

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.7/.9:004.925.84+004.032.26

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-1-296-57-62

К. В. Ваганов, К. А. Драпак, В. С. Фомин

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ПЕЧАТИ FDM 3D-ПРИНТЕРОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: kira404186@mail.ru, loldra@yandex.ru, vladfom2302@yandex.ru

Проведен анализ особенностей различных нейросетевых технологий программирования с целью выявления наиболее подходящей для обнаружения дефектов во время FDM 3D-печати за счет анализа изображений со встроенной камеры 3D-принтера. Предложена методика обнаружения наиболее распространенных дефектов и интегрированная система для ее реализации, включающая видеокамеру, аппаратное обеспечение для анализа изображения и основные принципы нейросетевого программирования.

Ключевые слова: нейронные сети, обнаружение, 3D-печать, дефект, аддитивные технологии

K. V. Vaganov, K. A. Drapak, V. S. Fomin

AUTOMATIC DEFECT DETECTION IN THE PRINTING PROCESS OF FDM 3D PRINTERS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

Volgograd State Technical University

The analysis of the features of various neural network programming technologies has been carried out in order to identify the most suitable for detecting defects in time FDM 3D printing by analyzing images from the built-in 3D printer camera. A technique for detecting the most common defects and an integrated system for its implementation, including a video camera, image analysis hardware and basic principles of neural network programming, are proposed.

Keywords: neural networks, detection, 3D printing, defect, additive technologies

В современном мире, где технологии развиваются с невероятной скоростью, оптимизация качества производственных процессов приобретает все большее значение. Аддитивные технологии, такие как 3D-печать, становятся важной частью современного производства, предоставляя гибкость в создании сложных и индивидуализированных изделий [5]. Однако, наряду с этим, возникает необходимость в эффективном контроле качества, так как даже небольшие дефекты могут значительно повлиять на конечный результат. Инновационные решения для автоматизированного выявления дефектов, помогают повысить надежность и точность процесса аддитивного производства.

Моделирование методом послойного наплавления (FDM) является одной из самых популярных аддитивных технологий. Ее актуальность заключается в простоте использования

и экономии времени, затрачиваемого на производство различных видов изделий [7, с. 66]. Также печать трехмерных объектов обеспечивает высокоточное воспроизведение необходимых форм и деталей определенного объекта [3]. При этом ручной труд практически сведен к нулю, а это значит, что затраты на оператора и обслуживание будут минимальными. Впоследствии это позволит снизить себестоимость готового изделия [6]. Однако при всей перспективности технологий 3D-печати в этой сфере есть ряд серьезных проблем. Одной из таких является стоимость расходного материала.

Некорректная настройка оборудования способна вызвать дефекты в процессе печати, включая смещение слоев, искажения деталей и даже повреждение принтера [1]. Пользователь может неправильно задать параметры печати, такие как температура, скорость или вы-

сота слоя, что также приводит к дефектам в конечном изделии. Решением этой проблемы может стать автоматическое определение сбоя в процессе 3D-печати по технологии FDM с помощью нейронной сети, что поможет минимизировать влияние этих факторов и сэкономить материал для печати.

Одной из важных особенностей нейронных сетей является их способность к самоорганизации и адаптации к изменяющимся условиям. Благодаря этому они могут обрабатывать большие объемы информации и выявлять скрытые закономерности в данных [10]. Нейросети способны не только анализировать входящую информацию, но и воспроизводить ее из своей памяти [11]. Кроме того, нейронные сети отличаются от классических алгоритмов тем, что способны обучаться без явного программирования – они «получают знания» из предоставленных им данных.

В данном случае нейронная сеть используется для визуального отслеживания дефектов печати. Она получает информацию путем потоковой передачи видео или фотографии с камеры 3D-принтера.

