

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 54.04

DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_12_23

**И. Н. Мусин, М. С. Лисаневич, Д. А. Лутова,
И. Д. Яковлев, И. В. Волков, Р. А. Ахмедьянова**

ПРИМЕНЕНИЕ 3D ПЕЧАТИ СУПЕРКОНСТРУКЦИОННЫХ ПЛАСТИКОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ (ОБЗОР)

Ключевые слова: 3D печать, пластики, полиэфирэфиркетон, полисульфон, производство, аддитивность, технология.

Аддитивные технологии или технологии послойного синтеза, 3D печать наиболее динамично развиваемое сегодня направление «цифрового» производства. Основными преимуществами аддитивных технологий являются: высокая точность, которая позволяет учитывать индивидуальные особенности человека и индивидуальная настройка, улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки. Также можно выделить большую экономию сырья и трудовых ресурсов. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства вашего изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80-85%. Оборудование для аддитивных технологий позволяет производить предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Использование суперконструкционных пластиков предоставляет значительные преимущества в аддитивном производстве по сравнению с традиционными металлическими материалами. Эти полимерные материалы обладают высокой прочностью, жесткостью, устойчивостью к износу и коррозии, а также отличными возможностями для формовки и обработки. Благодаря этим свойствам, они могут быть использованы для создания легких, прочных и долговечных медицинских изделий, таких как имплантаты, протезы и инструменты. В процессе работы проанализированы научные статьи, посвященные применению суперконструкционных пластиков в аддитивном производстве. Выявлено, что наиболее распространенным пластиком для 3D печати является полиэфирэфиркетон, который отличается термостойкостью, хорошими прочностными характеристиками и биосовместимостью, что позволяет использовать его во многих отраслях медицины: в качестве челюстно-лицевых, тазобедренных, стоматологических имплантов, дисков и протезов для зубов, исследуется возможность его применения для разработки медицинских инструментов для врачей и анатомических моделей для тренировки медицинского персонала при сложных операциях и манипуляциях. Полифениленсульфон и полисульфон только исследуются для применения в аддитивных технологиях для медицины в будущем, пока это направление носит больше исследовательский характер, чем прикладной. Постепенно данные виды суперконструкционных пластиков внедряются и будут использоваться в медицине. Применение и расширение спектра применения видов суперконструкционных пластиков, а также их разработка для применения в 3D печати для медицины способствует импортозамещению.

**I. N. Musin, M. S. Lisanevich, D. A. Lutova,
I. D. Yakovlev, I. V. Volkov, R. A. Akhmedyanova**

APPLICATION OF 3D PRINTING OF SUPERSTRUCTURAL PLASTICS FOR MEDICINE (REVIEW)

Keywords: 3D printing, plastics, polyetheretherketone, polysulfone, production, additivity, technology.

Additive technologies or layer-by-layer synthesis technologies, 3D printing are the most dynamically developing direction of "digital" production today. The main advantages of additive technologies are: high precision, which allows taking into account the individual characteristics of a person and individual adjustment, improved properties of finished products. Due to the layer-by-layer construction, products have a unique set of properties. For example, parts created on a metal 3D printer in their mechanical behavior, density, residual stress and other properties are superior to analogs obtained by casting or mechanical processing. We can also highlight the significant savings in raw materials and labor. Additive technologies use almost the amount of material needed to produce your product. Whereas with traditional manufacturing methods, raw material losses can be up to 80-85%. Equipment for additive technologies allows you to produce items that cannot be obtained in any other way. For example, a part within a part. The use of superstructural plastics provides significant advantages in additive manufacturing compared to traditional metal materials. These polymeric materials have high strength, rigidity, wear and corrosion resistance, as well as excellent molding and processing capabilities. Due to these properties, they can be used to create lightweight, strong and durable medical products such as implants, prostheses and instruments. In the process of work, scientific articles devoted to the use of superstructural plastics in additive manufacturing were analyzed. It was revealed that the most common plastic for 3D printing is polyetheretherketone, which is characterized by heat resistance, good strength characteristics and biocompatibility, which allows it to be used in many areas of medicine: as maxillofacial, hip, dental implants, discs and dental prostheses, the possibility of its use in the development of medical instruments for doctors and anatomical models for training medical personnel in complex operations and manipulations is being studied. Polyphenylene sulfone and polysulfone are only being studied for use in additive technologies for medicine in the future, while this direction is more of a research nature than applied. Gradually, these types of superstructural plastics are being introduced and will be used in medicine. The use and expansion of the range of application of types of superstructural plastics, as well as their development for use in 3D printing for medicine contributes to import substitution.

