

## БИОПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭНДОПРОТЕЗОВ СУСТАВОВ: ОСОБЕННОСТИ РЕЦЕПТУРЫ И МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ

А. А. Кашперов, И. А. Галушкин, А. А. Жукова

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель Ж. В. Кадолич

*Обоснована целесообразность создания композиционного полимерного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного неорганическими микро-частицами: графитом и ферритом бария. Оптимизировано содержание наполнителя по критериям прочности. Показана целесообразность формирования в зоне трения физических полей, моделирующих биополе сустава. Предложена модель изнашивания разработанного полимерного композиционного материала трения для эндопротезов суставов.*

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, графит, феррит бария.

Все виды движений в искусственных суставах осуществляются с помощью узлов трения, которые должны работать *in vivo* много лет без отказов и ремонта. Однако, как показывает медицинский опыт [1], пары трения эндопротезов традиционно изготавливают из жестких конструкционных материалов, не позволяющих реализовать биофизические механизмы смазки, что приводит к необходимости повторных операций через существенно непродолжительный период времени. Среди возможных причин подобной ситуации можно выделить следующие. Во-первых, в используемых в настоящее время эндопротезах невозможно регулировать электрический потенциал поверхностей трения, вследствие чего остаются невостребованными уникальные трибологические свойства естественной смазки – синовиальной жидкости – как полярной смазочной среды. Во-вторых, при замещении эндопротезом патологически измененного сустава практически одномоментно ликвидируется непосредственный очаг патологии, однако в системе нервной регуляции сустава образуется так называемая «немая зона». Наличие большого искусственного образования – эндопротеза – не может остаться «незамеченным» для организма в целом. К сожалению, при хирургическом вмешательстве происходит нарушение не только целостности сустава, но и механизма функционирования естественных биофизических полей [2].

Цель работы – разработка полимерного материала трения для эндопротезов, моделирующего триботехнические характеристики и естественные механизмы изнашивания в суставах.

**Материалы и методы проведения испытаний.** Для решения поставленных задач исходили из следующих соображений: 1) основу материала должен составлять сертифицированный для ортопедии материал; 2) наполнителем, упрочняющим основу, должен быть твердый смазочный материал; 3) частицы наполнителя должны создавать в зоне трения физическое поле, способное регулировать распределение смазочного слоя и частиц износа. В экспериментах использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки Hostalen GUR 4120. Выбор материала матрицы обоснован его активным применением в медицинской практике [1, 3]. В качестве наполнителей были выбраны феррит бария (ФБ) и коллоидный графит марки С1. Следует отметить, что ФБ используется как носитель магнитного поля, способный к специфическому регулированию физического состояния смазочного слоя в зоне трения. С целью надежного закрепления неорганических частиц в полимерной мат-

рице (степень наполнения СВМПЭ смесью наполнителей составляла 1 : 1 по массе) на поверхности частиц наполнителя механохимическим способом создавали активные центры [4]. Активацию наполнителя осуществляли путем механического измельчения частиц в среде неорганической кислоты. Образцы для механических испытаний формировали методом «горячего» прессования при температуре 180 °С и выдержкой под давлением 10–12 МПа до полного остывания. Исследования деформационно-прочностных характеристик образцов при растяжении проводили на машине Instron.

**Результаты и обсуждения.** Введение в матрицу СВМПЭ 0,01–0,20 мас. % наполнителя практически не оказывает влияния на прочность композита: отклонение значений разрушающего напряжения при растяжении наполненных образцов от среднего значения для чистого СВМПЭ составляет  $\pm 5$  %. Однако даже столь незначительная концентрация неорганических частиц, согласно данным работы [5], будет способствовать улучшению трибологических характеристик, так как частицы коллоидного графита, являющегося твердой смазкой, снижают коэффициент трения. Кроме того, частицы ФБ будут способствовать созданию слабого магнитного поля, имитирующего биополе естественного сустава, которое будет оказывать существенное влияние на формирование смазочного слоя.

Согласно данным работы [6], изнашивание СВМПЭ в паре с гладким металлическим контртелом ( $R_a < 0,02$  мкм) происходит *in vivo* по усталостному механизму. На этапе приработки микровыступы на поверхности трения полимерной детали первыми вступают в контакт с контртелом и изнашиваются. Под образующимися при трении микроучастками касания в полимерной детали концентрируются напряжения. Спустя некоторое время в зонах концентрации напряжений на глубине 10–40 мкм от поверхности трения в полимерной детали образуются микротрещины. При динамическом нагружении искусственного сустава происходит рост подповерхностных трещин, приводящий к откалыванию микронеровностей и значительному повреждению поверхности трения.

