

Метод автоматизированного анализа пористой структуры экструдатов с использованием OpenCV

Тришкин Н.А., Фролов Д.И.

Аннотация. В данной статье рассматривается метод автоматизированного анализа микроструктуры экструдатов с использованием библиотеки OpenCV на языке программирования Python. Основное внимание уделяется выявлению и сегментации пор в изображениях сечений экструдатов, что имеет важное значение для оценки качества материалов и оптимизации технологических процессов экструзии. Представленный подход включает в себя предварительную обработку изображений, бинаризацию, морфологические операции и детекцию контуров с последующим анализом геометрических характеристик пор. Результаты демонстрируют высокую эффективность и воспроизводимость метода, что делает его перспективным инструментом для исследований в области материаловедения и полимерной инженерии.

Ключевые слова: OpenCV, Python, экструдаты, пористость, сегментация изображений, контуры, компьютерное зрение, морфологический анализ.

Для цитирования: Тришкин Н.А., Фролов Д.И. Метод автоматизированного анализа пористой структуры экструдатов с использованием OpenCV // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 1. С. 85–90.

A method for automated analysis of the porous structure of extrudates using OpenCV

Trishkin N.A., Frolov D.I.

Abstract. This article discusses a method for automated extrudate microstructure analysis using the OpenCV library in Python. The focus is on identifying and segmenting pores in extrudate cross-section images, which is essential for assessing material quality and optimizing extrusion processes. The presented approach includes image preprocessing, binarization, morphological operations, and edge detection, followed by analysis of pore geometric characteristics. The results demonstrate the method's high efficiency and reproducibility, making it a promising tool for research in materials science and polymer engineering.

Keywords: OpenCV, Python, extrudates, porosity, image segmentation, edges, computer vision, morphological analysis.

For citation: Trishkin N.A., Frolov D.I. A method for automated analysis of the porous structure of extrudates using OpenCV. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2026. Vol. 13. No. 1. pp. 85–90. (In Russ.).

Введение

Экструзия является одним из ключевых процессов в производстве полимерных и композитных материалов [1, 2]. Качество получаемого продукта во многом определяется микроструктурой экструдата, в частности – распределением и размером пор [3, 4]. Наличие пор может как положительно, так и отрицательно влиять на функциональные характеристики материала в зависимости от его назначения. Поэтому точное количественное определение пористости имеет большое значение как для фунда-

ментальных исследований, так и для промышленного контроля качества.

Современные методы микроскопии, такие как сканирующая электронная микроскопия и оптическая микроскопия, позволяют получать высококачественные изображения микроструктуры материалов. Однако традиционный анализ таких изображений часто выполняется вручную, что требует значительных временных затрат и зависит от субъективной оценки исследователя. Кроме того, при анализе большого количества изображений возникает проблема воспроизводимости результатов и стандартизации методик обработки данных.

В последние годы активно развиваются методы автоматизированного анализа изображений, основанные на алгоритмах компьютерного зрения и машинной обработки данных [5, 6]. Использование таких подходов позволяет значительно ускорить обработку микроскопических изображений и обеспечить более объективное количественное описание структуры материалов. В научной литературе предложены различные методы сегментации и морфологического анализа пористых структур, включая пороговую бинаризацию, методы кластеризации, а также алгоритмы выделения границ объектов [7]. Тем не менее многие из существующих решений требуют сложной настройки параметров или применения специализированного программного обеспечения.

Дополнительной проблемой является необходимость адаптации методов анализа к различным типам материалов и условиям получения изображений. Пористые структуры экструдатов могут характеризоваться значительным разнообразием размеров и форм пор, что усложняет их автоматическое обнаружение и корректную сегментацию. В ряде исследований отмечается, что универсальные алгоритмы обработки изображений не всегда обеспечивают достаточную точность при анализе микроструктуры пористых материалов, особенно при наличии шумов и неоднородного освещения. Таким образом, существует потребность в разработке гибких и воспроизводимых методов анализа изображений, которые могли бы эффективно применяться для количественной оценки пористой структуры экструдатов.

