ТЕХНОЛОГИЯ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2024 Том 26 № 4 с. 19–40 ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online) DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)



Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом FDM: исследование для имплантата тазобедренного сустава

Йогирадж Дама^{1, a, *}, Бхагван Джоги^{1, b}, Раджу Паваде^{1, c}, Атул Кулкарни^{2, d}

¹ Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара, Лонере, Райгад, Махараштра, 402103, Индия

² Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Махараштра, Пуне – 411048, Индия

^{*a*} ⁽¹⁾ https://orcid.org/0009-0008-5404-4347, ⁽²⁾ yogirajdama@dbatu.ac.in; ^{*b*} ⁽¹⁾ https://orcid.org/0000-0003-2099-7533, ⁽²⁾ bfjogi@dbatu.ac.in; ^{*c*} ⁽¹⁾ https://orcid.org/0000-0002-6452-6349, ⁽²⁾ atul.kulkarni@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

АННОТАЦИЯ

УДК 678.8

История статьи: Поступила: 18 августа 2024 Рецензирование: 10 сентября 2024 Принята к печати: 17 сентября 2024 Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова: 3D-печать Биоматериалы Технология послойной печати Имплантат Ориентация печати Полимолочная кислота Износостойкость

Введение. Операция по эндопротезированию тазобедренного сустава предполагает замену поврежденного сустава имплантатом, который может восстановить его функциональность. Технология 3D-печати более перспективна, чем традиционный производственный процесс, когда речь заходит о создании более сложных деталей и форм. Цель текушего исследовательского проекта: определить, насколько быстро можно изготовить имплантат из биоматериала для эндопротезирования тазобедренного сустава с использованием 3D-печати, изучив скорость износа изделий, изготовленных при использовании различных направлений печати. Несмотря на наличие нескольких технологий аддитивного производства, технология послойного наплавления (FDM - fuse deposition modeling) оказала значительное влияние на здравоохранение, автомобильную промышленность и др. В основном это объясняется адаптируемостью различных композиционных материалов на основе полимеров и их экономичностью. Такие полимеры, напечатанные на 3D-принтере, нуждаются в дальнейшем изучении для оценки износа в зависимости от различных направлений 3D-печати. Биоматериалы на основе полимолочной кислоты (PLA – polylactic acid) были тщательно изучены с целью определения их пригодности в качестве материалов для изготовления тазобедренных суставов. Цель работы. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния направления печати на износ в условиях сухого трения скольжения материала из полимолочной кислоты (PLA), полученного путем послойного наплавления (FDM), по схеме «штифт – диск (SS 316)». Кроме того, были разработаны экспериментальные и эмпирические модели для прогнозирования производительности с учетом влияния нагрузки и скорости скольжения. Для определения оптимальных параметров был использован алгоритм реляционного анализа «серых» систем. Методы исследования. Методом FDM-печати в различных направлениях изготовлен штифт. Под направлением печати подразумевается печать под углами 0°, 45° и 90°, при этом все остальные параметры 3D-печати оставались неизменными. Испытание на износ проводили по кинематической схеме «штифт – диск». В ходе экспериментов варьировалась нормальная нагрузка на штифт и скорость вращения диска. Эксперименты были методически разработаны для изучения влияния входных параметров на удельную скорость износа. Было проведено около 13 экспериментов на каждое направление печати при пути трения, равном 4 км, в диапазоне нагрузки 400-800 Н при скорости скольжения 450–750 об/мин. Результаты и обсуждение. В ходе исследования были получены важные результаты, особенно касающиеся направления 3D-печати компонентов. Было обнаружено, что наименьший износ при трении скольжения наблюдается у штифта, напечатанного под углом 0°, чуть больший износ характерен для штифта, напечатанного под углом 90°. Соединение слоев на штифте, напечатанном под углом 45°, деформировалось при более высокой нагрузке в основном из-за повышения температуры. Низкая прочность соединения в штифте, напечатанном под углом 45°, привела к сильному износу при трении скольжения. Оптимальный результат достигнут при скорости скольжения 451 об/мин и нагрузке 600 Н. Результаты исследования очень полезны при выборе материалов для 3D-печати биомедицинских имплантатов, изделий медицинского и промышленного назначения.

Для цитирования: Влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом FDM: исследование для имплантата тазобедренного сустава / Й.Б. Дама, Б.Ф. Джоги, Р. Паваде, А.П. Кулкарни // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 19–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40.

Введение

*Адрес для переписки

Дама Йогирадж Басаврадж, научный сотрудник

Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара,

Лонере, Райгад,

402103, Махараштра, Индия

Тел.: +91-9860384360, e-mail: yogirajdama@dbatu.ac.in

Исследователи постоянно пытаются найти альтернативные биоматериалы и производственные процессы с целью применения их в области медицины [1]. Для создания более сложных деталей и форм технология 3D-печати является более перспективной, чем традиционные методы производства. Процесс 3D-печати, также называемый процессом аддитивного производства, нашел широкое применение в инженерной сфере, особенно для проектирования сложных компонентов и печати по требованию [2]. Однако эта технология еще не зарекомендовала себя в области медицины из-за многих ограничений, таких как доступность биоматериалов для 3D-печати, направление печати, одобрение регулирующих органов, надежность в долгосрочной перспективе, использование напечатанных изделий в организме пациента в режиме реального времени и др. Поэтому исследователи сосредоточились на использовании процесса 3D-печати в медицинской сфере [1].

Тазобедренный сустав, а следовательно, и имплантат тазобедренного сустава, является одним из наиболее важных элементов в организме человека по сравнению с любыми другими суставами. Несмотря на значительный прогресс в разработке имплантатов тазобедренного сустава с использованием различных биоматериалов, включая металл, керамику и полимеры, все еще остается много возможностей для исследований и разработок индивидуальных имплантатов тазобедренного сустава, даже несмотря на то, что за последние несколько столетий биоматериалы и методы эндопротезирования тазобедренного сустава прошли долгий путь развития. Тазобедренный сустав соединяет бедра с тазом, принимая на себя весь вес человеческого тела. Тазобедренный сустав является одним из самых важных суставов, поддерживающих человеческое тело. Естественным местом расположения вертлужной впадины является чашеобразная полость, в которую точно входит гладкая сферическая головка бедренной кости. Прочные связки охватывают весь сустав, обеспечивая стабильность. Внедрение инноваций в области дизайна и материалов способствовало весомому уменьшению реальной скорости износа самых популярных имплантатов, что, в свою очередь, позволяет значительно снизить риски, связанные с обширным распространением обломков в организме человека.

Такие биоматериалы, как сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и другие широко используются в медицине для изготовления имплантатов традиционным способом и хорошо зарекомендовали себя [3, 4]. Льюис (Lewis) [5] изучал свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена с поперечно сшитыми молекулами. Ванг и соавторы (Wang et al.) обнаружили, что смазывающие и износостойкие свойства полиэтилена при тотальной замене суставов улучшаются [6]. Юсуф и Moxcuн (Yousuf and Mohsin) [7] изучали повышение скорости износа полиэтилена высокой плотности за счет добавления керамических частиц. Однако имплантированные полиэтиленовые чашки для вертлужной впадины образуют мусор, на который реагирует иммунная система организма [8]. Для улучшения механических и трибологических характеристик ПЭВП-матрицы в нее были добавлены нанокомпозиты, включающие графен, наночастицы TiO₂ и гибридные нанонаполнители, что в конечном итоге привело к увеличению срока службы и снижению скорости износа [9].

