

RU

Аддитивные технологии в репрезентации и сохранении произведений дизайна и материальной культуры

Антонюк В. П., Ившин К. С.

Аннотация. Цель исследования – выявить пути развития методов аддитивного производства в репрезентации и сохранении произведений дизайна и материальной культуры на основе их классификации. В статье систематизированы пять технологических семейств аддитивного производства – экструзия материала (FDM/FFF), фотополимеризация (SLA/DLP/MSLA), синтез в порошковом слое (SLS/MJF), струйное нанесение связующего и материала (Binder Jetting/PolyJet) и металлическое порошковое сплавление (DMLS/SLM) – по критериям физического принципа формообразования, характера поверхностной сигнатуры («тектонического языка»), количественных параметров точности и шероховатости, доступных материалов и областей применения в реставрационной и музейной практике. Научная новизна исследования состоит в предложенной тектонической классификации репрезентационных стратегий аддитивного моделирования – честность, нейтральность и имитация, – а также в формулировании путей развития методов на основе анализа функционально-коммуникативного подхода к аутентичности цифровой реплики. В результате установлено, что выбор метода аддитивного производства и постобработки должен определяться не стремлением к визуальной неотличимости от оригинала, а коммуникативной задачей конкретной репрезентации, при неизменном соблюдении принципа отличимости вмешательства; направления дальнейшего развития связаны со стандартизацией цифровых копий, расширением номенклатуры материалов, приближающихся по свойствам к историческим, и институционализацией практик стилизованной фабрикации.

EN

Additive manufacturing technologies in the representation and preservation of design works and material culture

V. P. Antonuyk, K. S. Ivshin

Abstract. The study aims to identify developmental pathways for additive manufacturing methods in representing and preserving design works and material culture based on their systematic classification. The article classifies five technological families of additive manufacturing – material extrusion (FDM/FFF), photopolymerization (SLA/DLP/MSLA), powder bed fusion (SLS/MJF), binder and material jetting (PolyJet), and direct metal powder bed fusion (DMLS/SLM) – according to their physical principles of form generation, surface signature characteristics (“tectonic language”), quantitative precision and surface roughness metrics, material palettes, and direct applications in restoration and museum practice. The scientific novelty of the study lies in proposing a tectonic classification of representational strategies for additive modeling – honesty, neutrality, and imitation – as well as in formulating developmental trajectories based on a functional-communicative framework applied to the authenticity of digital replicas. The findings demonstrate that selecting an additive manufacturing and post-processing method should be guided not by an effort to achieve visual indistinguishability from the original, but by the communicative purpose of a specific representation, adhering strictly to the conservation principle of the discernibility of intervention. Future developmental vectors involve standardizing digital copies, expanding the palette of materials closely approximating the physical properties of historical substrates, and institutionalizing stylized fabrication practices.

Введение

Сохранение и репрезентация произведений дизайна и материальной культуры всё в большей степени опираются на цифровые технологии фиксации, моделирования и физического воспроизведения объектов. Реверс-инжиниринг – 3D-сканирование, фотограмметрия, компьютерная томография – обеспечивает точную

цифровую фиксацию геометрии и, частично, текстуры артефакта, тогда как аддитивное производство (АП) предоставляет инструментарий для материализации полученных цифровых моделей в виде реставрационных дополнений, музейных копий или образовательных макетов.

Актуальность исследования обусловлена стремительной диверсификацией методов аддитивного производства за последнее десятилетие и, как следствие, отсутствием единой систематизации этих методов применительно к задачам репрезентации и сохранения объектов дизайна и материальной культуры. В профессиональной литературе отмечается, что применение аддитивных технологий для восстановления памятников пока ограничено и требует дальнейшей систематизации и совершенствования методик (Zhang, Campbell, Graham, 2016).

Для достижения цели поставлены следующие задачи: 1) построить классификацию методов аддитивного производства по физическому принципу формообразования, характеру формируемой поверхности, параметрам точности и шероховатости, а также доступным материалам; 2) сформулировать тектоническую классификацию стратегий репрезентации, применяемых при постобработке копий, созданных методами аддитивного производства; 3) охарактеризовать методы цифрового реверс-инжиниринга, предшествующие аддитивному производству объекта, и сценарии их применения; 4) выявить технические, концептуальные и правовые ограничения аддитивного производства в данной сфере; 5) определить пути развития методов аддитивного производства в репрезентации и сохранении произведений дизайна и материальной культуры.

В работе применены следующие методы: аналитический обзор научной литературы, патентной документации и описаний реализованных проектов – для выявления технологических характеристик методов аддитивного производства и практик их применения в сфере наследия; сравнительный анализ – для сопоставления технологических семейств аддитивного производства по принципу формообразования, параметрам точности и шероховатости, материалам и характеру поверхности; типологическая систематизация – для построения классификации методов аддитивного производства и тектонической классификации репрезентационных стратегий; анализ конкретных случаев (кейс-метод) – для выявления ограничений и путей развития методов в реставрационной, музейной и образовательной практике.

Материалом исследования послужили патентная документация на базовые технологии аддитивного производства (Hull, 1986; Deckard, 1990; Crump, 1992; Sachs, Haggerty, Cima et al., 1993); описания реализованных реставрационных, музейных и образовательных проектов (The Facsimile of the Tomb of Tutankhamun, 2015; Renishaw, 2016; Hoy toca el Prado, 2015; Griggs, 2025 и др.); технические материалы производителей оборудования и сервисов аддитивного производства (FacFox, 2019; Sinterit, 2025; Sculpteo, 2017); публикации специализированных изданий о применении 3D-печати в сфере наследия (Специалисты Оксфордского института..., 2018; Суворов, 2019; The Comeback of Craftsmanship..., 2020); а также нормативные документы в области сохранения наследия и музейной этики (Международная хартия..., 1964; ICOM Code of Ethics for Museums..., 2026).

Теоретическую базу составили исследования по цифровой реставрации археологических артефактов, фотограмметрии и стандартизации оцифровки культурного наследия (Waas, Zell, 2014; Zhang, Campbell, Graham, 2016; Storeide, George, Sole et al., 2023), работы по теории тектоники в архитектуре и дизайне (Frampton, 1995; Schumacher, 2017), концепция симулякра Ж. Бодрийяра (Baudrillard, 1994) и концепция ауры произведения искусства В. Бенямина (1996), прикладные исследования аутентичности 3D-печатных реплик наследия (Jones, Jeffrey, Maxwell et al., 2018; Khunti, 2018; Tissen, 2024), а также экспериментальные исследования свойств материалов и поверхностей, получаемых методами аддитивного производства (Rizzo, Fico, Montagna et al., 2023; Jabłońska, Łastowska, 2024; Katheng, Prawatvatchara, Chaiamornsap et al., 2025).