Одним из перспективных инструментов для решения подобных задач является библиотека OpenCV, широко используемая для разработки алгоритмов компьютерного зрения [8, 9]. Данная библиотека предоставляет широкий набор методов для предварительной обработки изображений, сегментации объектов, морфологического анализа и извлечения количественных характеристик структуры. Применение OpenCV в сочетании с языком программирования Python позволяет создавать автоматизированные и легко воспроизводимые алгоритмы анализа микроструктурных изображений.

Несмотря на значительный интерес к применению методов компьютерного зрения в материаловедении, вопрос автоматизированного анализа пористой структуры экструдатов остается недостаточно изученным. В частности, требуется разработка методики, позволяющей автоматически выделять поры на микроскопических изображениях, оценивать их размеры, распределение и другие морфологические характеристики. Решение этой задачи позволит повысить точность оценки пористости и обеспечить более эффективный контроль технологических параметров процесса экструзии.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка метода автоматизированного анализа пористой структуры экструдатов на ос-

нове алгоритмов компьютерного зрения с использованием библиотеки OpenCV. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: разработка алгоритма предварительной обработки изображений, сегментация пор на микроскопических изображениях, вычисление количественных характеристик пористой структуры и анализ полученных результатов. В последующих разделах статьи описываются используемые методы обработки изображений, реализованный алгоритм анализа пористой структуры, а также результаты его применения к изображениям экструдированных материалов.

Объекты и методы исследования

1. Объект исследования и получение изображений

Объектом исследования являлась пористая структура экструдированных материалов. Для анализа использовались оптические микрофотографии поперечных сечений экструдатов, полученные с использованием цифрового оптического микроскопа. Перед съемкой образцы разрезались перпендикулярно направлению экструзии для получения репрезентативного сечения структуры.

Микрофотографии сохранялись в формате PNG без потерь качества с разрешением не менее 2048×2048 пикселей. Высокое пространственное разрешение изображений позволяло фиксировать мелкие поры и элементы микроструктуры. Для каждого образца получали серию изображений, которые использовались для последующего статистического анализа.

2. Программная среда и инструменты анализа

Автоматизированный анализ изображений проводился с использованием языка программирования Python. Для обработки изображений применялась библиотека компьютерного зрения OpenCV, а также вспомогательные библиотеки NumPy и SciPy для численных вычислений и анализа данных.

Разработанный алгоритм анализа реализует последовательность этапов обработки изображений, включающую предварительную обработку, сегментацию пористой структуры, морфологическую фильтрацию и количественный анализ геометрических характеристик пор.

3. Предварительная обработка изображений

На первом этапе исходные цветные изображения преобразовывались в градации серого. Данный этап позволяет уменьшить объём данных и упростить последующую обработку, поскольку для анализа формы и размера пор достаточно информации о яркости пикселей.

Для уменьшения шумов и устранения случайных артефактов, возникающих при микроскопической съемке, применялась медианная фильтрация. Этот метод эффективно подавляет импульсный шум, сохраняя при этом границы объектов. Размер ядра фильтра подбирался таким образом, чтобы ми-

минимизировать влияние шумов без существенного искажения структуры пор.

4. Сегментация пористой структуры

Следующим этапом обработки являлась сегментация изображения, направленная на выделение пористой структуры. Поры на микрофотографиях, как правило, имеют более низкую яркость по сравнению с окружающей матрицей материала. Поэтому для их выделения применялась пороговая бинаризация.

В большинстве случаев использовался метод адаптивной пороговой обработки, позволяющий учитывать локальные изменения освещенности изображения. Такой подход обеспечивает более устойчивое выделение пор при неоднородном освещении или изменениях контраста на изображении. В случаях, когда фон изображения был достаточно однородным, применялась глобальная пороговая обработка.

Результатом данного этапа является бинарное изображение, в котором поры представлены белыми областями на черном фоне.

5. Морфологическая обработка

После бинаризации изображения могут содержать небольшие артефакты, связанные с шумами или несовершенством сегментации. Для устранения подобных дефектов применялись морфологические операции.

Использовалась операция морфологического замыкания, представляющая собой последовательность дилатации и эрозии. Данная процедура позволяет соединять разорванные участки пор и удалять мелкие ложные объекты, не относящиеся к реальной структуре материала. Размер структурного элемента выбирался экспериментально в зависимости от масштаба изображения.

