

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ 3D ПЕЧАТИ ТОНКОСТЕННЫХ ФИГУР ИЗ ШОКОЛАДНОЙ ГЛАЗУРИ

Шибанов Эдуард Дмитриевич

Аспирант, Российский биотехнологический
университет, Москва
ShibanovED@mgupp.ru

CLASSIFICATION OF DEFECTS OF 3D PRINTING OF THIN-WALLED CHOCOLATE FIGURES

E. Shibanov

Summary. The purpose of this work was to develop a classification of defects that occur in the process of 3D printing of thin-walled figures from chocolate icing, and to identify the causes of their occurrence. In the article, the results of 3D prints of previous experiments were studied, as a result of this work 5 classes of different defects were identified: hypothermia, overheating, uneven extrusion, extrusion skip and complete cessation of extrusion. For each type of defects, the causes of occurrence and characteristic features are established, allowing them to be classified. The proposed classification is necessary when creating a dataset required for training a convolutional neural network. The results is presented as one of the stages in the development of an automated control system for the process of 3D food printing with chocolate using technical vision.

Key words: Keywords: 3D printing, chocolate, food additive technologies, automated control of 3D printing.

Аннотация. Целью данной работы стала разработка классификации дефектов, возникающих в процессе 3D печати тонкостенных фигур из шоколадной глазури, а также выявление причин их возникновения. В статье были изучены результаты проводимых ранее экспериментов, по итогам которых было выявлено 5 классов различных дефектов: переохлаждение, перегрев, неравномерная экструзия, пропуск экструзии и полное прекращение подачи. Для каждого типа дефектов установлены причины возникновения и характерные признаки, позволяющие их классифицировать. Предложенная классификация необходима при создании набора данных, требуемого для обучения свёрточной нейронной сети. Результаты работы будут использованы в процессе реализации системы автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием технического зрения.

Ключевые слова: 3D печать, шоколад, пищевые аддитивные технологии, автоматизированный контроль 3D печати.

Введение

Технология пищевой 3D печати шоколадом позволяет создавать авторские десерты с необычным внешним видом и уникальным дизайном. Традиционно изделия из шоколада создаются вручную, при помощи литья в специальные формы, что довольно трудоёмко и затратно при изготовлении единичных заказов. Благодаря возможности 3D принтера напечатать изделие практически любой формы, применение пищевых аддитивных технологий может значительно сэкономить время создания персонализированной продукции [1, 2]. 3D печать шоколадом находит своё применение в кулинарном и кондитерском искусстве, а также на мероприятиях и праздниках, где гости могут увидеть и попробовать необычные десерты, созданные с помощью аддитивных технологий [3].

В процессе 3D печати шоколадных моделей возможно появление различных дефектов, которые влияют на качество конечного продукта. В первую очередь потребитель визуально оценивает блюдо, а внешний вид является органолептическим показателем качества, который играет решающую роль. От того, насколько привлекательным получится десерт, будет зависеть желание клиента его приобрести. Наихудшие результаты печати могут содержать сильную деформацию изделия, неров-

ности и неоднородности на его поверхности, а также седину, что в совокупности приводит к потере деталей дизайна или общему ухудшению внешнего вида продукта.

В основном дефекты возникают из-за реологических свойств сырья, некорректно подобранных параметров печати и из-за влияния параметров окружающей среды. Попытки решения данной проблемы были рассмотрены в других исследованиях [4, 5]. Большинство решений подразумевает разработку специализированных материалов для печати или применение пищевых добавок для стабилизации свойств печатаемого материала. Некоторые исследования направлены на подбор режимов печати и сырья [6]. В одной из предыдущих работ [7] была предложена идея разработки системы автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью. Одним из компонентов такой системы является модуль обнаружения дефектов, возникающих в процессе печати. Понимание характера дефекта и причины его возникновения необходимы для исправления результата печати в режиме реального времени. Задачу распознавания дефектов и их классификации способны решать свёрточные нейронные сети, работающие с изображениями. Но для обучения нейронных сетей необходим набор классифицированных изображений, отобранных по определённым признакам.

Таблица 1.

