

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ/ENGINEERING TECHNOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.81> EDN: XAFGSY

ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И БИФУРКАЦИИ В ГИБРИДНОМ ПРОЦЕССЕ WAAM С ПОРОШКОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ И ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ: НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ

Научная статья

Баевский А.А.^{1,*}, Аносов М.С.², Подувальцев А.А.³, Архипов М.В.⁴, Ямгулин Р.И.⁵, Шатагин Д.А.⁶¹ ORCID : 0009-0003-1648-5276;³ ORCID : 0000-0003-4285-8980;⁵ ORCID : 0009-0009-5868-5579;⁶ ORCID : 0000-0003-1293-4487;^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (baevsky1990[at]gmail.com)

Предложена: 24.02.2026; Принята: 23.06.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

Проведён нелинейно-динамический анализ гибридного процесса Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) с порошковым легированием и вибрационным воздействием. На основе синхронной регистрации параметров дуги и акустической эмиссии реконструированы фазовые портреты системы «источник питания-дуга-сварочная ванна». С использованием корреляционной размерности и показателя Ляпунова идентифицированы сценарии бифуркационных переходов. Установлено: расход порошка — критический бифуркационный параметр; превышение порога 8 г/мин переводит систему из предельного цикла в детерминированный хаос. Обнаружен эффект управления хаосом вибрацией: в диапазоне 45–60 Гц наблюдается фазовая синхронизация, подавляющая хаотические осцилляции. Показана корреляция хаотических режимов с дефектами структуры. Предложена феноменологическая модель, описывающая бифуркации. Результаты создают основу для адаптивных систем предиктивного управления.

Ключевые слова: WAAM, нелинейная динамика, бифуркации, детерминированный хаос, акустическая эмиссия, фазовый портрет, показатель Ляпунова, вибрационная обработка, управление хаосом, предиктивный контроль.

DYNAMIC INSTABILITY AND BIFURCATIONS IN A HYBRID WAAM PROCESS WITH POWDER ALLOYING AND VIBRATION TREATMENT: A NON-LINEAR ANALYSIS

Research article

Baevskiy A.A.^{1,*}, Anosov M.S.², Poduval'tsev A.A.³, Arkhipov M.V.⁴, Yamgulin R.I.⁵, Shatagin D.A.⁶¹ ORCID : 0009-0003-1648-5276;³ ORCID : 0000-0003-4285-8980;⁵ ORCID : 0009-0009-5868-5579;⁶ ORCID : 0000-0003-1293-4487;^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Corresponding author (baevsky1990[at]gmail.com)

Suggested: 24.02.2026; Accepted: 23.06.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

A non-linear dynamic analysis was carried out on the hybrid Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process with powder alloying and vibration. Based on the synchronous recording of arc parameters and acoustic emission, phase portraits of the 'power source–arc–weld pool' system were reconstructed. Using correlation dimension and the Lyapunov exponent, scenarios of bifurcation transitions were identified. It has been established that powder flow rate is a critical bifurcation parameter; exceeding the threshold of 8 g/min shifts the system from a limit cycle to deterministic chaos. An effect of controlling chaos via vibration has been detected: in the 45–60 Hz range, phase synchronisation is observed, which suppresses chaotic oscillations. A correlation between chaotic modes and structural defects has been demonstrated. A phenomenological model describing the bifurcations has been suggested. The results provide a basis for adaptive predictive control systems.

Keywords: WAAM, non-linear dynamics, bifurcations, deterministic chaos, acoustic emission, phase portrait, Lyapunov exponent, vibration processing, chaos control, predictive control.

Введение

Технология Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) эффективна для крупногабаритных заготовок [1], [2]. Перспективно её развитие в сторону гибридных процессов с порошковым легированием и внешними полями [3], [4], [7], [14]. Однако такая гибридизация превращает процесс в сложную нелинейную систему, потеря устойчивости которой ведёт к дефектам [6]. Традиционный подбор режимов не учитывает внутреннюю динамику.

