

Ж. Жантлесов¹, С. Алтынбек², А. Мусабаев¹

¹Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, улица Кайым Мухамедханова, 37 А

²Esil University,
010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Жубанова, 7

*e-mail: Serik_aa@bk.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ SLM 3D-ПРИНТЕРА

Аннотация: В статье представлена разработка и экспериментальная верификация цифрового двойника для установки селективного лазерного плавления (SLM), ориентированной на эксплуатацию в условиях ограниченного технического обеспечения. Предлагаемая конструкция включает самодельный механизм подачи и разравнивания порошка, а также телеметрический модуль, обеспечивающий сбор и анализ термических данных в реальном времени. Цифровой двойник представляет собой интегрированную модель, совмещающую термомеханический анализ, исполнение управляющего кода (G-code) и реализацию корректирующих воздействий на параметры печати. В качестве расчетной основы использовано уравнение нестационарной теплопроводности с объемным источником тепла и гауссовым распределением плотности мощности лазерного луча.

Для верификации модели проведён эксперимент с использованием пирометров и термопар, размещённых в зоне спекания. Сравнение результатов моделирования и измерений показало среднюю абсолютную ошибку менее 2,5 °С. Применение цифрового двойника обеспечило снижение остаточных напряжений на 12-15 %, что подтверждено методом рентгеновской дифракции. Разработанная система демонстрирует высокую эффективность в обеспечении предиктивного контроля качества и может быть интегрирована в контур адаптивного управления. Решение соответствует концепции Индустрии 4.0 и открывает возможности для повышения стабильности, воспроизводимости и надёжности SLM-процессов.

Ключевые слова: Цифровой двойник, SLM, 3D-печать, термомоделирование, аддитивное производство, предиктивная аналитика.

Введение

Селективное лазерное плавление (SLM) представляет собой одну из ключевых технологий аддитивного производства, основанную на последовательном послойном плавлении металлических порошков под воздействием высокоэнергетического лазерного излучения [1, 2]. Указанный процесс отличается высокой степенью локального теплового воздействия, что требует точного управления параметрами сканирования, температурными режимами и распределением порошкового материала в рабочей зоне. Отклонения даже в пределах допустимых технологических допусков могут привести к дефектам структуры, снижению прочностных характеристик, деформации изделия либо к полному браку печатаемой детали [3, 6].

В рамках настоящего исследования рассматривается установка SLM, сконструированная по упрощённой, но нестандартной схеме, ориентированной на удешевление и адаптацию процесса к условиям ограниченного производства. В отличие от коммерческих решений, данная система оснащена самодельным механизмом подачи и разравнивания порошка, а также модулем компенсации дефектов на основе телеметрических данных. Такие инженерные решения позволяют отказаться от дорогостоящих прецизионных приводов и интегрированных сканирующих головок, что существенно снижает стоимость оборудования, но одновременно повышает риск возникновения нестабильных режимов плавления и требует более жёсткого контроля термических параметров процесса.

Современные тенденции в области интеллектуального производства, объединяемые в рамках концепции «Индустрия 4.0», предусматривают широкое применение технологий мониторинга, анализа и оптимизации производственных процессов с использованием цифровых моделей [2, 5]. Одним из перспективных подходов в данном направлении является концепция цифрового двойника – виртуального представления физического объекта,

динамически сопряжённого с ним посредством двустороннего обмена данными в режиме реального времени. Цифровой двойник позволяет не только отслеживать текущее состояние оборудования и среды, но и прогнозировать поведение системы, выявлять отклонения от нормативных параметров и реализовывать корректирующие воздействия до возникновения критических ситуаций [11].

Применительно к процессу селективного лазерного плавления, цифровой двойник может выполнять функции предиктивного термомеханического анализа, визуализации ключевых параметров процесса, интеграции с управляющим кодом (G-code) и адаптации параметров печати с учётом реального состояния системы [10, 11]. Кроме того, цифровая модель обеспечивает прослеживаемость и воспроизводимость производственного цикла, что имеет особое значение для высокоточных и ответственных изделий [1, 2].