Чжан с соавторами (Zhang et al.) [10] рассматривали применение ПЭЭК в качестве альтернативы CoCrMo в бедренном компоненте тотального эндопротеза коленного сустава. Переломы бедра у пожилых людей являются опасными травмами, которые приводят к увеличению заболеваемости и смертности, инвалидности и значительному спросу на медицинские ресурсы. Для обоснования хирургической стратегии гемиартропластики при лечении переломов бедра недостаточно качественных данных [11].

В настоящем исследовании для 3D-печати биомедицинских имплантатов рассмотрен PLA-материал. Данные о PLA-материале, используемом в имплантатах тазобедренного сустава, представлены в очень немногих исследованиях. Согласно Тол и соавторам (Tol et al.) [11], по результатам рандомизированного клинического исследования с участием 555 пациентов и естественного эксперимента с участием 288 человек не было выявлено различий в качестве жизни через шесть месяцев после травмы между хирургическими вмешательствами. По сравнению с DLA, PLA была связана со значительно большим количеством повторных операций и вывихов. В 2020 году Обинна с соавторами (Obinna et al.) [12] изучали 3D-печать для изготовления имплантатов тазобедренного сустава.

CM

TECHNOLOGY

Бхагия С. и соавторы (Bhagia S. et al.) [13] провели обзор PLA-биокомпозитов, содержащих ресурсы биомассы, и охарактеризовали их как биоразлагаемые, пригодные для вторичной переработки и имеющие потенциал для процесса получения топлива, электрической, тепловой энергии и химикатов из биомассы, а также печати по технологии FDM. Для технологии послойного наплавления (FDM) Прашант Анерао (Prashant Anerao) [14] провел параметрическое исследование механических характеристик PLA-композита, армированного биоуглем.

Проведено сравнительное исследование и анализ корпусов слуховых аппаратов, напечатанных из различных биоматериалов [15]. С помощью ANSYS Explicit Workbench было проведено сравнительное исследование различных полимерных материалов на пяти различных скоростях для испытания на удар при падении. Согласно исследованию, термополиуретан (ТПУ) деформируется до максимума при всех скоростях – больше, чем PLA или акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС) [15].

Дама с соавторами (Dama et al.) [16] указали на пригодность процесса аддитивного производства для воспроизведения конструктивных особенностей. Однако эти материалы не подходят для 3D-печати в том формате, который досту-

пен для обычного производственного процесса. 3D-печать методом послойного наплавления (FDM), также называемая изготовлением методом послойного наплавления нитей (FFF), является методом аддитивного производства (AM). Расплавленный материал выборочно наносится по заранее определенному маршруту для создания деталей слой за слоем. Для создания конечных физических изделий используются термопластичные полимеры в форме нитей. Далы с соавторами (Daly et al.) провели параметрическое исследование и наблюдали влияние нескольких факторов 3D-печати, включая направление печати, скорость и метод дискретизации (слой за слоем или нить), на коробление, остаточные напряжения, прогиб и механическое поведение [17].

Санданамсамы с соавторами (Sandanamsamy et al.) рассматривали параметры процесса FDMпечати на механические свойства при растяжении PLA-материалов [18]. Мелтем (Meltem) [19] изучил влияние направления FDM-печати на механические свойства при растяжении и время печати детали из PLA-материала. Прочность на разрыв уменьшалась, когда направление печати деталей было изменено с горизонтального на вертикальное и угла печати с 0° до 90° (рис. 1). Прочность на разрыв для вертикально



Рис. 1. Параметры печати методом FDM:

a – направление печати; б – угол направления растра, равный 0°, и толщина слоя (источник: Чакон и соавт. (Chacón et al.) [20])

Fig. 1. FDM printing parameters:

a – printing orientations; δ – raster direction angle equal to 0° and layer thickness (source: *Chacón* et al. [20])

напечатанной детали была на 36 % меньше, чем для горизонтально напечатанной, из-за направления приложения нагрузки и режима разрушения.

Чтобы гарантировать стабильные и высококачественные результаты, на предприятиях по всему миру внедряются передовые производственные процессы, такие как технология послойного наплавления (FDM). По этой причине крайне важно понимать, как взаимодействуют различные компоненты и как они влияют на качество конечной формы. Анализ характера износа изделий из полимолочной кислоты находит множество применений в биомедицине, протезировании, тканевой инженерии и других отраслях.

Биоматериал на основе PLA, напечатанный на 3D-принтере, был тщательно исследован на предмет возможности использования в качестве материала для эндопротезирования тазобедренного сустава путем анализа характера износа и механических свойств.

Цель работы: в ходе экспериментального исследования было изучено влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом послойного наплавления (FDM), в условиях сухого трения скольжения по схеме «штифт – диск (SS 316)». Для прогнозирования производительности моделей, которые являются как эмпирическими, так и полученными экспериментальным путем, учтено влияние скорости скольжения и нагрузки. Для определения идеальных параметров использовали алгоритм реляционного анализа «серых» систем. В работе применялось оборудование для 3D-печати FDM и испытания на износ, имеющееся в распоряжении факультета машиностроения Института информационных технологий Вишвакарма (Пуна, Махараштра, Индия).

Дальнейшие исследования направлены на изучение характера износа композиционных материалов для улучшения показателей скорости износа [21–27]. 3D-печать композиционного биоматериала может быть использована для разработки имплантата с более высокой устойчивостью.

Методы исследования

Трибометр «штифт-на-диске» – это проверенное устройство для анализа износостойкости при скольжении и характеристик износа материала. Принцип работы трибометра «штифт-надиске» заключается в том, что диск вращается с постоянной скоростью, в то время как штифт остается неподвижным при заданной нагрузке, и из-за относительного перемещения между штифтом и диском начинается износ. Для регистрации перемещения используется датчик перемещения на основе дифференциального трансформатора (LVDT) на другом конце устройства. Эта машина измеряет коэффициент трения, силу трения, скорость износа, температуру, объем износа и др. Схема трибометра «штифт-на-диске» показана на рис. 2, а, а устройство, используемое для экспериментов, – на рис. 2, б. Станок работает в диапазоне нагрузок 100...800 Н, скорость 20...2000 об/мин. Точность измерения LVDT составляет 1 ± 1 % при измерении износа в микрометрах и наименьшем значении 1 мкм. Испытание проводили в соответствии со стандартом ASTM G 99.