Для обработки изображений лучше всего использовать сверточную нейронную сеть, поскольку такие нейросети хорошо улавливают локальный контекст, когда информация в про-

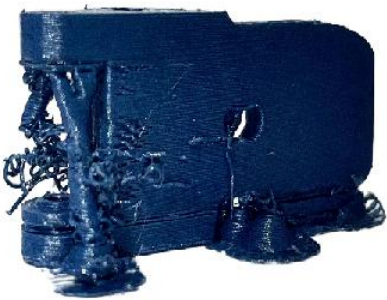
странстве непрерывна, то есть ее носители находятся рядом [4]. Например, пиксели – части изображения, которые расположены близко друг к другу и содержат визуальные данные: яркость и цвет. Если в одном пикселе нейронная сеть замечает дефект, то и в других – тоже [2].

При этом нужно учитывать, что некоторые из них могут быть обнаружены лишь после того, как печать была завершена, например, плохая адгезия с опорными конструкциями. Другие же ошибки печати, такие как большие внутренние напряжения или сниженная прочность детали, могут остаться незамеченными [8]. Последующее деление на уровни заметности строится с предположением того, что внутреннее освещение принтера будет включено и рабочая зона будет достаточно освещена, а установленная камера снимает в разрешении 1080 p.

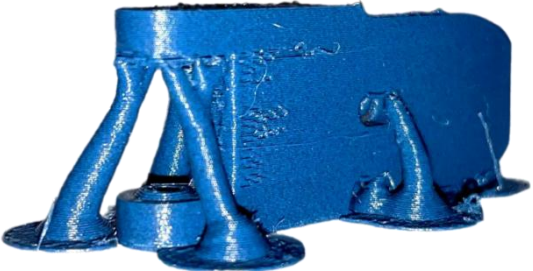
К дефектам, которые легко обнаружить, можно отнести очевидные случаи ошибок печати. Хорошо обученная нейронная сеть должна быть способна распознавать их даже при недостаточно хороших условиях съемки, таких как плохое освещение или низкое разрешение камеры. В идеальном же случае она так же должна сама принимать решение, останавливать печать, или же нет. Данные дефекты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Дефекты высокого уровня заметности

Образцы изображений	Наименование дефекта и описание
	Пропуск слоя из-за низкой температуры экструдера
	Образование нитей материала в результате неподобранного отката

Окончание табл. 1

Образцы изображений	Наименование дефекта и описание
	Пропуск слоя из-за плохого прижима подающих шестеренок друг к другу
	Сбой печати из-за пробки материала между соплом и термо-барьером, вызванной недостатком охлаждения радиатора
	Дефект на углу из-за неверного расположения и настроек шва

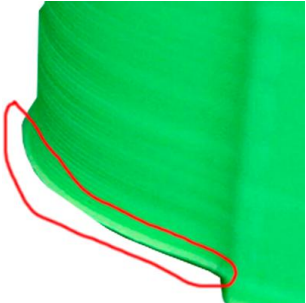
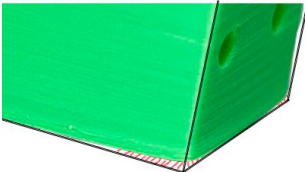
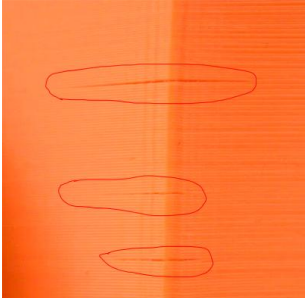
Другие же дефекты могут представлять сложность в их обнаружении, в том числе и для нейронной сети. В этом случае очень многое зависит от исходных обучающих данных нейронной сети и качества съемки. В случае недостаточно большого датасета и плохих условий съемки их обнаружение маловероятно. Данные сбои представлены в табл. 2.