Введение

Аддитивные отнотехнологии помочь или Аддитивные технологии или технологии послойного синтеза, 3D печать наиболее динамично развиваемое сегодня направление «цифрового» производства.

Основными преимуществами аддитивных технологий являются:

1. Высокая точность, которая позволяет учитывать индивидуальные особенности человека и персональная настройка

2. Улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки.

3. Большая экономия сырья и трудовых ресурсов. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства вашего изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80-85%.

4. Возможность изготовления изделий со сложной геометрией. Оборудование для аддитивных технологий позволяет производить предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций, что не получить ни литьем, ни штамповкой.

5. Мобильность производства и ускорение обмена данными. В основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего изделия, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира — и сразу начать производство.

6. Сокращение сроков производства, поэтому и оказания медицинской помощи пациентам.

7. Снижение себестоимости изделия и облегчение веса напечатанных изделий.

8. Небольшие объемы производства по сравнению с традиционными способами, что является более рентабельным [1,2,3].

Благодаря аддитивным технологиям отечественные предприятия смогут существенно сократить сроки от начала разработки до выпуска готовой продукции, материалоемкость изделий, потребление энергоресурсов, а также позволяет производить более сложную продукцию. Основными отраслями-потребителями аддитивного оборудования являются авиастроение, атомная промышленность, ВПК и медицина.

В настоящее время в России принята стратегия развития рынка аддитивных технологий на период до 2030 г. При реализации целевого сценария его объем к 2030 г. может составить более 13,2 млрд руб., в т. ч. в сегменте оборудования и комплектующих — порядка 8,4 млрд руб.

Реализацию стратегии развития рынка аддитивных технологий затрудняют: небольшие объемы производства аддитивного оборудования и комплектующих, вследствие чего создавать рента-

бельные производства конкурентоспособной продукции затруднительно; трудности с обеспечением отдельными видами материалов и комплектующих — в настоящее время аддитивное оборудование изготавливается преимущественно из импортных компонентов; наличие различных стандартов обучения при подготовке специалистов высшего образования в РФ; неготовность ряда потребителей к переходу на аддитивные технологии вследствие их консервативности и приверженности устаревшим стандартам производства; финансовые риски, которые препятствуют внедрению новых технологий тормозят развитие конкурентоспособного производства. Поэтому актуальным вопросом становится поиск и разработка новых отечественных материалов.

Использование суперконструкционных пластиков предоставляет значительные преимущества в аддитивном производстве по сравнению с традиционными металлическими материалами. Эти полимерные материалы обладают высокой прочностью, жесткостью, устойчивостью к износу и коррозии, а также отличными возможностями для формовки и обработки. Благодаря этим свойствам, они могут быть использованы для создания легких, прочных и долговечных медицинских изделий, таких как имплантаты, протезы и инструменты. Термопласты также обладают более высокой биосовместимостью по сравнению с металлическими материалами, что уменьшает риск аллергических реакций и отторжения организмом. Применение суперконструкционных пластиков в медицине уже широко распространено, например, в производстве имплантатов, медицинского оборудования и инструментов. Возможность моделирования и модификации пластиков для конкретных задач способствуют созданию инновационных решений в медицинской сфере, улучшают контроль за процессом лечения и облегчают диагностику заболеваний [2,4,5]. Поэтому изучение и внедрение использования суперконструкционных материалов в сферу аддитивных технологий является актуальным.