Технология послойного наплавления (FDM) один из популярных методов 3D-печати, в котором используются термопластичные полимеры для создания сложных 3D-структур. Метод позволяет создавать небольшие функциональные детали простым и экономичным способом. Для печати сложных объектов можно использовать широкий спектр материалов, таких как PLA, нейлон, акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС), политетрафторэтилен (ПТФЭ) и другие, с различными технологическими параметрами. В процессе печати термопластичные нити расплавляются и экструдируются через нагретую насадку, после чего в полутвердом виде наносятся на твердую подложку. Принципиальная схема технологического процесса показана на рис. 3, а. Штифты печатались на 3D-принтере Flashforge Dreamer NX из материала на основе PLA (полимолочной кислоты). На рис. 3, б показана фотография 3D-принтера, использованного для печати штифтов. Все штифты были изготовлены при плотности заполнения 100 %, температуре экструзии 220 °С, с углом растрирования 90° и толщиной слоя 0,2 мм. Согласно данным из литературы эти параметры являются оптимальными. В качестве тестовых образцов были использованы цилиндрические штифты из материала на основе PLA диаметром 8 мм и длиной 40 мм. Эти штифты были напечатаны при направлении печати 0°, 45° и 90°. РLА является



- Рис. 2. Принципиальная схема трибометра «штифт-на-диске» (*a*); экспериментальная установка трибометра «штифт-на-диске» (*б*)
 - *Fig. 2.* Schematic diagram of the pin-on-disk tribometer (*a*); experimental setup of the pin-on-disk tribometer (δ)



Puc. 3. Схема FDM-печати (*a*) и 3D-принтер FDM (Flashforge-Dreamer NX) (*б*) *Fig. 3. FDM* printing scheme (*a*) and *FDM* 3D printer (*Flashforge-Dreamer NX*) (*б*)

одним из популярных материалов для изготовления волокон, используемых в FDM-печати. PLA-материал прост в печати и под него легко настроить принтер.

Эксперименты были методически спланированы для изучения влияния входных параметров на удельную скорость износа. Значения скорости скольжения получены путем выбора диаметра дорожки на диске и соответствующей скорости вращения диска. Было проведено около 13 экспериментов на каждое направление печати при пути трения, равном 4 км. Подготовка осуществлялась на основе центрального композиционного плана (ССD), который является эффективным планированием эксперимента (DOE) для метода анализа на поверхности отклика (RSM). В табл. 1 приведены значения параметров, выбранных для эксперимента.

Таблица 1

Table 1

Значения параметров, выбранных для эксперимента	a
Values of parameters selected for the experiment	

Параметри	Минимальное	Максимальное		
Параметры	значение	значение		
Нормальная нагрузка (Н)	400	800		
Скорость (об/мин)	450	750		
Путь трения 4 км				

В настоящем исследовании для оптимизации параметров, обеспечивающих минимальный износ при скольжении, был использован алгоритм реляционного анализа «серых» систем. Теория серых систем представляет степень «серой» корреляции для описания степени сходства в развивающихся тенденциях различных вещей или различных факторов. Чем больше степень серой корреляции, тем более похожи вещи, и наоборот. Эта теория преобразует задачу оптимизации с несколькими ответами в ситуацию оптимизации с одним ответом с целевой функцией общей серой реляционной оценки [27].

Метод серого реляционного анализа

Процедура получения решения оптимизации методом серого реляционного анализа выглядит следующим образом.

Шаг 1. Определение входных параметров, которые влияют на несколько выходных переменных.

Шаг 2. Выбор матрицы плана Тагучи и проведение экспериментов.

Шаг 3. Выбор качественных характеристик для каждой выходной переменной.

Шаг 4. Нормализация всех переменных отклика (серая реляционная генерация): формула нормализации «чем меньше, тем лучше» использовалась для перевода исходной последовательности в сопоставимую последовательность и приведена ниже:

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}$$

Шаг 5. Определение последовательности отклонений $\Delta 0_i(k)$. Последовательность отклонений $\Delta 0_i(k)$ – это абсолютная разница между эталонной последовательностью $x_0(k)$ и после-

довательностью сопоставимости $x_i(k)$ после нормализации:

$$\Delta 0_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|.$$

Значение $x_0(k)$ считалось равным единице.

Шаг 6. Расчет серого реляционного коэффициента (GRC) для каждого выхода:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta \min + \zeta \Delta \max}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta \max}.$$

Шаг 7. Расчет серой относительной оценки по среднему значению GRC. Серая реляционная оценка – это средняя сумма серых реляционных коэффициентов, которые определяются следующим образом:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \gamma(x_0(k), x_i(k)).$$

Шаг 8. Определение оптимальных параметров.

Шаг 9. Прогнозирование серой реляционной оценки при настройке оптимальных параметров.

Результаты и обсуждение

Исследование износа при трении скольжения PLA-материала по диску из стали SS 316 было проведено на машине трения по схеме «штифт – диск». На этом станке устройство качелей было выполнено путем прикрепления стержня для передачи нормальной нагрузки на штифт посредством прикрепления грузиков к другому концу. Датчик перемещения на основе дифференциального трансформатора (LVDT) использовался для обнаружения изменения смещения из-за износа материала. Скорость вращения диска варьировалась путем выбора соответствующего диаметра дорожки.

Испытание проводилось на 4-километровом участке пути (приблизительно от 18 до 22 минут).

OBRABOTKA METALLOV

Сл

TECHNOLOGY

К машине были подключены панель управления и компьютер, который отображал скорость, силу трения и износ для соответствующих параметров обработки. Программное обеспечение Windcom использовалось для отображения изменения износа и силы трения в зависимости от времени испытания и расстояния пути в 5 км. На рис. 4 показано изображение дорожек трения *PO1*, *PO2* и *PO3*, сформированных на диске SS 316.

Штифты были изготовлены по технологии FDM с направлением печати 0°, 45° и 90°. В дальнейшем штифты, изготовленные с углом



- *Рис.* 4. Изображение дорожек износа штифтов, напечатанных методом FDM, на диске из нержавеющей стали SS 316
- *Fig. 4.* Image of wear tracks of *FDM* printed pins on a *SS 316* stainless steel disc

направления печати 0° , 45° и 90° , будут называться *PO1*, *PO2* и *PO3* соответственно. Направление печати штифтов в виде CAD-модели и при реальной печати показаны на рис. 5, *а* и *б* соответственно.

Эксперименты проводились согласно плану (DOE), и износ при трении скольжения регистрировался для различных значений нормальной нагрузки и скорости скольжения. Экспериментальные результаты вместе с изображением дорожек износа для всех испытаний сведены в табл. 2 и 3. Все необходимые условия окружающей среды были постоянными для всех экспериментальных испытаний. Математическое уравнение, основанное на степенном законе (обычно степенной закон используется для понимания влияния нескольких входных параметров на выходной отклик), применялось для прогнозирования износа с учетом нормальной нагрузки (H) и скорости (об/мин):

$$W = aF_N^b S^c, (1)$$

где F_N и S – нормальная нагрузка и скорость соответственно; a, b и c – константы.

Значения этих констант были определены для PO1, PO2 и PO3 с использованием экспериментальных результатов. Математические уравнения для напечатанных методом FDM материалов PO1, PO2 и PO3 приведены в табл. 4. Для определения корреляции между износом, нормальной нагрузкой и скоростью использовалось программное обеспечение Data fit.



