

Акционерное общество «Ижевский радиозавод»



«СОВРЕМЕННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ: ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ»

Сборник докладов
научно-практической конференции
Ижевского радиозавода

Ижевск, 23, 25-26 апреля, 21, 23-24 мая 2024 г.

Акционерное общество «Ижевский радиозавод»

**«СОВРЕМЕННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ:
ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ»**

Сборник докладов
научно-практической конференции
Ижевского радиозавода

Ижевск, 23, 25–26 апреля, 21, 23–24 мая 2024 г.



Издательство УИР ИЖГТУ
имени М. Т. Калашникова
Ижевск 2025

УДК 681.2(06)
ББК 34.9я4
С56

Главный редактор

Феофилактов С. В., канд. техн. наук, главный конструктор ООО «ИРЗ ТЭК»

Редакционная коллегия

Бекмачев Д. А., начальник сектора разрушающего физического анализа и химического анализа отдела 454 ООО «ИРЗ ТЕСТ»

Вахрушев Н. В., начальник конструкторского бюро отдела проектирования станций управления ООО «ИРЗ ТЭК»

Сафиуллин И. Г., главный технолог – начальник технологического отдела ООО «ИРЗ», доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры»

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Исаев Э. П., главный специалист отдела стандартизации ООО «ИРЗ»

Клёнов А. И., руководитель проекта отдела робототехники ООО «ИРЗ»

Максимов К. О., канд. техн. наук, начальник отдела испытаний на специальные факторы ООО «ИРЗ ТЕСТ», доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры»

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Рылов С. А., инженер-конструктор 2-й категории отдела бортовых радиотехнических комплексов ООО «ИРЗ»

Шартдинов В. Р., начальник конструкторского бюро отдела телеметрических систем и бортовых цифровых вычислительных комплексов ООО «ИРЗ»

Шаура А. С., канд. техн. наук, ведущий инженер-программист ООО «ИРЗ-Телеком», доцент кафедры «Высшая математика» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, старший научный сотрудник лаборатории машинного обучения и обработки больших данных производственных киберсистем УдмФИЦ УрО РАН

Современное приборостроение: от теории к практике : сборник докладов научно-практической конференции Ижевского радиозавода, Ижевск, 23, 25–26 апреля, 21, 23–24 мая 2024 г. / [гл. ред. С. В. Феофилактов]. – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025. – 90 с. – 5,60 МБ (PDF). – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7526-1083-7

Сборник докладов научно-практической конференции «Современное приборостроение: от теории к практике» подготовлен на основе докладов ежегодной научно-практической конференции Ижевского радиозавода, состоявшейся 23, 25–26 апреля, 21, 23–24 мая 2024 г.

Программа конференции включала работу трех секций: конструкторско-технологической, программного обеспечения, студенческой.

Издание может быть полезно научным сотрудникам, инженерам, преподавателям вузов, аспирантам для публикации своих научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, а также техническим специалистам.

ISBN 978-5-7526-1083-7

© Ижевский радиозавод, 2025

© Оформление. Издательство УИР ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова, 2025

Д. Р. Фатталова, студент
Г. А. Гордеев, кандидат физико-математических наук
Удмуртский государственный университет, Ижевск
С. Л. Ломаев, кандидат физико-математических наук
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск
w_c_b_and_a@bk.ru, gordeevgeorgii@gmail.com, lomayevst@ya.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ 3D-ПЕЧАТИ ПОСРЕДСТВОМ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Описан механизм воздействия ультразвука на кристаллизацию металлических изделий посредством кавитации в таких процессах 3D-печати, как SLS, SLM и DED. Установлено, что существует два режима схлопывания кавитационных пузырьков: резонансный и безрезонансный. Рассчитаны пороговые характеристики ультразвука (частота и акустическое давление) для резонансного режима, а также рассмотрены характеристики ультразвука при отхождении от резонансного состояния. Выявлено, что воздействие ультразвука в процессе печати металлических изделий влияет на структуру кристаллизующегося материала. Рассчитаны пороговые характеристики ультразвука для активации кавитационных процессов в расплавах нержавеющей стали 316L и титанового сплава BT6.

