УДК 621.78.01/.08

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ (3D-ПЕЧАТЬ)

Ястребинская Д.В., Гончарова Е.А., Лейченко В.И., Бачев П.А., Солонков А.А., Козик Е.С.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,
dialchem.cooperation@mail.ru

Аннотация: в докладе были рассмотрены актуальные вопросы моделирования термической обработки алюминиевых сплавов, полученных аддитивными методами. Проанализированы ключевые проблемы, включая горячее растрескивание при быстрой кристаллизации, окисление порошка, пористость, остаточные напряжения. На оснвое литературных статей продемонстрировано, что введение модификаторов (циркония, скандия, эрбия) способствует формированию мелкой равноосной структуры, снижающей склонность к трещинам. Особое внимание получили современные методы: интеграция CALPHAD с кинетическими моделями, высокопроизводительные расчёты, фазово-полевое моделирование, in-situ термообработка с использованием тепла процесса. В работе рассмотрены перспективные концепции, такие как моделирование «наследственных» дефектов и дислокационной структуры (на примере WAAM с межслойной прокаткой), неизотермические модели выделения фаз (Al_3Sc), управление тепловой историей через опорные структуры с низкой площадной фракцией (LAFS), а также мультимасштабный «цифровой двойник» (фреймворк MALAMUTE, корреляция PSPP). Результатом работы является литературно обоснованная концепция синергетического объединения микроструктурного модифицирования, управления теплоотводом и мультимасштабного цифрового моделирования для реализации полноценной in-situ термообработки алюминиевых сплавов непосредственно в процессе аддитивного производства.

Ключевые слова: моделирование, алюминий, сплавы, термообработка.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии представляют собой перспективные и активно используемые методы создания 3D-объектов путём послойного нанесения материала, слой за слоем. Свобода проектирования является основным аргументом в пользу внедрения аддитивных технологий. Благодаря 3D-печати удалось облегчить создание деталей сложных геометрических форм, облегчить вес конструкций, при этом повысив точность производства и уменьшив количество отходов.

Помимо вышеперечисленных преимуществ, аддитивное производство открывает возможность комбинировать компоненты в сборках, что позволяет снизить зависимость от механических приспособлений и дополнительных производственных операций[1].

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ТЕХНОЛОГИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Алюминиевые сплавы – универсальный материал для различных областей производств. Их микроструктура при применении аддитивных технологий, в частности селективного лазерного спекания, благодаря высокой скорости кристаллизации представляет собой более однородную и дисперсную структуру, чем методом традиционного литья, где образуется грубая структура с неравномерным распределением фаз. Но при применении подобного метода необходимо обращать внимания на важные факторы, способные повлиять на результат: окисления поверхности порошка, его невысокая и текучесть, низкая поглощающая способность лазерного луча и повышенная склонность к образованию трещин и пористости, относительно высокие усадка при затвердевании и вязкость расплава. Эти трудности могут привести к образованию нежелательных структурных особенностей и дефектов, приводящих к снижению качества материала. Также формируются остаточные напряжения, которые могут приводить как снижению механических свойств, так и образованию трещин, и разрушению материала [2].

Однако основной и самой главной проблемой алюминиевых сплавов при лазерной печати является горячее растрескивание во время быстрой кристаллизации. Во избежание подобного результата вводят модификаторы, цирконий, скандий или эрбий. Эти элементы способны образовывать тугоплавкие наночастицы прямо в расплаве, благодаря чему будут образовываться центры кристаллизации и вместо изначальной структуры сплава в виде длинных столбчатых кристаллов, которые легко растрескиваются, формируется мелкая равноосная структура, что значительно снижает склонность к горячим трещинам [3, 4].

