

УДК 621.77.04

Оценка качества деталей, изготовленных методом послойного наплавления

Гусарова Светлана Витальевна

gusarovasv@student.bmstu.ru

Зубарев Никита Андреевич

zubarevna@student.bmstu.ru

Галиновский Андрей Леонидович

a_galinovskiy@bmstu.ru

Филимонов Алексей Сергеевич

alexf@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование по оценке качества продукции, созданной с помощью FDM-печати, с применением методов компьютерного зрения. На примере дефектов недостаточной экструзии материала были изготовлены эталонные и дефектные образцы из PLA (кубы $50 \times 50 \times 50$ мм) с различными настройками печати, проведена их фотосъемка, цифровая обработка (медианная фильтрация, бинаризация по Оцу) и классификация с использованием классических алгоритмов машинного обучения. Результаты показали точность распознавания дефектов на уровне 93 %, что подтверждает практическую реализуемость метода. Определены критические параметры, влияющие на достоверность анализа. Работа представляет собой основу для создания систем онлайн-мониторинга качества в реальном времени.

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM-печать, контроль качества, машинное зрение, диагностика дефектов, обработка изображений

Evaluation of the quality of parts made by layer-by-layer surfacing

Gusarova Svetlana Vitalievna

gusarovasv@student.bmstu.ru

Zubarev Nikita Andreevich

zubarevna@student.bmstu.ru

Galinsonskiy Andrey Leonidovich

a_galinovskiy@bmstu.ru

Filimonov Alexey Sergeevich

alexf@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. An experimental study was conducted to evaluate the quality of products created using FDM printing using computer vision methods. Using the example of defects in insufficient extrusion of the material, reference and defective samples from PLA ($50 \times 50 \times 50$ mm cubes) with various printing settings were produced, photographed, digitally processed (median filtration, Otsu binarization) and classified using classical machine learning algorithms. The results showed the accuracy of defect recognition at the level of 93 %, which confirms the practical feasibility of the method. Critical parameters affecting the reliability of the analysis have been identified. This work provides the basis for creating real-time online quality monitoring systems.

Keywords: additive technologies, FDM printing, quality control, machine vision, defect diagnosis, image processing

Введение. Современное развитие аддитивных технологий, в частности FDM-печати, сталкивается с проблемой контроля качества изделий. Дефекты печати снижают механические свойства и точность геометрии образцов. Традиционные методы визуального контроля обладают низкой эффективностью из-за субъективности оценок, высокой трудоемкости и невозможности масштабирования на промышленные объемы производства, что создает потребность в разработке автоматизированных систем диагностики качества готовых изделий по их изображениям.

Целью исследования является экспериментальная оценка возможности автоматического выявления дефектов FDM-печати по изображениям слоев. Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи:

- классификация и выбор дефектов печати для анализа;
- выбор материала и параметров печати для создания тестовых образцов;
- исследование подходов к обработке изображений;
- оценка эффективности классификации дефектов по изображениям;
- определение параметров, влияющих на точность анализа.

Материалы и методы. Для исследования был выбран метод послойного наплавления (FDM) как наиболее распространенная и относительно простая в плане контроля параметров печати технология [1]. Метод подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Пруток (филамент) материала подается в нагретое сопло, где переходит в вязкотекучее состояние, после чего наносится на поверхность нагретого столика в заданных точках, а затем охлаждается и затвердевает (рис. 1).

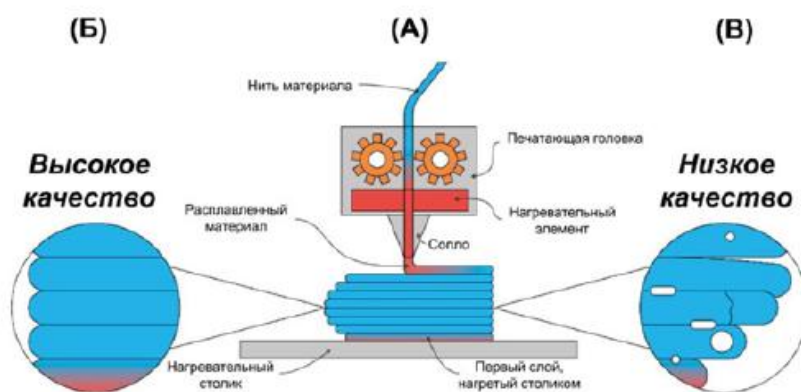


Рис. 1. Схема метода FDM:

(А) — принцип изготовления изделий; (Б) — изделие высокого качества; (В) — изделие низкого качества

Теоретически должны получаться идеально выверенные геометрические формы с высокой адгезией между слоями, но в реальности нагрев и последующие охлаждение термопласта сопровождается расширением, сжатием, и даже изменением кристалличности, это может приводить к возникновению дефектов на макро- и на микроуровне. Их появление может быть вызвано как

природой самого материала (составом), так и неоптимальными параметрами печати.

Дефекты поверхности при 3D-печати — это отклонения геометрии, текстуры или структуры изготовленного изделия от заданных параметров, возникающие в процессе аддитивного производства и ухудшающие функциональные, эстетические или механические свойства объекта [2].

Дефекты печати классифицируют по:

- геометрическому размеру (рис. 2) на: сантиметровые, миллиметровые, микрометровые, ангстремного диапазона;
- пространственной топологии на: точечные (0D), линейные (1D), плоские (2D), объемные (3D), меняющиеся во времени (4D);
- природе на: деформационные, связанные с отклоняющимся от нормы количеством материала;
- локализации на: внешние, внутренние, комбинированные.

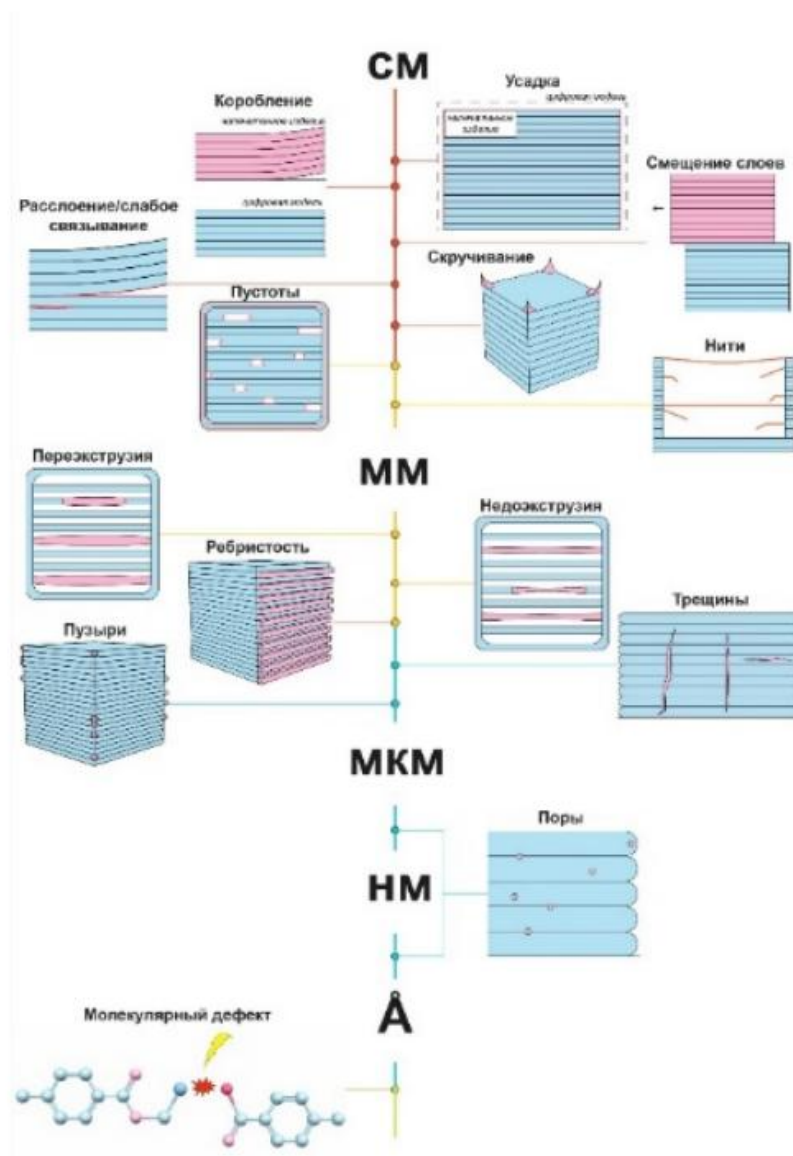


Рис. 2. Сводная схема дефектов в соответствии с их размерами

Наиболее важными параметрами 3D-печати, влияющими на совокупность дефектов изделия, являются температура экструдера, скорость печати, скорость подачи материала. Для каждого материала требуется свой собственный набор параметров печати, определяемых его свойствами (температуры стеклования и плавления, адгезия, коэффициент теплового расширения), эксплуатационными характеристиками конечного продукта (прочность, вес).

Одними из типичных проблем FDM-печати являются проблемы экструзии, поэтому в качестве объекта исследования были рассмотрены поверхностные дефекты, связанные с недостаточной экструзией материала (рис. 3). Возникающие при этом пустоты и трещины внутри и между слоев сигнализируют о недостаточной интенсивности потока материала, выходящего из сопла, что сказывается на прочности получаемых изделий [3]. Данная проблема может быть связана с ошибками в настройке параметров 3D-печати (низкая температура экструзии, низкий коэффициент подачи материала), засоренностью сопла, наличием механических проблем подачи экструдером материала. Для устранения или минимизации дефекта такого типа следует проверить параметры печати и детали печатающей головы.