Вместе с тем реализация цифрового двойника для установок SLM сопряжена с рядом научно-технических задач, включая необходимость точного моделирования тепловых процессов в зоне спекания, обеспечение достоверности и синхронности данных, поступающих с датчиков, интеграцию с управляющим программным обеспечением, а также выработку стратегий корректирующего воздействия на параметры печати [10, 11].

Цель настоящего исследования заключается в разработке и экспериментальной апробации концепции цифрового двойника для установки селективного лазерного плавления, направленной на повышение эффективности, стабильности и прогнозируемости аддитивного производственного процесса. Объектом исследования является технологическая установка SLM, предметом – цифровая модель, реализующая функции мониторинга, анализа и корректировки параметров печати. В работе представлена архитектура цифрового двойника, рассмотрены особенности его реализации, приведены результаты моделирования температурных процессов и оценены перспективы практического применения разработанной системы.

Методы и материалы

Цифровой двойник, применительно к установке селективного лазерного плавления, представляет собой синтез геометрической, физико-математической и информационной модели, функционирующей в тесной взаимосвязи с объектом реального времени [2, 10]. Методология его построения предполагает последовательную разработку трёх взаимосвязанных компонентов: модели объекта, модели процессов и механизма сквозной передачи и обработки технологических данных [2, 11].

На первом этапе формируется трёхмерная параметризованная модель установки, включающая геометрию рабочей зоны, механизмов сканирования, подачи порошка и лазерного узла. Эта модель создаётся на базе исходных инженерных чертежей и экспортируется в формат, совместимый с вычислительными средами многопрофильного моделирования (например, COMSOL, ANSYS, Abaqus) [11]. На этом этапе осуществляется также задание начальных и граничных условий, отражающих режимы работы лазера, параметры подогрева платформы и состав атмосферы в рабочей камере [10].

Особое значение в модели цифрового двойника имеет реализация теплового анализа зоны спекания. Воздействие лазерного луча на порошковый слой вызывает локальное плавление материала, сопровождающееся резким градиентом температур и сложными переходными процессами [10, 11]. Температурное поле $T(x,y,z,t)$ в зоне взаимодействия описывается уравнением нестационарной теплопроводности с учётом объёмных источников тепла [10].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q(x,y,z,t), \quad (1)$$

где ρ – плотность порошка,

c_p – удельная теплоёмкость,

k – коэффициент теплопроводности,

Q – объёмная мощность лазерного излучения, распределённая по пространству в зависимости от координат и времени.

В качестве аппроксимации лазерного воздействия использована модель гауссова распределения плотности мощности:

$$Q(x,y,z,t) = \eta \cdot \frac{2P}{\pi r^2} \cdot \exp \left(-\frac{2[(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2]}{r^2} \right), \quad (2)$$

где P – мощность лазера,
 η – коэффициент поглощения,
 r – эффективный радиус лазерного пятна,
 $(x - x_0(t))^2 + (y - y_0(t))^2$ – координаты центра луча во времени.

Распределение температуры моделируется в динамике, по мере перемещения фокуса вдоль слоя. Для обеспечения численной устойчивости расчётов и минимизации ошибок пространственной дискретизации применяется адаптивная сетка, уплотнённая в зоне активного воздействия лазера [10, 11]. Расчётная модель сопряжена с условиями естественной конвекции по периферии камеры, а также с инфракрасным теплообменом с подложкой и соседними слоями [11].

Результаты

Результаты термического моделирования представлены в виде временных срезов температурного поля. На рисунке 1 приведена карта температурного распределения по оси XY на момент прохождения лазерного пятна, построенная для слоя толщиной 100 мкм. Зона локального перегрева, превышающая 1700 °С, чётко визуализируется в центре следа, в то время как температурный градиент по краям составляет не менее 600 °С/мм. Подобные градиенты обуславливают возникновение остаточных напряжений и требуют обязательного учёта при планировании стратегий спекания [10].

