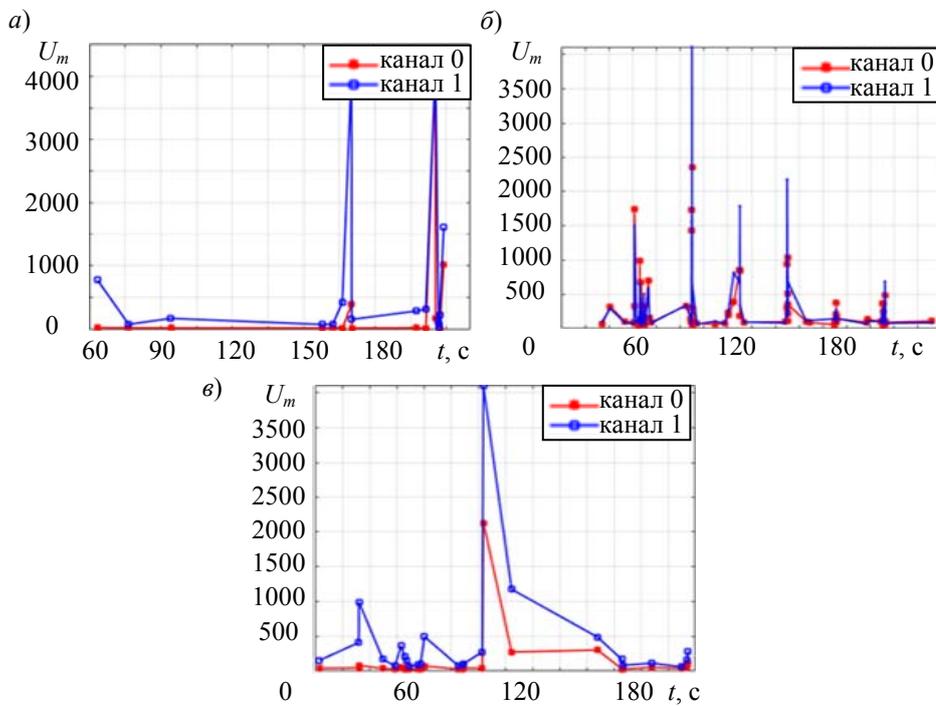


Рис. 6

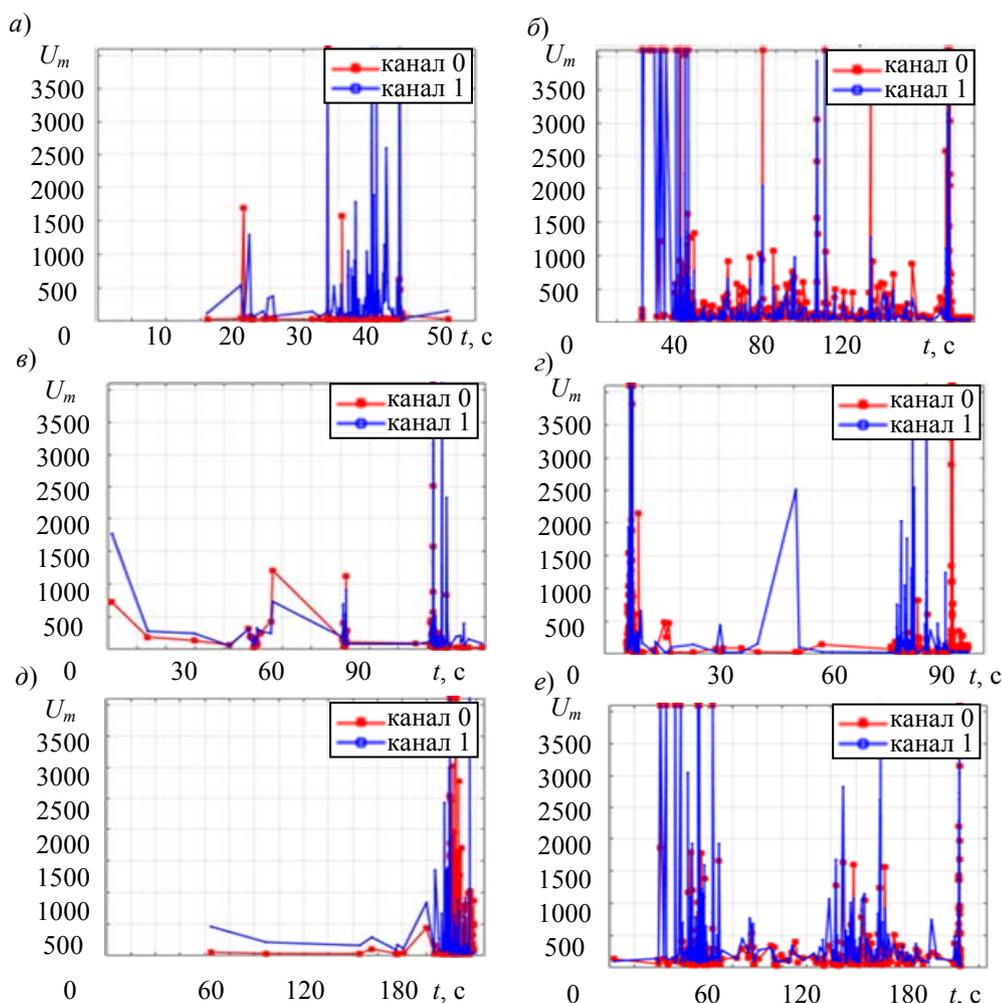


Рис. 7

В ходе исследования форм АЭ-сигналов, сопровождающих процесс разрушения образцов, с имитацией дефектов и без дефектов, выявлены характерные особенности амплитуды U_m сигналов (см. рис. 7).

Для АЭ-импульсов, локализованных в области накопления концентрации напряжений в рабочей части образца, характерно снижения длительности переднего фронта Δt .

Выводы. В ходе экспериментальных исследований образцов была обнаружена зависимость изменения параметров АЭ при контроле дефектных и бездефектных образцов.

Наиболее информативными параметрами АЭ в ходе эксперимента являлись число импульсов АЭ N_Σ , разность времени поступления сигнала АЭ, амплитуда сигналов АЭ U_m , активность АЭ \dot{N}_Σ .

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что основным механизмом пластической деформации на этапах нагружения с превышением значения напряжений в цикле предела текучести материала $\sigma_{0,2}$ являются процессы скольжения на границах „кластеров“, образованных при спекании гранул жаропрочного сплава (размером $\approx 30\text{—}40$ мкм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kruth J.-P., Leu M. C., Nakagawa T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 1998. Vol. 47, N 2. P. 525—540. DOI:10.1016/S0007-8506(07)63240-5.
2. Berman B. 3-D Printing: The New Industrial Revolution // Business Horizons. 2012. Vol. 55, N 2. P. 155—162. DOI: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.

3. Гончарова О. Н., Бережной Ю. М., Бессарабов Е. Н., Кадамов Е. А., Гайнутдинов Т. М., Негопетьян Е. М., Ковина В. М. Аддитивные технологии — динамично развивающееся производство // Электронный научный журнал „Инженерный вестник Дона“. 2016. № 4 [Электронный ресурс]: <ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931>.
4. Khajavi S. H., Partanen J., Holmström J. Additive Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain // *Computers in Industry*. 2014. Vol. 65, N 1. P. 50—63. DOI:10.1108/RPJ-03-2017-0052.