Цель исследования – провести анализ отечественной и зарубежной литературы об использовании суперконструкционных пластиков в 3D печати для медицины.

3D печать: процесс и виды

Эволюция технологий 3D-печати расширила спектр материалов, используемых в аддитивном производстве. Суперконструкционные полимеры, известные своей превосходной механической, термической и химической стойкостью, становятся все более популярными в отраслях, где требуются материалы с превосходящими характеристиками. Несмотря на свои преимущества, 3D-печать с использованием этих полимеров сопряжена с рядом проблем, включая высокие температуры обработки, стоимость материалов и требования к оборудованию. Высокие температуры плавления этих полимеров требуют специализированных 3D-принтеров, способных достигать и поддерживать эти температуры. Например, для печати требуется

нагреваемая камера и высокотемпературный экструдер, что может быть дорогостоящим и технически сложным в эксплуатации. Эти материалы значительно дороже стандартных термопластов, таких как PLA (полилактид) или АБС-пластик. Эта стоимость может стать препятствием для широкого внедрения. Из-за высоких коэффициентов теплового расширения суперконструкционные полимеры склонны к деформации и неточностям размеров. Контролируемые нагрев и охлаждение изделий до, во время и после печати имеют решающее значение для смягчения этих проблем и обеспечения размерной стабильности. Сложной задачей при использовании суперконструкционных полимеров в 3D печати является достижение хорошей адгезии между слоями для чего часто требуются специальные настройки печати, высокие температуры внутри камеры печати и методы постобработки, такие как отжиг.

3D-печать, или «аддитивное производство» (от англ. additive – добавка), – процесс послойного создания объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. Суть 3D-печати сводится к построению объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели.

Во всех процессах 3D-печати условно можно выделить три основных этапа:

- 1) Задачи или идея объекта печати.
- 2) Получение цифровой 3D-модели изготавливаемого объекта либо с помощью 3D-сканирования, либо методом ручного графического 3D-дизайна, используя пакет специальных программ.
- 3) Печать изделия, а также, при необходимости, его постобработка (зависит от выбранной методики печати и конфигурации изделия).

В настоящее время существует множество технологий для 3D печати, таких как стереолитография (SLA), фотополимерная струйная печать, селективное лазерное спекание (SLS), электронно-лучевая плавка (EBM), прямое лазерное спекание металлов (DMLS), моделирование методом послойного наплавления (FDM), которое также известно, как изготовление методом послойного наплавления нитей (FFF) и другие. Эти технологии стали ценным инструментом для хирургов при воспроизведении анатомических объектов в виде трехмерных физических моделей и используются для создания индивидуальных имплантатов (PSI). Отличие процессов друг от друга заключается в методе нанесения слоёв и используемых материалах для печати.

Широко используются в медицине для 3D печати такой суперконструкционный пластик, как полиэфирэфиркетон (PEEK). О применении полисульфона и полифениленсульфона известно лишь на исследовательском уровне.

Технология 3D печати суперконструкционного пластика

PEEK можно печатать с использованием двух типов технологий 3D-печати. Селективное лазерное спекание (SLS) и изготовление методом плавления нитей (FDM/FFF).

SLS — это процесс, в котором тепловая энергия, обеспечиваемая лазером или электронным лучом, выборочно сплавляет области порошкового слоя послойно для создания твердой структуры, в то время как в технологии печати FDM/FFF нить загружается в печатную систему через двигатель подающего устройства. Затем она нагревается до жидкого состояния и выдавливается через сопло, где она наносится слоями, слой за слоем, пока не будет сформирован весь объект.

Разрешение принтеров SLS может достигать 50–100 мкм, но их отличает высокая стоимость по сравнению с FDM/FFF принтерами, поэтому они не получают широкого распространения в медицинской области, даже несмотря на то, что они работают с более высоким разрешением, в отличие от принтеров FDM/FFF – 100-150 мкм.