Ключевые слова: кавитация, математическое моделирование, ультразвуковая обработка, аддитивные технологии.

D.R. Fattalova, Student
G.A. Gordeev, PhD in Physics and Mathematics
Udmurt State University, Izhevsk
S.L. Lomaev, PhD in Physics and Mathematics
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Izhevsk
w_c_b_and_a@bk.ru, gordeevgeorgii@gmail.com, lomayevst@ya.ru

FORMATION OF THE GRAIN STRUCTURE OF METAL IN THE PROCESS OF 3D PRINTING BY MEANS OF OPTOACOUSTIC ACTION

The mechanism of the effect of ultrasound on the crystallization of metal products by cavitation in such 3D printing processes as SLS, SLM and DED is described. It is established that there are two modes of collapse of cavitation bubbles: resonant and non-resonant. The threshold characteristics of ultrasound (frequency and acoustic pressure) for the resonant mode are calculated, and the characteristics of ultrasound when moving away from the resonant state are considered. It has been revealed that the effect of ultrasound in the printing process of metal products affects the structure of the crystallizing material. Threshold characteristics of ultrasound for activation of cavitation processes in melts of 316L stainless steel and Ti-6Al-4V titanium alloy are calculated.

Keywords: cavitation, mathematical modeling, ultrasonic treatment, additive technologies.

Введение

На сегодняшний день аддитивные технологии (АТ) всё активнее внедряются в технологические процессы предприятий. Одно из важнейших преимуществ АТ перед традиционными технологиями изготовления изделий: возможность получать детали со сложной геометрией без сварки и пайки. Также технологии послойного выращивания позволяют печатать детали в небольшом количестве и с индивидуальными особенностями, что очень важно, например, для создания протезов в медицинском деле. В число перспективных методов печати входят порошковые методы печати металлических изделий, такие как SLS, SLM и DED. В данных технологиях металлический порошок послойно спекается лазерным излучением. Как и в металлургических процессах, важным аспектом в выращивании металлических изде-

лий является управление зеренной структурой материала, так как от того, какая структура получится при кристаллизации расплава, зависят свойства готового продукта. Под пятном лазера порошок плавится, формируя бассейн расплава (БР). После прохождения луча лазера расплав кристаллизуется. Из-за больших градиентов температур скорость кристаллизации высока, вследствие чего зеренная структура остывшего металла получается столбчатой и крупной, что способствует охрупчиванию детали, делает ее менее гибкой. Существуют исследования, показывающие, что воздействие ультразвука в процессе печати позволяет формировать равноосную мелкую зеренную структуру [1–3], такая структура повышает ударную вязкость, пластичность и обрабатываемость изделия. Гипотеза, которая объясняет такое формирование структуры металла при воздействии ультразвуковой волны, которой придерживаются множество исследователей, – ультразвуковая кавитация [4]. В БР всегда присутствует некоторое количество парогазовых пузырьков – зародышей кавитации. Под действием растягивающих давлений они увеличиваются в размерах, после чего существует два исхода событий: на стадии сжимающих давлений пузырьки уменьшаются в размерах и схлопываются; если растягивающие давления слишком велики, кавитационные полости взрываются. В обоих случаях на месте схлопывания/взрыва локально возрастает температура, а также образуется ударная волна, которая разбивает растущий металлический кристалл вблизи места взрыва/схлопывания, образуя новые центры кристаллизации. В исследованиях, описанных ранее, образец выращивался на сонотроде, который являлся источником ультразвукового поля. Однако для порошковых методов печати такой способ генерации ультразвука неприменим: интенсивные вибрации подложки могут привести к рассыпанию металлического порошка. Один из способов генерации ультразвука – оптоакустический эффект [5, 6].

Цель данного исследования – рассчитать пороговые характеристики ультразвука, необходимые для инициации кавитационных процессов в бассейне расплава, генерируемого оптоакустическим эффектом.