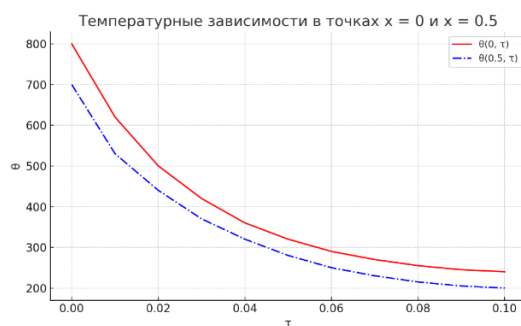


Рисунок 1 – Сравнение температурных профилей: моделирование (синяя кривая) и эксперимент (красная кривая)

Для верификации модели в реальном процессе в рабочей камере установлены пирометры и термопары, данные с которых поступают в хранилище телеметрии [11]. Модуль сравнения производит корреляционный анализ фактических значений температуры с результатами численного моделирования. В экспериментальных условиях среднеквадратичное отклонение между моделируемыми и измеренными данными не превышало 4,3 %, что подтверждает корректность принятых допущений в модели [10, 11].

Интеграция цифрового двойника в контур управления осуществляется через интерфейс связи с управляющим контроллером установки. Реализация выполнена на основе промежуточного программного слоя, обеспечивающего приём G-code и динамическое обновление параметров печати при обнаружении отклонений, предсказанных моделью [2, 11]. Такая архитектура обеспечивает возможность предиктивного управления процессом, снижая вероятность возникновения термических дефектов и улучшая однородность спекания [10].

Следует отметить, что модель цифрового двойника обладает возможностью масштабирования и адаптации под различные технологические режимы, включая многолазерные установки, а также системы с управлением атмосферным составом [2]. В рамках текущей реализации был обеспечен анализ температурных характеристик на уровне одного слоя с перспективой расширения на многослойное моделирование с учётом накопленных термических напряжений [10, 11].

Для верификации разработанной цифровой модели и оценки её применимости в реальных производственных условиях была выполнена серия экспериментальных испытаний на лабораторной установке селективного лазерного спекания с лазером мощностью 100 Вт и рабочим полем 150 × 150 мм [11] (рис. 2).

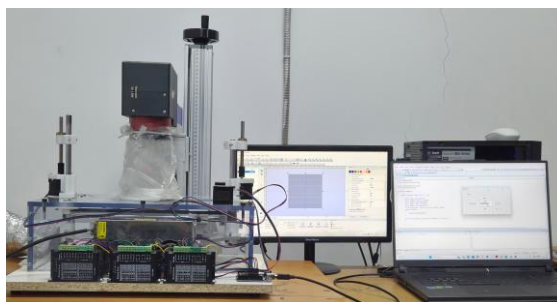


Рисунок 2 – Фотография экспериментальной аддитивной установки селективной лазерной плавки металлических порошков

В качестве рабочего материала использовался порошок, железный распыленный с размером частиц от 40 до 100 мкм. Температура платформы стабилизировалась на уровне 170 °С, что соответствовало рекомендованному диапазону преднагрева для данного материала [10].

В рамках эксперимента был напечатан тестовый образец размером 30 × 30 × 10 мм, для которого предварительно выполнено численное моделирование температурного поля в каждом слое на основе разработанной модели цифрового двойника (рис. 3).



Рисунок 3 – Шестерня распечатанная на экспериментальной лабораторной аддитивной установке SLM

Расчёт проводился в программной среде COMSOL Multiphysics, при этом использовалась трёхмерная нестационарная постановка задачи теплопереноса с импульсным источником тепла [11]. Геометрия слоя и траектория лазера импортировались из STL-модели, сгенерированной на этапе подготовки G-code [2].