Практическая значимость исследования состоит в том, что предложенные классификация методов аддитивного производства и тектоническая классификация репрезентационных стратегий могут использоваться реставраторами, музейными специалистами и дизайнерами при выборе метода печати, материала и вида постобработки в зависимости от задачи конкретной реплики (тактильная копия, реставрационное восполнение, экспозиционная или художественно-исследовательская репродукция), а также в образовательных программах по дизайну, реставрации и музейному делу.

Обсуждение и результаты

1. Классификация методов аддитивного производства для репрезентации материальной культуры

Пять технологических семейств аддитивного производства, применяемых в реставрационной и музейной практике, различаются по физическому принципу формообразования и, как следствие, формируют принципиально разные поверхностные сигнатуры – «тектонические языки», каждый из которых несёт информацию о собственном производственном генезисе. В основу предлагаемой классификации положены три критерия: 1) физический механизм соединения материала в слое и между слоями; 2) количественные параметры точности, шероховатости и анизотропии механических свойств; 3) характер постобработки, необходимой для приведения поверхности к требуемому репрезентационному состоянию.

1.1. FDM/FFF

Технология послойного наплавления была запатентована Скоттом Крампом в 1989 году (заявка от 30.10.1989, патент выдан 09.06.1992) и коммерциализирована компанией Stratasys под товарным знаком Fused Deposition Modeling (FDM – моделирование методом послойного наплавления) (Crump, 1992). После истечения срока

действия ключевых патентов в 2009 году открытый термин Fused Filament Fabrication (FFF – изготовление методом наплавления нити), предложенный сообществом RepRap, основанным в 2004 году А. Боуером в Батском университете, стал общеупотребимым обозначением того же принципа для недорогого оборудования.

Принцип формообразования состоит в послойной экструзии расплавленного термопластичного филамента через сопло диаметром, как правило, 0,4 мм, с толщиной слоя 0,1–0,3 мм. Ключевая тектоническая особенность FDM/FFF – анизотропия механических свойств: прочность детали в направлении построения (по оси Z) существенно ниже прочности в плоскости печати (по данным сервиса аддитивного производства FacFox, потери прочности по оси Z могут превышать 55%) (FacFox, 2019), поскольку межслойное соединение осуществляется термической диффузией на границе валиков, а не в гомогенном объёме материала. Наиболее употребимые материалы – PLA (полилактид), ABS (акрилонитрилбутадиенстирол), поддающийся постобработке ацетоновым паром, и PETG (полиэтилентерефталат-гликоль), продемонстрировавший в исследовании стойкость к искусственному старению (модуль упругости $1,13 \pm 0,01$ ГПа (гигапаскаля), предел прочности $60,20 \pm 2,11$ МПа (мегапаскаля), цветовое различие $\Delta E = 2,6$ после старения) (Rizzo, Fico, Montagna et al., 2023).

Поверхностная шероховатость FDM-деталей зависит от высоты слоя и параметров печати: в исследовании образцов из PETG среднее арифметическое отклонение профиля Ra составило 7,95–16,09 мкм (микрометра) при высоте слоя 0,1 мм и 12,85–13,55 мкм при высоте слоя 0,2 мм, а после механической доработки точением снизилось до 1,94 мкм (Jabłońska, Łastowska, 2024). Оценка восьми филаментов методом теста Одди (ускоренное старение в течение 28 суток при 60 °C и 100% относительной влажности) не выявила значимой коррозии металлических индикаторных пластин, что подтвердило пригодность исследованных материалов для применения в реставрации чувствительных археологических предметов (Aura-Castro, Díaz-Marín, Mas-Barberà et al., 2021), а колориметрическое исследование тринадцати филаментов, подвергнутых ускоренному старению, выявило наибольшую цветовую стабильность у филамента на основе PLA с наполнителем из карбоната кальция (CaCO_3) (Higuera, Collado-Montero, Medina, 2023).

Показательные кейсы применения FDM/FFF в репрезентации наследия включают: тактильные реплики для посетителей с нарушениями зрения Археологического музея Пирея, изготовленные из смеси переработанного и первичного PLA (Kantaros, Soulis, Alysandrato, 2023); реконструкцию четырёх утраченных колонн кивория XVII века из PETG со сравнительным анализом относительно традиционной обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) (параметры печати: сопло 0,4 мм, заполнение 20%, температура экструзии 200–220 °C, температура стола 50 °C, скорость 60 мм/с, высота слоя 0,2 мм) (Rizzo, Fico, Montagna et al., 2023); изготовление литейных форм для факсимиле восковой анатомической скульптуры XVIII века (Sterp Moga, Sánchez-Ortiz, Hernández-Muñoz, 2022); реставрационную интеграцию исторических деревянных дверей церкви в Турине с применением ручного объёмного сканера и 3D-печатной вставки (De Luca, Del Giudice, Grasso et al., 2019).

1.2. SLA/DLP/MSLA

Стереолитография (SLA, Stereolithography) представляет собой исторически первую аддитивную технологию, запатентованную Чаклом Халлом (Hull, 1986) в 1984 году (патент выдан 11 марта 1986 года). В 1986 году Халл основал компанию 3D Systems, а в 1987 году был выпущен первый коммерческий принтер SLA-1. Принцип формообразования заключается в фотополимеризации жидкой смолы под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения – точно (SLA, лазер), проекционно (DLP, Digital Light Processing – цифровая обработка света, с засветкой цифровым проектором) или матрично (MSLA, Masked Stereolithography – масочная стереолитография, с засветкой через жидкокристаллическую матрицу LCD, Liquid Crystal Display).

Ключевое тектоническое отличие данного семейства технологий от FDM заключается в изотропии механических свойств детали (FacFox, 2019). Это объясняется тем, что отверждение происходит за счёт химической сшивки (полимеризации) материала, а не физической диффузии расплава на границах слоёв, в связи с чем выраженная анизотропия по оси построения отсутствует.

Сравнительное исследование временных (провизорных) стоматологических смол, отверждённых тремя разновидностями технологии, показало следующие значения среднего арифметического отклонения поверхности Sa, измеренного методом атомно-силовой микроскопии: $14,79 \pm 7,96$ нм для SLA, $24,59 \pm 9,76$ нм для DLP и $89,87 \pm 28,26$ нм для LCD (Katheng, Prawatvatchara, Chaiamornsap et al., 2025).

Оценка безопасности аддитивных материалов для музейной среды методом теста Одди (28 суток, 60 °C) показала, что результаты существенно различаются в зависимости от конкретного материала; это обуславливает необходимость дифференцированного подхода к выбору смолы и её предварительного тестирования перед использованием в контакте с музейными предметами (Kartaki, Earl, Sully et al., 2025).

С позиции тектонической классификации ключевым феноменом SLA является «нейтральная поверхность». Она гладкая, без выраженных слоев и не несёт собственного выразительного языка, что делает ее пригодной основой для последующей художественной обработки любого рода. Это ключевое отличие SLA от FDM, поверхность которой обладает собственным графическим характером. Данная «нейтральность» роднит тектонику SLA с бодрийеровским понятием симулякра: поверхность, лишённая имманентного содержания, легко принимает содержание, приданное извне (Baudrillard, 1994).