Модель одиночного кавитационного пузырька

Для описания динамики пузырька используется уравнение Нолтинга – Неппайреса [7]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2} = \frac{1}{\rho} \left(\left(P_h + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - 4\eta \frac{\dot{R}}{R} - \left(P_h + \frac{P_a}{2} (1 - \cos \omega_a t) \right) \right), \quad (1)$$

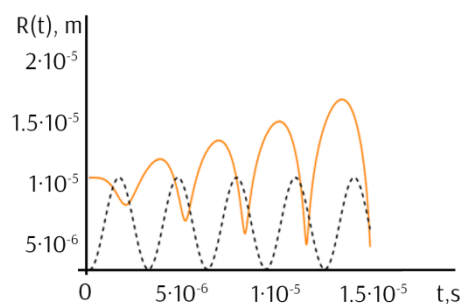
здесь $R = R(t)$ – радиус пузырька, точки над переменной показывают порядок производной величины по времени; t – время; R_0 – радиус пузырька до воздействия ультразвука; ρ – плотность жидкого металла, окружающего пузырек; P_h – статическое давление жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе газ-жидкость; γ – коэффициент политропы; η – динамическая вязкость жидкости; $P_a = P_a(t)$ – акустическое давление; $\omega_a = \omega_a(t)$ – циклическая частота ультразвука.

Последнее слагаемое отражает воздействие ультразвуковой волны на БР. Оптоакустический эффект реализуется при помощи импульсного лазерного источника, а значит, имеет место быть только стадия сжатия. Беря во внимание этот факт, в дальнейшем речь будет идти только о схлопывании пузырька, не рассматривая ситуацию с взрывом кавитационной полости. Аналитического общего решения уравнение не имеет. Однако упрощается до простой колебательной системы, а значит, имеется резонансная частота:

$$\omega_r^2 = 1 / (\rho R_0^2) [3\gamma (P_h + 2\sigma / R_0) - 2\sigma / R_0]. \quad (2)$$

Отсюда можно сделать вывод о существовании двух режимов схлопывания пузырьков – резонансном и безрезонансном.

Рассмотрим режим резонансного схлопывания пузырьков. Возьмем пузырек с радиусом 10^{-5} м в бассейне расплава нержавеющей стали 316L (показатель политропы $\gamma = 1,3$, пузырек будем считать парогазовым).



Динамика пузырька 10^{-5} м в бассейне расплава стали 316L: сплошная линия – изменение радиуса пузырька со временем, пунктирная – ультразвуковая волна

Наблюдается уменьшение радиуса при сжимающих давлениях, и увеличение при растягивающих. Отдельное внимание стоит уделить критериям схлопывания пузырька. Есть множество экспериментов с наблюдением схлопывания пузырьков в различных жидкостях. Так, в работах [8–10] пузырьки в расплавах металлов увеличивались в размерах примерно в 2,8 раз и на стадии сжимающей волны схлопывались. В работах [11, 12] наблюдалось увеличение радиуса в 1,6 и 1,4 раза соответственно, затем с наступлением сжимающих давлений также происходило схлопывание. Такой разброс критериев схлопывания, вероятно, связано с тем, что авторы работ не ставили прямой задачи нахождения момента схлопывания полостей. Чтобы учесть все эти наблюдения, возьмем следующие критерии схлопывания: пузырек должен увеличиться в два раза от радиуса без воздействия ультразвука (т. е. $2R_0$), а затем сжаться в $1/3$ от R_0 . Для рассматриваемого пузырька пороговые характеристики следующие: акустическое давление $2 \cdot 10^5$ Па, циклическая частота $2,2 \cdot 10^5$ Гц.

Расчеты были проведены для пузырьков в следующем диапазоне радиусов: от 10^{-6} м до 10^{-4} м. Такие размеры полостей выбраны из следующих соображений. Для схлопывания пузырьков меньшего радиуса требуется высокое давление, пузырьки большего диаметра соизмеримы с характерными размерами БР [13, 14]. И, как показывают эксперименты [13, 15, 16], при лазерной обработке размеры пузырьков лежат в рассматриваемом диапазоне. Одни из самых широко используемых материалов в технологиях порошковой печати: нержавеющей сталь 316L [2, 18] и титановый сплав ВТ6 (аналог Ti-6Al-4V) [1, 16, 17].