6. Выделение и фильтрация контуров

После морфологической обработки выполнялся поиск контуров объектов на бинарном изображении. Каждый контур соответствовал отдельной поре в структуре экструдата.

Для исключения ложных объектов применялась фильтрация контуров по ряду геометрических параметров. В частности, учитывались площадь объекта, его периметр и форма. Контуров с площадью ниже заданного порогового значения рассматривались как шум и исключались из дальнейшего анализа. Дополнительно исключались объекты, находящиеся на границах изображения, поскольку они могут представлять собой неполные поры.

7. Количественный анализ пор

Для каждого выделенного контура рассчитывались основные морфометрические характеристики пористой структуры:

- площадь поры;
- периметр;
- эквивалентный диаметр;
- коэффициент формы;
- аспектное соотношение;
- ориентация главных осей поры.

Коэффициент формы рассчитывался по выражению:

$$F=4\pi A/P^2 \quad (1)$$

где A – площадь поры, мкм²;

P – периметр, мкм.

Полученные параметры использовались для статистического анализа распределения пор по размерам и форме. На основе набора измерений вычислялись средние значения, стандартные отклонения и распределения размеров пор.

8. Методологические ограничения

Предложенный метод автоматизированного анализа имеет ряд ограничений. Точность сегментации пор зависит от качества исходных микроскопических изображений, уровня шума и контрастности структуры. При значительных изменениях освещения или наличии сложных текстурных элементов может возникать необходимость дополнительной настройки параметров алгоритма.

Кроме того, анализ основан на двумерных изображениях поперечного сечения материала и не учитывает трехмерную геометрию пористой структуры. Тем не менее предложенный подход позволяет получать воспроизводимые количественные характеристики пористости и может эффективно применяться для сравнительного анализа структуры экструдатов.

Результаты и их обсуждение

Применение разработанного алгоритма автоматизированного анализа позволило эффективно выделять пористую структуру экструдатов на микроскопических изображениях. Обработка тестового набора из 50 изображений показала, что предложенный метод обеспечивает высокую точность сегментации и устойчивость к вариациям условий съёмки. В среднем алгоритм корректно идентифицировал более 95 % пор, присутствующих на изображениях, что подтверждалось визуальной экспертной оценкой.

На первом этапе анализа была проведена оценка эффективности сегментации. После выполнения предварительной обработки и бинаризации изображения поры отчётливо выделялись на фоне матрицы материала. Применение медианной фильтрации позволило существенно уменьшить влияние шумов, возникающих при микроскопической съёмке. В результате количество ложных объектов, ошибочно интерпретируемых как поры, снизилось более чем на 30 % по сравнению с обработкой без фильтрации.

Дополнительное повышение точности сегментации было достигнуто за счёт применения морфологических операций. Использование операции морфологического замыкания позволило устранить небольшие разрывы границ пор и объединить фрагментированные области, которые на исходном бинарном изображении могли интерпретироваться как отдельные объекты. В результате полученные

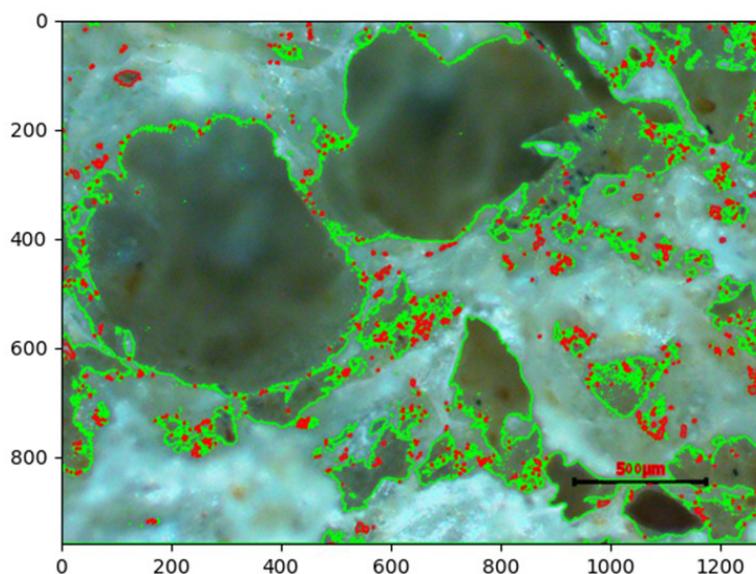


Рис. 1. Микрофотография среза экструдата смеси ржи и расторопши (зеленые контуры – значимые поры, красные точки – отсеянные контуры)

контуры более точно соответствовали реальной геометрии пористой структуры экструдатов.