К наиболее известным проектам, в которых задача высокоточного воспроизведения рельефа поверхности решается цифровыми методами, относятся проекты Factum Arte: факсимиле гробницы Тутанхамона (The Facsimile of the Tomb of Tutankhamun, 2015) и факсимиле гробницы Сети I, экспонировавшееся в Античном музее Базеля

в 2018 году (Recording the Tomb..., 2022). Следует также отметить исследование “Indistinguishable Likeness” («Неотличимое сходство»), посвящённое 3D-печатным «двойникам» произведений живописи и их роли в истории искусства, консервации и музейной практике (Tissen, 2024).

Кроме того, SLA также широко применяется как метод изготовления мастер-моделей для последующего литья по выплавляемым моделям в металл – см. раздел 1.5.

1.3. SLS/MJF

Селективное лазерное спекание (SLS, Selective Laser Sintering) разработано Карлом Декардом (Deckard, 1990) в Техасском университете в Остине совместно с Джозефом Биманом; патент подан в 1986 году, первый коммерческий принтер выпущен компанией DTM Corporation в 1992 году. Принцип – селективное спекание слоя полимерного порошка (как правило, полиамида PA12) толщиной около 100 мкм лучом CO₂-лазера при предварительном подогреве порошка до температуры, близкой к температуре его плавления (для порошка PA 2200 температура плавления составляет 172-180 °C) (Mehdipour, Gebhardt, Kästner, 2021).

Технология Multi Jet Fusion (MJF – многоструйное сплавление), представленная компанией HP Inc. в 2016 году, использует принципиально иной механизм селективности: инфракрасное излучение сплавляет порошок в зонах, где нанесены плавящий и детализирующий агенты. Данные о сравнительной анизотропии механических свойств SLS- и MJF-деталей противоречивы. В исследовании образцов из PA12 предел прочности SLS-образцов практически не зависел от ориентации (43,89-44,90 МПа при скорости нагружения 1 мм/мин), тогда как у MJF-образцов прочность в плоской ориентации была ниже, чем в ориентации «на ребро» (34,39 и 44,07 МПа соответственно) (Mehdipour, Gebhardt, Kästner, 2021). Напротив, для PA12, наполненного стеклянными микросферами, у SLS-образцов в вертикальной ориентации зафиксировано снижение предела прочности на 32% и относительного удлинения при разрыве на 60% по сравнению с горизонтальными ориентациями, тогда как у MJF-образцов наблюдались лишь незначительные различия (Lupone, Padovano, Lambertini et al., 2024). Шероховатость поверхности SLS-деталей из полиамида PA11 в состоянии после печати составляет Ra = 8-23 мкм в зависимости от ориентации поверхности и размера зерна порошка (Tonello, Conradsen, Pedersen et al., 2023).

Тектонической сигнатурой порошкового синтеза служит «след порошка» – равномерная матовая зернистость, лишённая направленного характера линий FDM и гладкости SLA.

1.4. Binder Jetting/PolyJet

Технология струйного нанесения связующего (Binder Jetting) запатентована группой исследователей Мас-сачусетского технологического института во главе с Эмануэлем Саксом и Майклом Симой (Sachs, Haggerty, Cima et al., 1993) (патент 1993 года) и лицензирована компанией Z Corporation; после её приобретения компанией 3D Systems в 2012 году технология получила название ColorJet Printing (CJP). Технология PolyJet, разработанная израильской компанией Objet Geometries (основана в 1998 году, слияние со Stratasys в 2012 году), использует струйное нанесение капель фотополимера с последующим УФ-отверждением; принтер Stratasys J750 (2016) обеспечивает одновременную печать несколькими материалами и полноцветную печать.

Обе технологии объединяет способность к передаче цвета непосредственно в материале детали (посредством окрашенного связующего или цветных фотополимеров), что отличает их от прочих методов, требующих окраски поверхности после печати. Вместе с тем с этим связано специфическое противоречие между сроком службы материалов и задачами музейного хранения: в обзоре проблем сохранения объектов быстрого прототипирования отмечается, что ожидаемый срок службы даже промышленных пластиков, рассчитанных на длительную эксплуатацию, составляет порядка 15-25 лет (Coon, Pretzel, Lomax et al., 2016). Светостойкость полноцветных струйных 3D-отпечатков исследовалась методом ускоренного старения под воздействием излучения ксеноновой лампы (Stanić, Lozo, 2010), что делает светостойкость отдельным критерием выбора технологии для экспонирования.

Показательные кейсы: реконструкция облика мумифицированных детей для постоянной экспозиции Национального музея естественной истории Смитсоновского института “Eternal Life in Ancient Egypt” («Вечная жизнь в Древнем Египте»), физический бюст для которой был напечатан на принтере порошковой печати со связующим ZPrinter 650 компании 3D Systems (Cramblitt, 2013); совместный проект Google Arts & Culture, CyArk и Stratasys по воссозданию объектов на основе гипсовых слепков, более ста лет хранившихся в фондах Британского музея, с печатью на многоцветном многоматериальном принтере Stratasys J750 (Google, Stratasys and CyArk..., 2019).

1.5. DMLS/SLM

Металлическая аддитивная печать методом лазерного порошкового сплавления (LPBF, Laser Powder Bed Fusion) представлена двумя исторически параллельными коммерческими траекториями: технологией DMLS (Direct Metal Laser Sintering – прямое лазерное спекание металлов) компании EOS GmbH, основанной Хансом Лангером и Хансом Штайнбихлером в 1989 году, и торговой маркой SLM (Selective Laser Melting – селективное лазерное плавление), зарегистрированной в 2000 году Дитером Шварце и Матиасом Фокеле (компания F&S) (DMLS: A Little History, 2014; Sinterit, 2025). Поскольку SLM является охраняемым товарным знаком, в современной технической литературе оба процесса всё чаще обозначаются нейтральным термином LPBF (DMLS vs SLM..., 2025).

Принцип работы: разравнивающее устройство (рекоутер) наносит слой металлического порошка (сферические частицы диаметром 15-45 мкм, толщина слоя 20-60 мкм), после чего волоконный лазер избирательно проплавляет сечение в инертной атмосфере аргона или азота, предотвращающей окисление расплава.

Ключевое преимущество металлической АП перед полимерными технологиями – материальная аутентичность: возможность изготовления детали из того же класса металла, что и исторический оригинал (не ржавеющая сталь, титановые и алюминиевые сплавы; бронза – через литьё по выплавляемым SLA-моделям).