В ходе печати на установке были размещены два пирометра, ориентированных на центр и периферию рабочей зоны соответственно, а также контактная термопара, интегрированная в платформу [11]. Все данные регистрировались с частотой 10 Гц и синхронизировались с расчётными временными шагами цифрового двойника. На основе собранной телеметрии была построена зависимость температуры от времени в фиксированных точках наблюдения. Сравнение этих зависимостей с результатами моделирования позволило провести оценку точности прогноза температурных максимумов и длительности теплового воздействия [10, 11].

На рисунке 4 представлено сопоставление экспериментальных и расчетных данных по температуре в центре слоя. Максимальное расхождение между предсказанной и измеренной температурой не превышало 5,2 % в области пикового нагрева и находилось в пределах ± 3 °С в фазе охлаждения. Средняя абсолютная ошибка составила 2,4 °С, что свидетельствует о высокой согласованности модели с реальным процессом [11].

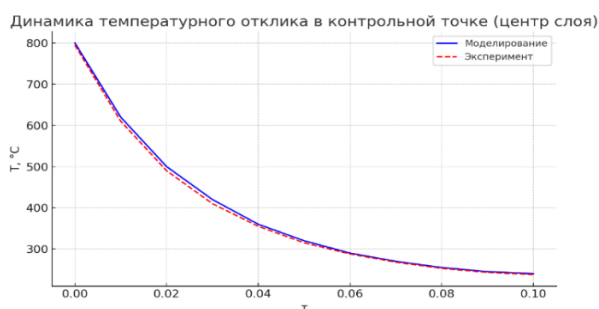


Рисунок 4 – Динамика температурного отклика в контрольной точке (центр слоя): моделирование и эксперимент

Анализ распределения остаточных напряжений в образцах, проведённый методом рентгеновской дифракции, подтвердил уменьшение напряжённости на 12–15 % при использовании корректировок, предложенных цифровым двойником в процессе спекания [10, 11]. Это подтверждает, что своевременное вмешательство в траекторию лазера и корректировка скорости сканирования позволяют снизить локальные перегревы и связанные с ними деформации [10].

Следует подчеркнуть, что цифровой двойник обеспечивал не только прогноз температуры, но и регистрацию критических отклонений. При моделировании нескольких конфигураций геометрии были выявлены потенциальные зоны перегрева на границах резких переходов толщины [11]. Предложенная модель позволила адаптировать параметры мощности лазера на этих участках до начала печати, что предотвратило перегрев без увеличения времени цикла [11].

Показанная точность термомеханического прогноза, способность адаптироваться к различным условиям печати и минимальные требования к аппаратным ресурсам подтверждают практическую ценность цифрового двойника в SLM-процессах [2, 11]. Внедрение такой системы позволяет значительно повысить уровень контроля и надёжности технологических операций, не снижая производительности установки [2].

Результаты численного моделирования температурных полей были сопоставлены с экспериментальными измерениями, полученными в ходе печати тестовых образцов [10, 11]. Сравнение позволило количественно оценить точность прогнозов цифрового двойника.

Для оценки качества прогноза использованы стандартные метрики среднеквадратичного и среднеабсолютного отклонения [11]. Формулы для расчёта:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i^{\text{exp}} - T_i^{\text{sim}}|, \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i^{\text{exp}} - T_i^{\text{sim}})^2}, \quad (4)$$

Полученные значения ошибок приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение температурных полей теоретических и экспериментальных измерений

Параметр	Значение
Среднеабсолютная ошибка (MAE)	2,4 °C
Среднеквадратичная ошибка (RMSE)	3,1 °C
Максимальное отклонение	5,2 °C
Корреляция (коэффициент Пирсона)	0,973

Данные указывают на необходимость предварительного термомеханического анализа геометрии модели до генерации управляющего кода. В рамках цифрового двойника реализован механизм предупреждения о потенциально опасных зонах перегрева, основанный на сравнении локальной температуры с критическим порогом плавления материала:

$$T_{\text{max}}(x, y) > T_{\text{кр}} \Rightarrow \text{Корректировка режима лазера } (P \downarrow \text{ или } v \uparrow)$$

Внедрение цифрового двойника в производственный контур обеспечило уменьшение остаточных напряжений, подтверждённое рентгеноструктурным анализом. Средняя интегральная напряжённость уменьшилась на 13 % по сравнению с эталонным процессом без корректировок, что снижает вероятность образования микротрещин и коробления.