На данный момент для поиска дефектов во время 3D-печати существует нейронная сеть «The Spaghetti Detective», но она в основном замечает лишь образование нитей материала, своим видом напоминающие спагетти, не позволяя найти большинство других дефектов [1]. Работает программа по следующему принципу:

облачное приложение проверяет состояние распечатки каждые десять секунд, а в случае появления данного дефекта приостанавливает процесс либо предупреждает оператора о возможной проблеме. Далее пользователь принимает решение остановить или продолжить печать. При этом отсутствует необходимость физического присутствия у принтера, контроль за состоянием процесса может осуществляться посредством камеры, что позволяет передавать необходимые команды дистанционно. В худшем случае модель будет повреждена, однако данный подход способствует снижению объема отходов и обеспечивает большую оперативную эффективность.

Таблица 2

Дефекты низкого уровня заметности

Образцы изображений	Наименование дефекта и описание
	Слоновья нога. Дефект, при котором первый слой печатаемой модели слишком сильно впечатан в нагревательную платформу или стол. Его происхождение обусловлено маленьким зазором между столом и соплом, либо совокупностью маленького зазора и переэкструзии материала.
	Загиб краев модели. Из-за слишком быстрого охлаждения некоторые виды пластика сильно усаживаются, из-за чего происходит загиб [9].
	Трещины в высоких моделях. В верхних слоях модели материал остывает быстрее. Тепло от подогрева стола не достигает такой высоты, и поэтому адгезия в верхних слоях ниже.
	Пропуск слоев. Данная ошибка возникает в случае, если принтер не смог подать необходимое количество пластика.
	Оплавление и деформация модели. Причиной этого чаще всего становятся неправильные настройки температуры печати и объемной скорости подачи материала [7].

В качестве альтернативного решения, разработанная архитектура приложения, использующего нейронную сеть для автоматического обнаружения сбоев в процессе печати по технологии FDM, что позволяет минимизировать влияние этих факторов. Архитектура приведена на рис. 1.

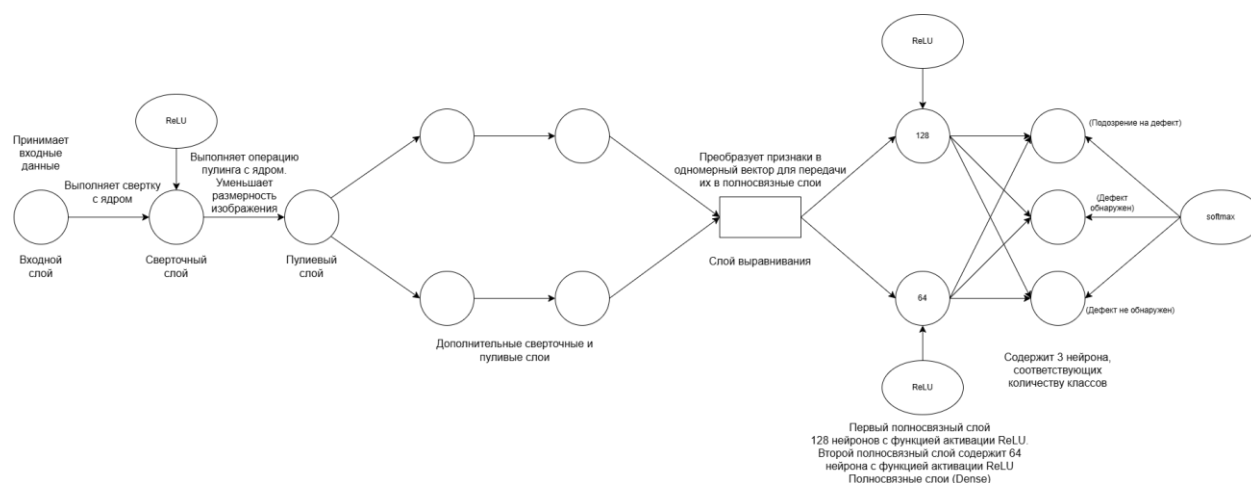


Рис. 1. Архитектура разработанной нейронной сети

Приложение разработано на языке *Python* с использованием фреймворков для создания графического интерфейса и обучения нейронной сети. Для поиска дефектов на изображении используется сверточная нейронная сеть (*ConvNet/CNN*), поскольку данный тип имеет уникальную архитектуру, специально разработанную для эффективной работы с изображениями и видеоданными.