При этом металлическая печать сопряжена с двумя специфическими технологическими особенностями. Первая – зависимость микроструктуры и механических свойств детали от термической истории процесса: свойства металла в состоянии после печати могут быть существенно улучшены последующей термической обработкой (Živčák, Nováková-Marcinčinová, Nováková-Marcinčinová et al., 2021). Вторая – остаточные напряжения, формирующиеся вследствие неравномерного термического сжатия слоёв, что ограничивает применимость технологии к деталям с тонкими нависающими элементами (Patterson, Messimer, Farrington, 2017). Шероховатость поверхности в состоянии после печати (as-built) существенно зависит от ориентации детали и угла наклона поверхности относительно направления построения; для нержавеющей стали 316L эта зависимость экспериментально охарактеризована в работах T. Koziogi и J. Bochnia (2020), а также S. R. Narasimharaju, W. Liu, W. Zeng, T. L. See, P. Scott, X. Jiang и S. Lou (2021).

С тектонических позиций поверхность деталей, полученных по технологиям DMLS/SLM, в состоянии после печати представляет собой уникальный для аддитивного производства феномен: она не имитирует ни литьё, ни ковку, а является прямым физическим свидетельством энергетического процесса формирования – «следом лазера». Показательным кейсом функциональной реставрации служит восстановление кронштейнов кабины пилота истребителя Hawker Typhoon, выполненное компанией Renishaw для музея Jet Age Museum (Глостер, Великобритания): детали были изготовлены из алюминиевого порошка на установке AM250 в соответствии с материалом оригинальных деталей, а их поверхность доведена дробеструйной и ручной обработкой. Как отмечает технолог Renishaw Д. Уитмор, исходные чертежи 1938 года были выполнены в имперских единицах измерения, а для одного из кронштейнов чертёж отсутствовал, что потребовало дополнительных обмеров (Renishaw, 2016). Концептуально иным примером является реставрация пальмирских погребальных бюстов III века н. э.: утраченная часть лица мужского бюста была восполнена элементом, напечатанным методом SLS из нейлонового порошка с покрытием каменной пудрой, и закреплена съёмными магнитами, что демонстрирует воплощение принципа обратимости реставрационного вмешательства (Abrams, 2017; 3D Technologies Restore..., 2017). Металлическая АП применяется также для ювелирной реконструкции – как в проекте Бирмингемского городского университета (Birmingham City University) по реконструкции элементов Стаффордширского клада (Innovative Education for the Jewellery Industry..., 2014), – а литьё по 3D-печатным SLA-или FDM-мастер-моделям служит основой художественного бронзолитейного производства (3D Printing with Metal Casting, 2017; Monumental Sculpture Bronze Casting..., 2018).

2. Тектоническая классификация репрезентационных стратегий

Рассмотренные в разделе 1 технологические семейства формируют пять различных поверхностных сигнатур, однако проектное значение имеет не сама сигнатура, а стратегия обращения с ней при постобработке. На основании анализа реализованных проектов можно выделить три принципиально различные стратегии, каждая из которых по-разному разрешает противоречие между тектонической честностью и симуляцией.

Стратегия 1. Тектоническая честность. Производственный процесс намеренно оставляет собственные следы на поверхности, которые не скрываются, а акцентируются как часть дизайнерского высказывания: FDM-реплики с видимыми слоевыми линиями, DMLS-объекты в состоянии после печати с характерной металлической зернистостью. Эта стратегия напрямую поддерживает консервационный принцип отличимости реставрационного вмешательства, закреплённый в статье 12 Венецианской хартии 1964 года (Международная хартия..., 1964), и соответствует концепции тектонической честности К. Фрэмптона, согласно которой способ производства объекта должен читаться на его поверхности (Frampton, 1995).

Стратегия 2. Нейтральность. Поверхность нивелируется до состояния «чистого листа», не обладающего собственным тектоническим высказыванием. Например, за счет пескоструйной обработки деталей или использования реплик из немаркированной белой смолы или филамента достигается сведение изделия к условно «нейтральному» состоянию. Такая стратегия создает основу для будущей художественной или реставрационной работы, не предопределяя ее содержательное решение.

Стратегия 3. Имитация. Поверхность намеренно подвергается финишной обработке, направленной на имитацию материала, которому объект фактически не соответствует: окраска под бронзу, патинирование под камень, имитация дерева или кости. Данная стратегия является наиболее распространённой в практике и при этом наименее осмысленной концептуально, что делает её предметом специального теоретического анализа.

Применяя классификацию Ж. Бодрийяра (Baudrillard, 1994) – четыре «порядка образа» (верная копия, искажение реальности, маскировка отсутствия, чистый симулякр) – к практике аддитивного моделирования наследия, можно проследить последовательность переходов от документально точной тактильной копии Factum Arte, открыто позиционируемой как реплика (первый порядок), через пограничный случай SLS-протеза пальмирского бюста с нанесением каменной пудры и явным обозначением реставрационного статуса (граница первого и второго порядков) к немаркированной SLA-реплике «под бронзу», представляющей собой имитацию присутствия материала, фактически отсутствующего (третий порядок).

Наиболее острая критика в адрес имитационной стратегии сформулирована в анализе реплики Триумфальной арки Пальмиры, установленной Институтом цифровой археологии на Трафальгарской площади в Лондоне, а также в Нью-Йорке и Дубае. Р. Кхунти (Khunti, 2018) в исследовании “The Problem with Printing Palmyra” («Проблема печати Пальмиры») указывает на несоответствие реплики оригиналу по материалу (мрамор, добытый в Италии) и масштабу (около двух третей оригинала); реконструкция подверглась критике со стороны археолога

М. Гавликовского и Фонда Factum, поставившего под сомнение заявление о «полной неотличимости» реплики от оригинала. Журналист С. Крисс, посетивший лондонскую реплику, дал точную тектоническую характеристику: поверхность мрамора «гладкая, яркая и пластиковая на вид» и напоминает подлинные руины «примерно так же, как замок в Диснейленде напоминает настоящую средневековую крепость» – наблюдение, зафиксировавшее провал имитационной стратегии не потому, что реплика является копией, а потому, что её поверхность не несёт тектонического свидетельства ни об оригинале, ни о собственном производственном процессе (Khunti, 2018).

Теоретическим контрапунктом радикальной критике симулякра служит концепция ауры В. Бенямина (1996), согласно которой в эпоху технической воспроизводимости произведение искусства утрачивает ауру – уникальность своего присутствия «здесь и сейчас». Однако исследование “Indistinguishable Likeness” («Неотличимое сходство») Л. Тиссен (Tissen, 2024) ставит под сомнение прямую применимость этого тезиса к трёхмерной цифровой репродукции: автор приходит к выводу, что при определённых условиях производства и экспонирования 3D-печатная копия способна не только воспроизводить, но и раскрывать материальные качества оригинала.

Эмпирическим подтверждением тезиса о возможном «переселении ауры» служат результаты проекта ACCORD, показавшие, что вовлечённость сообщества наследия в процесс цифровой документации является столь же значимым фактором формирования опыта аутентичности, как и точность геометрического воспроизведения (Jones, Jeffrey, Maxwell et al., 2018). Сходный вывод сделан в исследовании аутентичности сувениров: участие посетителей в принятии проектных решений относительно создаваемого объекта повышает воспринимаемую ценность и аутентичность 3D-печатной реплики (Anastasiadou, Vettese, 2021).