Для количественного анализа устойчивости в дуговых процессах применяют аппарат нелинейной динамики: старший показатель Ляпунова (λ_1) и корреляционную размерность (D_2) [5], [13], [15]. В [5] показано, что $\lambda_1 > 0$ соответствует хаосу при сварке; в [15] аналогичный метод использован для WAAM без порошка и вибрации. Фазовая

синхронизация позволяет управлять хаосом в технологических системах [11], [13], [14], но для гибридного WAAM с вибрацией такие исследования отсутствуют. Акустическая эмиссия даёт возможность высокочастотного мониторинга сварочных процессов [12], а реконструкция фазового пространства [8], [9] и расчёт λ_1 [10] — количественно характеризовать режимы.

Таким образом, несмотря на отдельные работы по нелинейной динамике дуговой наплавки [5], [13], [15] и порошковой подаче [3], [4], [7], единый анализ гибридного WAAM с одновременным легированием порошком и вибрацией не проводился. Бифуркационные параметры, пороги перехода к хаосу и частотные окна подавления хаоса не определены.

Цель — исследование нелинейной динамики и бифуркационных переходов в гибридном WAAM при варьировании погонной энергии, расхода порошка и частоты вибрации.

Научная новизна.

1) Впервые гибридный WAAM с порошком и вибрацией рассмотрен как единая диссипативная система; реконструированы аттракторы и количественно оценены λ_1 , D_2 (отличие от [5], [15]).

2) Установлен бифуркационный параметр — расход порошка G с порогом $G_{кр} \approx 8$ г/мин (в [3], [4], [7] анализировалась только структура).

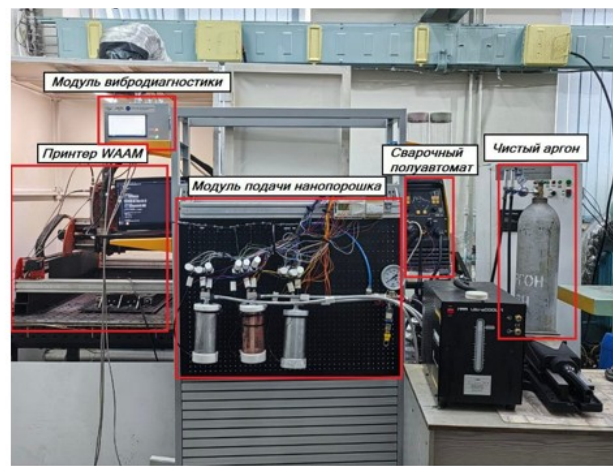
3) Обнаружено «окно синхронизации» 45–60 Гц, подавляющее хаос (расширяет [13], [14] для WAAM).

Методы и принципы исследования

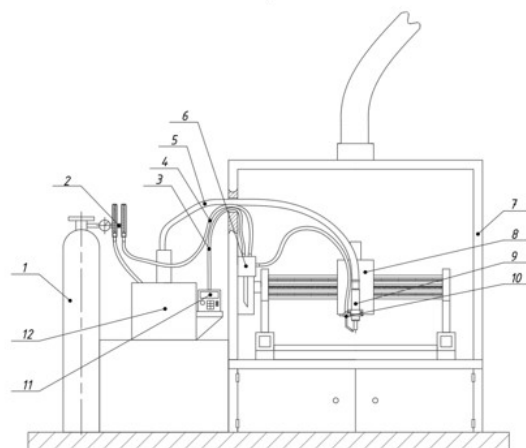
Исследования проводились на гибридном стенде на базе станка с числовым программным управлением (ЧПУ), интегрированного со сварочным оборудованием и модулем подачи нанопорошка (рис. 1).