5. Song B., Zhao X., Li Sh., Han Ch., Wei Q., Wen Sh., Liu J., Shi Yu. Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: a review // *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 10, N 2. P. 111—125. DOI: 10.1007/s11465-015-0341-2.
6. Olakanmi E. O., Cochrane R. F., Dalgarno K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminum alloy powders: processing, microstructure, and properties // *Progress in Materials Science*. 2015. Vol. 74. P. 401—477. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.03.002.
7. Collins P. C., Haden C. V., Ghamarian I., Hayes B. J., Ales T., Penso G., Dixit V., Harlow G. Progress toward an integration of process-structure-property performance models for ‘three-dimensional (3-D) printing’ of titanium alloys // *JOM*. 2014. Vol. 66, N. 7. P. 1299—1309. DOI:10.1007/s11837-014-1007-y.
8. Степанова Л. Н., Пестов Н. М., Чаплыгин В. Н., Кабанов С. И., Кожемякин В. Л., Лебедев Е. Ю., Катарушкин С. А. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов из авиаматериалов и элементов авиационных конструкций // *Контроль. Диагностика*. 2002. № 2. С. 19—24.
9. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кареев А. Е., Кожемякин В. Л., Лебедев Е. Ю., Кабанов С. И., Чаплыгин В. Н., Катарушкин С. А. Расчет остаточного ресурса образцов из авиаматериалов при их акустико-эмиссионном контроле // *Контроль. Диагностика*. 2002. № 9. С. 13—18.
10. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Митрофанов О. В., Куликов Е. Н., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю., Чаплыгин В. Н., Катарушкин С. А. Циклические испытания панелей самолета RRJ с использованием метода акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика*. 2007. № 7. С. 56—60.
11. Анасов А. М. Исследование сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении плоских образцов из высокопрочной стали // *Изв. Томского политехнического университета*. 2010. Т. 316, № 2. С. 32—41.
12. Васильев Е. В., Виноградов А. Ю., Мерсон Д. Л., Брилевский А. И. Акустическая эмиссия при циклической деформации магниевого сплава ZK30 // *Сборник материалов всероссийской конференции с международным участием „Актуальные проблемы метода акустической эмиссии“*. Тольятти, 2018. С. 76.