Рассматривая в совокупности уравнения (1), (2) и сформулированные критерии схлопывания, для пузырьков в рассматриваемом диапазоне можно вычислить следующие пороговые характеристики (см. таблицу).

Пороговые характеристики ультразвука, необходимого для инициации кавитационных процессов в резонансном режиме схлопывания

Сталь	Циклическая частота ω_a , кГц	Акустическое давление P_a , кПа
316L	13,7...6400	0,74...25
ВТ6	19...9300	0,6...24

Здесь левая граница диапазона соответствует пороговым характеристикам для пузырька радиусом 10^{-6} м, правая – для 10^{-4} м

Генерация ультразвука посредством оптоакустического эффекта

Для реализации технологии выращивания изделий, в ходе которой формируется мелкозернистая структура посредством кавитации, понадобятся два лазера. Первый лазер – непрерывный с настройками, типичными для выбранной технологии выращивания (SLS, SLM, DED), который будет формировать БР. Второй лазер, идущий вслед за непрерывным и направленный в хвост БР, – импульсный с частотой, рассчитанной в пункте ранее. Во время лазерного импульса локально возрастает температура металлического образца. Температура достигает значений, когда вещество начинает активно испаряться с поверхности. Испаряясь, вылетающее вещество создает реактивное давление, генерируя акустическую волну [19]. Акустическое давление, возникающее при испарении вещества с БР, связано с мощностью

импульсного лазерного излучения. Зная давление, возникающее при испарении вещества (это и есть акустическое давление, рассчитанное в предыдущем пункте), можно рассчитать температуру поверхности БР под лазерным пучком в момент воздействия импульса:

$$P_{\text{исп}} = \left(\frac{1}{2} + 1 - \phi \right) e^{\frac{A-B}{T_s}} = P_a, \quad (3)$$

где $P_{\text{исп}} = P_a$ – давление, генерируемое испаряющимся веществом при покидании БР; ϕ – доля вещества, вернувшегося обратно в БР (здесь 0,82 [20]), A, B – константы насыщенных паров; T_s – температура поверхности БР под лучом импульсного лазера.

Зная температуру поверхности хвоста БР до воздействия лазерного импульса T_0 и во время импульса T_s , можно рассчитать разницу температур, на которую нагрелся участок под лучом:

$$\Delta T = T_s - T_0. \quad (4)$$

Отсюда найдем интенсивность излучения, уходящего на нагрев $I_{\text{нагр}}$ и испарение $I_{\text{исп}}$:

$$\Delta T = I_{\text{нагр}} \frac{\Delta t}{\sqrt{ac_v\rho}}, \quad I_{\text{нагр}} = \eta I, \quad I_{\text{исп}} = \frac{P_{\text{исп}} L \alpha \sqrt{M}}{\sqrt{8RT_s}}, \quad (5)$$

здесь Δt – время воздействия импульса; a – температуропроводность; c_v – теплоемкость жидкого металла; ρ – плотность жидкого металла; η – доля тепла, приходящегося на нагрев; L – теплота парообразования; α – коэффициент поглощения лазерного излучения; M – молярная масса металла; R – универсальная газовая постоянная.

Сумма (4) и (5) дает интенсивность лазерного излучения I :

$$I = \frac{\alpha P_{\text{исп}}}{S}, \quad (6)$$

где $P_{\text{исп}}$ – мощность импульса; S – площадь под пятном лазерного луча.

Решая систему уравнений (3)–(6), можно рассчитать мощность импульса для генерации акустического давления, необходимого для инициации процессов кавитации в БР.

Заключение

В работе исследовались пороговые характеристики ультразвука, необходимые для активации кавитационных процессов с целью формирования мелкозернистой структуры металлического материала в процессах SLS, SLM, DED. Частота ультразвука 13,7...9300 кГц, акустическое давление 0,6...24 кПа. Представлена система уравнений для вычисления мощности импульсного лазера для генерации порогового акустического давления посредством оптоакустического эффекта.