Fig. 5. 3D printing orientation:

a - CAD model; δ – printed pins

ТЕХНОЛОГИЯ

CM

Таблица 2

Table 2

Экспериментальные результаты испытаний штифтов с различным направлением печати Experimental results of testing pins with different printing directions

№ эксперимента	Направление печати	Нормальная нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Износ, мкм
1	PO1	800	600	2394
2	PO1	600	451	2178
3	PO1	459	494	2234
4	PO1	600	600	2398
5	PO1	741	494	2367
6	PO1	741	706	2429
7	PO1	401	600	2208
8	PO1	600	600	2320
9	PO1	600	600	2398
10	PO1	600	600	2367
11	PO1	459	706	2214
12	PO1	600	750	2391
13	PO1	600	600	2502
14	PO2	800	600	3293
15	PO2	600	451	3101
16	PO2	459	494	2877
17	PO2	600	600	3267
18	PO2	741	494	3012
19	PO2	741	706	3539
20	PO2	401	600	2896
21	PO2	600	600	3106
22	PO2	600	600	3148
23	PO2	600	600	3178
24	PO2	459	706	3273
25	PO2	600	750	3388
26	PO2	600	600	3147
27	PO3	800	600	3012
28	PO3	600	451	2683
29	PO3	459	494	2598
30	PO3	600	600	2796
31	PO3	741	494	2825
32	PO3	741	706	3201
33	PO3	401	600	2575
34	PO3	600	600	2867

OBRABOTKA METALLOV

Окончание табл. 2

The End Table 2

CM

№ эксперимента	Направление печати	Нормальная нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Износ, мкм
35	PO3	600	600	2864
36	PO3	600	600	2854
37	PO3	459	706	2701
38	PO3	600	750	3056
39	PO3	600	600	2910

Таблица 3

Table 3

Изображение дорожек износа для каждого испытания Image of wear tracks for each test

№ экспе-	Направ-	Изображение	Направ-	Изображение	Направ-	Изображение
римента	ление	лорожки износа	ление	дорожки	ление	дорожки
Printenia	печати	Ach cumur usure en	печати	износа	печати	износа
1	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
2	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
3	<i>PO</i> 1		<i>PO</i> 2		PO3	
4	<i>PO</i> 1	the	PO2		PO3	
5	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
6	<i>PO</i> 1		PO2	<u>///</u>	PO3	

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

CM

ТЕХНОЛОГИЯ

Окончание табл. 3

The End Table 3

№ экспе- римента	Направ- ление печати	Изображение дорожки износа	Направ- ление печати	Изображение дорожки износа	Направ- ление печати	Изображение дорожки износа
7	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
8	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
9	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
10	PO1		PO2		PO3	
11	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
12	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	
13	<i>PO</i> 1		PO2		PO3	0

Таблица 4

Table 4

Математические уравнения Mathematical equations

Направление печати	Уравнение
<i>PO</i> 1	$W = 432, 8F_N^{0,11}S^{0,16}$
PO2	$W = 234,9F_N^{0,18}S^{0,23}$
PO3	$W = 123, 5F_N^{0,22}S^{0,27}$

TECHNOLOGY

Коэффициент корреляции (R^2) оказался равным 0,9244, 0,928 и 0,95 для РО1, РО2 и РО3 соответственно. Это показало, что разработанное эмпирическое уравнение может быть использовано для определения износа материала при трении о диск из стали SS 316 в пределах выбранного параметра. Из показателя степени всех уравнений видно, что скорость оказывает большее влияние на износ по сравнению с нормальной нагрузкой. Для лучшего понимания характера износа были подготовлены 2D- и 3D-графики. Потеря материала вызвана износом, который в конечном итоге происходит из-за относительного перемещения двух поверхностей. В отличие от трения при этом не происходит потери энергии. В полимерах обычно наблюдаются абразивный, адгезионный и усталостный механизмы износа. Полимеры склонны образовывать пленку, переносимую на контртело, что минимизирует износ, и поэтому их зачастую выбирают в качестве материала для изнашиваемых деталей. Это одно из важных трибологических явлений. Известно также, что когда внутри пленки переноса происходит разделение, то оно происходит между пленкой и полимером, а не между полимером и сталью, поэтому пленка действует как защитный слой, минимизирующий износ. Механизм адгезионного износа полимера является одной из причин развития пленки переноса. Схема формирования такой пленки показана на рис. 6.

PLA является одним из популярных материалов из-за способности разлагаться в естественной среде, биосовместимости и экологичности,





OBRABOTKA METALLOV

а также отсутствия токсичности. Кроме того, поскольку это материал для 3D-печати, то он высоко ценится в биомедицинских приложениях, где есть относительные движения между двумя поверхностями (например, в случае тазобедренных, коленных и других суставов). В литературе сообщалось, что угол направления печати также играет важную роль в характере износа PLAматериала. В настоящем исследовании штифты РО1, РО2 и РОЗ были изготовлены с использованием аддитивной технологии с постоянными и оптимизированными параметрами, указанными в литературе, чтобы можно было поддерживать однородность печати. Было изучено влияние нормальной нагрузки и скорости, а также угла печати на характер износа. На рис. 7, а и б показано влияние нормальной нагрузки и скорости на характер износа штифта РО1 (угол направления печати 0°).

Постепенное увеличение износа наблюдалось при нормальной нагрузке и переменной скорости. Минимальный износ был равен 2291 мкм, а высота – 2523 мкм. Проанализировав рис. 7, а и б, можно отметить, что наклон графика зависимости износа от скорости увеличился почти на 43 % по сравнению с наклоном графика зависимости износа от нормальной нагрузки. Это показывает, что скорость оказывает заметное влияние на характер износа, и было также очевидно из значений показателя степени уравнения (РО1), приведенных в табл. 4. По мере увеличения скорости вибрации в системе усиливаются, что является неблагоприятным условием для формирования стабильной пленки переноса. На рис. 8, а и б показано влияние нормальной нагрузки и скорости на характер износа для штифта *PO*2 (угол направления печати 45°).

Минимальный износ 2948 мкм и максимальный износ 3489 мкм показали, что наклон графика зависимости износа от скорости увеличился почти на 26 % по сравнению с наклоном графика зависимости износа от нормальной нагрузки. Износ *PO*2 больше по сравнению с *PO*1 в рассмотренных случаях. Причиной этому послужило неправильное склеивание материала при угле направления печати 45°. Похожий факт также был описан в литературе.

На рис. 9, *а* и *б* показано влияние нормальной нагрузки и скорости на характер износа для штифта *PO*3 (угол направления печати 90°). По-







Рис. 8. Влияние нормальной нагрузки (а) и скорости (б) на износ РО2

Fig. 8. Effect of normal load (a) and speed (δ) on PO2 wear





TECHNOLOGY

CM

степенное увеличение износа наблюдалось при нормальной нагрузке и переменной скорости. Минимальный зафиксированный износ составил 2538 мкм, а высота – 3106 мкм. Из рис. 9, а и б очевидно, что наклон графика зависимости износа от скорости увеличился почти на 21 % по сравнению с наклоном графика зависимости износа от нормальной нагрузки. Это показывает, что скорость оказывает заметное влияние на характер износа. На основании значений показателя степени уравнения (РО1), приведенных в табл. 4, можно было сделать аналогичный вывод. Анализ приведенных выше рисунков показал, что материал РО1 изнашивается в меньшей степени, за ним следует материал РОЗ. Материал РО2 показал самый высокий износ. Износ PLA, напечатанного с использованием аддитивной технологии (FDM), в большей степени зависит от скорости, чем от нормальной нагрузки.