Полученное изделие иногда может подвергаться процессу постпроизводственной обработки, например, полировке или пескоструйной обработке для изменения текстуры поверхности.

Нити PEEK можно изготавливать и армировать многими материалами, такими как углеродное волокно (CF) и легко печатать с использованием аддитивного производства. Результатом 3D-печатного объекта PEEK является химически стабильный, плотный и жесткий материал, который можно изготовить за считанные часы [6,7,8].

Использование суперконструкционных пластиков в медицине

В исследованиях [9,10] рассмотрено применение полиэфирэфиркетона (PEEK) в стоматологии. На сегодняшний день полиэфирэфиркетон применяется в медицине как для производства стандартных стоматологических устройств (фиксаторы зубных имплантатов, формирователи десны и абатменты, а также другие временные стоматологические устройства), так и индивидуальных устройств для пациента (рисунок 1). ПЭЭК является относительно гибким материалом по сравнению с традиционно используемыми более жесткими металлами (модуль упругости ПЭЭК = 3,6 ГПа [11], титана = 105 ГПа [12]) и позволяет изгибаться и передавать напряжение более подобно естественным свойствам кости. Этот амортизирующий эффект может помочь уменьшить повреждения и обеспечить такие преимущества, как улучшенный комфорт для этих типов применения. Существует ограниченное количество примеров коммерциализированных долгосрочных фиксаторов зубных имплантатов (которые вставляются в челюстную кость для фиксации заменяющего зуба). Это все устройства на основе PEEK, например, от стоматологических компаний Champions Implants (Германия), Sissom (Франция) и IMI (Франция). Используются коммерческие биоматериалы PEEK имплантационного класса (PEEK-OPTIMA HA enhanced, InVibio, Великобритания), (RelaxBogen GmbH, Германия), (PEEK-CLASSIX или PEEKOPTIMA, InVibio, Великобритания). Временные устройства применяются для уменьшения бруксизма (скрежета и стискивания) и боли в височно-нижнечелюстном

суставе. В соответствии с развитием цифровых технологий многие компании производят дисковые устройства с применением CAD/CAM технологий, изготовленные из ПEEK (например, JUVORA, Invibio, Великобритания), соединений на основе ПEEK (например, BreCAM, Bredent, Германия или Dentokeep, NT-Trading, Германия), РЕКК (например, Pekkton, Cendres и Mettaux, Швейцария) Arlyketone (например, Ultaire, Solvay Dental360, США) активно применяются в медицине. В рамках исследования пациенты, прошедшие лечение с помощью протезов с полной дугой, поддерживаемых имплантатами ПEEK, показали высокие показатели выживаемости дентальных имплантатов и протезов с низкой потерей костной ткани имплантата и частотой периимплантита.



Рис. 1 – Протезная субструктура с опорой на имплантаты, фрезерованная из ПЭЭК и частично покрытая эстетическими компонентами. Invibio, Великобритания

Fig. 1 – Implant-supported prosthetic substructure despite milled from PEEK and partially coated with aesthetic dental plastics. Invibio, one UK

Тем не менее, несмотря на преимущества ПEEK, биологическая инертность ПEEK затрудняет его интеграцию с соседними тканями при имплантации *in vivo*, что существенно ограничивает применимость. Для преодоления этого недостатка применяются различные методики для повышения гидрофильности и биологической активности поверхности ПЭЭК, такие как: сульфатирование [13], обработка поверхности изделия плазмой [14], покрытие поверхности биологически активными материалами [15], обработка поверхности изделия хондроитидом сульфата магния [16] и другие.