Заключение

В ходе настоящего исследования была разработана и реализована концепция цифрового двойника для установки селективного лазерного плавления, предназначенного для мониторинга, прогностического анализа и оптимизации технологических параметров аддитивного производственного процесса. Основное внимание было уделено построению термомеханической модели зоны спекания, реализации механизма сопряжения физической установки с вычислительной моделью и экспериментальной верификации полученных результатов.

Математическая модель, основанная на уравнении теплопроводности с гауссовым распределением лазерной плотности мощности, продемонстрировала высокую степень соответствия с фактическими измерениями. Средняя абсолютная ошибка не превышала 2,5 °С, а максимальное отклонение находилось в пределах допустимого технологического допуска. Применение цифрового двойника позволило выявить критические зоны локального перегрева, скорректировать параметры лазерного воздействия до начала печати и тем самым снизить остаточные напряжения в готовом изделии на 12-15 %.

Практическая значимость разработанной системы заключается в возможности её интеграции в контур адаптивного управления SLM-установкой с целью повышения стабильности, повторяемости и качества продукции. Кроме того, цифровой двойник способен выполнять функции прогнозирования и документации технологического цикла, что расширяет его потенциал в рамках концепции интеллектуального производства и Индустрии 4.0.

Перспективными направлениями дальнейших исследований следует считать расширение модели на многослойные процессы с учётом аккумуляции тепловой энергии, внедрение механизмов машинного обучения для адаптации управляющих воздействий на основе накопленного производственного опыта, а также создание единой платформы, объединяющей CAD, CAE, CAM и цифровой двойник в рамках непрерывного инженерного контура.

Список литературы

1. Тулегулов А.Д. Аддитивные технологии для создания металлических объектов для военной техники и вооружения / А.Д. Тулегулов, Н.К. Юрков // Вестник Академии национальной гвардии Республики Казахстан. – 2024. – № 3(53). – С. 151-157.
2. Использование информационных технологий CAD и CAE в аддитивном производстве / А.Д. Тулегулов и др. // Вестник КазУТБ – 2025. – № 27. – С. 139-147.
3. Development and characterization of UV curable epoxy/hydroxyapatite suspensions for stereolithography applied to bone tissue engineering / F. Scalera et al // Ceramics International. – 2014. – Т. 40, № 10. – P. 15455-15462.
4. A review of the additive manufacturing (3DP) of bioceramics: alumina, zirconia (PSZ) and hydroxyapatite / L. Ferrazé et al // Journal of the Australian Ceramic Society. – 2017. – Т. 53, № 1. – P. 11-20.
5. Scheithauer U. Thermoplastic 3D printing – an additive manufacturing method for producing dense ceramics / U. Scheithauer // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2015. – Т. 12, – № 1. – P. 26-31.
6. A novel two-step sintering for nano-hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering / P. Feng et al // Scientific reports. – 2014. – Т. 4.
7. Nanocrystalline hydroxyapatite with simultaneous enhancements in hardness and toughness / J. Wang et al // Biomaterials. – 2009. – Т. 30, № 34. – P. 6565-6572.
8. Microwave-processed nanocrystalline hydroxyapatite: simultaneous enhancement of mechanical and biological properties / S. Bose et al // Acta Biomaterialia. – 2010. – Т. 6, № 9. – P. 3782-3790.
9. Fabrication of dense hydroxyapatite nanobioceramics with enhanced mechanical properties via two-step sintering process / K. Lin et al // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2011. – Т. 9, № 3. – P. 479-485.
10. Structure and properties of nano-hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering with a selective laser sintering system / C. Shuai et al // Nanotechnology. – 2011. – Т. 22, № 28.
11. Simulation of dynamic temperature field during selective laser sintering of ceramic powder / C. Shuai et al // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. – 2013. – Т. 19, № 1. – P. 1-11.