Сравнительный анализ износа всех образцов был выполнен путем поддержания постоянной скорости и постоянной нагрузки. Уравнение, приведенное в табл. 4, использовалось для определения износа при соответствующей постоянной нагрузке. Влияние нормальной нагрузки на характер износа образцов *PO1*, *PO2* и *PO3* при постоянной скорости 600 об/мин и влияние скорости на характер износа образцов *PO1*, *PO2* и *PO3* при постоянной нормальной нагрузке 600 Н отражено на рис. 10, *a* и *б* соответственно. Нагрузка варьировалась от 400 Н до 800 Н с постоянным приращением 50 Н.





Fig. 10. Effect of normal load at constant speed of 600 rpm (*a*) and effect of speed at constant normal load of 600 N (δ) on wear behavior of *PO*1, *PO*2 and *PO*3 specimens

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Было отмечено, что при постоянной скорости 600 об/мин материал РО1 показал меньший износ по сравнению с РО2 и РО3. Наименьшее значение износа для РО1 составило 2328 мкм, а наибольшее зафиксировано на уровне 2513 мкм. Для РО2 наименьшее значение износа составило 3008 мкм, а наибольшее – 3407 мкм. Для РОЗ наименьшее значение износа составило 2595 мкм, а наибольшее – 3023 мкм. Скорость износа неуклонно возрастала, увеличившись в 1,08, 1,25 и 1,11 раза при повышении нагрузки для образцов РО1, РО2 и РО3 соответственно. РО1 показал более стабильный характер износа по сравнению с РО2 и РО3. В основном это было связано с формированием стабильной пленки переноса, которая четко наблюдается на изображениях дорожек износа при испытании материала РО1, показанных в табл. 3. Более высокая производительность РО1 также была связана с углом направления печати FDM (т. е. 0°). Кроме того, материал РО1 (как показано на рис. 11) с углом направления печати 0° показал превосходную прочность на растяжение и сжатие – в первую очередь потому, что направление печати совпадало с направлением приложения нагрузки. В этом положении слои материала имеют постоянную толщину и большую длину в направлении РО1, что, вероятно, улучшает связь между слоями материала, в конечном итоге снижая износ.

Кроме того, в случае материалов PO2 и PO3 направление печати составляет 45° и перпендикулярно направлению нагрузки. На сцепление слоев оказывают влияние нагрузка и тепло, выделяемое во время работы [14]. В результате не образуется стабильная пленка переноса. Это также подтверждается изображениями дорожек износа для материалов PO2 и PO3, показанными в табл. 3. В случае PO2 наблюдалась неравномерная пленка переноса, что привело к плохой износостойкости. Следует также отметить, что сцепление слоев оказалось слабым в образцах, изготовленных с углом направления печати от 30° до 60° [14, 26].

Схематическое изображение направления печати и направления приложения нормальной нагрузки, действующей на штифт во время испытания, показано на рис. 11. Видно, что в случае материала *PO*2 нагрузка, действующая на штифт, делится на две составляющие. ГоризонТЕХНОЛОГИЯ



Рис. 11. Схема направления печати и направления приложения нормальной нагрузки, действующей на штифт во время испытания



тальная составляющая пытается ослабить связь между слоями, в результате чего в системе появляется вибрация и из-за этого не формируется стабильная пленка переноса, что приводит к большему износу *PO2*. В случае *PO3* это явление не наблюдалось, поэтому эффективность *PO3* выше, чем *PO2*. Однако следует отметить, что прочность соединения слоев в материале *PO3* меньше, чем в *PO1*, поэтому его эффективность ниже, чем эффективность *PO1*.

Значения нормальной нагрузки и скорости в уравнениях из табл. 4 для материалов РО1, РО2 и РО3 свидетельствуют о том, что износ в большей степени зависит от нормальной нагрузки, чем от скорости скольжения. Чтобы иметь четкое представление о влиянии входных параметров на износ, с использованием приведенных в табл. 4 эмпирических уравнений были построены трехмерные графики для износа, изменяющегося в зависимости от нормальной нагрузки и скорости скольжения. Трехмерные кривые поверхности построены путем изменения двух параметров процесса одновременно при сохранении третьего параметра постоянным в среднем значении диапазонов параметров, как показано в табл. 1. Трехмерные графики, отражающие изменение износа, показаны на рис. 12, а-в, где отражено изменение износа в зависимости от нормальной нагрузки и скорости для РО1, РО2 и РОЗ соответственно. В ходе исследования



Рис. 12. Трехмерные графики, показывающие изменение износа в зависимости от нормальной нагрузки и частоты вращения для *PO1* (*a*), *PO2* (*б*) и *PO3* (*в*)

Fig. 12. 3D graphs showing the change in wear depending on the normal load and rotation speed for *PO*1 (*a*), $PO2(\delta)$ and $PO3(\epsilon)$

было обнаружено влияние взаимодействия параметров процесса и угла направления печати на скорость износа PLA в паре трения с нержавеющей сталью SS 316.

Видно, что износ увеличивается с ростом скорости и нормальной нагрузки. Однако увеличение износа станет более заметным при более высоких параметрах процесса. Скорость и нормальную нагрузку можно рассматривать как наиболее значимые параметры, влияющие на износ. Это также может быть подтверждено более высоким значением показателя степени для скорости и нагрузки (табл. 4). Настоящее исследование показывает, что износ заметно зависит от скорости, особенно при более высоких значениях нормальной нагрузки.

Серый реляционный анализ (алгоритм реляционного анализа серых систем, GRA) – это метод оптимизации множественных откликов, который применялся при оценке производи-

тельности различных сложных приложений с ограниченной информацией. Он широко используется для измерения степени взаимосвязи между последовательностями с помощью серой реляционной оценки. Процедура для GRA описана выше в методологии. В настоящем исследовании входными факторами были нормальная нагрузка и скорость, тогда как GRA проведен для износа материалов PO1, PO2 и PO3. Линейная нормализация экспериментальных результатов для износа была основана на подходе «чем меньше, тем лучше». Эксперименты проводились для различных входных параметров в соответствии с табл. 1 для образцов РО1, РО2 и РОЗ. Всего было проведено 39 экспериментов, из которых эксперименты 1-13 - для РО1, 14-26 для PO2 и остальные – для PO3. В соответствии с процедурой GRA нормализации отклика $(x_i(k))$ была определена последовательность отклонения ($\Delta 0_{.}$) и серый реляционный коэффи-



циент (GRC) для износа. Значения $x_i(k)$, $\Delta 0_i$ и GRC для износа приведены в табл. 5. Более высокий GRC указывает на то, что соответствующие экспериментальные условия являются оптимальными. В целом материал *PO*1 продемонстрировал превосходные характеристики по сравнению с *PO*2 и *PO*3. Однако *PO*2 продемонстрировал плохие характеристики. Оптимальными значениями нормальной нагрузки и скорости оказались 600 H и 451 об/мин. Компоненты PLA, напечатанные методом FDM с углом направления печати 0°, наиболее подходят для деталей, подверженных износу, за ними следуют компоненты с углом направления печати 90°. Компоненты, изготовленные с углом направления печати 45°, не следует применять.