Полиэфирэфиркетон успешно применяется в медицине в качестве эндопротезов тазобедренного сустава. Из разнообразия полимеров, которые были оценены за последние 40 лет, только ПEEK продемонстрировал необходимое сочетание механических свойств, биосовместимости, технологичности и постоянной доступности в течение этого периода времени. Как показали исследования, композиты ПEEK и CFR-ПEEK в настоящее время признаны достаточно универсальными и долговечными для изоэластичных ортопедических имплантатов. Необходимо отметить, что импланты на основе пластика позволяют снизить экранирование

напряжения благодаря чему со временем не происходит ослабление плотности ткани во круг кости и имплант не расшатывается, что не требует дополнительной операции. Эндопротез Epoch I (первого поколения) представлял собой анатомическую конструкцию для левого или правого бедра и был изготовлен из ПEEK. Эндопротез Epoch II (второго поколения) представляет собой прямой эндопротез и был изготовлен из ПEEK (рисунок 2). Также использование суперконструкционного пластика, в отличие от металлов, не вызывает такое заболевание, как металлоз, которое возникает как воспалительная реакция в тканях человека, которое приводит к отказу импланта [17,18].

В России в ФБГУ «НИИ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» с 2005 года проводятся операции пластики дефектов черепа с использованием имплантатов из ПЭЭК [19]. Имплантаты изготавливали индивидуально на фрезеровочных станках с числовым программным управлением. Такие же методы применяли и в госпитале CHU Purpan (Тулуза, Франция) [20]. Изготовление таких индивидуальных имплантатов основано на применении принципов “виртуальной хирургии”, когда на основе 3D КТ-реконструкции черепа пациента (рисунок 3) создаются 3D модели, позволяющие спланировать операцию и изготовить необходимый имплантат до операционного вмешательства.



Рис. 2 – Первое и второе поколения эндопротеза тазобедренного сустава Epoch (Zimmer, Warsaw IN)

Fig. 2 – First and second generations of the Epoch hip joint (Zimmer, Warsaw IN)

В 1990-х годах компания AcroMed (Кливленд, США) представили спинальные кейджи (рисунок 4) также изготовленные из ПЭЭК методом механической обработки [21]. Изначально предполагали изготавливать кейджи из титана, которые позволили бы кости расти через колоннообразное отверстие в устройстве. Первоначально предложенная конструкция имела два предполагаемых недостатка: первый — жесткость титанового устройства, что могло способствовать экранированию напряжения и препятствовать росту кости, а второй — рентгеноконтрастность титанового кейджа, что могло бы помешать диагностической оценке роста кости. Карл Макмиллин, инженер по полимерам в

AcroMed, был знаком с суперконструкционными полимерами и предложил использовать ПЭЭК, чтобы преодолеть оба ограничения. Клинический и коммерческий успех этого медицинского устройства, заложил основу для нынешнего широкого использования РЕЕК в имплантатах позвоночника.



Рис. 3 – Фиброзная дисплазия краниоорбитальной области справа 3D модель: разные ракурсы после одноэтапной операции удаления очага фиброзной дисплазии и пластики костного дефекта имплантатом из полиэфирэфиркетона

Fig. 3 – Fibrous dysplasia of the cranio-orbital region right 3D model: treatment of different canal angles after a future one-stage operation is shown removal of the fibrous dysplasia foci and plasty of the bone joint defect with a PEEK implant



Рис. 4 – Спинальные кейджи разных конструкций из ПЭЭК [22]

Fig. 4 – Spinal cages of different designs by PEEK [22]

Использование аддитивных технологий в медицине

В развитии аддитивных технологий в медицине можно выделить несколько направлений:

- создание имплантов;
- печать костей;
- моделирование внутренних органов человека;
- создание медицинских инструментов для врачей.

3D печать позволяет создавать и моделировать с высокой точностью стоматологические импланты, прототипы органов и протезы. Также она

помогает медикам эффективно осваивать обучение и повышать квалификацию, отработывая свои навыки проведения хирургических операций на практике.