Сведения об авторах

- Анастасия Сергеевна Ковалевич** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kovalevi4.a.s@gmail.com
- Игорь Юрьевич Кинжагулов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; преподаватель; E-mail: kinzhiki@mail.ru
- Ксения Андреевна Степанова** — канд. техн. наук; Научно-технический центр „Эталон“, отдел научно-технических разработок; ведущий научный сотрудник; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru
- Дмитрий Олегович Кузиванов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Поступила в редакцию 22.08.22; одобрена после рецензирования 07.09.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Kruth J.-P., Leu M.C., Nakagawa T. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1998, no. 2(47), pp. 525–540, DOI:10.1016/S0007-8506(07)63240-5.
2. Berman B. *Business Horizons*, 2012, no. 2(55), pp. 155–162, DOI: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
3. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931. (in Russ.)
4. Khajavi S.H., Partanen J., Holmström J. *Computers in Industry*, 2014, no. 1(65), pp. 50–63, DOI:10.1108/RPJ-03-2017-0052.
5. Song B., Zhao X., Li Sh., Han Ch., Wei Q., Wen Sh., Liu J., Shi Yu. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2015, no. 2(10), pp. 111–125, DOI: 10.1007/s11465-015-0341-2.
6. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. *Progress in Materials Science*, 2015, vol. 74, pp. 401–477, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.03.002.
7. Collins P.C., Haden C.V., Ghamarian I., Hayes B.J., Ales T., Penso G., Dixit V., Harlow G. *JOM*, 2014, no. 7(66), pp. 1299–1309, DOI:10.1007/s11837-014-1007-y.

8. Stepanova L.N., Pestov N.M., Chaplygin V.N., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., Lebedev E.Yu., Katarushkin S.A. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2002, no. 2, pp. 19–24. (in Russ.)
9. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Kareev A.E., Kozhemyakin V.L., Lebedev E.Yu., Kabanov S.I., Chaplygin V.N., Katarushkin S.A. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2002, no. 9, pp. 13–18. (in Russ.)
10. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Mitrofanov O.V., Kulikov E.N., Kabanov S.I., Lebedev E.Yu., Chaplygin V.N., Katarushkin S.A. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2007, no. 7, pp. 56–60. (in Russ.)
11. Apasov A.M. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2010, no. 2(316), pp. 32–41. (in Russ.)
12. Vasiliev E.V., Vinogradov A.Yu., Merson D.L., Brilevsky A.I. *Aktual'nyye problemy metoda akusticheskoy emissii* (Actual Problems of the Acoustic Emission Method), Collection of Materials of the All-Russian Conference with International Participation, Tolyatti, 2018, pp. 76. (in Russ.)

Data on authors

- Anastasiia S. Kovalevich** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kovalevi4.a.s@gmail.com
- Igor Yu. Kinzhagulov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; преподаватель; E-mail: kinzhiki@mail.ru
- Kseniya A. Stepanova** — PhD; Scientific and Technical Center Etalon, Department of Scientific and Technical Development; Leading Researcher; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru
- Dmitry O. Kuzivanov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Received 22.08.22; approved after reviewing 07.09.22; accepted for publication 27.12.22.