

ОБЗОР ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ В АЭРОКОСМИЧЕСКУЮ СФЕРУ

Зулаева Г.В. ¹

¹Самарский университет, г. Самара, Gala.Zu@mail.ru

Ключевые слова: FDM-печать, усталостное разрушение, армированные полимеры, аддитивные технологии, двигателестроение, параметры печати, циклическое нагружение, композиты

В последние годы наблюдается устойчивый рост использования аддитивных технологий в аэрокосмической, автомобильной и строительной промышленности. В основном для изделий, подвергающихся высоким температурным и механическим нагрузкам, преимущественно применяются методы металлической печати (например, SLM и SLS) [1]. Однако сейчас разработано множество полимеров и композитов для FDM-печати, которые могут использоваться в ответственных конструкциях не только как прототипы, но и как готовые изделия. Производителей таких материалов зачастую указывают лишь предел прочности на разрыв, игнорируя усталостные характеристики. Между тем, до 70% отказов деталей в эксплуатации связано именно с циклическим нагружением (вибрация, пульсации давления), что делает исследование усталостных характеристик критически важным.

Как отмечено в зарубежном обзоре Shanmugam и соавторов [2], в отличие от полимеров, изготовленных традиционным способом (например, литьём под давлением), полимеры, полученные методом послойного наплавления (FDM), имеют послойную адгезию, а влияние параметров печати делает анализ усталостных характеристик сложным и критически важным. Параметры печати и характеристики материала оказывают значительное влияние на усталостные свойства. Усталостное разрушение полимеров связано с накоплением повреждений и ростом дефектов до критического размера. На усталостную прочность влияют физические свойства материала (молекулярная масса, степень кристалличности, плотность сцепления цепей, характеристики армирования), условия окружающей среды и факторы механического нагружения (амплитуда и частота циклов, среднее напряжение, самонагревание, концентрация напряжений. Кроме того, рассматривая волокнистые композиты, используемые в 3д-печати, отмечают повышенную неоднородность и анизотропию свойств [3]. Проводились исследования по улучшению качества печати, так как оно напрямую определяет механические свойства изделий. Однако остаётся открытым вопрос: каковы оптимальные режимы печати для того или иного материала и как выявить числовую закономерность?

В табл. 1 обобщены данные литературы о влиянии ключевых параметров печати на усталостную долговечность [4].

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что для каждого из параметров необходимо количественно определять степень влияния на усталостную долговечность. В литературе часто приводятся качественные оценки, однако отсутствуют системные данные о процентном вкладе каждого параметра в изменение числа циклов до разрушения. Не менее важным является выявление оптимальных значений параметров, при которых усталостная долговечность достигает максимума для конкретного материала.

Для высокопроизводительного полимера РЕЕК показано, что усталостная прочность 3D-печатных образцов составляет 65 МПа (~75% от предела прочности), а трещины зарождаются на пустотах и распространяются вдоль границ дорожек [5]. Для PLA с геометрическими концентраторами установлено, что наличие центрального отверстия снижает усталостную долговечность на 60% по сравнению с гладкими образцами,

причём стадия инициирования трещины занимает до 50% общей жизни. Армирование полимеров волокном (CF) может повышать усталостную долговечность в 1,5–3 раза, однако системных данных для PLA-CF и ABS-CF недостаточно.

Таблица 1 – Влияние параметров FDM-печати на усталостную долговечность

Параметр	Влияние на усталостную долговечность
Ориентация печати (растра)	Образцы с ориентацией 0° живут в 5–10 раз дольше, чем с 90°. Ориентация +45°/–45° даёт максимальный ресурс некоторых материалов.
Толщина слоя	Уменьшение слоя снижает шероховатость и увеличивает циклическую долговечность из-за лучшего сцепления.
Температура сопла	Недогрев → непроплавы, перегрев → термическая деградация полимера. Требуется оптимизация.
Плотность заполнения	Один из наиболее значимых параметров; 75–100% заполнения оптимальны для усталости.
Диаметр сопла	Значимо влияет на усталостную прочность (большой диаметр может снижать число дефектов).
Ширина дорожки (extrusion width)	Влияет на перекрытие между линиями и образование микрозазоров или наплывов.
Схема заполнения (pattern)	Gyroid и grid гасят колебания лучше, чем linear, но концентрация напряжений в узлах разная.
Количество периметров (walls)	Внешние слои несут максимальные растягивающие напряжения при изгибе/растяжении.

Несмотря на существующие достижения, тема усталостного разрушения FDM-изделий остаётся актуальной и не до конца изученной областью. Наименее исследованными параметрами остаются ширина дорожки (extrusion width), схема заполнения (gyroid, grid, linear) и количество периметров (walls). Также отсутствуют системные данные о совместном влиянии ряда параметров печати при циклическом нагружении. На основе выполненного обзора планируется проведение экспериментального исследования, направленного на установление количественных зависимостей между технологическими параметрами FDM-печати и усталостной долговечностью. Ожидаемым результатом является выявление оптимальных режимов печати, обеспечивающих максимальную усталостную долговечность для армированных и неармированных полимеров, а также разработка рекомендаций по настройке слайсера для инженерных расчётов ресурса FDM-изделий при циклических нагрузках

Список литературы

1. Wawryniuk, Z., Brancewicz-Steinmetz, E., & Sawicki, J. (2024). Revolutionizing transportation: an overview of 3D printing in aviation, automotive, and space industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–23.
2. Shanmugam, V., Das, O., Babu, K., Marimuthu, U., Veerasimman, A., Johnson, D. J., Neisiany, R. E., Hedenqvist, M. S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2021). Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, Volume 143, February 2021, 106007.
3. Mazzanti, V., et al. «FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of Their Mechanical Properties.» *Polymers*, vol. 11, no. 7, 2019, p. 1094.
4. Peko I., Čatipović N., Antunović K., Ljumović P. Multi-objective optimization of fatigue performance in FDM-printed PLA biopolymer using grey relational method // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 24. P. 10902.
5. Rendas P., Figueiredo L., Geraldo M., Vidal C., Soares B.A. High-cycle fatigue behaviour of 3D-printed polyetheretherketone (PEEK) // *International Journal of Fatigue*. 2023. Vol. 176. P. 107874.

Сведения об авторах

Зулаева Галина Владиславовна – студент. Область научных интересов: Аддитивные технологии.

REVIEW OF THE INFLUENCE OF FDM PRINTING TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE FATIGUE LIFE OF POLYMERS FOR IMPLEMENTATION IN THE AEROSPACE INDUSTRY

Zulaeva G.V. ¹

¹Samara University, Samara, Russia, Gala.Zu@mail.ru

Keywords: FDM-printing, fatigue failure, reinforced polymers, additive technologies, aerospace engineering, printing parameters, cyclic loading, composites.

This review examines the effect of key FDM printing parameters on the fatigue performance of polymers and composites. Raster orientation of 0° provides 5–10 times higher fatigue life than 90°, while +45°/–45° pattern is optimal for PLA and ABS. Extrusion width, infill pattern, and wall count remain the least studied parameters. For PEEK, fatigue strength reaches 65 MPa (~75% of UTS). A central hole reduces fatigue life of notched PLA by 60%. Fiber reinforcement (CF) can improve fatigue life by 1.5–3 times. Based on these findings, further experimental studies are planned to quantify relationships between printing parameters and fatigue durability.