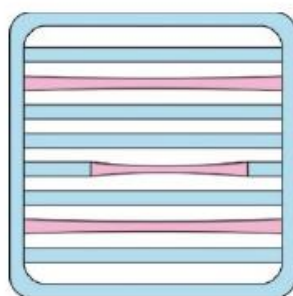


Рис. 3. Дефект недостаточной экструзии

В качестве тестовых образцов использованы модели кубов размером $50 \times 50 \times 50$ мм (рис. 4), что обусловлено следующими преимуществами: простота и воспроизводимость изготовления, минимальное влияние сложной геометрии и ее стабильность, достаточная площадь поверхностей для анализа дефектов, оптимальное время печати.

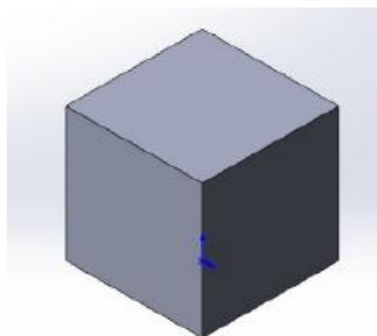


Рис. 4. CAD-модель исходного образца

Печать производилась на принтере Creality K1C с закрытой камерой печати пластиком НИТ PLA (полилактид) натурального цвета (рис. 5), обоснование выбора которого определяется его преимуществами.

1. Простота 3D-печати, связанная с технологическими возможностями: оптимальная температура экструзии (190–220 °С), низкая усадка при охлаждении, хорошая адгезия к печатной платформе благодаря чему не требуются высокотемпературные хотэнды, износостойкие сопла или термокамеры, что минимизирует влияние аппаратных факторов на возникновение дефектов, позволяя сфокусироваться на дефектах, обусловленных преимущественно параметрами печати.

2. Натуральный цвет пластика говорит о высокой однородности материала и минимальном количестве примесей в нем, исключая их влияние на результаты исследования.

3. Экологичен, безопасен, биосовместим и быстро разлагается — подходит для работы с большим количеством одноразовых образцов.

4. Дешевый в производстве, что позволяет использовать его как расходный материал для экспериментов.

Недостатки полилактида, такие как высокая степень гигроскопичности (перед печатью рекомендуется просушка), разложение в результате длительного воздействия света, низкая термостойкость, хрупкость не оказывают влияния на результаты исследования, поскольку:

- используемый PLA-материал был заказан специально для исследования и поставлен в герметичной вакуумной упаковке с осушителем, что гарантирует начальную влажность не более 0,3 % (по данным производителя) и отсутствие предварительной термодегradации;

- подразумевается кратковременность использования — образцы применяются для одноразового анализа без длительного хранения и не подвержены эксплуатации;

- контролируемые условия тестирования: изображения дефектов фиксируются непосредственно после печати, отсутствует воздействия УФ-излучения и влажности в ходе эксперимента.