> Таблица 5 Table 5

№ эксперимента	Направление	Износ, мкм	$x_i(k)$	0,	GRC
1	PO1	2394	0,84	0,16	0,758
2	PO1	2178	1	0	1
3	PO1	2234	0,96	0,04	0,926
4	PO1	2398	0,84	0,16	0,758
5	PO1	2367	0,86	0,14	0,781
6	PO1	2429	0,82	0,18	0,735
7	PO1	2208	0,98	0,02	0,962
8	PO1	2320	0,9	0,1	0,833
9	PO1	2398	0,84	0,16	0,758
10	PO1	2367	0,86	0,14	0,781
11	PO1	2214	0,97	0,03	0,943
12	PO1	2391	0,84	0,16	0,758
13	PO1	2502	0,76	0,24	0,676
14	PO2	3293	0,18	0,82	0,379
15	PO2	3101	0,32	0,68	0,424
16	PO2	2877	0,49	0,51	0,495
17	PO2	3267	0,2	0,8	0,385
18	PO2	3012	0,39	0,61	0,45
19	PO2	3539	0	1	0,333
20	PO2	2896	0,47	0,53	0,485
21	PO2	3106	0,32	0,68	0,424
22	PO2	3148	0,29	0,71	0,413
23	PO2	3178	0,27	0,73	0,407
24	PO2	3273	0,2	0,8	0,385
25	PO2	3388	0,11	0,89	0,36
26	PO2	3147	0,29	0,71	0,413
27	PO3	3012	0,39	0,61	0,45
28	PO3	2683	0,63	0,37	0,575
29	PO3	2598	0,69	0,31	0,617
30	PO3	2796	0,55	0,45	0,526
31	PO3	2825	0,52	0,48	0,51
32	PO3	3201	0,25	0,75	0,4
33	PO3	2575	0,71	0,29	0,633
34	PO3	2867	0,49	0,51	0,495

Значения GRC для всех экспериментов GRC values for all experiments

№ эксперимента	Направление	Износ, мкм	$x_i(k)$	0,	GRC
35	PO3	2864	0,5	0,5	0,5
36	PO3	2854	0,5	0,5	0,5
37	PO3	2701	0,62	0,38	0,568
38	PO3	3056	0,35	0,65	0,435
39	PO3	2910	0,46	0,54	0,481

Окончание табл.	5
The End Table	5

Выводы

В настоящем исследовании продемонстрированы характеристики износа PLA-материала в паре трения с нержавеющей сталью SS 316 для определения оптимальных параметров. Печать FDM использовалась для создания образца с различным направлением печати (0°, 45°, 90°). Эксперименты проводились по схеме трения «штифт – диск» при различной нагрузке и скорости. На основе эксперимента разработана математическая модель. Кроме того, для определения оптимальных параметров использовался серый реляционный анализ, метод оптимизации множественных ответов. Уникальность этого метода в том, что он применяется при оценке эффективности различных сложных систем с недостаточной информацией.

Ниже приведены выводы, сделанные в ходе исследования.

- Исследование PLA-материала, полученного методом FDM с различным направлением печати, показывает, что горизонтально напечатанные штифты имеют меньший износ, чем вертикально напечатанные. Наибольший износ характерен для штифтов, напечатанных под углом 45°.

- Отмечено, что на износ в значительной степени влияет скорость; в меньшей степени влияет нагрузка. Это также подтверждается более высокими значениями показателя степени для скорости и нагрузки. Заметное увеличение износа наблюдалось при более высоких параметрах процесса.

 Образец PLA, напечатанный методом FDM с углом направления печати 0° (PO1), показал меньший износ; больший износ характерен для образца с углом направления печати 90° (PO3). Это в основном связано с высокой прочностью соединения слоев вдоль направления печати для PO1. Образец с направлением печати 45° (PO2) показал плохую износостойкость из-за термиче-

ского размягчения. Оптимальными параметрами для РО1 оказались нагрузка 600 Н и 451 об/мин, что было определено с помощью многопараметрического метода серого реляционного анализа.

-В разработанной экспериментальной математической модели коэффициент корреляции (R²) составил 0,9244, 0,928 и 0,95 для PO1, PO2 и РОЗ соответственно. Эти модели можно использовать для прогнозирования износа напечатанного методом FDM материала PLA в паре трения с нержавеющей сталью SS 316.

– Результаты исследования будут полезны при 3D-печати PLA-биоматериала для применения в тазобедренном суставе.

Список литературы

1. Ventola C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses // Pharmacy and Therapeutics Journal: Peer Review. - 2014. - Vol. 39 (10). -P. 704–711.

2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Direct digital manufacturing//Additive Manufacturing Technologies. -2nd ed. - New York: Springer, 2015. - P. 375-397. -DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3 16.

3. Patil N.A., Njuguna J., Kandasubramanian B. UHMWPE for biomedical applications: performance and functionalization // European Polymer Journal. -2020. - Vol. 125. - P. 109529. - DOI: 10.1016/j. eurpolymj.2020.109529.

4. Kurtz S.M. Primer on UHMWPE // UHMWPE biomaterials handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical. -3rd ed. - Amsterdam: Elsevier, 2016. - P. 1-6.

5. Lewis G. Properties of crosslinked ultra-highmolecular-weight polyethylene // Biomaterials. 2001. - Vol. 22 (4). - P. 371-401. - DOI: 10.1016/ S0142-9612(00)00195-2.

6. Lubrication and wear of ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacements / A. Wang, A. Essner, V. Polineni, C. Stark, J. Dumbleton // Tribology International. - 1998. - Vol. 31. - P. 17-33. -DOI: 10.1016/S0301-679X (98)00005-X.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

7. Yousuf J.M., Mohsin A.A. Enhancing wear rate of high-density polyethylene (HDPE) by adding ceramic particles to propose an option for artificial hip joint liner // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 561. – P. 012071. – DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012071.

8. Relationship between polyethylene wear and osteolysis in hips with a second-generation porouscoated cementless cup after seven years of follow-up / K.F. Orishimo, A.M. Claus, C.J. Sychterz, C.A. Engh // The Journal of Bone & Joint Surgery. – 2003. – Vol. 85 (6). – P. 1095–1099. – DOI: 10.2106/00004623-200306000-00018.

9. Mechanical and tribological performance of HDPE matrix reinforced by hybrid Gr/TiO_2 NPs for hip joint replacement / A. Nabhan, G. Sherif, R. Abouzeid, M. Taha // Journal of Functional Biomaterials. – 2023. – Vol. 14 (3). – P. 140. – DOI: 10.3390/jfb14030140.