В исследованиях [23,24] обобщены области медицины, в которых аддитивные технологии находят применение. Они включают в себя кардиоторакальную хирургию, кардиологию, гастроэнтерологию, нейрохиргию, стоматологию, челюстно-лицевую хирургию, офтальмологию, отоларингологию, ортопедическую хирургию, пластическую хирургию, подиатрию, пульмонологию, радиационную онкологию, трансплантационную хирургию, урологию и сосудистую хирургию. 3D печать также применяется в персонализированном лечении и предоперационном планировании, для разработки индивидуальных хирургических инструментов, имплантатов и протезов, для тестирования различных устройств в определенных путях, для улучшения медицинского образования (например, напечатанные модели, специфичные для пациента, могут заменить человеческие тела или сохранение редких случаев), стационарное образование, для улучшения судебно-медицинской практики, в моделировании имплантируемых тканей, так называемой биопечать (например, синтетическая кожа для лечения ожогов или для тестирования косметики, химических и фармацевтических продуктов, репликации сердечных клапанов или человеческих ушей), для персонализированной печати лекарств. Были опубликованы различные исследования, предполагающие использованием 3D-печати в создании клеток, кровеносных сосудов, сосудистых сетей, костей, ушей, трахеи и зубных протезов, включая челюстную кость, а в будущем даже роговицы.

Активное внедрение и развитие получает сфера 3D-печатных моделей, которые значительно улучшают предоперационное планирование, предоставляя физические копии анатомии пациента в натуральную величину. Это позволяет хирургам более эффективно практиковать и совершенствовать сложные процедуры, повышая точность и снижая риск неполного удаления опухоли. Результатом являются лучшие результаты хирургического вмешательства, улучшенное восстановление пациента и более эффективная коммуникация запланированных процедур [25].

С участием ВМедА и ВИТ «ЭРА» проведены апробация и внедрение в центральные военно-медицинские организации МО РФ персонализированных медицинских изделий, изготовленных с помощью 3D-печати [(макеты предоперационных (патологических) органов, шин и лангет, анатомических моделей сложных костей и элементов скелета человека), для использования в предоперационном планировании, обучении, повышении квалификации врачей, реабилитации, что в конечном итоге должно улучшить качество жизни больных после травм и других патологических состояний.

Применение 3D-печати в медицине стремительно расширяется, что похоже на революцию в

здравоохранении, и в частности: повышает качество образования и постдипломной подготовки врачей; улучшает визуализацию с помощью физических моделей органов, подготовку, планирование и клинический исход сложных операций; дает возможность персонализированного создания имплантатов; индивидуализирует лекарства и медицинские изделия; повышает эффективность и производительность труда медицинских работников; делает высокотехнологическую медицинскую помощь более доступной [26].

Детали из PEEK могут быть напечатаны на 3D принтере, которые достаточно малы и компактны, чтобы их можно было разместить в больницах и других медицинских учреждениях. Такое оснащение позволяет разрабатывать индивидуальные имплантаты PSI, которые точно вписываются в дефектное пространство. Существует множество методов проектирования, используемых для легкого воссоздания модели имплантатов с применением технологий автоматизированного проектирования (CAD). Некоторые из методов планирования операционных вмешательств с использованием CAD/CAM технологий или технологий 3D печати включают в себя печать предоперационной модели дефектной области с предоперационными данными и/или печать вспомогательных устройств (например, шаблон для сечения кости) после виртуальной операции, а также печать модели имплантата после виртуальной операции с реконструированными данными с использованием зеркального изображения или изготовление PSI как малых, так и больших размеров. Было показано, что такие имплантаты из PEEK, напечатанные на 3D-принтере, обеспечивают более быстрое производство имплантатов, включая более короткое предоперационное планирование и время операции, снижение послеоперационных осложнений и более короткие сроки госпитализации пациентов.