Параметры печати образцов

№	T_{extr} , °C	h, мм	t, мин	V, мм/с	№	T_{extr} , °C	h, мм	t, мин	V, мм/с	№	T_{extr} , °C	h, мм	t, мин	V, мм/с
6	40	0.2	29:18	-	24	36	0.4	15:22	12	13	36	0.2	16:25	18
8	38	0.2	29:18	-	18	36	0.3	21:53	10	15	36	0.2	14:48	20
9	36	0.2	29:18	-	19	36	0.3	18:17	12	14	36	0.2	13:20	22
10	34	0.2	29:18	-	20	36	0.3	16:54	13	25	36	0.1	23:26	22
11	32	0.2	29:18	-	17	36	0.3	15:43	14	26	36	0.1	19:55	26
22	36	0.4	30:28	6	16	36	0.3	12:17	18	27	36	0.1	17:21	30
21	36	0.4	22:55	8	9	36	0.2	29:18	10	28	36	0.1	15:25	34
23	36	0.4	18:23	10	12	36	0.2	21:10	14	29	36	0.1	13:54	38

Примечание. Где T_{extr} — рабочая температура экструдера и колбы для хранения материала в °C; h — высота печатаемого слоя в мм; t — общее время печати образца в мин; V — линейная скорость нанесения материала в мм/сек.

Цель данной работы заключается в разработке классификации наиболее распространённых дефектов 3D печати шоколадной глазурью и указанием причин их возникновения.

Методика исследования

В качестве образцов 3D печати для дальнейшего изучения были использованы материалы одной из предыдущих работ [8]. Фигуры печатались из шоколадной глазури марки «Belgostar». Был проведён визуальный анализ каждого образца и выделены основные признаки, характеризующие каждый дефект. Затем, были сгруппированы, образцы имеющие схожие признаки дефектов, и проанализированы режимы печати. Дополнительно были изучены видеоматериалы экспериментов печати, в результате чего сделан вывод о причинах возникновения дефектов. Каждая группа получила наименование.

Результаты и анализ

Основные параметры печати образцов приведены в таблице 1. Стоит также отметить, что во время технологического процесса использовалось внешнее охлаждение зоны печати до температуры 13°C. Диаметр печатающего сопла был равен 0.8 мм.

Стоит сразу отметить, что в результате первичного подбора рабочей температуры экструдера для печати шоколадной глазурью, проявился самый первый тип дефекта «перегрев» модели (№1, №3, №4, рис. 1). Характерными признаками такого дефекта являются натёки и наплывы на модели. В процессе печати наносимый материал не успевал застыть, к тому моменту, когда начиналась печать следующего слоя. Это приводило к «просадке» наносимого материала и росту деформации периметра фигуры. Образовывались каплевидные и утолщённые натёки, а для удержания заданной формы материалу не хватало вязкости. Для исправления ситуации были предприняты различные меры: понижение температуры сырья; уменьшение высоты наносимого слоя, с целью уменьшения объёма охлаждаемого материала; снижение скорости нанесения материала, с целью увеличения времени охлаждения верхнего слоя; увеличение степени внешнего охлаждения.

После получения стабильных результатов печати, был найден нижний порог, при котором проявился противоположный дефект (№11, рис. 2). Контур фигуры полностью потерял свою целостность, а стенки фигуры были непоправимо разрушены. В момент печати было заметно, что сырьё становилось слишком вязким, и происходило «комкование» материала. Таким образом стен-

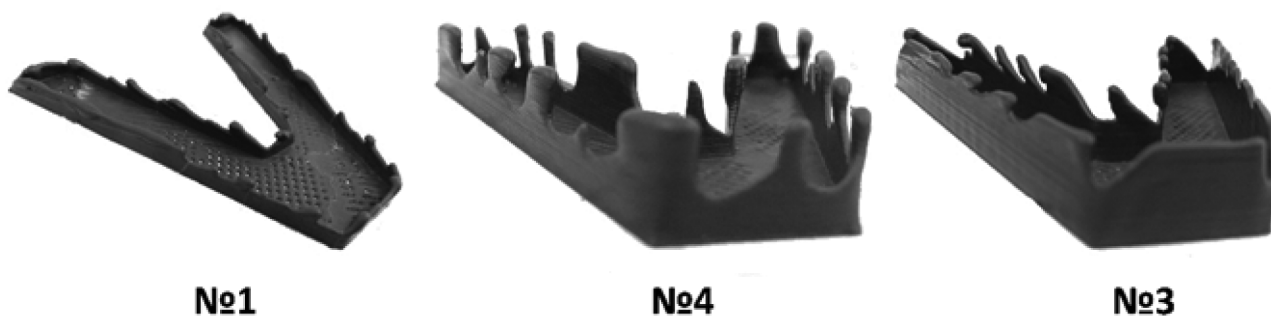


Рис. 1. Перегрев печатаемой модели

ки даже не были сформированы. Объясняется такой результат слишком низкой температурой экструдированного сырья в совокупности с интенсивным внешним охлаждением. Это повлекло за собой чрезмерное увеличение вязкости материала, в результате чего его свойства изменились. Описанный дефект можно назвать «переохлаждением» печатаемой модели.