Список литературы и источников

1. *Todaro, C. J.* [et al.] Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound // *Nature communications*. – 2020. – Vol. 11. – No 1. – P. 142. – Текст : непосредственный.
2. *Todaro, C. J.* [et al.] Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing // *Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 37. – P. 101632. – Текст : непосредственный.
3. *Zhang, Y.* [et al.] Microstructure and mechanical properties of Al-12Si alloys fabricated by ultrasonic-assisted laser metal deposition // *Materials*. – 2019. – Vol. 13. – No 1. – P. 126. – Текст : непосредственный.
4. *Сиротюк, М. Г.* Акустическая кавитация. – 2008. – Текст : непосредственный.
5. *Kruger, S. E., Lord, M.* Ultrasonic wave generation by lasers on different metal surfaces // *AIP Conference Proceedings* // *American Institute of Physics*. – 2007. – Vol. 894. – No 1. – Pp. 209–216. – Текст : непосредственный.
6. *Гусев, В. Э.* [и др.] Лазерная оптоакустика. – Наука, 1991. – Текст : непосредственный.
7. *Noltingk, B. E., Neppiras, E. A.* Cavitation produced by ultrasonics // *Proceedings of the Physical Society. Section B*. – 1950. – Vol. 63. – No 9. – P. 674. – Текст : непосредственный.
8. *Wang, B.* [et al.] Ultrafast synchrotron X-ray imaging studies of microstructure fragmentation in solidification under ultrasound // *Acta Materialia*. – 2018. – Vol. 144. – Pp. 505–515. – Текст : непосредственный.
9. *Tzanakis, I.* [et al.] In situ synchrotron radiography and spectrum analysis of transient cavitation bubbles in molten aluminium alloy // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 70. – Pp. 841–845. – Текст : непосредственный.

10. *Shu, D.* [et al.] A high-speed imaging and modeling study of dendrite fragmentation caused by ultrasonic cavitation // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2012. – Vol. 43. – Pp. 3755–3766. – Текст : непосредственный.
11. *Tan, D.* [et al.] High-speed synchrotron X-ray imaging studies of the ultrasound shockwave and enhanced flow during metal solidification processes // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2015. – Vol. 46. – Pp. 2851–2861. – Текст : непосредственный.
12. *Xu, W. W.* [et al.] Synchrotron quantification of ultrasound cavitation and bubble dynamics in Al-10Cu melts // *Ultrasonics sonochemistry.* – 2016. – Vol. 31. – Pp. 355–361. – Текст : непосредственный.
13. *Luo, J.* [et al.] Bubble formation in additive manufacturing of borosilicate glass. – 2016. – Текст : непосредственный.
14. *Шуиковский, И. В.* Основы аддитивных технологий высокого разрешения. – 2016. – Текст : непосредственный.
15. *Zhang, P.* [et al.] Elucidation of bubble evolution and defect formation in directed energy deposition based on direct observation // *Additive manufacturing.* – 2020. – Vol. 32. – P. 101026. – Текст : непосредственный.
16. *Wolff, S. J.* [et al.] In situ X-ray imaging of pore formation mechanisms and dynamics in laser powder-blown directed energy deposition additive manufacturing // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2021. – Vol. 166. – P. 103743. – Текст : непосредственный.
17. *Parab, N. D.* [et al.] Ultrafast X-ray imaging of laser-metal additive manufacturing processes // *Journal of synchrotron radiation.* – 2018. – Vol. 25. – No 5. – Pp. 1467–1477. – Текст : непосредственный.
18. *Caprio L., Demir A. G., Previtali B.* Observing molten pool surface oscillations during keyhole processing in laser powder bed fusion as a novel method to estimate the penetration depth // *Additive Manufacturing.* – 2020. – Vol. 36. – P. 101470. – Текст : непосредственный.
19. *Bilotsky Y., Grigorichuk N. I., Tomchuk P. M.* Hot electrons and laser optoacoustics in metal nanoparticles // *Surface science.* – 2009. – Vol. 603. – No. 22. – Pp. 3267–3274. – Текст : непосредственный.
20. *Klassen A., Scharowsky T., Körner C.* Evaporation model for beam based additive manufacturing using free surface lattice Boltzmann methods // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2014. – Vol. 47. – No 27. – P. 275303. – Текст : непосредственный.