Разработанный модуль (рис. 1б) включает в себя баллон с защитным газом 1, который через двойной регулятор расхода 2 с помощью рукава 4 подключен к приводной системе подачи нанопорошков 6, из второго выхода регулятора 2 рукавом баллон 1 соединен со сварочным аппаратом 12, который через рукав 5 соединен со сварочной горелкой 9 закрепленной на 3D-принтере 8, рядом с которой при помощи подвижного крепления присоединено сопло распыления 10, подключенное через систему шлангов к приводной системе подачи нанопорошка 6, управление которым происходит через кабель канал 3, соединяющий плату коммутации блока подачи с вынесенным за пределы камеры печати 7 электронным блоком управления 11.

Для возбуждения колебаний использовался вибростол (0–100 Гц). Материал основы: проволока ER70S-6 ($\varnothing 1,2$ мм); порошок: карбонильный никель ПНК-1Л5 (5–10 мкм). Датчик АЭ установлен на подложке вблизи зоны наплавки.



а)



б)

Рисунок 1 - Схема гибридного стенда:
а) общая компоновка; б) модуль подачи порошка
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.81.1>

Примечание: 1 – баллон с защитным газом; 2 – двойной регулятор расхода; 3 – кабель канал; 4, 5 – рукав; 6 – приводная система подачи нанопорошков; 7 – камера печати; 8 – 3D-принтер; 9 – сварочная горелка; 10 – сопло распыления; 11 – электронный блок управления; 12 – сварочный аппарат

Варьировались параметры:

- погонная энергия Q : 0,5–1,30 кДж/мм ($I = 120$ – 200 А, $U = 18$ – 27 В);
- расход порошка G : 2–12 г/мин;
- частота вибрации f : 0–80 Гц.

Регистрация сигналов (ток, напряжение, АЭ) — 20 кГц. Анализ: реконструкция фазового пространства методом Такенса [8], корреляционная размерность D_2 [9], показатель Ляпунова λ_1 [10], [13]: $\lambda_1 > 0$ — хаос, $\lambda_1 \approx 0$ — предельный цикл [12].

Основные результаты

При фиксированной погонной энергии $Q = 0,69$ кДж/мм идентифицированы три режима динамики процесса (рис. 2).