Рис. 5. Катушка PLA-пластика натурального цвета

Результаты. Образцы были напечатаны в двух вариантах:

– эталонные — с оптимальными настройками экструзии для выбранного материала;

– дефектные — с искусственно созданной недостаточной экструзией.

Подбор оптимальных режимов печати для них произведен путем калибровки значений потока и температуры, численные значения которых представлены в таблице.

Процесс печати образцов на выбранных режимах представлен на рис. 6.

Параметры печати

Образец	Эталонный	Дефектный
Визуальные признаки	Гладкие слои; ровные линии экструзии; хорошее сцепление между слоями; отсутствие провисания и наплывов	Прерывистые линии экструзии; пропуски в слоях; «дырки» в стенках; слабое сцепление слоев (деталь хрупкая); тонкие, «прозрачные» участки
Параметр	Рекомендуемое значение (выбранное)	Выбранное значение
Температура сопла	190–210°C (220 °C)	197°C
Температура стола	50–60°C (50°C)	50°C
Скорость печати	40–60 мм/с (60 мм/с)	60 мм/с
Поток	95–100 % (95 %)	95 %
Высота слоя	0,1–0,2 мм (0,2 мм)	0,2 мм
Скорость вентилятора	50–100 % (50 %)	50 %

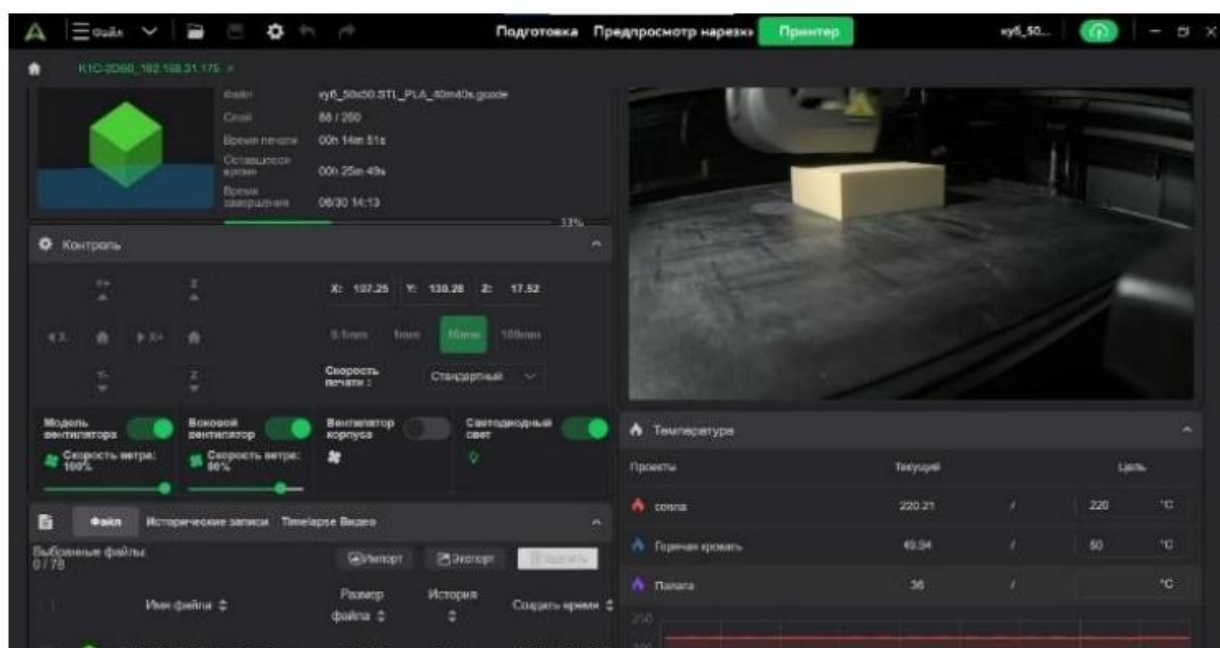


Рис. 6. Процесс печати эталонного образца в программе Creality Print 6.1

Чтобы сделать вывод об отсутствии или наличии дефектов, их количестве и степени их критичности на конкретном изделии предполагалось выполнить фотографии этого образца и произвести их дальнейшую обработку для явного выделения дефектов печати на изображении.

