

6. Анохин А.В. Специальная оценка условий труда как механизм улучшения условий труда, направленная на безопасность рабочих мест / А.В. Анохин // Охрана и экономика труда. – 2016. – № 1(22). – С. 31– 39.
7. Жулавская А.Е. Благоприятные условия труда как составляющие организации труда современного предприятия / А.Е. Жулавская // Молодой ученый. – 2016. – № 11(115). – С. 740–742.
8. Прокопец Т.Н. Анализ методов оценки качества предоставляемых услуг сервисных предприятий / Т.Н. Прокопец, С.Н. Комарова, В.А. Логвинова. – Текст: электронный // Вестник Академии знаний. – 2020. – №2(37). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-otsenki-kachestva-predostavlyaemyh-uslug-servisnyh-predpriyatiy>.
9. Филатова Т.А. Критерии оценки качества услуг в сервисной организации / Т.А. Филатова – Текст: электронный // Российское предпринимательство. – 2013. – №6(228). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kriterii-otsenki-kachestva-uslug-v-servisnoy-organizatsii>.

УДК 620.179.152.1: 004.356.2-023.5:678.5.067.5

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ 3D-ПЕЧАТИ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОВ

Бурган Владислав Алексеевич

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: vab46@tpu.ru

Научный руководитель: Батранин Андрей Викторович,

к.т.н., доцент отделения контроля и диагностики ТПУ

E-mail: batranin@tpu.ru

X-RAY TOMOGRAPHY FOR DETECTING DEFECTS IN 3D-PRINTED REINFORCED POLYMERS

Burgan Vladislav Alexievich

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Academic supervisor: Batranin Andrey Viktorovich,

Ph.D. in Engineering National Research Tomsk Polytechnic University

Аннотация: статья посвящена выявлению дефектов при 3D-печати полимеров (ПЭЭК), армированных стеклянными волокнами. Для этих целей использовался томограф «ОРЕЛ-МТ», собранный в Томском политехническом университете. Для томографической реконструкции и визуализации полученных данных использовался программный пакет «Bruker-microCT» v.1.18.

Abstract: the paper is devoted to detecting defects in 3D-printed polymers (PEEK) reinforced with glass fibers. For this purpose, the "OREL-MT" tomograph, assembled at Tomsk Polytechnic University, was used. The "Bruker-microCT" v.1.18 software package was utilized for tomographic reconstruction and visualization of the obtained data.

Ключевые слова: рентгеновская томография; полимеры; армированные полимеры; 3D-печать; дефекты.

Keywords: X-ray Tomography; Polymers; Reinforced Polymers; 3D Printing, Defects.

Аддитивные технологии в современной промышленности интенсивно развиваются и находят все более широкое применение. Вместе с развитием самих методов аддитивного производства расширяется и круг применяемых в данных методах материалов [1].

Один из наиболее популярных способов 3D-печати – это послойное наплавление, при котором в качестве расходного материала используются термопластичные полимеры. В

промышленности метод используется в основном для прототипирования, но в ряде случаев может применяться для изготовления конечной продукции [1].

В настоящий момент химическая промышленность выпускает полимеры, сопоставимые по эксплуатационным свойствам с металлическими сплавами. Одним из таких полимеров является полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) [2].

В Томском политехническом университете идет работа по созданию перспективных конструкций из ПЭЭК методом послойного наплавления на принтере собственной конструкции. Для исследования внутренней структуры напечатанных образцов применяется рентгеновская томография высокого разрешения на установке, также разработанной в ТПУ.

В данной работе приведены результаты томографии образцов после 3D-печати ПЭЭК с армированием стеклянными волокнами и проведен численный анализ пористости, а также представлен результат томографии.

Полукристаллический термопластик, известный как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), представляет собой высокоэффективный технический материал. Это жесткое, серое и непрозрачное вещество, которое обладает рядом уникальных свойств:

- устойчивостью к ползучести, износу и к химическим веществам;
- высокой термостойкостью – до 260 °С.

Полиэфирэфиркетон относится к семейству поликетонов и является наиболее широко используемым и производимым в больших масштабах материалом среди них [2].