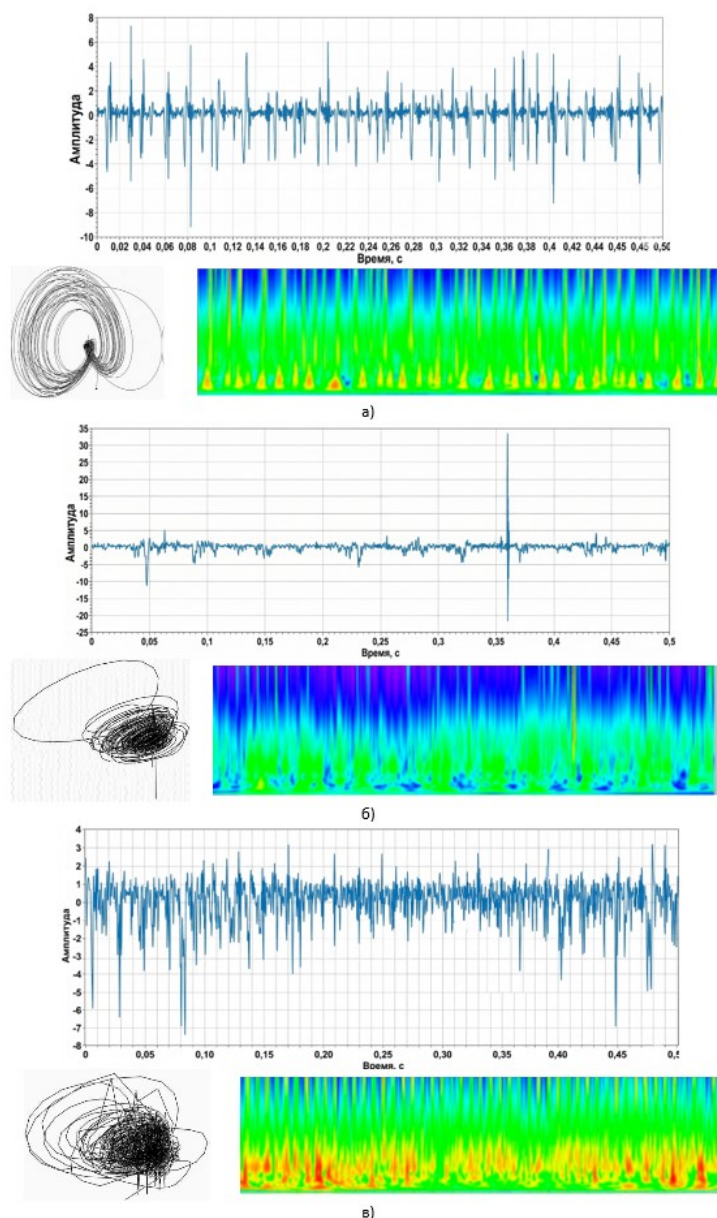


Рисунок 2 - Эволюция фазовых портретов при росте расходов порошка G :
а) $G=4$ г/мин — цикл; б) $G=6$ – 8 — переход; в) $G=10$ – 12 — хаос
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.81.2>

Режим 1 ($G = 4$ г/мин): устойчивый предельный цикл. Фазовый портрет представляет собой чёткий замкнутый контур (рис. 2а). Количественные показатели: $D_2 = 2,1 \pm 0,1$; $\lambda_1 = 0,02 \pm 0,01$. Низкая размерность аттрактора указывает на то, что динамика определяется двумя основными степенями свободы (частота отрыва капель и колебания ванны). Стабильность процесса обеспечивается полным расплавлением частиц порошка в столбе дуги.

Режим 2 ($G = 6\text{--}8$ г/мин): бифуркационный переход. Фазовый портрет теряет чёткость, появляются нерегулярные петли (рис. 2б). Корреляционная размерность возрастает до $D_2 = 3,4 \pm 0,2$, что свидетельствует о вовлечении дополнительных степеней свободы. Физически это соответствует частичному нарушению стабильности переноса порошка: часть частиц не успевает полностью расплавиться в дуге, что приводит к локальным флуктуациям температуры ванны, изменению вязкости и поверхностного натяжения.

Режим 3 ($G = 10\text{--}12$ г/мин): детерминированный хаос. Фазовый портрет заполняет значительную область фазового пространства — формируется странный аттрактор (рис. 2в). Показатели: $D_2 = 5,2 \pm 0,3$; $\lambda_1 = 0,28 \pm 0,03$ (положительное значение). Высокая размерность ($D_2 > 5$) указывает на необходимость минимум 5–6 независимых переменных для описания динамики. Положительный показатель Ляпунова означает экспоненциальную чувствительность к начальным условиям с временем предсказуемости порядка $1/\lambda_1 \approx 3,5$ с.

Полученные значения λ_1 и D_2 для хаотического режима сопоставимы с данными для дуговой сварки при потере устойчивости [5] и для WAAM без порошка [15]. Однако в работе [5] порог перехода к хаосу соответствовал другим режимным параметрам (ток, напряжение), а в [15] хаос достигался только при значительных отклонениях погонной энергии. В нашем случае критическим параметром впервые выступил расход порошка G , причём переход происходит при превышении $G_{кр} \approx 8$ г/мин. В известных работах по порошковой подаче в WAAM [3], [4], [7] влияние расхода на динамическую устойчивость не анализировалось, изучались лишь структура и состав.

Переход в хаотический режим коррелирует с ухудшением качества наплавки. Металлографический анализ образцов при $G > 8$ г/мин выявил увеличение загрязнённости включениями и появление непроваров (рис. 3). В хаотическом режиме флуктуации температуры и состава ванны приводят к неравномерному смачиванию подложки и захвату нерасплавленных частиц порошка. Непровары возникают из-за периодических «провалов» энергии дуги, когда система временно переходит в режим с низкой тепловкладкой. Поры образуются вследствие захвата газов при нестабильном переносе металла.