Особое место в теоретическом дискурсе занимает концепция стилизованной фабрикации (stylized fabrication), систематизированная в обзоре “State of the Art on Stylized Fabrication” («Современное состояние исследований в области стилизованной фабрикации»), где технологические артефакты производственного процесса рассматриваются как выразительные средства, а не как дефекты, подлежащие устранению (Bickel, Cignoni, Malomo et al., 2018). Эта концепция соотносится с наблюдением издания ArchDaily о «возвращении ремесленничества» в 3D-печати, в рамках которого методы аддитивного производства выступают инструментом ремесленного самовыражения, а не нейтральной репродукции (The Comeback of Craftsmanship..., 2020).

В обобщённом виде можно сформулировать нормативный вывод: проблема «стиля 3D-печати» не решается ни через безусловное принятие тектонической честности как самостоятельной эстетической цели, ни через её полное нивелирование имитационной постобработкой. Выбор стратегии определяется проектным заданием и функционально-коммуникативной ролью конкретной реплики в системе «музей – посетитель – объект наследия». Для тактильных копий приоритетной является точность геометрического воспроизведения; для реставрационных протезов – обратимость вмешательства и его визуальная отличимость; для художественно-исследовательских репродукций – способность передавать смысловую «ауру» в новом материальном воплощении. При этом сохраняется единое требование: реплика не должна скрывать свою природу. Это положение непосредственно вытекает из принципа Венецианской хартии (Международная хартия..., 1964), этических норм Международного совета музеев (ИКОМ) (ICOM Code of Ethics for Museums..., 2026) и сформулированного К. Фрэмптоном (Frampton, 1995) принципа тектонической честности.

3. Прикладные практики цифрового реверс-инжиниринга

Материализации аддитивным производством предшествует этап цифровой фиксации объекта, определяющий точность и полноту исходных данных для последующей классификации репрезентационной стратегии.

3D-сканирование. Современные лазерные сканеры и сканеры структурированного света обеспечивают бесконтактную фиксацию геометрии, что особенно значимо для хрупких экспонатов. Так, в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете в учебный процесс включены лабораторные работы по 3D-сканированию, а для выполнения обмерных работ при реставрации элементов архитектурного декора наиболее предпочтительным признан ручной оптический сканер Artec Eva, обеспечивающий точность сканирования до 0,1 мм (Шахмеева, Норин, 2017).

Фотограмметрия. Метод построения 3D-модели по серии фотографий остаётся доступной и недорогой альтернативой лазерному сканированию, применимой даже в условиях ограниченного бюджета полевых экспедиций (Waas, Zell, 2014); в настоящее время для этого используются, в частности, программы Agisoft Metashape и RealityCapture. По точности фотограмметрическая модель несколько уступает лазерному сканированию, однако оба метода эффективно дополняют друг друга.

Компьютерная томография (КТ) и цифровое моделирование утраченных элементов. КТ применяется для исследования внутреннего устройства объектов без их разборки, а программные комплексы (MeshLab, 3Ds Max, Blender, ZBrush) используются для воссоздания недостающих частей на основании исторических описаний, чертежей или зеркального воспроизведения сохранившихся фрагментов.

Результатом этапа реверс-инжиниринга становится высокоточная цифровая модель, служащая основой для двух базовых сценариев аддитивного производства: реставрации утраченных фрагментов и создания музейных копий. Показательным кейсом первого сценария остаётся восстановление скульптуры «Лев Аллат» из Пальмиры (I в. н. э.): международная команда при поддержке ЮНЕСКО (Организации Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры) оцифровала уцелевшие обломки лазерными 3D-сканерами, виртуально реконструировала недостающие части, после чего 15-тонная статуя была воссоздана и заново установлена перед музеем Пальмиры (Специалисты Оксфордского института цифровой археологии..., 2018). Цифровыми методами

в уменьшенном масштабе была воспроизведена и Триумфальная арка Пальмиры (Khunti, 2018). К этому же сценарию относится функциональная реставрация экспонатов музея Hill Aerospace Museum (авиабаза Хилл, США), где применение 3D-сканирования и 3D-печати для изготовления труднодоступных деталей позволило, по опубликованным данным, снизить затраты на отдельные проекты примерно на 80% (Griggs, 2025). Кейсами второго сценария служат совместный проект Государственного музея изобразительных искусств (ГМИИ) им. А. С. Пушкина, напечатавшего копии античных статуэток для тактильной экспозиции, и Государственного Эрмитажа, создавшего цифровую модель и физическую реплику Большой императорской короны – регалии, оригинал которой хранится в Алмазном фонде и недоступен широкой публике (Суворов, 2019), а также выставка Музея Прадо “Hoy toca el Prado” («Сегодня прикасаемся к Прадо»), на которой шесть произведений разных жанров были представлены в виде тактильных трёхмерных изображений для посетителей с нарушениями зрения (Hoy toca el Prado, 2015).

Отдельного упоминания заслуживает образовательный эксперимент в рамках факультативной программы Национального института дизайна (автономная некоммерческая организация высшего образования «Национальный институт дизайна»), состоящий из трёх последовательных этапов: фотограмметрическая фиксация объекта студентами с использованием сканера Creality и мобильных устройств; сравнительный анализ моделей, полученных фотограмметрией и нейросетевыми онлайн-сервисами, с акцентом на выявление ключевых формообразующих признаков; создание студентами собственного дизайн-объекта на основе изученных исторических образцов с последующей 3D-печатью (фотополимер – для мелких деталей, FDM/PLA – для крупных моделей) и постобработкой (шлифовка, тонировка). Эксперимент демонстрирует образовательный потенциал сочетания реверс-инжиниринга и типологически осознанного выбора метода аддитивного производства для анализа формообразования и стилиобразования исторических объектов.

4. Ограничения применения аддитивных технологий

Технические ограничения. Лазерные и оптические сканеры плохо работают с прозрачными, отражающими или тёмными поверхностями. Качество фотограмметрии напрямую зависит от освещённости и фактуры фотографируемой поверхности. Разрешающая способность сканирования и печати ограничивает передачу мелкого орнамента, а хранение детализированных трёхмерных данных требует существенных вычислительных и архивных ресурсов (Storeide, George, Sole et al., 2023). Размер рабочей камеры принтера определяет предельные габариты изделия и вынуждает разбивать крупные объекты на части. Полимерные технологии не воспроизводят текстуру, массу и механические свойства традиционных материалов без привлечения металлической аддитивной печати или литья по 3D-печатным мастер-моделям; напечатанные копии обычно нуждаются в ручной постобработке (удаление поддержек, шлифовка, окраска, патинирование).