Для обеспечения сопоставимости результатов все образцы фотографировались в стандартных условиях: использовалось рассеянное освещение над рабочей областью, исключающее блики и резкие тени, съемка проводилась под углом 90° на расстоянии 80 см от граней куба на камеру фирмы SONY. Процедура обработки изображений анализа проводилась в программе GIMP и состояла из следующих этапов [4]:

- перехода от цветного изображения к полутоновому для экономии ресурса на обработку изображений (рис. 7, *а*; рис. 8, *а*);
- медианной фильтрации для устранения шумов и артефактов на изображении (рис. 7, *б*; рис. 8, *б*);
- бинаризации методом Оцу для выделения полезной информации для дальнейшего анализа (разделение всей области на черные (дефекты) и белые (фон) участки) (рис. 7, *в*; рис. 8, *в*).

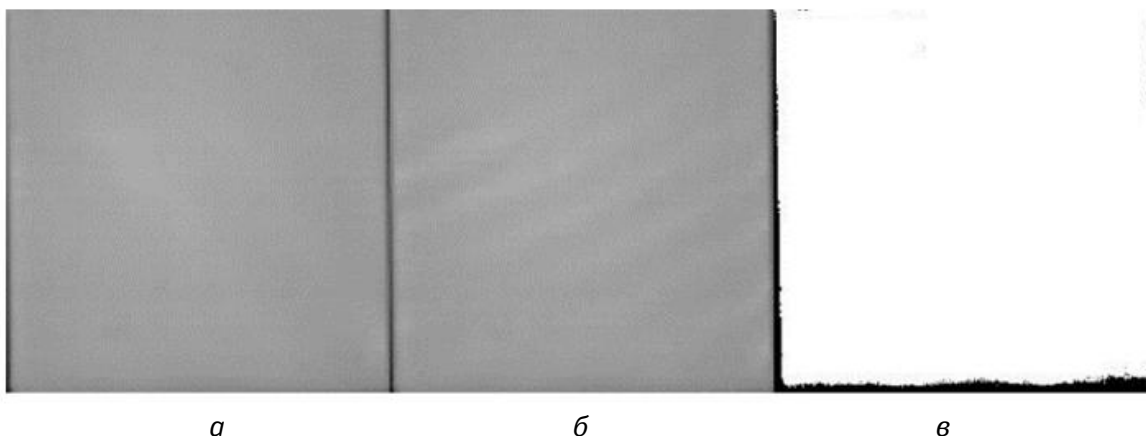


Рис. 7. Эталонный образец: полутоновое (*а*), медианно-фильтрованное (*б*), бинарное (метод Оцу) (*в*) изображения

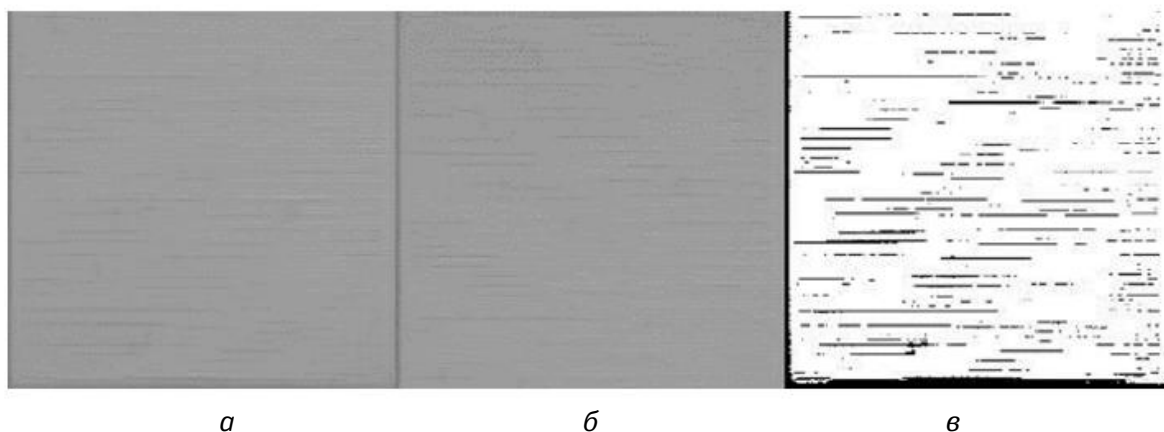


Рис. 8. Дефектный образец: полутоновое (*а*), медианно-фильтрованное (*б*), бинарное (метод Оцу) (*в*) изображения