10. Wear mechanism and debris analysis of PEEK as an alternative to CoCrMo in the femoral component of total knee replacement / X. Zhang, T. Zhang, K. Chen, H. Xu, C. Feng, D. Zhang // Friction. – 2023. – Vol. 11. – P. 1845–1861. – DOI: 10.1007/s40544-022-0700-z.

11. Posterolateral or direct lateral surgical approach for hemiarthroplasty after a hip fracture: a randomized clinical trial alongside a natural experiment/M.C.J.M. Tol, N.W. Willigenburg, A.J. Rasker, H.C. Willems, T. Gosens, M. Heetveld, M.G.M. Schotanus, B. Eggen, M. Kormos, S.L. van der Pas, A. van der Vaart, J.C. Goslings, R.W. Poolman // JAMA Network Open. – 2024. – Vol. 7 (1). – P. e2350765. – DOI: 10.1001/ jamanetworkopen.2023.50765.

12. 3D printing for hip implant applications: a review / O. Obinna, I. Stachurek, B. Kandasubramanian, J. Njuguna // Polymers (Basel). – 2020. – Vol. 12 (11). – P. 2682. – DOI: 10.3390/polym12112682.

13. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries / S. Bhagia, K. Bornani, R. Agarwal, A. Satlewal, J. Ďurkovič, R. Lagaňa, M. Bhagia, C.G. Yoo, X. Zhao, V. Kunc, Y. Pu, S. Ozcan, A.J. Ragauskas // Applied Materials Today. – 2021. – Vol. 24. – P. 101078. – DOI: 10.1016/j. apmt.2021.101078.

14. Biochar reinforced PLA composite for fused deposition modelling (FDM): a parametric study on mechanical performance / P. Anerao, A. Kulkarni, Y. Munde, A. Shinde, O. Das // Composites, Part C: Open Access. – 2023. – Vol. 12. – P. 100406. – DOI: 10.1016/j. jcomc.2023.100406.

15. Comparative analysis of drop impact resistance for different polymer based materials used for hearing aid casing / A. Gosavi, A. Kulkarni, Y. Dama, A. Deshpande, B. Jogi // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 49. – P. 2433–2441. – DOI: 10.1016/j. matpr.2021.09.519.

16. *Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S.* Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing process for engineering design features: a study and recommendations // Communications on Applied Nonlinear Analysis. – 2024. – Vol. 31 (1s). – P. 94–105. – DOI: 10.52783/cana.v31.559.

17. FDM technology and the effect of printing parameters on the tensile strength of ABS parts / M. Daly, M. Tarfaoui, M. Chihi, C. Bouraoui // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 126 (11–12). – P. 5307–5323. – DOI: 10.1007/s00170-023-11486-y.

18. Effect of process parameter on tensile properties of FDM printed PLA/L. Sandanamsamy, J. Mogan, K. Rajan, W.S.W. Harun, I. Ishak, F.R.M. Romlay, M. Samykano, K. Kadirgama // Materials Today: Proceedings. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.217.

19. *Eryildiz M*. Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3D-printed PLA parts: an experimental investigation // European Mechanical Science. – 2021. – Vol. 5 (3). – P. 116–120. – DOI: 10.26701/ems.881254.

20. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection / J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez // Materials & Design. – 2017. – Vol. 124. – P. 143–157. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.

21. Explainable AI techniques for comprehensive analysis of the relationship between process parameters and material properties in FDM-based 3D-printed biocomposites / N. Kharate, P. Anerao, A. Kulkarni, M. Abdullah // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – Vol. 8 (4). – P. 171. – DOI: 10.3390/jmmp8040171.

22. Experimental investigation of dry sliding wear behaviour of jute/epoxy and jute/glass/epoxy hybrids using Taguchi approach / A. Paturkar, A. Mache, A. Deshpande, A. Kulkarni // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5 (11). – P. 23974–23983. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.190.

23. Satkar A.R., Mache A., Kulkarni A. Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/ epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 59 (1). – P. 734–741. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.464.

24. Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S. Investigation of flexural properties of glass-Kevlar hybrid composite // European Journal of Engineering and Technology Research. – 2018. – Vol. 1. – P. 25–29. – DOI: 10.24018/ejeng.2016.1.1.90.

CM

25. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2311 (1). – P. 070030. – DOI: 10.1063/5.0035408.

26. Чинчаникар С. Моделирование характеристик износа при скольжении композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), армированного углеродным волокном, в паре трения с SS304 (12X18H10T) // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 40–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

27. Pawade R.S., Joshi S.S. Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA) // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 56 (1–4). – P. 57–62. – DOI: 10.1007/s00170-011-3183-z.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).



OBRABOTKA METALLOV

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2024 vol. 26 no. 4 pp. 19–40 ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online) DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40



Impact of print orientation on wear behavior in FDM printed PLA Biomaterial: Study for hip-joint implant

Yogiraj Dama^{1, a, *}, Bhagwan Jogi^{1, b}, Raju Pawade^{1, c}, Atul Kulkarni^{2, d}

¹ Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Lonere, Raigad, Maharashtra, 402103, India
² Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Maharashtra, Pune - 411048, India

^{*a*} ⁽¹⁾ https://orcid.org/0009-0008-5404-4347, ⁽²⁾ yogirajdama@dbatu.ac.in; ^{*b*} ⁽¹⁾ https://orcid.org/0000-0003-2099-7533, ⁽²⁾ bfjogi@dbatu.ac.in; ^{*c*} ⁽¹⁾ https://orcid.org/0000-0002-6452-6349, ⁽²⁾ atul.kulkarni@viit.ac.in

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history: Received: 18 August 2024 Revised: 10 September 2024 Accepted: 17 September 2024 Available online: 15 December 2024

Keywords: 3D Printing Biomaterials FDM Implant Print orientation PLA Wear behavior

Introduction: hip joint replacement surgery involves replacing the damaged joint with an implant that can re-create the joint's articulation functionality. 3D printing technology is more promising than the traditional manufacturing process when it comes to producing more complex parts and shapes. The goal of the current research project is to determine how quickly biomaterial implant can be manufactured using 3D printing for hip-joint replacement by studying the wear rate of parts manufactured using different printing orientations. Although there are several additive manufacturing technologies, fuse deposition modeling (FDM) technology has had a significant impact on healthcare, automotive industry, etc. This is mainly due to the adaptability of different polymer-based composite materials and its cost-effectiveness. Such 3D printed polymers need to be further studied to evaluate the wear rate depending on different 3D printing orientations. Polylactic acid (PLA) biomaterials were extensively studied to determine its suitability for use as hip joint materials. Purpose of the work: in this work, an experimental study was carried out on the effect of printing orientation on dry sliding wear of a polylactic acid (PLA) material obtained by fused deposition modeling (FDM) technology using the pin-on-disk (SS 316) scheme. In addition, experimental and empirical models are developed to predict the performance taking into account the influence of load and sliding speed. Grey relational analysis was used to determine the optimal parameters. The methods of investigation: the FDM printing was used to manufacture pins using different printing orientations. Printing direction refers to printing at angles of 0°, 45°, and 90°, while all other 3D printing parameters remained unchanged. Wear testing was performed using the pin-on-disk kinematic scheme. During the experiments, the normal pin load and disk rotation speed were varied. The experiments were methodically designed to study the effect of input parameters on the specific wear rate. About 13 experiments were conducted for each printing orientation with a friction path of 4 kilometers, in the load range of 400-800 N, at a sliding speed of 450-750 rpm. Result and discussion: the study provides important results especially regarding the direction of 3D printing of components. It was found that the lowest sliding wear was observed for the pin printed at an angle of 0°, while slightly higher wear was observed for the pin printed at an angle of 90°. The layer bonding in the pin printed at an angle of 45° deformed under higher load, mainly due to an increase in temperature. The low bond strength in the pin printed at an angle of 45° resulted in high sliding wear. The optimal result was achieved at a sliding speed of 451 rpm and a load of 600 N. The results of the study are very useful for choosing materials for 3D printing of biomedical implants, medical and industrial products.