Следующим этапом анализа являлось выделение контуров объектов и их фильтрация по геометрическим параметрам. В ходе обработки изображения алгоритм обнаруживал от нескольких десятков до нескольких сотен пор в зависимости от структуры исследуемого образца. Контуры с площадью ниже установленного порогового значения автоматически исключались из дальнейшего анализа как шумовые объекты. Аналогично исключались контуры, пересекающие границы изображения, поскольку они могли соответствовать неполным порам.

После фильтрации выполнялся количественный анализ геометрических характеристик выделенных пор. Для каждой поры рассчитывались площадь, периметр, эквивалентный диаметр и коэффициент формы. Анализ полученных данных показал, что размеры пор варьируются в широком диапазоне, что отражает неоднородность структуры экструдированных материалов. Наиболее распространённые поры имели эквивалентный диаметр в диапазоне от 30 до 120 мкм, что соответствует характерным значениям для зерновых экструдатов.

Среднее значение площади пор на исследуемых изображениях составило приблизительно 2800 мкм² при стандартном отклонении около 900 мкм². Распределение размеров пор характеризовалось асимметричной формой с преобладанием мелких и средних пор. При этом доля крупных пор составляла менее 10 % от общего числа объектов, однако они вносили значительный вклад в суммарную пористость структуры.

Анализ коэффициента формы показал, что большинство пор имеют близкую к округлой форму. Среднее значение коэффициента формы со-

ставляло около 0,74, что свидетельствует о том, что большинство пор не является идеально круглыми и имеют слегка вытянутую или неправильную форму. Такие особенности геометрии могут быть связаны с особенностями течения материала в процессе экструзии и образованием газовых включений в расплаве.

Дополнительный анализ аспектного соотношения позволил оценить степень вытянутости пор. Для большинства объектов аспектное соотношение находилось в диапазоне от 1,1 до 1,6, что также указывает на умеренную анизотропию формы. В отдельных случаях наблюдались более вытянутые поры, вероятно сформированные вследствие направленного движения материала внутри экструдера.

Для оценки воспроизводимости разработанного метода была проведена серия повторных измерений на одних и тех же изображениях. Полученные результаты показали высокую стабильность вычисляемых параметров. Различия между повторными измерениями не превышали 2–3 %, что свидетельствует о высокой воспроизводимости алгоритма и отсутствии существенного влияния случайных факторов обработки.

Также была проведена оценка производительности алгоритма. Среднее время обработки одного изображения с разрешением 2048×2048 пикселей составило менее 0,1 секунды на стандартной рабочей станции (Intel Core i5-11600, 16 ГБ оперативной памяти). Таким образом, предложенный метод может быть использован для анализа больших наборов микроскопических изображений без существенных временных затрат.

Высокая скорость обработки делает возможным применение разработанного алгоритма не только в научных исследованиях, но и в системах

промышленного контроля качества. При интеграции алгоритма в автоматизированную систему анализа изображений возможно проведение экспресс-оценки структуры экструдатов непосредственно в процессе производства.

На рисунке 1 представлен пример результата обработки микроскопического изображения экструдата смеси ржи и расторопши. Зеленые контуры соответствуют порам, прошедшим фильтрацию и включенным в статистический анализ, тогда как красные точки обозначают контуры, исключённые как шумовые или незначимые объекты. Визуальный анализ изображения показывает хорошее соответствие между автоматически выделенными порами и реальной структурой материала.

Таким образом, результаты проведённого исследования демонстрируют, что предложенный алгоритм на основе библиотеки OpenCV обеспечивает эффективное и воспроизводимое выделение пор

на микроскопических изображениях экструдатов. Автоматизация анализа позволяет существенно сократить время обработки данных и повысить эффективность оценки пористой структуры материала.