Рис. 2. Переохлаждение печатаемой модели

Экспериментальным путём была подобрана минимальная рабочая температура $T_{extr} = 36^{\circ}\text{C}$, при которой изделие получалось напечатать полностью (№8, №12, №18, №22, рис. 3). Дальнейшее изменение настроек печати было направлено на оптимизацию процесса с целью увеличения скорости выращивания трёхмерного изделия.

В ходе проводимых экспериментов были обнаружены и другие виды дефектов. На стенках некоторых образцов появлялась волнистость или рябь вызванные **неравномерной экструзией** (№14, №16, №26, рис. 4). При анализе настроек печати замечено, что появле-

ние такого рода дефектов характерно при увеличении линейной скорости нанесения материала, а также при уменьшении высоты наносимого слоя. Стоит заметить, что диаметр сопла оставался неизменным и равным 0.8мм. При уменьшении высоты наносимого слоя объём выдавливаемого материала пропорционально уменьшался. При значительном снижении объёма шоколадной массы, подаваемой через печатающее сопло, движение потока становилось похоже на последовательность поочерёдно выдавливаемых капель. Непрерывность потока нарушалась и возникала периодичность при осаждении материала на поверхности изделия. Таким образом прямая стенка становилась волнистой, а её толщина становилась переменной.

Предотвратить возникновение таких дефектов возможно путём увеличения высоты наносимого слоя, или увеличением коэффициента подачи.

При печати некоторых образцов (рис. 5) возникали пропуски экструзии — состояние кратковременного прекращения подачи наносимого материала, с последующим возобновлением печати. Это приводит к образованию локальных дефектов на текущем слое, которые впоследствии оказывают влияние на укладку следующих слоёв. Дальнейшее поведение дефекта зависит от степени «устойчивости» системы. Дефекты могут быть «затухающими» (№19, №20, рис. 5) и полностью исчезать во время печати, а могут быть «незатухающими» и даже «возрастающими» (№12, №23 рис. 5). Обычно при корректно настроенных параметрах печати такие дефекты уменьшались с каждым новым слоем, вплоть до их полного исчезновения. Однако, если печать осуществлялась на границе «правильности» настроек, возникновение пропуска экструзии приводило к дальнейшему росту дефектов и деформации определённого участка модели.