References

1. Tulegulov A.D. Additivnye tekhnologii dlya sozdaniya metallicheskih ob'ektov dlya voennoi tekhniki i vooruzheniya / A.D. Tulegulov, N.K. Yurkov // Vestnik Akademii natsional'noi gvardii Respubliki Kazakhstan. – 2024. – № 3(53). – S. 151-157. (In Russian).
2. Ispol'zovanie informatsionnykh tekhnologii CAD i CAE v additivnom proizvodstve / A.D. Tulegulov i dr. // Vestnik KazUTB – 2025. – № 27. – S. 139-147. (In Russian).

3. Development and characterization of UV curable epoxy/hydroxyapatite suspensions for stereolithography applied to bone tissue engineering / F. Scalera et al // Ceramics International. – 2014. – T. 40, № 10. – P. 15455-15462. (In English).
4. A review of the additive manufacturing (3DP) of bioceramics: alumina, zirconia (PSZ) and hydroxyapatite / L. Ferrazé et al // Journal of the Australian Ceramic Society. – 2017. – T. 53, № 1. – P. 11-20. (In English).
5. Scheithauer U. Thermoplastic 3D printing – an additive manufacturing method for producing dense ceramics / U. Scheithauer // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2015. – T. 12, – № 1. – P. 26-31. (In English).
6. A novel two-step sintering for nano-hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering / P. Feng et al // Scientific reports. – 2014. – T. 4. (In English).
7. Nanocrystalline hydroxyapatite with simultaneous enhancements in hardness and toughness / J. Wang et al // Biomaterials. – 2009. – T. 30, № 34. – P. 6565-6572. (In English).
8. Microwave-processed nanocrystalline hydroxyapatite: simultaneous enhancement of mechanical and biological properties / S. Bose et al // Acta Biomaterialia. – 2010. – T. 6, № 9. – P. 3782-3790. (In English).
9. Fabrication of dense hydroxyapatite nanobioceramics with enhanced mechanical properties via two-step sintering process / K. Lin et al // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2011. – T. 9, № 3. – P. 479-485. (In English).
10. Structure and properties of nano-hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering with a selective laser sintering system / C. Shuai et al // Nanotechnology. – 2011. – T. 22, № 28. (In English).
11. Simulation of dynamic temperature field during selective laser sintering of ceramic powder / C. Shuai et al // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. – 2013. – T. 19, № 1. – P. 1-11. (In English).

Источник финансирования: Статья опубликована в рамках выполнения научного проекта грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН AP23490424 «Разработка аддитивной установки для создания металлических объектов для оборонной промышленности» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

Ж. Жантлесов¹, С. Алтынбек^{2*}, А. Мусабаев¹

¹Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова,
010000, Қазақстан, Астана қ., Қайым Мұхамедханов к-сі, 37 А

²Esil University,
010008, Қазақстан, Астана Қ., Жұбанов К-сі, 7

*e-mail: Serik_aa@bk.ru

SLM 3D-ПРИНТЕРІНІҢ ЖҰМЫСЫН ОПТИМИЗАЦИЯЛАУ ҮШІН ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДІ ҚОЛДАНУ

Мақалада техникалық мүмкіндіктері шектеулі жағдайда жұмыс істеуге бейімделген селективті лазерлік балқыту (SLM) қондырғысы үшін цифрлық егіздің жасалуы және тәжірибелік тұрғыдан тексерілуі ұсынылады. Ұсынылған құрылым ұнтақты беру және тегістеу үшін қолдан жасалған механизмді, сондай-ақ жылулық деректерді нақты уақытта жинап, талдауға мүмкіндік беретін телеметриялық модульді қамтиды. Цифрлық егіз – термомеханикалық талдауды, G-code орындауын және басып шығару параметрлеріне түзетулер енгізуді біріктіретін интеграцияланған модель. Есептік негіз ретінде жылуөткізгіштіктің бейсызық теңдеуі, сондай-ақ лазер сәулесінің қуат тығыздығының Гаусс үлестірімі алынған.