Для автоматического разделения образцов на дефектные и эталонные использовался подход машинного обучения с учителем [5]. В исследовании применялась следующая схема:

- формирование обучающей выборки $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$, где x_i — вектор признаков изображения, в котором каждое измерение $j = 1, \dots, D$ численно описывает некоторую его характеристику и называется признаком $x^{(j)}$; y_i — бинарная метка (+1/–1 — для эталонных/дефектных образцов):

- процесс анализа: извлечение признаков из изображений; построение модели классификации; верификация на тестовой выборке.

Результаты классификации представлены на рис. 9, где визуализированы: распределение образцов в пространстве признаков, граница принятия решений, степень уверенности классификации.

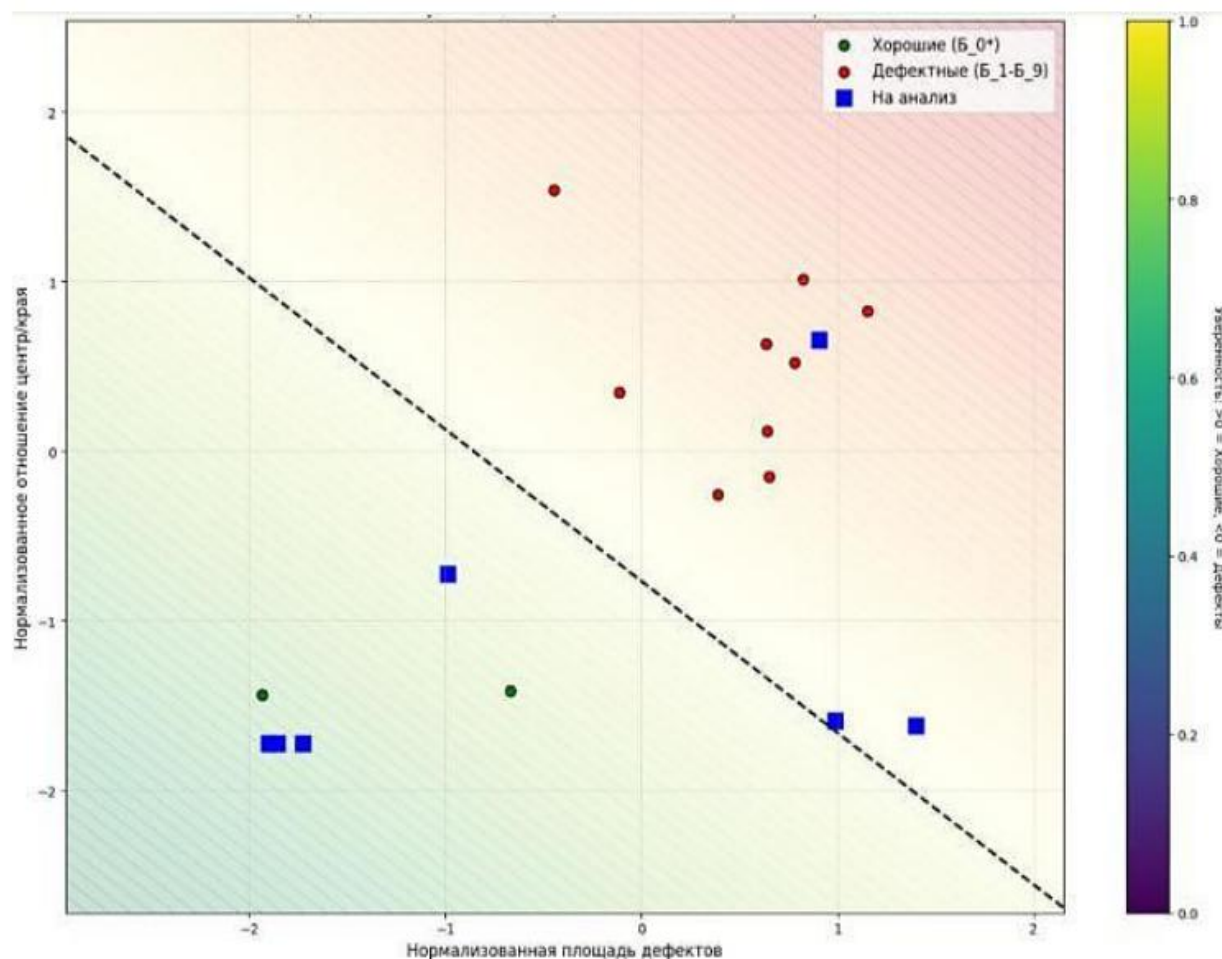


Рис. 9. Карта дефектов: классификация по площади и локализации

Обсуждение полученных результатов. Проведенное исследование подтвердило гипотезу о возможности эффективного обнаружения и анализа дефектов FDM-печати по изображениям слоев готового изделия за счет четкого контраста между зонами нормальной (белые участки) и недостаточной (черные участки) экструзии после бинаризации. Это позволило классифицировать

образцы с помощью алгоритма машинного обучения, анализирующего геометрические и пространственные характеристики дефектных областей, что подтверждается:

- точностью классификации до 93 % (больше, чем у k-NN (82 %), но меньше, чем у CNN (95 %));
- скоростью обработки 15 мс/изображение (меньше, чем у k-NN (120 мс) и CNN (2100 мс));
- устойчивостью к вариациям — $< 5 \%$;
- снижение процента брака с 8,2 до 5,7 %;
- сокращение затрат на контроль качества на 40 % за счет автоматизации;
- увеличение скорости контроля в 3 раза по сравнению с ручной проверкой.

Несмотря на высокую точность подход имеет ряд ограничений:

- зависимость от качества изображения — точность снижается на 8–12 % при неравномерном освещении, наличии бликов на поверхности образцов, размытии изображений (движение камеры);