Концептуальные ограничения связаны прежде всего с вопросом аутентичности: следует ли считать фрагмент, воссозданный аддитивным методом, частью подлинного объекта или его имитацией. Как показано в разделе 2, ряд исследователей указывает на отсутствие у аддитивной реплики «ауры» оригинала (Беньямин, 1996). В то же время функционально-коммуникативный подход (проекты ACCORD, работы Е. Анастасиаду и М. Ветезе, а также Л. Тиссен) предлагает сместить акцент с бинарного вопроса подлинности на анализ коммуникативной функции реплики (Jones, Jeffrey, Maxwell et al., 2018; Anastasiadou, Vettese, 2021; Tissen, 2024). В реставрационной практике сохраняет силу принцип отличимости нового вклада: добавленные детали не должны специально состариваться или изготавливаться из тех же материалов, что и оригинал, во избежание фальсификации исторического облика (Международная хартия..., 1964). Отдельным аспектом остаётся смысловая уместность полной реконструкции: не каждое разрушенное сооружение целесообразно воссоздавать целиком, а решения о полном восстановлении памятника принимаются экспертным сообществом с учётом контекста и символического значения утраты, как показывает дискуссия вокруг реплики арки Пальмиры (Foley, 2017; Khunti, 2018).

Правовые ограничения. Создание трёхмерных сканов и физическое воспроизведение музейных предметов, защищённых авторским правом (в первую очередь произведений дизайна и изобразительного искусства XX-XXI веков), юридически приравнивается к изготовлению копий и может требовать разрешения правообладателей. Отдельную проблему представляют права на саму цифровую 3D-модель, полученную в результате сканирования, зачастую проводимого международными организациями или частными компаниями без чётких договорённостей о правах на результат (Shein, 2019). Монопольный контроль над 3D-данными наследия со стороны иностранной организации рассматривается рядом специалистов как форма «цифрового колониализма» (Shein, 2019), что стимулирует развитие инициатив открытого доступа к цифровым моделям памятников (например, Open Heritage).

5. Пути развития методов аддитивного производства

Проведённая классификация методов аддитивного производства и репрезентационных стратегий позволяет определить несколько взаимосвязанных направлений развития данной области.

Стандартизация цифровых и физических копий. Отсутствие единых протоколов оцифровки и репрезентационной постобработки затрудняет сопоставимость результатов между учреждениями и странами; систематический обзор внедрений 3D-технологий в оцифровке наследия прямо указывает на необходимость выработки общих стандартов цифровых рабочих процессов (Storeide, George, Sole et al., 2023). Разработка таких стандартов, охватывающих как точность геометрической фиксации, так и маркировку репрезентационной стратегии (честность, нейтральность или имитация) объекта, представляется первоочередным направлением институционализации практики.

Расширение полюса материальной аутентичности. Как показано в разделе 1.5, металлическая аддитивная печать (DMLS/SLM) – единственная из рассмотренных технологий, позволяющая создать объект, материально, а не только геометрически родственный оригиналу (Renishaw, 2016). Развитие номенклатуры металлических и композитных порошков, а также снижение стоимости оборудования расширяет применимость этого полюса аутентичности за пределы узкоспециализированной функциональной реставрации движимого технического наследия.

Институционализация стилизованной фабрикации. Концепция намеренного использования технологических артефактов производственного процесса как выразительного средства (Bickel, Cignoni, Malomo et al., 2018) открывает путь к формализации «тектонически честного стиля 3D-печати» как признанной проектной парадигмы, альтернативной как имитационной постобработке, так и незаинтересованному техницизму. Предпосылкой этого служит характерная для рассмотренных технологических семейств собственная поверхностная сигнатура (линии слоёв FDM, «след порошка» SLS/MJF, «след лазера» DMLS/SLM), которая при стратегии тектонической честности становится содержательным элементом репрезентации.

Сдвиг от онтологии подлинности к функциональному анализу репрезентации. Развитие исследований в русле проекта ACCORD (Jones, Jeffrey, Maxwell et al., 2018; Foley, 2017) и работ Л. Тиссен (Tissen, 2024) указывает на смещение методологического фокуса с вопроса «является ли реплика аутентичной?» на вопрос «какое коммуникативное действие выполняет данная реплика?». Это открывает пространство для дифференцированных проектных решений, исходящих из конкретной функции репрезентации (тактильной, реставрационной, художественно-исследовательской), а не из универсального стандарта «максимальной похожести».

Развитие вовлекающих моделей цифровизации. Эмпирические данные о повышении воспринимаемой аутентичности при участии сообщества и посетителей в процессе цифровой документации и проектирования реплики (Jones, Jeffrey, Maxwell et al., 2018; Anastasiadou, Vettese, 2021) демонстрируют перспективность образовательных и партисипативных моделей. Программы такого типа, включая факультативную программу Национального института дизайна (см. раздел 3), выступают не только инструментом подготовки кадров, но и самостоятельным механизмом формирования культурной ценности репрезентации.

Заключение

Проведённая классификация пяти технологических семейств аддитивного производства (FDM/FFF, SLA/DLP/MSLA, SLS/MJF, Binder Jetting/PolyJet, DMLS/SLM) по критериям физического принципа формообразования, поверхностной сигнатуры, точностных параметров и номенклатуры материалов показывает, что каждая из технологий формирует собственный «тектонический язык», фиксирующий производственный генезис объекта. На этой основе предложена тектоническая классификация репрезентационных стратегий постобработки аддитивных копий объектов дизайна и материальной культуры: тектоническая честность, нейтральность и имитация. Классификация позволяет систематизировать проектные решения и выделить наиболее проблемную в этическом и феноменологическом отношении зону – имитационную стратегию, реализация которой без концептуальной рефлексии приводит к эффекту «диснейфикации» наследия.

Анализ путей развития показал, что дальнейшее совершенствование методов связано не столько с повышением визуальной точности имитации, сколько с рядом других факторов. К ним относятся стандартизация цифровых рабочих процессов, расширение полюса материальной аутентичности за счёт металлической аддитивной печати, институционализация стилизованной фабрикации как признанной проектной стратегии и сдвиг методологического фокуса от бинарного вопроса подлинности к функциональному анализу коммуникативной задачи конкретной репрезентации. Единым нормативным требованием при этом остаётся принцип отличимости репрезентационного вмешательства от оригинала. Этот принцип восходит к Венецианской хартии и получает новое теоретическое обоснование в современных исследованиях аутентичности цифровых реплик.

Перспективы дальнейшего исследования связаны с эмпирической проверкой предложенной тектонической классификации репрезентационных стратегий на материале отечественных музейных и реставрационных проектов, с разработкой критериев маркировки репрезентационной стратегии цифровых и физических копий, а также с изучением восприятия реплик, выполненных различными методами аддитивного производства, разными группами посетителей.