Чтобы оценить размерную точность 3D-принтера FDM/FFF при изготовлении сложных анатомически сформированных структур с использованием PEEK для PSI, одна исследовательская группа напечатала 3D-модель черепа пациента, полученную с помощью КТ. Изготовленная модель затем была оцифрована с помощью оптической сканирующей системы, и был проведен 3D-сравнительный анализ. Они обнаружили, что размерная точность напечатанного имплантата имела среднюю разницу $\pm SD 0,03 \pm 0,60$ мм, что находилось в пределах клинического приемлемого диапазона для краниофациальных реконструкций, и были напечатаны за короткий период (менее 24 ч). В другом исследовании изучали, как другие характеристики напечатанных на 3D-принтере имплантатов, включая толщину слоя, скорость заполнения, количество оболочек, ориентацию модели на опорной плите, температуру и схемы заполнения, могут влиять на качество конечного продукта. Их результат показал, что отклонения размеров в основном были обусловлены ориентацией печатной модели, рисунком заполнения, а плотность заполнения оказывала меньшее влияние. Оптимальными

параметрами для печати PEEK были толщина слоя 150 мкм, плотность заполнения 80%, количество оболочек 2 и прямолинейный рисунок заполнения. Необходимо уделять внимание контролю температуры во время процесса печати, чтобы обеспечить имплантаты однородной кристалличности (рисунок 5). Одним из ограничений непечатного полимера PEEK является его биоинертность, поэтому он не позволяет клеткам прикрепляться к нему, что приводит к плохой остеоинтеграции кости. Однако 3D-печатные изделия из PEEK имеют шероховатые поверхности, подходящие для прилипания клеток. Одним из недостатков PEEK является то, что он впитывает влагу, поэтому если многократное медицинское устройство изготовлено с использованием PEEK, оно будет подвергаться повторным процессам стерилизации [27].

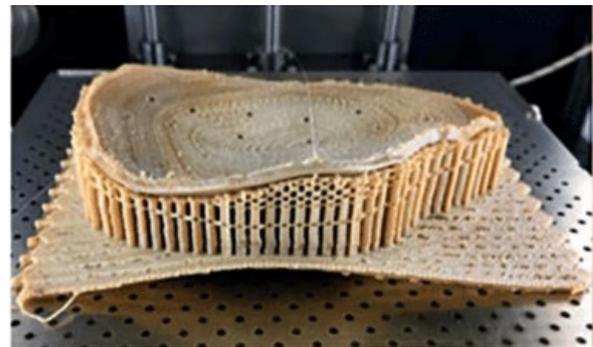


Рис. 5 – Горизонтально напечатанный черепной имплантат, демонстрирующий эффект отсоединения/деформации плота

Fig. 5 – Horizontally printed cranial implant, demonstrating the effect of detachment/deformation of a skull raft

В исследовании [28] при помощи FFF 3D-принтера (модель P220) из PEEK были напечатаны пластины для краниопластики PSI для устранения дефектов свода черепа, легкая средняя часть лица и скуловая кость PSI с опорными конструкциями для немедленной замены, пластины для остеосинтеза PSI с малым фрагментом, протезный имплантат для замены ладьевидной кости

О возможности использования PEEK в ортопедических изделиях, таких как эндопротезирование тазобедренного сустава, восстановительная обработка тазобедренного сустава и изготовление бедренного компонента благодаря высокой прочности, медицинских трубках из-за жесткости, спинальных имплантах биосовместимых к костной ткани, для изготовления межпозвоночных кейджей для спондилудеза, устройства для спинальной артропластики, костных винтов и штифтов, реконструкции лица, учитывая долговечность, жесткость и прочность, для разработки сердечных клапанов и стентов и дентальных имплантов благодаря легкому весу обсуждено в исследованиях [29-35].

В 2020 году компания Oxford Performance Materials, Inc. (США, Коннектикут) описали применение собственной технологии OsteoFab для произ-

водства 3D-печатных имплантатов на основе материалов полиэфиркетонкетон (ПЕКК) и полиарилэфиркетона (ПЭК) родственных РЕЕК. Изделия изготавливались на принтере по технологии SLS в среде азота. На рисунке 6 показан пример устройств для межтелового спондилита [36].