Содержание

<i>Архипов Е. Д.</i> РАЗРАБОТКА ОТЛАДОЧНОЙ ПЛАТЫ ПЛИС ДЛЯ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	3
<i>Белых Ю. А.</i> СПЕКТРОСКОПИЯ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ СТРУКТУР PbS-CdS	8
<i>Борнашов В. Е., Горяинов А. Е., Калентьев А. А.</i> РЕАЛИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТОВ РЕДАКТОРА СХЕМ В ОНЛАЙН-СЕРВИСЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО СВЧ-РАДИОТРАКТА	15
<i>Бывишенко А. В., Остапенко А. В.</i> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МНОГОРАЗОВОГО РАСКРЫТИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ СПУТНИКА ФОРМАТА «КУБСАТ»	22
<i>Вотинцев Д. В.</i> ХИМИЧЕСКОЕ ПАССИВИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ. ПОДБОР РЕЖИМОВ И СОСТАВОВ ПАССИВИРОВАНИЯ, ОЦЕНКА ИХ РАБОТЫ ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	27
<i>Золотарь Я. О., Дмитриев Н. В.</i> РАЗРАБОТКА И МАКЕТИРОВАНИЕ ВЫСОКО-ЧАСТОТНОГО АТТЕНУАТОРА	31
<i>Ижболдина Ю. С., Шляев С. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОБНОСТИ	37
<i>Кушков Е. О.</i> РАЗРАБОТКА БЛОКА НАВИГАЦИИ И ТЕЛЕМЕТРИИ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕСПИЛОТНОГО СУДНА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СБОРА ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ	41
<i>Орлова Д. С., Волкова Т. Г.</i> АНАЛИЗ РЫНКА ФИНАНСОВОГО ЛИЗИНГА В РОССИИ	46
<i>Пузырева Ю. А., Рылов С. А.</i> РАЗРАБОТКА ПОНИЖАЮЩЕГО КОНВЕРТЕРА РЕТРАНЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА	51
<i>Римацкий Д. В., Волошин А. С.</i> РАСЧЕТ ОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ОДИНОЧНОМ ПРОВОДЕ НА СВЧ	55
<i>Соломенникова У. В., Гольцова О. Б.</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО РАНЖИРОВАНИЮ ОТКАЗОВ В ПО «ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКАЗОВ»	60
<i>Фатталова Д. Р., Гордеев Г.А., Ломаев С. Л.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ 3D-ПЕЧАТИ ПОСРЕДСТВОМ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	64
<i>Хабибуллин Р. Д.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЕМКОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ С ДИЭЛЕКТРИКОМ 2-ГО КЛАССА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ	69
<i>Харасов В. А., Силушкин С. В.</i> РАЗРАБОТКА МИНИТЮРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	76
<i>Шумкова Е. А., Коломейцев А. А.</i> РАЗРАБОТКА УМНОЙ КАСКИ	83

Электронное научное издание

**«СОВРЕМЕННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ:
ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ»**

Сборник докладов
научно-практической конференции
Ижевского радиозавода
Ижевск, 23, 25–26 апреля, 21, 23–24 мая 2024 г.

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети
https://419.irz.ru/ntb/Lists/List3/Attachments/74/Конф_ИРЗ_2025_итоги%202024_с_обл.pdf

Дата размещения на сайте
09.10.2025

Технический редактор *С. В. Логинова*
Корректор *Я. В. Олина*
Верстка *Н. В. Паклиной*
Дизайн обложки *А. В. Абакумовой*

Разрешено к использованию 07.10.2025. Уч.-изд. л. 5,21. 5,60 МБ (PDF). Заказ № 249

Управление информационных ресурсов
Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова
Издательство УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
426069, Ижевск, Студенческая, 7