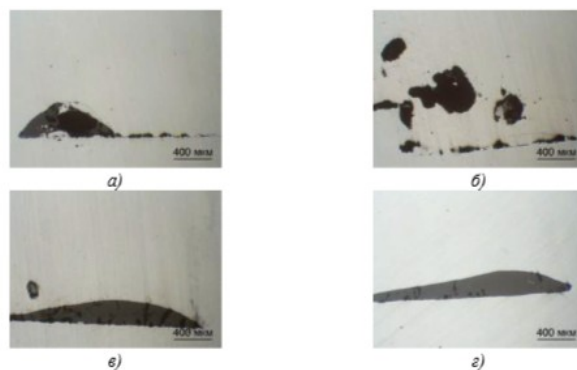


Рисунок 3 - Пример дефектов структуры (непровары), соответствующих хаотическому режиму процесса
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.81.3>

Таким образом, расход порошка G выступает критическим бифуркационным параметром с порогом $G_{кр} \approx 8$ г/мин. При исходно хаотическом режиме ($Q = 0,69$ кДж/мм, $G = 10$ г/мин) исследовано влияние вибрации.

При $f = 30$ Гц наблюдалась параметрическая раскачка: λ_1 увеличился с 0,28 до 0,35. Этот эффект объясняется совпадением частоты внешнего воздействия с одной из собственных частот колебаний сварочной ванны, что приводит к накачке энергии в систему.

При $f = 50$ Гц фазовый портрет «коллапсирует» в предельный цикл, λ_1 снижается до 0,04 (рис. 4а). Эффект интерпретируется как фазовая синхронизация [11], [14]: внешняя периодическая сила «захватывает» ритм системы и подавляет хаотические колебания. Физический механизм синхронизации заключается в том, что внешняя вибрация навязывает системе определённый ритм колебаний, который подавляет собственные хаотические моды. Это возможно только при определённом соотношении между амплитудой внешнего воздействия и уровнем внутреннего шума системы.

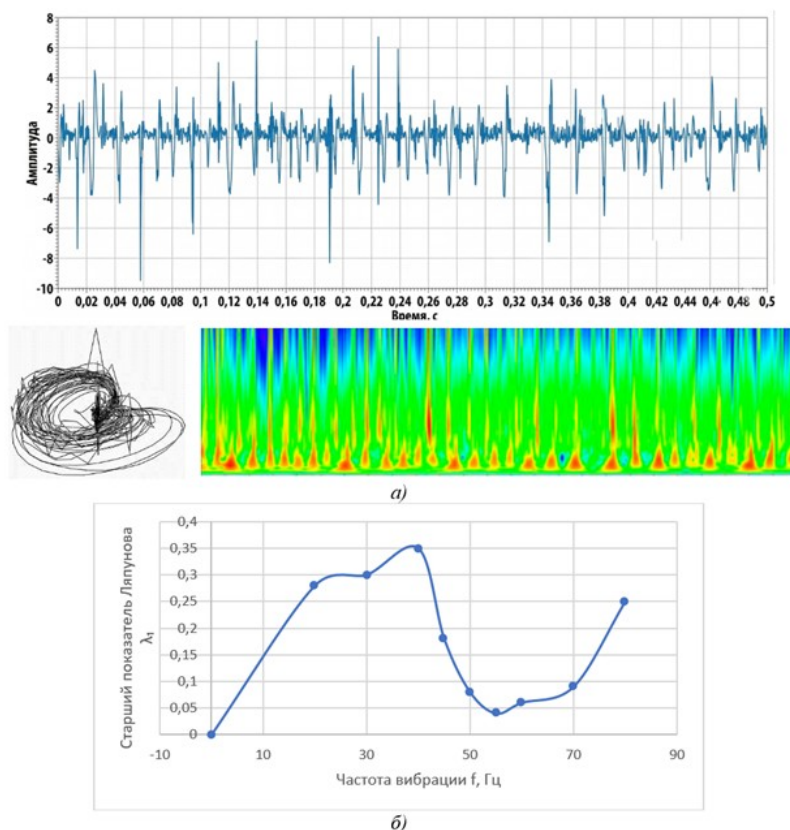


Рисунок 4 - Управление хаосом:

а) фазовый портрет при $f=50$ Гц; б) зависимость $\lambda_1(f)$ с «окном синхронизации»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.81.4>

«Окно синхронизации» составляет 45–60 Гц; за пределами этого окна вибрация неэффективна или дестабилизирует процесс (рис. 4б). Ширина окна синхронизации (15 Гц) обеспечивает достаточный запас устойчивости для промышленной реализации. Это позволяет компенсировать дрейфы параметров процесса без потери стабильности горения дуги. Обнаруженный эффект имеет практическое значение для разработки систем адаптивного

управления: мониторинг λ_1 в реальном времени позволяет детектировать приближение к бифуркационному порогу и автоматически корректировать частоту вибрации для возврата системы в устойчивый режим без остановки процесса.

В [13] отмечено, что для дуговых процессов характерны узкие частотные окна подавления хаоса, однако конкретные значения для WAAM отсутствовали. В работе [14] использовалось электромагнитное воздействие, которое также позволяло стабилизировать процесс, но на других частотах (ниже 30 Гц). Таким образом, обнаруженное окно 45–60 Гц является новым для гибридного WAAM и расширяет известные методы управления хаосом [11], [13], [14].

Обсуждение

Для качественного описания предложена модель на основе модифицированного уравнения Ван дер Поля:

$$\ddot{x} - (\mu - \beta x^2)\dot{x} + \omega_0^2 x = F \cdot \sin(\Omega t),$$

где $\mu = \mu_0 + k \cdot G$ — параметр подкачки энергии, зависящий от расхода порошка. Рост G увеличивает μ , что через каскад бифуркаций ведёт к хаосу. Внешнее воздействие $F \cdot \sin(\Omega t)$ моделирует вибрацию. При $G < G_{кр}$ система находится в режиме автоколебаний с устойчивой амплитудой. При $G > G_{кр}$ нелинейное демпфирование становится отрицательным, что приводит к неограниченному росту амплитуды и переходу к хаосу. Численное решение качественно воспроизводит наблюдаемые режимы устойчивости и синхронизации. Модель может служить основой для алгоритмов адаптивного управления и предиктивного контроля качества наплавки. Полученные зависимости позволяют прогнозировать критические режимы и оптимизировать параметры гибридного процесса WAAM для обеспечения стабильного качества аддитивных изделий в промышленных условиях.

Заключение

1) Гибридный процесс WAAM с порошковым легированием и вибрацией является нелинейной диссипативной системой, демонстрирующей бифуркационный переход от предельного цикла к детерминированному хаосу при увеличении расхода порошка.

2) Количественные критерии устойчивости: устойчивый режим ($\lambda_1 \approx 0$, $D_2 < 2,5$), хаотический ($\lambda_1 > 0,2$, $D_2 > 4,0$), что согласуется с известными данными для дуговых процессов [5], [15].

3) Расход порошка G является критическим бифуркационным параметром с порогом $G_{кр} \approx 8$ г/мин. Превышение порога инициирует хаос, который прямо коррелирует с ростом дефектов структуры (непровары, включения).

4) Впервые для WAAM обнаружено «окно подавления хаоса» вибрацией в диапазоне 45–60 Гц (фазовая синхронизация), возвращающее систему в устойчивый предельный цикл.