For citation: Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R., Kulkarni A.P. Impact of print orientation on wear behavior in FDM printed PLA Biomaterial: Study for hip-joint implant. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 19–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40. (In Russian).

References

1. Ventola C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics Journal: Peer Review*, 2014, vol. 39 (10), pp. 704–711.

* Corresponding author Dama Yogiraj Basavraj, Research Scholar Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Lonere, Raigad, 402103, Maharashtra, India Tel.: +91-9860384360, e-mail: yogirajdama@dbatu.ac.in

CM

2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Direct digital manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*. 2nd ed. New York, Springer, 2015, pp. 375–397. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3 16.

3. Patil N.A., Njuguna J., Kandasubramanian B. UHMWPE for biomedical applications: performance and functionalization. *European Polymer Journal*, 2020, vol. 125, p. 09529. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.109529.

4. Kurtz S.M. Primer on UHMWPE. UHMWPE biomaterials handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical. 3rd ed. Amsterdam, Elsevier, 2016, pp. 1–6.

5. Lewis G. Properties of crosslinked ultra-high-molecular-weight polyethylene. *Biomaterials*, 2001, vol. 22 (4), pp. 371–401. DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00195-2.

6. Wang A., Essner A., Polineni V., Stark C., Dumbleton J. Lubrication and wear of ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacements. *Tribology International*, 1998, vol. 31, pp. 17–33. DOI: 10.1016/S0301-679X (98)00005-X.

7. Yousuf J.M., Mohsin A.A. Enhancing wear rate of high-density polyethylene (HDPE) by adding ceramic particles to propose an option for artificial hip joint liner. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 561, p. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012071.

8. Orishimo K.F., Claus A.M., Sychterz C.J., Engh C.A. Relationship between polyethylene wear and osteolysis in hips with a second-generation porous-coated cementless cup after seven years of follow-up. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 2003, vol. 85 (6), pp. 1095–1099. DOI: 10.2106/00004623-200306000-00018.

9. Nabhan A., Sherif G., Abouzeid R., Taha M. Mechanical and tribological performance of HDPE matrix reinforced by hybrid Gr/TiO₂ NPs for hip joint replacement. *Journal of Functional Biomaterials*, 2023, vol. 14 (3), p. 140. DOI: 10.3390/jfb14030140.

10. Zhang X., Zhang T., Chen K., Xu H., Feng C., Zhang D. Wear mechanism and debris analysis of PEEK as an alternative to CoCrMo in the femoral component of total knee replacement. *Friction*, 2023, vol. 11, pp. 1845–1861. DOI: 10.1007/s40544-022-0700-z.

11. Tol M.C.J.M., Willigenburg N.W., Rasker A.J., Willems H.C., Gosens T., Heetveld M., Schotanus M.G.M., Eggen B., Kormos M., Pas S.L. van der, Vaart A. van der, Goslings J.C., Poolman R.W. Posterolateral or direct lateral surgical approach for hemiarthroplasty after a hip fracture: a randomized clinical trial alongside a natural experiment. *JAMA Network Open*, 2024, vol. 7 (1), p. e2350765. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2023.50765.

12. Obinna O., Stachurek I., Kandasubramanian B., Njuguna J. 3D printing for hip implant applications: a review. *Polymers (Basel)*, 2020, vol. 12 (11), p. 2682. DOI: 10.3390/polym12112682.

13. Bhagia S., Bornani K., Agarwal R., Satlewal A., Ďurkovič J., Lagaňa R., Bhagia M., Yoo C.G., Zhao X., Kunc V., Pu Y., Ozcan S., Ragauskas A.J. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. *Applied Materials Today*, 2021, vol. 24, p. 101078. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101078.

14. Anerao P., Kulkarni A., Munde Y., Shinde A., Das O. Biochar reinforced PLA composite for fused deposition modelling (FDM): a parametric study on mechanical performance. *Composites, Part C: Open Access*, 2023, vol. 12, p. 100406. DOI: 10.1016/j.jcomc.2023.100406.

15. Gosavi A., Kulkarni A., Dama Y., Deshpande A., Jogi B. Comparative analysis of drop impact resistance for different polymer based materials used for hearing aid casing. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 49, pp. 2433–2441. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.519.

16. Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S. Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing process for engineering design features: a study and recommendations. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 2024, vol. 31 (1s), pp. 94–105. DOI: 10.52783/cana.v31.559.

17. Daly M., Tarfaoui M., Chihi M., Bouraoui C. FDM technology and the effect of printing parameters on the tensile strength of ABS parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 126 (11–12), pp. 5307–5323. DOI: 10.1007/s00170-023-11486-y.

18. Sandanamsamy L., Mogan J., Rajan K., Harun W.S.W., Ishak I., Romlay F.R.M., Samykano M., Kadirgama K. Effect of process parameter on tensile properties of FDM printed PLA. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.217.

19. Eryildiz M. Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3D-printed PLA parts: an experimental investigation. *European Mechanical Science*, 2021, vol. 5 (3), pp. 116–120. DOI: 10.26701/ ems.881254.

20. Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 2017, vol. 124, pp. 143–157. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.

OBRABOTKA METALLOV

21. Kharate N., Anerao P., Kulkarni A., Abdullah M. Explainable AI techniques for comprehensive analysis of the relationship between process parameters and material properties in FDM-based 3D-printed biocomposites. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (4), p. 171. DOI: 10.3390/jmmp8040171.

22. Paturkar A., Mache A., Deshpande A., Kulkarni A. Experimental investigation of dry sliding wear behaviour of jute/epoxy and jute/glass/epoxy hybrids using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (11), pp. 23974–23983. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.190.

23. Satkar A.R., Mache A., Kulkarni A. Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 59 (1), pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.464.

24. Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S. Investigation of flexural properties of glass-Kevlar hybrid composite. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2018, vol. 1, pp. 25–29. DOI: 10.24018/ ejeng.2016.1.1.90.

25. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2311 (1), p. 070030. DOI: 10.1063/5.0035408.

26. Chinchanikar S. Modeling of sliding wear characteristics of Polytetrafluoroethylene (PTFE) composite reinforced with carbon fiber against SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 40–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

27. Pawade R.S., Joshi S.S. Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 56 (1–4), pp. 57–62. DOI: 10.1007/s00170-011-3183-z.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).