Не менее перспективным методом является термодинамическое моделирование и создание мультимасштабных и предсказательных моделей. Существующие подходы включают в себя такие отрасли, как интеграцию CALPHAD с кинетическими моделями, так как обычный термодинамический расчёт не является работоспособным для скоростей охлаждения при лазерном сплавлении в порошковом слое, поэтому его комбинируют с кинетическими моделями для учёта быстрой кристаллизации и метастабильных фаз, это позволяет предсказывать образование нанометровых фаз, которые при старении трансформируются в эффективные упрочняющие частицы. Не менее активно используют высокопроизводительные расчёты, где вместо единичных симуляций применяются подходы, которые позволяют быстрее оценивать кинетику выделения фаз для большого количества комбинаций состава и параметров термообработки; среди них фазово-полевое моделирование, где используют связывание параметров процесса с конечной морфологией фаз и симуляция эволюции микроструктуры (например, ячеистые структуры α-Al, ликвация кремния) при высоких скоростях охлаждения; и новые подходы к in-situ термообработке, где вместо постобработки используют тепло самого процесса, например управление опорными структурами для снижения теплоотвода позволяет запустить старение прямо в процессе печати и достичь прочности на уровне традиционного пикового старения [5].

НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

К современным концепциям можно отнести моделирование «наследственных» дефектов и микроструктуры. Эта идея исследует морфологию и дефекты, которые возникают при печати и не исчезают из материала, а напрямую влияют на конечные свойства после термообработки, такие как поры, остаточные напряжения, дислокационная структура. В своём исследование Чжана и др. (Northwestern Polytechnical University) предлагает высокоточную численную модель для гибридного процесса WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) с межслойной прокаткой, которая учитывает двунаправленное наследование морфологии [6]. Основная идея состоит в том, что морфология наплавленного валика влияет на распределение деформации при прокатке, а геометрия прокатанной поверхности, в свою очередь, изменяет распределение энергии и осаждение материала при последующей наплавке. Существующие модели упрощали это, создавая идеальные геометрические формы, что приводило к ненадёжным прогнозам. Новая модель использует изначальную/истинную морфологию предыдущих проходов в качестве начальных условий. Результаты показали, что боковые ограничивающие ролики значительно улучшают точность рёбер (± 0,01 мм), а оптимизированные параметры (скорость подачи 10 мм/с, температура прокатки 340 °C) позволяют получать высокорёберные алюминиевые компоненты с точностью менее 0,01 мм. При аддитивном производстве в сплавах накапливается огромное количество дислокаций из-за быстрой кристаллизации и повторяющихся термических циклов. Эти дислокации не пропадают при термообработке, а служат движущей силой для последующего выделения фаз и формируют «память» материала.

Ещё одним развивающимся методом является разработка неизотермических моделей выделения фаз, которые напрямую связывают локальную историю тепловых циклов с конечными свойствами. Лю и др. разработали численную модель для прогнозирования распределения предела текучести в тонкостенной детали из Al-Mg-Sc, полученной методом DED (Directed Energy Deposition). Модель рассчитывает радиус и объёмную долю выделений Al_3Sc в процессе термических циклов путём дискретизации процесса на множество изотермических шагов. Радиус выделений восстанавливается путём приравнивания температурных вариаций к эквивалентной термообработке (отжигу). Прогноз хорошо согласуется с экспериментом: предел текучести уменьшается от нижних слоёв к 25-му слою и остаётся постоянным выше, что объясняется влиянием термических циклов внизу и тепловой аккумуляцией вверху [7]. Управление тепловой историей через опорные структуры. Опорные структуры с низкой площадной фракцией (LAFS) можно инженерно проектировать для управления теплоотводом и использования внутреннего тепла процесса для непосредственной внутренней термообработки (In-situ Heat Treatment (IHT)). Использование LAFS значительно продлевает высокотемпературное воздействие при послойном изготовлении, что способствует её существенному упрочнению. Комбинация LAFS с контролем времени позволила получить предел текучести 453 МПа и предел прочности 479 МПа в состоянии as-built - практически идентично традиционно состаренному Scalmalloy [8].