Рис. 3. Успешно напечатанные модели

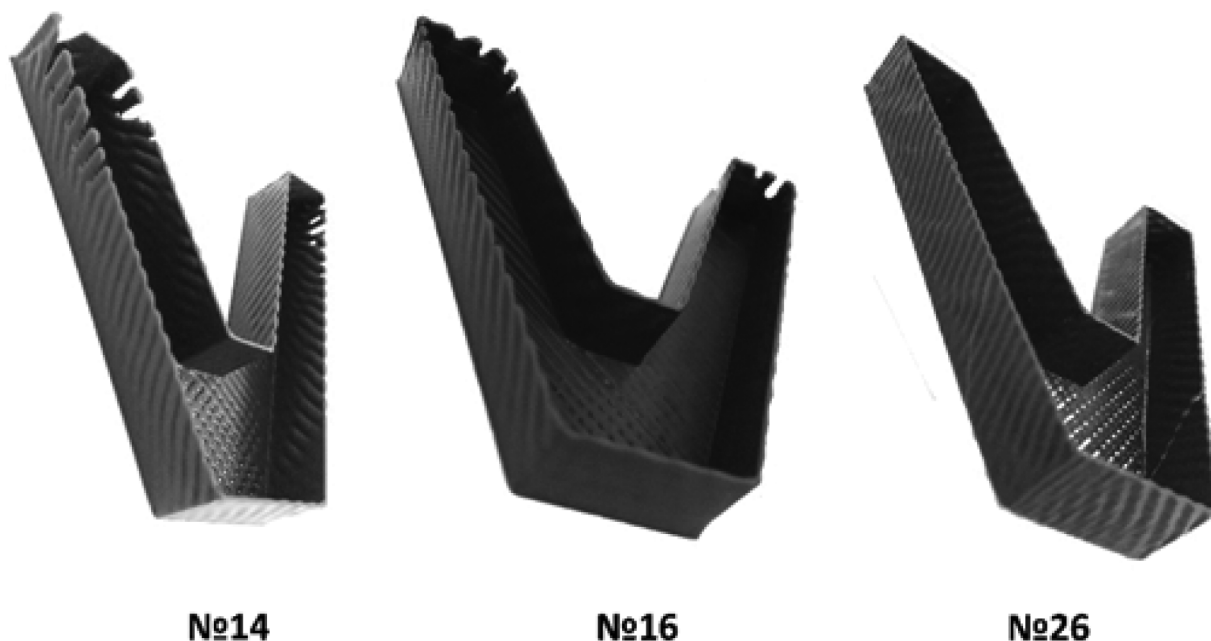


Рис. 4. Неравномерная экструзия материала

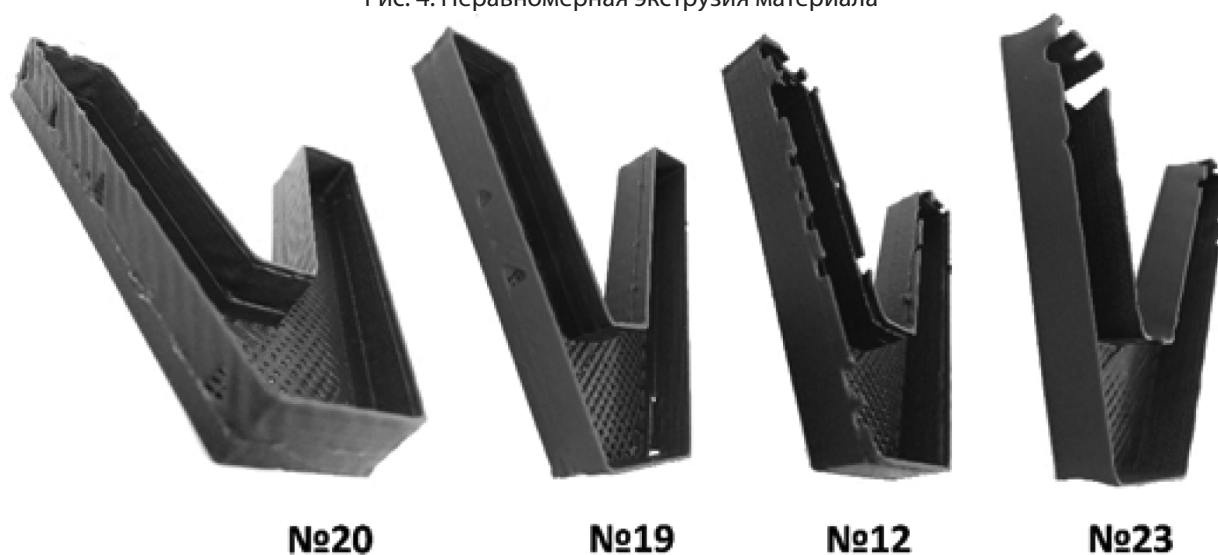


Рис. 5. Пропуск экструзии

Пропуски экструзии обусловлены наличием примесей или пузырьков воздуха в жидком сырье. Это указывает на ошибки, совершенные при подготовке шоколадной массы к печати.

В редких случаях возможно полное прекращение подачи, возникающее по тем же причинам или из-за не правильного расчёта требуемого сырья. При такой проблеме изделие уже точно становится бракованным и не подлежит исправлению.