ПЭЭК выпускается рядом крупных химических компаний под разными брендами. В ТПУ используется материал, выпускаемый компанией Solvey (Бельгия) под маркой KetaSpire KT-880 GF30 BG 20 [3]. Гранулы имеют серый цвет и армирование стекловолокном на уровне 30%. Материал имеет повышенную текучесть, что предпочтительно для аддитивного процесса.

ПЭЭК благодаря высоким эксплуатационным свойствам, таким как прочность, термостойкость, изоляционные свойства и химическая стойкость, находит самое широкое применение от медицины и пищевой промышленности до аэрокосмической отрасли. Существенным ограничением является высокая стоимость материала.

Рентгеновская компьютерная томография широко применяется во многих областях, в том числе в материаловедении.

Для проведения исследования использовали рентгеновскую микрокомпьютерную томографию (микро-КТ). Для этих целей воспользовались томографом «Орёл-МТ». Данный томограф был собран в Томском политехническом университете [4].

В томографе «Орёл-МТ» установлены: острофокусный рентгеновский аппарат XWT 160-ТС от компании X-RAY WorX (Германия), плоскочелюстной рентгеновский детектор PaxScan-2520V от Varian (США) и система для точного размещения исследуемого объекта. Томограф использует коническую геометрию рентгеновского пучка, при которой используется проекционное увеличение для повышения пространственного разрешения получаемых снимков. Проходя через объект исследования, излучение частично в нем ослабляется, после чего регистрируется детектором. Во время сканирования образец медленно поворачивается вокруг вертикальной оси на небольшой угол. После этого регистрируется рентгеновское изображение и сохраняется на жесткий диск управляющего компьютера.

Для томографической реконструкции и визуализации полученных данных использовался программный пакет «Bruker-microCT» v.1.18 [5].

Исследование проводилось при следующих параметрах сканирования: ток анода – 35 мкА, ускоряющее напряжение – 100 кВ, число рентгеновских проекций – 1800, угловой шаг – 0,2°, размер вокселя – 6,35 мкм. Всего было исследовано три образца, напечатанных при различных режимах. Образцы имеют условное обозначение: №19, 28, 30.

Объемный вид образца №19 после томографии, показанный со стороны печатающей головки и со стороны поддерживающего стола, представлен на рисунке 1.

На рисунке 2 представлены ортогональные проекции образца №19 для иллюстрации внутренней структуры.