Инновационным методом является создание мультимасштабного «цифрового двойника». Это система, которая связывает процессы, структуру и свойства в виртуальной копии детали. При развитии этой идеи мы получаем снижение брака на треть, прогнозирование свойств в реальном времени, с задержкой в миллисекунды. Программа AMMT (Advanced Materials and Manufacturing Technologies) использует фреймворк MALAMUTE для создания цифрового двойника, который коррелирует условия процесса с конечным продуктом и устанавливает корреляцию PSPP (Process-Structure-Property-

Performance). Подход объединяет физически-обоснованные и ML-модели для прогнозирования микроструктуры. Мультимасштабное моделирование затвердевания Al-Si. Для быстрого затвердевания Al-Si в условиях аддитивного производства разрабатываются мультимасштабные подходы, которые моделируют эволюцию температуры расплава с учётом большого термического переохлаждения. Это критически важно, поскольку классические модели затвердевания не учитывают экстремальные скорости охлаждения. Для решётчатых структур из алюминия создаются цифровые двойники на основе рентгеновской томографии, которые позволяют проводить симуляции на изготовленных ячейках, а не на идеализированных CAD-моделях. Это позволяет учитывать реальные дефекты, возникающие при печати [9].

На основе проведённого анализа представляется целесообразным развивать комплексный подход, объединяющий микроструктурное модифицирование сплава с активным управлением тепловой историей через инженерные опорные структуры (LAFS). В качестве инструментальной основы для реализации данной стратегии предлагается использовать мультимасштабный «цифровой двойник», связывающий неизотермические кинетические модели (CALPHAD) с физически-информированным машинным обучением. Такая связка позволит трансформировать классическую печную термообработку в управляемый in-situ процесс, активно инициируя выделение упрочняющих фаз за счёт внутреннего тепла печати и гарантируя отсутствие горячих трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование термической обработки алюминиевых сплавов для эффективных технологий развивается в направлении мультимасштабных и предсказательных подходов. Основной проблемой для изучения и разработок является горячее растрескивание при быстрой кристаллизации, которого можно избежать посредством введения модификаторов, формирующих мелкую равноосную структуру.

Современный методы включают интеграцию с кинетическими моделями, фазово-полевое моделирование и термообработку с использованием тепла самого процесса. Наиболее перспективными новыми концепциями, подтверждёнными недавними исследованиями являются моделирование наследственных дефектов, неизотермические модели выделения фаз, управление тепловой историей через опорные структуры, развитие мультимасштабного цифрового двойника. Всё это создаёт важные предпосылки для автоматизированного управления микроструктурой в реальном времени, для промышленного внедрения аддитивных технологий алюминиевых сплавов.

Ключевым же трендом становится переход от пассивного моделирования к активному управлению процессом, где физически-информированное машинное обучение интегрируется с цифровыми двойниками для контроля микроструктуры в реальном времени. Однако для широкого внедрения необходимы стандартизированные наборы данных и валидация моделей для разных сплавов и методов печати. Это позволит снизить зависимость от постобработки и повысить качество изделий.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Aboulkhair, N. T. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting [Электронный ресурс] / N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, R. Hague // Progress in Materials Science. — 2019. — Vol. 106. — P. 100578. — DOI 10.1016/j.pmatsci.2019.100578. — URL: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578 (дата обращения: 13.09.2026).

[2] Сбитнева, С. В. Некоторые особенности структуры алюминиевых сплавов, полученных методом селективного лазерного сплавления (обзор) / С. В. Сбитнева, Е. А. Лукина, И. Бенариеб // Труды ВИАМ. — 2023. — № 1 (119). — Ст. 06. — DOI 10.18577/2307-6046-2023-0-1-69-83. — URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 13.09.2026).

[3] Liu, M. High-throughput thermodynamic screening and microstructural engineering for crack-free Al-Mg-Zr alloys in laser powder bed fusion: Synergistic strengthening and hot cracking inhibition [Электронный ресурс] / M. Liu, X. Ma, Y. Zhang, J. Sun, B. Zhang, X. Qu // Journal of Alloys and Compounds. — 2026. — Vol. 1026. — Art. 187742. — DOI 10.1016/j.jallcom.2026.187742. — URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.187742 (дата обращения: 13.09.2026).