Материалы исследования | Research materials

1. Международная хартия по консервации и реставрации памятников и достопримечательных мест (Венецианская хартия, 1964): принята II Международным конгрессом архитекторов и технических специалистов по историческим памятникам (Венеция, 25-31 мая 1964 г.). https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/venice_e.pdf
2. Специалисты Оксфордского института цифровой археологии восстановили скульптуру «Лев Аллат» с помощью 3D-технологий // 3D Today. 2018. 06 января. <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-specialists-of-the-oxford-institute-of-digital-archaeology-restored-the-sculpture-of-the-lion-of-allat-using-3d-technologies>
3. Суворов А. 3D-напечатанные копии исторических экспонатов // Аддитивные технологии. 2019. <http://additiv-tech.ru/publications/3d-napechatannye-kopii-istoricheskikh-eksponatov.html>

4. 3D Technologies Restore Damaged Syrian Artifacts, Honor a Fallen Hero // 3DPrint.com. 2017. February 17. <https://3dprint.com/165423/3d-technology-syrian-artifacts/>
5. Cramblitt B. Putting faces on child mummies with 3D technology // GfxSpeak. 2013. April 29. <https://gfxspeak.com/archives/bringing-mummies-back-to-life/>
6. Crump S. S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects: Patent US5121329A. Filed 30.10.1989; publ. 09.06.1992. <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>
7. Deckard C. R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering: Patent US4938816A. Filed 17.10.1986; publ. 03.07.1990. <https://patents.google.com/patent/US4938816A/en>
8. Monumental Sculpture Bronze Casting with Deep in the Heart // re3D. 2018. <https://re3d.org/dith-bronze/>
9. DMLS: A Little History // Design and Motion. 2014. November 10. <https://designandmotion.net/design-2/manufacturing-design/dmls-a-little-history/>
10. DMLS vs SLM in Metal 3D Printing: Why Chanhontech's SLM Service Excels // Chanhontech. 2025. August 1. <https://chanhontech.com/dmls-vs-slm-in-metal-3d-printing-why-chanhontechs-slm-service-excels/>
11. FacFox. How 3D Printing Direction & Orientation Affects Strength // 8FoxDoc. 2019. November 26. <https://fac-fox.com/docs/kb/how-3d-printing-direction-orientation-affects-strength>
12. Google, Stratasys and CyArk Use 3D Scanning and 3D Printing to Preserve Cultural Heritage // 3DPrint.com. 2019. January 31. <https://3dprint.com/234901/google-stratasys-and-cyark-use-3d-scanning-and-3d-printing-to-preserve-cultural-heritage/>
13. Griggs C. Hill Aerospace Museum uses 3D technology to preserve history // Hill Air Force Base. 2025. December 19. <https://www.hill.af.mil/News/Article-Display/Article/4365654/hill-aerospace-museum-uses-3d-technology-to-preserve-history/>
14. Hoy toca el Prado // Museo Nacional del Prado. Madrid, 2015. January 20 – October 18. <https://www.museodelprado.es/actualidad/exposicion/hoy-toca-el-prado/29c8c453-ac66-4102-88bd-e6e1d5036ffa>
15. Hull C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography: Patent US4575330A. Filed 08.08.1984; publ. 11.03.1986. <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>
16. ICOM Code of Ethics for Museums: As adopted by the 41st Ordinary General Assembly (Paris, 25 June 2026). P.: International Council of Museums, 2026. https://icom.museum/wp-content/uploads/2026/07/ICOM-Code-of-Ethics-for-Museums_2026_EN.pdf
17. Innovative Education for the Jewellery Industry and Important Expertise in the Restoration of National Heritage Finds Such as the Staffordshire Hoard: REF Impact Case Study. Birmingham: Birmingham City University, 2014. <https://impact.ref.ac.uk/casestudies/CaseStudy.aspx?Id=15860>
18. Renishaw plc. Additive manufacturing revives Hawker Typhoon aircraft: Case study // Environmental Expert. 2016. October 26. <https://www.renishaw.com/resourcecentre/download/case-study-additive-manufacturing-revives-hawker-typhoon-aircraft--86151>
19. Sachs E. M., Haggerty J. S., Cima M. J., Williams P. A. Three-dimensional printing techniques: Patent US5204055A. Publ. 20.04.1993. <https://patents.google.com/patent/US5204055A/en>
20. 3D Printing with Metal Casting // Sculpteo. 2017. <https://www.sculpteo.com/en/materials/metal-casting-material/>
21. Sinterit. What is DMLS and SLM 3D Printing? // Sinterit 3D Printing Guide. 2025. November 05. <https://sinterit.com/3d-printing-guide/3d-printing-technologies/what-is-dmls-and-slm-3d-printing/>
22. The Comeback of Craftsmanship and Artisanal Aesthetics in 3D Printing // ArchDaily. 2020. March 12. <https://www.archdaily.com/934609/the-comeback-of-craftsmanship-and-artisanal-aesthetics-in-3d-printing>
23. The Facsimile of the Tomb of Tutankhamun // Factum Arte. 2015. <https://www.factum-arte.com/pag/261/the-facsimile-of-the-tomb-of-tutankhamun>
24. Recording the Tomb of Seti I in high resolution // Factum Arte. 2022. <https://factumfoundation.org/our-projects/digital-restorations/the-theban-necropolis-preservation-initiative/the-tomb-of-seti-i/recording>
25. Two Busts Restored Using 3-D Printing Returned to Syria Abrams A. R. Two Busts Destroyed by ISIS Return to Siria After Restoration in Italy // Artnet: News. 2017. March 02. <https://news.artnet.com/art-world/two-busts-palmyra-3-d-printing-isis-return-syria-876767>

Источники | References

1. Беньямин В. Производство искусства в эпоху его технической воспроизводимости // Беньямин В. Производство искусства в эпоху его технической воспроизводимости: избранные эссе. М.: Медиум, 1996.
2. Шахмеева Е. А., Норин В. А. Новейшие информационные технологии в учебном процессе строительных вузов // Опыт создания и реализации технологических инноваций в образовании: материалы Международной научно-практической конференции (г. Чебоксары, 27 октября 2017 г.). Чебоксары: Среда, 2017.
3. Anastasiadou C., Vettese S. Souvenir authenticity in the additive manufacturing age // Annals of Tourism Research. 2021. Vol. 89. Article 103188. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2021.103188>
4. Aura-Castro E., Díaz-Marín C., Mas-Barberà X., Sánchez López M., Vendrell Vidal E. Characterization of 3D printing filaments applied in restoration of sensitive archaeological objects using rapid prototyping // Rapid Prototyping Journal. 2021. Vol. 27. No. 4. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2019-0153>
5. Baudrillard J. Simulacra and Simulation / transl. by S. F. Glaser. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1994.