5) Феноменологическая модель на основе уравнения Ван дер Поля качественно воспроизводит наблюдаемые бифуркации и может служить основой для систем адаптивного предиктивного управления.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.81.5>

Review

Community of Reviewers of the International Research Journal

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.81.5>

Список литературы / References

1. Mann S. Connected, digitalized wire arc additive manufacturing: utilizing data in the internet of production to enable industrie 4.0. / S. Mann, J. Pennekamp, M. Ay et al. // Scientific Reports. — 2025. — 15. — P. 1–14. — DOI: 10.1038/s41598-025-15250-y
2. Rodrigues T. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) / T. Rodrigues, V. Duarte, R.M. Miranda et al. // Materials. — 2019. — 12. — P. 1121. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1121> (accessed: 25.02.26). — DOI: 10.3390/ma12071121
3. Meng Y. Wire arc additive manufacturing of Ni-Al intermetallic compounds through synchronous wire-powder feeding / Y. Meng, J. Li, S. Zhang et al. // Journal of Alloys and Compounds. — 2023. — 943. — P. 169152. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169152
4. Song X. The Effect of B4C Powder on Properties of the WAAM 2319 Al Alloy / X. Song, J. Niu, J. Huang et al. // Materials. — 2023. — № 1. — P. 436. — DOI: 10.3390/ma16010436
5. Lv X. Stability Analysis of Metal Active-Gas Welding Short-Circuiting Transfer Based on Input Pulsating Energy / X. Lv, Q. He, L. Xu // Materials. — 2024. — Vol. 17. — №2. — P. 274. — DOI: 10.3390/ma17020274
6. Аносов М.С. Изменение химического состава стали Св-08ХМФА в зависимости от режима электродуговой наплавки / М.С. Аносов, Ю.С. Мордовина, М.А. Чернигин. // Развитие экономики Российской Федерации в условиях формирования технологического суверенитета: актуальные вопросы теории и практики : Сборник докладов региональной научно-практической конференции; под ред. Абросимова О.С., Бровченко А.А., Глушаченко В.В. — 1. — Москва: МГТУ «СТАНКИН», 2023. — С. 10–14.
7. Sinclair C.W. Vibratory powder feeding for powder bed additive manufacturing using water and gas atomized metal powders / C.W. Sinclair, W. Sparling, R. Edinger et al. // Vibratory powder feeding for powder bed additive manufacturing using water and gas atomized metal powders. — 2021. — Vol. 14. — № 13. — DOI: 10.3390/ma14133548
8. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // Dynamical Systems and Turbulence. — 1981. — 898. — DOI: 10.1007/BFb0091924



9. Grassberger P. Characterization of Strange Attractors / P. Grassberger, I. Procaccia // *Phys. Rev. Lett.* — 1983. — 50. — P. 346–349. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.346
10. Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series / H. Kantz // *Physics Letters A*. — 1994. — 185. — P. 77–87.
11. Pikovsky A. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences / A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths. — Cambridge: Cambridge University Press, 2001. — 433 p. — URL: [https://kyl.neocities.org/books/\[TEC%20PIK\]%20synchronization%20-%20a%20universal%20concept%20in%20nonlinear%20sciences.pdf](https://kyl.neocities.org/books/[TEC%20PIK]%20synchronization%20-%20a%20universal%20concept%20in%20nonlinear%20sciences.pdf). (accessed: 19.02.26).
12. Koal J. Acoustic process monitoring during projection welding using airborne sound analysis and machine learning / J. Koal, M. Baumgarten, C. Nikolov et al. // *Welding in the World*. — 2024. — 68. — DOI: 10.1007/s40194-024-01876-5
13. Chen L. Non-Hermitian-enhanced topological protection of chaotic dynamics in one-dimensional optomechanics lattice / L. Chen, F. Huang, H. Wang et al. // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2022. — 164. — DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112678
14. Trinh N.Q. Effects of alkaline elements on the metal transfer behavior in metal cored arc welding / N.Q. Trinh, S. Tashiro, K. Tanaka et al. // *Journal of Manufacturing Processes*. — 2021. — 68, Part A. — P. 1448–1457. — DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.06.061