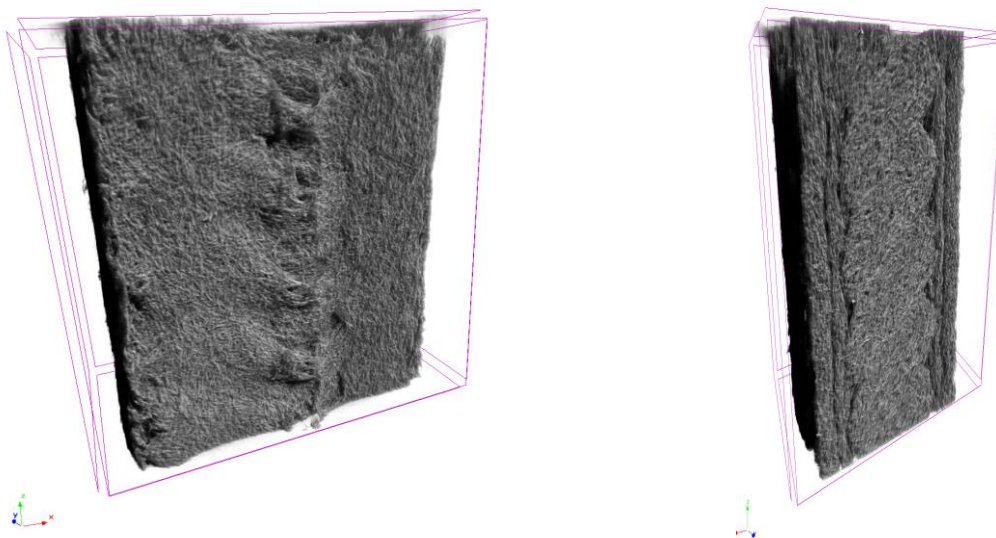


Рисунок 1 – Образец № 19

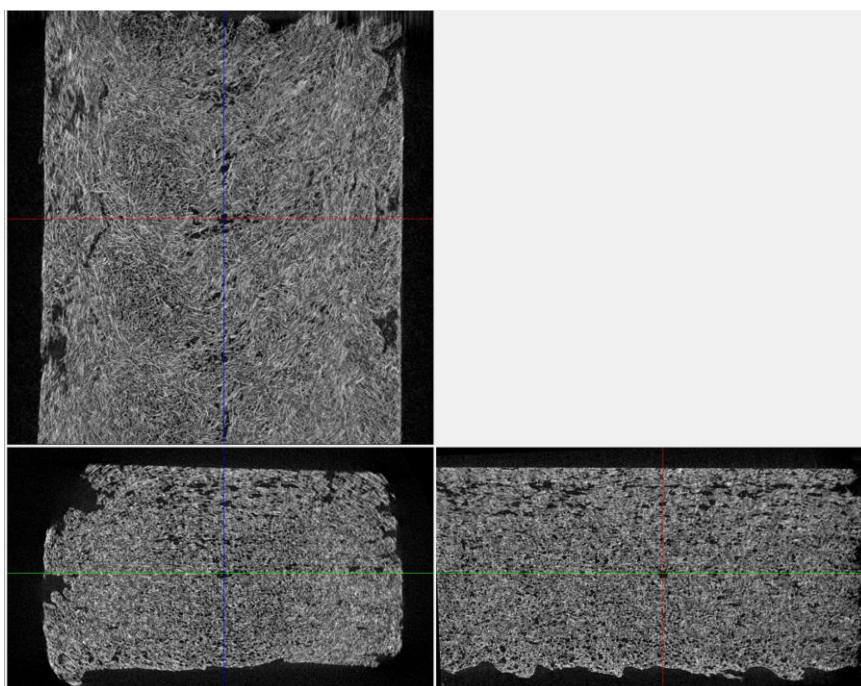


Рисунок 2 – Образец № 19

На ортогональных проекциях видна макронеоднородность структуры, пустоты и расслоения материала.

По степени пористости и характеру ее распределения внутри объема образцы различаются. Проведем численный анализ по внутренней части образцов. Для это выберем объем, как показано ниже. Это нужно для корректного расчета пористости без захвата окружающего воздуха. Такая область называется Volume of Interest (VOI). Расчет пористости проведем в пределах VOI.

В связи с тем, что стекловолокно существенно плотнее полимера, нужно корректно выбрать порог для отделения материала от пор. Эта процедура называется сегментацией или бинаризацией. На рисунке 3 представлена VOI образца №19.



Рисунок 3 – Образец № 19

Результат расчетов сведён в таблицу.

Таблица – Результат расчетов

Образец	Объем VOI, мм ³	Объем материала, мм ³	Пористость, %
19	59,76	50,25	16
28	57,15	50,26	12
30	57,15	51,71	9,5

Таким образом, наименьшую пористость имеет образец №30. А по сечениям видно, что размеры пор у него в целом меньше, и пористость распределена более равномерно. Хуже по этим показателям образец №19. Образец №28 занимает промежуточное положение.

Томография позволила увидеть пустоты, расслоения и макронеоднородность структур образцов, так же позволила провести численный анализ пористости. Результаты томографии согласуются с проведенными механическими испытаниями: рост числа внутренних дефектов ведет к снижению механических свойств.

Список литературы

1. X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review / Thompson A., Maskery I., Leach R. K. // Measurement Science and Technology. – 2016. – Vol. 27 (7). – С. 072001.
2. Polyether ether ketone (PEEK Plastic): Uses, Properties & Material Guide. – Текст: электронный // Omnexus.specialchem.com: [сайт]. – URL: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketone-peek-thermoplastic> (дата обращения 11.11.2024).
3. KetaSpire® KT-880 GF30. – Текст: электронный // Syensqo.com: [сайт]. – URL: <https://www.syensqo.com/en/product/ketaspire-kt-880-gf30-bk95> (дата обращения 11.11.2024).
4. Рентгеновский микротомограф «Орел-МТ». – Текст: электронный // Portal.tpu.ru: [сайт]. – URL: https://portal.tpu.ru/departments/laboratory/tti/products/orel_tomo (дата обращения 11.11.2024).
5. microCT software download library – Service. – Текст: электронный // Bruker.com [сайт]. – URL: <https://www.bruker.com/service/support-upgrades/software-downloads/micro-ct/library.html> (дата обращения 11.11.2024).