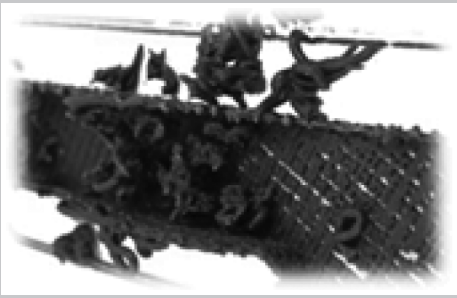
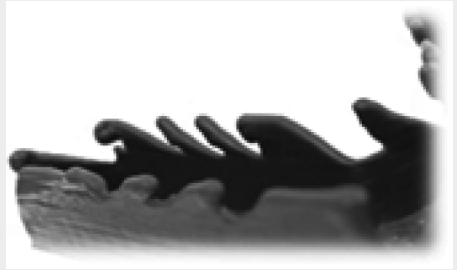
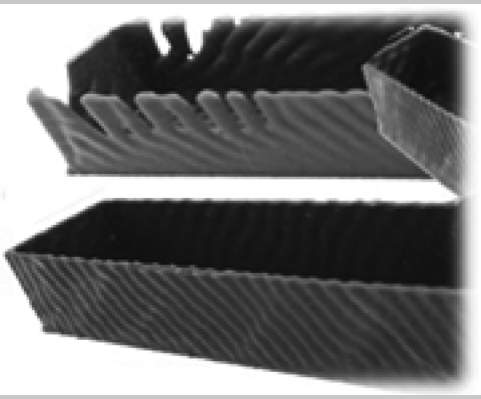
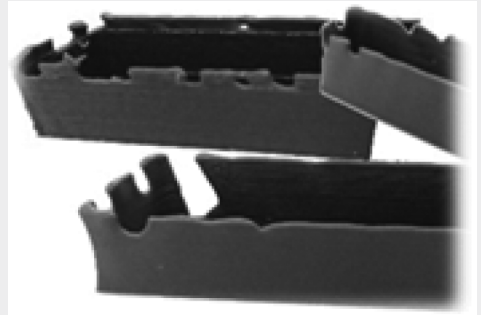
В таблице 2 представлены выявленные типы дефектов, указаны характерные признаки и причины их возникновения.

Заключение

В результате исследования предложена классификация дефектов 3D печати тонкостенных фигур из шоколадной глазури, с указанием наиболее вероятных причин их возникновения. Дальнейшая работа будет направлена на создание набора классифицированных данных для обучения свёрточной нейронной сети. Исследование представлено, как один из этапов разработки системы автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью.

Таблица 2.

Классификация дефектов

№	Тип дефекта	Характерные признаки	Причины возникновения
1	Переохлаждение		<ul style="list-style-type: none"> — Низкая температура печатающей головки — Высокая интенсивность охлаждения
2	Перегрев		<ul style="list-style-type: none"> — Высокая температура экструдера — Высокая скорость нанесения материала — Малая площадь слоя
3	Неравномерная экструзия, волнистая стенка		<ul style="list-style-type: none"> — Критически малый объем подаваемого материала — Высокая скорость нанесения — Несопоставимо большой диаметр сопла по отношению к высоте наносимого слоя
4	Пропуск экструзии		<ul style="list-style-type: none"> — Неоднородная структура сырья — Наличие примесей или пузырьков воздуха
5	Отсутствие подачи	Экструдер перемещается в холостую. Модель не строится.	<ul style="list-style-type: none"> — Возникновение пробки из-за низкой температуры — Наличие примесей в сырье — Отсутствие материала

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Tan, W.Y. Toh, G. Wong, L. Li, Extrusion-based 3D food printing — Materials and machines. *International Journal of Bioprinting*, 2018. Vol. 4 (2). P. 1-13. doi:10.18063/IJB.v4i2.143
2. S. Portanguen, P. Tournayre, J. Sicard, T. Astruc, P. S. Mirade. Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 2018. Vol. 86 (5). P. 188–198. doi:10.1016/j.tifs.2019.02.023
3. P. Pitayachaval, N. Sanklong, and A. Thongrak, «A Review of 3D Food Printing Technology», *MATEC Web Conf.*, vol. 213, p. 01012, Oct. 2018, doi: 10.1051/mateconf/201821301012
4. Lanaro M., Desselle M.R., Woodruff M.A. 3D Printing Chocolate. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*, 2019. P. 151–173. doi:10.1016/b978-0-12-814564-7.00006-7
5. Mantihal S., Prakash S., Godoi F.C., Bhandari B. Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.012>
6. I.A. Ferreira, J.L. Alves. Low-cost 3D food printing. *Ciencia e Tecnologia dos Materiais*, 2017. Vol. 29 (1). P. 265–269. doi:10.1016/j.ctmat.2016.04.007
7. Шибанов Э.Д., Благовещенский И.Г., Благовещенская М.М. Обзор систем технического зрения, применяемых в 3D-печати. Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей II международной научно-практической конференции в 2-х т., Тамбов, 21–23 октября 2020 года. Том I, 2020. — С. 264–268. — EDN MEUCTU.
8. Благовещенский И.Г., Шибанов Э.Д., Загородников К.А. Оптимизация 3D печати на примере использования шоколадной глазури. *Пищевая Промышленность*, 2020, №12, С. 70–73. doi.org:10.24411/0235-2486-2020-10147

© Шибанов Эдуард Дмитриевич (ShibanovED@mgupp.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»