Список литературы на английском языке / References in English

1. Mann S. Connected, digitalized wire arc additive manufacturing: utilizing data in the internet of production to enable industrie 4.0. / S. Mann, J. Pennekamp, M. Ay et al. // *Scientific Reports*. — 2025. — 15. — P. 1–14. — DOI: 10.1038/s41598-025-15250-y
2. Rodrigues T. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) / T. Rodrigues, V. Duarte, R.M. Miranda et al. // *Materials*. — 2019. — 12. — P. 1121. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1121> (accessed: 25.02.26). — DOI: 10.3390/ma12071121
3. Meng Y. Wire arc additive manufacturing of Ni-Al intermetallic compounds through synchronous wire-powder feeding / Y. Meng, J. Li, S. Zhang et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2023. — 943. — P. 169152. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169152
4. Song X. The Effect of B4C Powder on Properties of the WAAM 2319 Al Alloy / X. Song, J. Niu, J. Huang et al. // *Materials*. — 2023. — № 1. — P. 436. — DOI: 10.3390/ma16010436
5. Lv X. Stability Analysis of Metal Active-Gas Welding Short-Circuiting Transfer Based on Input Pulsating Energy / X. Lv, Q. He, L. Xu // *Materials*. — 2024. — Vol. 17. — №2. — P. 274. — DOI: 10.3390/ma17020274
6. Anosov M.S. Изменение химического состава стали Sv-08XMFA в зависимости от режима электродуговой наплавки [Changes in the chemical composition of Sv-08KhMFA steel depending on the mode of electric arc surfacing] / M.S. Anosov, Yu.S. Mordovina, M.A. Chernigin. // *Development of the Russian Federation's Economy in the Context of Technological Sovereignty: Current Issues of Theory and Practice: Collection of Papers from the Regional Scientific and Practical Conference; edited by Abrosimova O.S., Brovchenko A.A., Glushachenko V.V.* — 1. — Moscow: MGTU “STANKIN”, 2023. — P. 10–14. [in Russian]
7. Sinclair C.W. Vibratory powder feeding for powder bed additive manufacturing using water and gas atomized metal powders / C.W. Sinclair, W. Sparling, R. Edinger et al. // *Vibratory powder feeding for powder bed additive manufacturing using water and gas atomized metal powders*. — 2021. — Vol. 14. — № 13. — DOI: 10.3390/ma14133548
8. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // *Dynamical Systems and Turbulence*. — 1981. — 898. — DOI: 10.1007/BFb0091924
9. Grassberger P. Characterization of Strange Attractors / P. Grassberger, I. Procaccia // *Phys. Rev. Lett.* — 1983. — 50. — P. 346–349. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.346
10. Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series / H. Kantz // *Physics Letters A*. — 1994. — 185. — P. 77–87.
11. Pikovsky A. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences / A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths. — Cambridge: Cambridge University Press, 2001. — 433 p. — URL: [https://kyl.neocities.org/books/\[TEC%20PIK\]%20synchronization%20-%20a%20universal%20concept%20in%20nonlinear%20sciences.pdf](https://kyl.neocities.org/books/[TEC%20PIK]%20synchronization%20-%20a%20universal%20concept%20in%20nonlinear%20sciences.pdf). (accessed: 19.02.26).
12. Koal J. Acoustic process monitoring during projection welding using airborne sound analysis and machine learning / J. Koal, M. Baumgarten, C. Nikolov et al. // *Welding in the World*. — 2024. — 68. — DOI: 10.1007/s40194-024-01876-5
13. Chen L. Non-Hermitian-enhanced topological protection of chaotic dynamics in one-dimensional optomechanics lattice / L. Chen, F. Huang, H. Wang et al. // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2022. — 164. — DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112678
14. Trinh N.Q. Effects of alkaline elements on the metal transfer behavior in metal cored arc welding / N.Q. Trinh, S. Tashiro, K. Tanaka et al. // *Journal of Manufacturing Processes*. — 2021. — 68, Part A. — P. 1448–1457. — DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.06.061