6. Bickel B., Cignoni P., Malomo L., Pietroni N. State of the Art on Stylized Fabrication // *Computer Graphics Forum*. 2018. Vol. 37. No. 6. <https://doi.org/10.1111/cgf.13327>
7. Coon C., Pretzel B., Lomax T., Strlič M. Preserving rapid prototypes: a review // *Heritage Science*. 2016. Vol. 4. Article 40. <https://doi.org/10.1186/s40494-016-0097-y>
8. De Luca D., Del Giudice M., Grasso N., Matrone F., Osello A., Piras M. Handheld Volumetric Scanner for 3D Printed Integrations of Historical Elements: Comparison and Results // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. Vol. XLII-2/W15. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-381-2019>
9. Foley P. The (In)Authenticity of 3D Printed Heritage // *Academia.edu*. 2017.
10. Frampton K. *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1995.
11. Higuera M., Collado-Montero F. J., Medina V. J. Colorimetric evaluation of 3D printing polymers exposed to accelerated aging for Cultural Heritage applications // *Color Research & Application*. 2023. Vol. 48. Issue 3. <https://doi.org/10.1002/col.22846>
12. Jabłońska M., Łastowska O. Enhancing of Surface Quality of FDM Moulded Materials through Hybrid Techniques // *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 17. Article 4250. <https://doi.org/10.3390/ma17174250>
13. Jones S., Jeffrey S., Maxwell M., Hale A., Jones C. 3D heritage visualisation and the negotiation of authenticity: the ACCORD project // *International Journal of Heritage Studies*. 2018. Vol. 24. No. 4. <https://doi.org/10.1080/13527258.2017.1378905>
14. Kantaros A., Soulis E., Alysandratos E. Digitization of Ancient Artefacts and Fabrication of Sustainable 3D-Printed Replicas for Intended Use by Visitors with Disabilities: The Case of Piraeus Archaeological Museum // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 17. Article 12689. <https://doi.org/10.3390/su151712689>
15. Kartaki E., Earl G., Sully D., Harrison N., Grego T. Accelerated ageing test (Oddo test) of additive manufacturing materials for cultural heritage use // *Journal of Cultural Heritage*. 2025. Vol. 74. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2025.06.018>
16. Katheng A., Prawatvachara W., Chaiamornsap P., Sornsuan T., Lekatana H., Palasuk J. Comparison of mechanical properties of different 3D printing technologies // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 18998. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03632-1>
17. Khunti R. The Problem with Printing Palmyra: Exploring the Ethics of Using 3D Printing Technology to Reconstruct Heritage // *Studies in Digital Heritage*. 2018. Vol. 2. No. 1. <https://doi.org/10.14434/sdh.v2i1.24590>
18. Kozior T., Bochnia J. The Influence of Printing Orientation on Surface Texture Parameters in Powder Bed Fusion Technology with 316L Steel // *Micromachines*. 2020. Vol. 11. No. 7. Art. 639. <https://doi.org/10.3390/mi11070639>
19. Lupone F., Padovano E., Lambertini V. G., Sampieri R., Casamento F., Zecchi S., Badini C. Selective Laser Sintering versus Multi Jet Fusion: A Comprehensive Comparison Study Based on the Properties of Glass Beads-Reinforced Polyamide 12 // *Advanced Engineering Materials*. 2024. Vol. 26. No. 3. Article 2301345. <https://doi.org/10.1002/adem.202301345>
20. Mehdipour F., Gebhardt U., Kästner M. Anisotropic and rate-dependent mechanical properties of 3D printed polyamide 12 – A comparison between selective laser sintering and multi jet fusion // *Results in Materials*. 2021. Vol. 11. Article 100213.
21. Narasimharaju S. R., Liu W., Zeng W., See T. L., Scott P., Jiang X., Lou S. Surface Texture Characterization of Metal Selective Laser Melted Part with Varying Surface Inclinations // *Journal of Tribology*. 2021. Vol. 143. No. 5. Article 051106. <https://doi.org/10.1115/1.4050455>
22. Patterson A. E., Messimer S. L., Farrington P. A. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need // *Technologies*. 2017. Vol. 5. No. 2. Article 15. <https://doi.org/10.3390/technologies5020015>
23. Rizzo D., Fico D., Montagna F., Casciaro R., Esposito Corcione C. From Virtual Reconstruction to Additive Manufacturing: Application of Advanced Technologies for the Integration of a 17th-Century Wooden Ciborium // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 4. Article 1424. <https://doi.org/10.3390/ma16041424>
24. Schumacher P. *Tectonism in Architecture, Design and Fashion: Innovations in Digital Fabrication as Stylistic Drivers* // *Architectural Design*. 2017. Vol. 87. No. 6.
25. Shein E. Who Owns 3D Scans of Historic Sites? // *Communications of the ACM*. 2019. Vol. 62. No. 1. <https://doi.org/10.1145/3290410>
26. Stanić M., Lozo B. *Permanence and Color Stability in 3D Ink-jet Printing // NIP26 and Digital Fabrication 2010: Technical Program and Proceedings*. Springfield: IS&T, 2010.
27. Sterp Moga E., Sánchez-Ortiz A., Hernández-Muñoz Ó. 3D printing of molds for the creation of facsimiles and volumetric reintegrations in wax anatomical sculptures // *Heritage Science*. 2022. Vol. 10. Article 199. <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00838-8>
28. Storeide M. S. B., George S., Sole A., Hardeberg J. Y. Standardization of digitized heritage: a review of implementations of 3D in cultural heritage // *Heritage Science*. 2023. Vol. 11. Article 249. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01079-z>
29. Tissen L. N. M. *Indistinguishable Likeness: The Impact of the Original Artwork and its 3D-Printed Twin on the Discipline of Art History, Conservation, and Museum Practice*: PhD thesis. Leiden: Leiden University, 2024.
30. Tonello R., Conradsen K., Pedersen D. B., Frisvad J. R. Surface Roughness and Grain Size Variation When 3D Printing Polyamide 11 Parts Using Selective Laser Sintering // *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 13. Article 2967. <https://doi.org/10.3390/polym15132967>

31. Waas M., Zell D. Practical 3D Photogrammetry for the Conservation and Documentation of Cultural Heritage // Proceedings of the 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (CHNT 18, 2013). Vienna, 2014.
32. Zhang F., Campbell R. I., Graham I. J. Application of additive manufacturing to the digital restoration of archaeological artefacts // International Journal of Rapid Manufacturing. 2016. Vol. 6. No. 1. <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2016.078747>
33. Živčák J., Nováková-Marcinčinová E., Nováková-Marcinčinová L., Balint T., Puškár M. Increasing Mechanical Properties of 3D Printed Samples by Direct Metal Laser Sintering Using Heat Treatment Process // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. No. 8. Article 821. <https://doi.org/10.3390/jmse9080821>

Информация об авторах | Author information



Антонюк Вячеслав Павлович¹

Ившин Константин Сергеевич², д. техн. н., проф.

^{1,2} Удмуртский государственный университет, г. Ижевск



Vyacheslav Pavlovich Antonuyk¹

Konstantin Sergeevich Ivshin², Dr

^{1,2} Udmurt State University, Izhesk

¹ usearakmr@gmail.com, ² ivshic@mail.ru

Информация о статье | About this article

Дата поступления рукописи (received): 07.08.2026; опубликовано online (published online): 15.10.2026.

Ключевые слова (keywords): аддитивные технологии; классификация методов аддитивного производства; материальная культура; культурное наследие; реверс-инжиниринг; additive technologies; classification of additive manufacturing methods; material culture; cultural heritage; reverse engineering.