Использование при производстве эндопротезов композита на основе СВМПЭ, наполненного графитом и ФБ, изменяет механизм изнашивания. Интерес представляет также ориентация частиц ФБ вдоль поверхности трения образца, если спекание образцов проводить в поле соленоида. Механизм изнашивания такого материала можно описать с помощью следующей модели. В процессе приработки, когда интенсивно изнашиваются микровыступы контактирующих образцов, часть продуктов износа – частицы графита, ФБ и полимера – остается в зоне контакта и вовлекается в процесс трения, а намагниченные частицы ФБ локализуются в микрополостях зоны контакта. Более мелкие частицы графита заполняют пустоты в агломератах из частиц ФБ, образуя «третье тело», стабилизирующее процесс трения. Под микроучастками касания в полимерной детали концентрируются напряжения, но зона их действия значительно меньше из-за заполнения микрополостей в контакте агломератами ФБ и графита. Частицы наполнителя, выступающие из СВМПЭ на поверхность трения, являются своеобразными распределителями напряжений. Благодаря этому уменьшается толщина перенапряженного поверхностного слоя полимерной матрицы. Через некоторое время в зонах концентрации напряжений в подповерхностном слое полимерного образца трения могут возникнуть микротрещины. Уменьшение глубины залегания последних обусловлено увеличением площади фактического контакта и изменением напряженного состояния поверхностного слоя за счет «третьего тела». Откалывание микронеровностей при динамическом нагружении искусствен-

ного сустава с композитным вкладышем приводит к меньшему повреждению поверхности трения, а следовательно, к снижению скорости изнашивания. Наличие магнитного поля и токопроводящих частиц в зоне трения имплантированного эндопротеза определяет оптимальную ориентацию в смазочном слое полярных групп белково-полисахаридных комплексов и жидкокристаллических компонентов естественной смазочной среды (синовиальной жидкости). Это создает благоприятные предпосылки для снижения коэффициента трения в эндопротезе *in vivo*.

#### Литература

1. Пинчук, Л. С. Эндопротезирование суставов: технические и медико-биологические аспекты эндопротезирования / Л. С. Пинчук, В. И. Николаев, Е. А. Цветкова. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2003. – 308 с.
2. Барабаш, И. В. Изменение биоэлектрической активности головного мозга при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава / И. В. Барабаш, А. П. Барабаш, Н. И. Арсентьева // Вестник травматологии и ортопедии имени Н. Н. Приорова. – 2000. – № 1. – С. 36–41.
3. Кашперов, А. А. Материалы для имплантов опорно-двигательного аппарата человека / А. А. Кашперов, Ж. В. Кадолич // Исследования и разработки в области машиностроения : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. для студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2022. – С. 118–120.
4. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А. А. Берлин, С. А. Вольфсон, В. Г. Ошмян, Н. С. Ениколопов. – М. : Химия, 1990. – 240 с.
5. Механические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного неорганическими микрочастицами / Л. С. Пинчук, Ж. В. Кадолич, Е. А. Цветкова, Е. А. Сементовская // Пластические массы. – 2010. – № 12. – С. 49–53.
6. Cooper, J. R. Macroscopic and microscopic wear mechanisms in ultra-high molecular weight polyethylene / J. R. Cooper, D. Dowson, J. Fisher // Wear. – 1993. – Vol. 162-164. – P. 378–384.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПОРОШКА С ПОМОЩЬЮ ВИБРОДОЗАТОРА В ЗОНУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ

**В. Г. Гаврилин**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель С. В. Рогов

*В ходе работы проведено экспериментальное исследование зависимости величины подачи и ее стабильности от угла наклона лотка дозатора и гранулометрических характеристик порошков. Изучена стабильность величины подачи порошка от количества циклов работы дозатора.*

**Ключевые слова:** электромагнитная наплавка, подача, порошковые материалы, вибрация.

Сущность метода ЭМН заключается в совокупном одновременном воздействии на обрабатываемую поверхность детали и ферромагнитный порошок (ФМП), подаваемый в зону наплавки, нескольких видов энергии: электрического тока, внешнего магнитного поля, кругового магнитного поля электрического тока и механической энергии. Для метода характерно то, что обрабатываемая деталь является анодом, а обрабатывающий электрод-инструмент – катодом. При этом между электродом и изделием под действием тока возбуждается искровой заряд, в результате которого происходит расплавление и последующий перенос частиц ферромагнитного порош-