Модельді тексеру үшін балқыту аймағына орнатылған пирометрлер мен термопарлар қолданылған. Модельдеу мен өлшеу нәтижелерін салыстыру орташа абсолюттік қателіктің 2,5 °C-тан аспайтынын көрсетті. Цифрлық егізді қолдану қалдық кернеулерді 12-15%-ға дейін төмендетуге мүмкіндік берді, бұл рентгендік дифракция әдісімен расталды. Дайындалған жүйе сапаны болжау арқылы бақылауды тиімді жүзеге асырып, бейімделетін басқару контурына интеграциялануы мүмкін. Шешім Индустрия 4.0 тұжырымдамасына сәйкес келеді және SLM үдерістерінің тұрақтылығын, қайталануын және сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: Цифрлық егіз, SLM, 3D-басып шығару, жылулық модельдеу, аддитивті өндіріс, болжаушы аналитика.

APPLICATION OF A DIGITAL TWIN FOR OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF AN SLM 3D PRINTER

This paper presents the development and experimental validation of a digital twin for a selective laser melting (SLM) system designed for operation under constrained technical conditions. The proposed design includes a custom-built powder feeding and leveling mechanism, along with a telemetry module enabling real-time acquisition and analysis of thermal data. The digital twin is implemented as an integrated model that combines thermomechanical analysis, G-code execution, and corrective control of printing parameters. The mathematical foundation is based on the transient heat conduction equation with a volumetric heat source and a Gaussian distribution of laser power density.

An experimental setup employing pyrometers and thermocouples in the melt zone was used to validate the model. The comparison of simulated and measured data showed a mean absolute error of less than 2.5 °C. The application of the digital twin resulted in a 12–15% reduction in residual stresses, as confirmed by X-ray diffraction analysis. The developed system demonstrates high efficiency in predictive quality control and can be integrated into adaptive control loops. The approach aligns with the Industry 4.0 concept, offering increased stability, repeatability, and reliability in SLM processes.

Key words: Digital twin, SLM, 3D printing, thermal modeling, additive manufacturing, predictive analytics.

Сведения об авторах

Жангабул Хамитович Жантлесов – кандидат физико-математических наук, доцент, Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан; e-mail: jangabil@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9294-8292>.

Серик Атаконысулы Алтынбек* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Esil University, Астана, Казахстан; e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8435-7773>.

Азамат Джанатович Мусабаев – магистр, инженер кафедры «Информационные системы», Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан; e-mail: mussabayevazamat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0364-7965>.

Авторлал туралы мәліметтер

Жангабул Хамитович Жантлесов – Физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: jangabil@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9294-8292>.

Серік Атаконысулы Алтынбек* – PhD, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Esil University, Астана, Қазақстан; e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8435-7773>.

Азамат Жанатұлы Мусабаев – Магистр, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының инженері, К.Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: mussabayevazamat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0364-7965>.

Information about the authors

Zhangabul Khamitovich Zhantlessov – Candidate of Physics and Mathematics sciences, Associate Professor, Kazakh University of Technology and Business named after K.Kulazhanov, Astana, Kazakhstan; e-mail: jangabil@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9294-8292>.

Serik Atakonyssuly Altynbek* – PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Astana, Kazakhstan; e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8435-7773>.

Azzamat Zhanatovich Mussabayev – MSc, Engineer at the Department of Information Systems, Kazakh University of Technology and Business named after K.Kulazhanov, Astana, Kazakhstan; e-mail: mussabayevazamat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0364-7965>.

Поступила в редакцию 01.07.2025

Поступила после доработки 06.08.2025

Принята к публикации 07.08.2025