- геометрические ограничения — эффективен только для плоских поверхностей (кубы, плиты) и требует доработки для сложных форм (сферы, решетчатые структуры) и мелких деталей ($< 50 \text{ px}$);
- не оптимизирован для других материалов, особенно полупрозрачных или глянцевых;
- не подходит для классификации других типов дефектов (переэкструзия материала, расслоение между слоями, коробление краев и др.).

Заключение. Работа экспериментально подтвердила возможность автоматического контроля качества деталей, полученных методом FDM-печати на примере дефекта недостаточной экструзии по изображениям на что указывают высока точность (93 %), быстродействие (15 мс/изображение) и экономическая эффективность (снижение брака на 30 %) подхода.

Перспективные направления для дальнейших исследований:

- расширение типов обнаруживаемых дефектов;
- разработка адаптивных алгоритмов для компенсации неравномерного освещения и автоматической калибровки под разные материалы;
- интеграция с системами реального времени (онлайн-мониторинг в процессе печати, обратная связь для коррекции параметров печати).

Полученные результаты создают основу для разработки комплексных систем контроля качества аддитивного производства, сочетающих высокую точность обнаружения дефектов с экономической эффективностью и возможностью масштабирования для промышленного применения.

Список источников

- [1] Ляпков А.А., Троян А.А. *Полимерные аддитивные технологии*. Санкт-Петербург, Лань, 2022, 120 с.
- [2] Ерохин К.С., Наумов С.А., Анаников В.П. Анализ, классификация и предотвращение образования дефектов в экструзионной 3D-печати. *Успехи химии*, 2023, т. 92, № 11. <https://doi.org/10.59761/RCR5103>
- [3] Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. *Технологии аддитивного производства*. Москва, ТЕХНО-СФЕРА, 2022, 649 с.
- [4] Форсайт Д., Понс Ж. *Компьютерное зрение. Современный подход*. Москва, Вильямс, 2004, 928 с.
- [5] Бурков А. *Машинное обучение без лишних слов*. Санкт-Петербург, Питер, 2020, 192 с.