[4] Sun, J. High-throughput thermodynamic screening and microstructural engineering for crack-free Al-Mg-Zr alloys in laser powder bed fusion: Synergistic strengthening and hot cracking inhibition [Электронный ресурс] / J. Sun, Y. Zhang, X. Ma, M. Liu, X. Qu // Journal of Alloys and Compounds. — 2026. — Vol. 1063. — P. 1–10. — DOI 10.1016/j.jallcom.2026.187742. — URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.187742 (дата обращения: 13.09.2026).

[5] Efa D. A., Ifa D. A. Systematic review of multiscale thermal prediction models for FDM/FFF additive manufacturing: Toward digital twin integration with physics-informed machine learning // Results in Engineering. 2025. Vol. 28. Art. 108087. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108087. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025041349 (дата обращения: 13.09.2026).

[6] Zhang J., Li H., Zhang X., Ma H., Han X., Han Y., Zhan M. Modeling and simulation of the hybrid WAAM-rolling process for aluminum high-rib components with consideration of multi-pass morphology inheritance // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2026. Vol. 145, iss. 1–2. P. 1091–1110. DOI: 10.1007/s00170-026-18405-x. URL: https://ir.nwpu.edu.cn/handle/39AN3IGR/438112 (дата обращения: 13.09.2026).

[7] Liu X., Di Y., Wang G., Ji L., Yuan Y., Rong Y. Prediction of spatial yield strength distribution in Al–Mg–Sc alloy fabricated by coaxial laser wire directed energy deposition // Virtual and Physical Prototyping. 2025. Vol. 20, iss. 1. P. 1. DOI: 10.1080/17452759.2025.2544757 (дата обращения: 13.09.2026)..

[8] Chua C., Ghasemi A., An J., Luan J., Chua C. K., Sing S. L. Support-enabled heat retention for activating in-situ heat treatment in laser powder bed fusion of high-strength aluminum alloys // Materials Science and Engineering: A. 2026. Vol. 972. Art. 150671. DOI: 10.1016/j.msea.2026.150671. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509326009512 (дата обращения: 14.09.2026).

[9] Tongne A. Modélisation des procédés thermomécaniques : vers le calcul en temps réel pour le jumeau numérique : Habilitation à Diriger des Recherches. Toulouse : Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2024. 121 p. URL: https://ut3-toulouseinp.hal.science/tel-04686291v1 (дата обращения: 14.09.2026).

HEAT TREATMENT MODELING OF ALUMINUM ALLOYS PRODUCED BY ADDITIVE METHODS (3D PRINTING)

D.V. Yastrebinskaya, E.A. Goncharova, V.I. Leichenko, P.A. Bachev, A.A. Solonkov, E.S. Kozik

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, dialchem.cooperation@mail.ru

Abstract: the report examined current issues in the modeling of heat treatment of aluminum alloys produced by additive methods. Key problems were analyzed, including hot cracking during rapid solidification, powder oxidation, porosity, and residual stresses. Based on literature articles, it was demonstrated that the introduction of modifiers (zirconium, scandium, erbium) promotes the formation of a fine equiaxed structure that reduces susceptibility to cracking. Particular attention was given to modern methods: the integration of CALPHAD with kinetic models, high-performance computing, phase-field modeling, and in-situ heat treatment using process heat. The work examined promising concepts such as the modeling of "inherited" defects and dislocation structure (using the example of WAAM with interlayer rolling), non-isothermal models of phase precipitation (Al_3Sc), control of thermal history through support structures with low area fraction (LAFS), as well as a multiscale "digital twin" (MALAMUTE framework, PSPP correlation). The result of the work is a literature-based concept for the synergistic integration of microstructural modification, heat removal control, and multiscale digital modeling to implement full-fledged in-situ heat treatment of aluminum alloys directly during the additive manufacturing process.

Keywords: modeling, aluminum, alloys, heat treatment.