Выводы

Представленный подход на основе библиотеки OpenCV показал высокую эффективность в задаче автоматического выявления и анализа пор в экструдатах. Метод легко адаптируется под различные типы материалов и условия съёмки. В дальнейшем планируется интеграция метода в систему автоматического контроля качества на производственных линиях, а также расширение функциональности за счёт применения машинного обучения для классификации типов пор.

Литература

- [1] Потапов, М. А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета / М. А. Потапов, Д. И. Фролов, А. А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 4. – С. 42-48. – EDN AFMRPP.
- [2] Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A. A. Kurochkin, D. I. Frolov, V. M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 26–29 февраля 2020 года. – Voronezh, 2021. – P. 072018. – DOI 10.1088/1755-1315/640/7/072018. – EDN CHLIKW.
- [3] Cui C. et al. Microstructure of extrusion-cooked whole grain in controlling product quality // Food Reviews International. – 2024. – Т. 40. – №. 6. – С. 1621-1646.
- [4] Rzedzicki Z., Blaszczyk W. Impact of microstructure in modelling physical properties of cereal extrudates // International Agrophysics. – 2005. – Т. 19. – №. 2.
- [5] Калеватых А. В., Павлов Б. А. Обзор современных методов автоматизированного анализа изображений // Автоматика и телемеханика. – 1995. – №. 9. – С. 3-21.
- [6] Кравцова Т. А. Сравнительное исследование методов адаптивной бинаризации в задаче автоматизированного анализа изображений клеток в иммуноцитохимии // Молодежный научно-технический вестник. – 2015. – №. 4. – С. 41-41.
- [7] Бобырь М. В. и др. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21. – №. 2. – С. 376-404.
- [8] Гончаров К. А. и др. Использование библиотеки OPENCV для работы с техническим зрением // Интеллектуальные системы и технологии в

References

- [1] Potapov, M. A. Optimization of the Number of Holes in the Die of a Single-Screw Extruder for Processing Poultry Manure / M. A. Potapov, D. I. Frolov, A. A. Kurochkin // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. – 2020. – No. 4. – Pp. 42-48. – EDN AFMRPP.
- [2] Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A. A. Kurochkin, D. I. Frolov, V. M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, February 26-29, 2020. – Voronezh, 2021. – P. 072018. – DOI 10.1088/1755-1315/640/7/072018. – EDN CHLIKW.
- [3] Cui C. et al. Microstructure of extrusion-cooked whole grain in controlling product quality // Food Reviews International. – 2024. – Vol. 40. – No. 6. – Pp. 1621-1646.
- [4] Rzedzicki Z., Blaszczyk W. Impact of microstructure in modeling physical properties of cereal extrudates // International Agrophysics. – 2005. – Vol. 19. – No. 2.
- [5] Kaleyatykh A. V., Pavlov B. A. Review of modern methods of automated image analysis // Automation and Telemechanics. – 1995. – No. 9. – P. 3-21.
- [6] Kravtsova T. A. Comparative study of adaptive binarization methods in the problem of automated analysis of cell images in immunocytochemistry // Youth Scientific and Technical Bulletin. – 2015. – No. 4. – P. 41-41.
- [7] Bobyr M. V. et al. Fuzzy logic methods in the problem of detecting object boundaries // Computer Science and Automation. – 2022. – Vol. 21. – No. 2. – P. 376-404.
- [8] Goncharov K. A. et al. Using the OPENCV library for working with machine vision // Intelligent systems and technologies in the food industry. – 2019. – P. 53-60.

отраслях пищевой промышленности. – 2019. – С. 53-60.

- [9] Берников В. В., Преображенский А. П., Чопоров О. Н. Возможности распараллеливания обработки изображений с помощью OpenCV и OpenMP // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7. – №. 2. – С. 110-126.

[9] Bernikov V. V., Preobrazhensky A. P., Choporov O. N. Possibilities of parallel image processing using OpenCV and OpenMP // Modeling, optimization and information technology. - 2019. - Vol. 7. - No. 2. - P. 110-126.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Тришкин Никита Алексеевич студент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 E-mail: trishkin.nik01@mail.ru</p>	<p>Trishkin Nikita Alekseevich student of the department «Food productions» Penza State Technological University E-mail: trishkin.nik01@mail.ru</p>
<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>