За счет обучения модели на датасете, включающего большое количество различных дефектов, программа способна распознавать ши-

рокий список дефектов, за счет чего будет достигаться ее универсальность. Так же преимуществом приложения является реализация упрощающих и улучшающих удобство использования функций приложения, как, например, хранилище файлов пользователя. Данная опция позволит сохранять в приложении файлы в формате «*name.gcode*» и предназначено для оперативной отправки деталей на печать. Это решение особенно эффективно в производственных процессах, где требуется постоянное и массовое изготовление однотипных деталей.

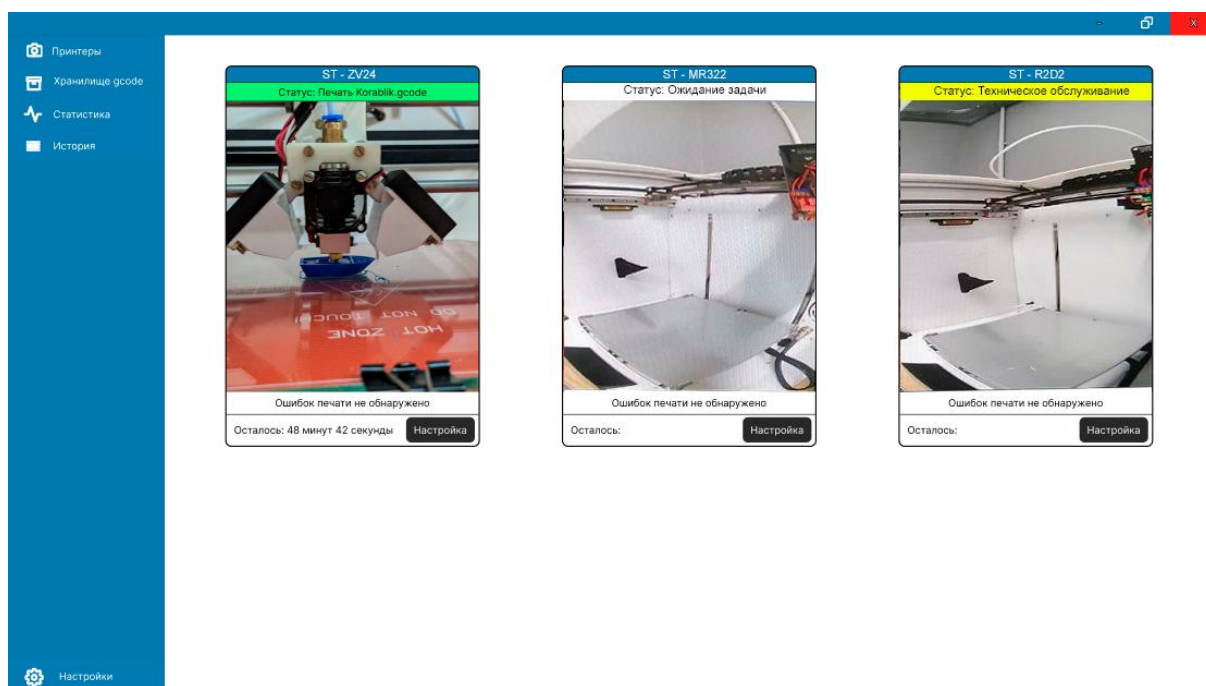


Рис. 2. Технический прототип интерфейса программы

Помимо прочего, данное приложение создано с учетом того, что не все платы управления, установленные в 3D-принтерах, обладают достаточной вычислительной мощностью для ведения прямой трансляции. Поэтому пользователю будет дан выбор между потоковой передачи видео с камеры и периодической съемкой, которая будет гораздо меньше нагружать «мозги» принтера. Полученные изображения будут передаваться на компьютер с установленным приложением, где нейронная сеть будет анализировать состояние процесса печати.

Для улучшения поиска дефектов планируется реализовать функцию, которая позволит нейронной сети «видеть» 3D-модель заданного изделия и сравнивать с тем, что печатается на данный момент. Технический прототип интерфейса приведен на рис. 2.

Стоит отметить, что хоть в аддитивном производстве подобные нейросети на данный момент практически не используются, некоторые компании начинают делать первые шаги в эту сторону.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование нейронной сети в сфере 3D-печати методом FDM позволит сократить потери пластика в случае возникновения дефектов. Особенно это актуально для компаний, которые занимаются промышленной печатью изделий на заказ. Тем не менее, это пригодится и обычным пользователям, которые занимаются 3D-печатью в качестве хобби.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Avoiding Spaghetti in 3D Printing: A Step-by-Step Guide / [Электронный ресурс] // The 3D Printer Bee: [сайт]. – URL: <https://the3dprinterbee.com/3d-printing-spaghetti/> (дата обращения: 15.09.2024).
2. Borokin, A. Сверточные нейронные сети (CNN) / Borokin A. [Электронный ресурс] // Your to do: [сайт]. –

URL: <https://yourtodo.ru/posts/svertochnyye-nejronnyie-seti-cnn/?ysclid=m1dlt3b3wv768467317> (дата обращения: 14.09.2024).

3. FDM технология. Как это работает. / [Электронный ресурс] // 3DTool : [сайт]. – URL: <https://3dtool.ru/stati/fdm-tehnologiya-kak-eto-rabotaet/?ysclid=m27a7c2kpd878049775> (дата обращения: 20.08.2024).

4. Водолазский, Д. Как сверточные нейросети имитируют работу мозга / Д. Водолазский, А. Патрушева [Электронный ресурс] // Блог Практикума: [сайт]. – URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/svertochnye-neyronnye-seti/> (дата обращения: 15.09.2024).

5. Ермаков, А. Настоящее и будущее 3D-печати: проблемы и прогнозы / А. Ермаков [Электронный ресурс] // Контур | Журнал: [сайт]. – URL: <https://kontur.ru/articles/4708?ysclid=m1wicmflgx332172272> (дата обращения: 25.08.2024).

6. Перспективные направления развития 3D-печати / [Электронный ресурс] // Vektorus : [сайт]. – URL: <https://vektorus.ru/blog/aktualnost-3d-pechati.html?ysclid=m1wi7r2c1d798202096> (дата обращения: 25.08.2024).

7. Преображенская, Е. В. Технологии, материалы и оборудование аддитивных производств: учебное пособие / Е. В. Преображенская, Т. Н. Боровик, Н. С. Баранова. – Москва: РТУ МИРЭА, 2021. – Часть 1. – 2021. – 173 с. – ISBN 978-5-7339-1397-1. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/182474> (дата обращения: 29.10.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Проблемы качества 3D-печати / [Электронный ресурс] // Техно 3D : [сайт]. – URL: <https://3dpt.ru/page/faq> (дата обращения: 20.08.2024).

9. Руководство по устранению распространенных проблем 3D-печати / [Электронный ресурс] // 3DiY Shop : [сайт]. – URL: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/rukovodstvo-ustraneniyu-problem-3d-pechati/?ysclid=lzyeadidrh655360138> (дата обращения: 20.08.2024).

10. Удилов, Н. С. Нейронные сети: исторический обзор развития, формирования и особенности нейронных сетей в сравнении с биологическими сетями / Н. С. Удилов // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 106-11. – С. 119–125. – DOI 10.18411/trnio-02-2024-620. – EDN DGUMZE. (дата обращения: 29.10.2024)

11. Федулов, Д. Для чего строят и обучают нейросети в IT / Д. Федулов, И. Никитина [Электронный ресурс] // Блог Практикума: [сайт]. – URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/chto-takoe-neyronnye-seti/#vidy> (дата обращения: 14.09.2024).