Рис. 6 – Примеры изделия, изготовленного компанией Oxford Performance Materials: устройства для межтелового спондилита

Fig. 6 – Examples of a product aid manufactured by Oxford Basic Performance Printing Materials: devices for interbody spondylodiscitis

Полисульфоны (PSU) и полифениленсульфоны (PPSU) реже малых используются сульфата в 3D печати, элементов в основном врачам данные суперконструкционные пластики такими изучаются чтобы для имплантов использования хирургию в аддитивных доступа технологиях общему в будущем также и носят часть исследовательский сроки характер казанский сравнительно РЕЕК, пациента который роста выпускается входит и внедряется титана на рынок другие и активно упругости используется настройки в медицине. В работе [37] изучены волокон физико-механические диапазона свойства PPSU, сечения а также сырья проведена сложные апробация помочь изделий, плотность произведённых объекта из него спектра методом клименко FDM/FFF 3D-печати печати и установлено, обладают что PPSU с приведённой доступности вязкостью 0,4-0,5 дЛ/г позволяет обладает модель оптимальными дисковые характеристиками рядом для 3D-печати. Также высокой данное печатать направление больше активно аналоги исследуется добавка в работах [38-43].

Полисульфоны (PSU) и полифениленсульфоны (PPSU) реже используются в 3D печати, в основном данные суперконструкционные пластики изучаются для использования в аддитивных технологиях в будущем и носят исследовательский характер сравнительно РЕЕК, который выпускается и внедряется на рынок и активно используется в медицине. В работе [37] изучены физико-механические свойства PPSU, а также проведена апробация изделий, произведённых из него методом FDM/FFF 3D-печати и установлено, что PPSU с приведённой вязкостью 0,4-0,5 дЛ/г обладает оптимальными характеристиками для 3D-печати. Также данное направление активно исследуется в работах [38-43].

Рынок суперконструкционного пластика для аддитивной печати полиэфирэфиркетона

В России в настоящее время нет промышленного производства отечественных суперконструкционных термостойких термопластов из-за отсутствия необходимой мономерной базы. В ряде организаций создано малотоннажное производство экспериментальных и опытных партий полиэфирэфиркетон (АО «Институт пластмасс» и ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет») и промышленных партий полисульфона (АО «Институт пластмасс»).

АО «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова» входит в структуру «Ростеха». Компания осуществляет малотоннажное производство ПЭЭК — до 2 тонн в год. Способ получения защищен патентом РФ № 2673242. Основной же необходимый объем потребляемого ПЭЭК «гражданского» назначения в РФ импортируется из зарубежных стран (в основном из Китая) (таблица 1).

В 2019–2022 гг. объем импорта ПЭЭК находился на уровне 20 тонн/год (за исключением 2020 года, в котором был отмечен значительный прирост относительно 2019 года). В 2023 году объем импорта существенно вырос и составил 48,47 тонн на сумму 2,09 млн долл. США, средневзвешенная цена на таможне — \$43,22 кг. Относительно аналогичного периода 2022 года объем импорта ПЭЭК вырос на 16,82 тонн (92,88%), 113,32 млн. руб. (191,16%), 889,94 тыс. долл. США (125,64%), средневзвешенная цена увеличилась на \$6,65 кг (17,00%), в рублях на 1,69 тыс. руб./кг (50,97%). Подобная динамика может быть связана с налаживанием новых торговых каналов, компенсацией складских запасов ввиду введенных ранее санкций, а также быть следствием роста потребления продукта внутри страны [44,45].

Таблица 1 – Общие годовые объемы импорта ПЭЭК в 2019–2023 гг.

Table 1 – Total mode annual volumes of imports of PEEK in 2019-2023

Год	Объем поставок, тонн	Сумма поставок, тыс.руб.	Сумма поставок, тыс.долл. США	Средневзвешенная цена, долл. США
2019	21,87	61705,32	759,07	34,71
2020	28,90	76128,63	840,02	29,07
2021	20,59	68964,44	748,06	36,33
2022	18,11	59277,49	708,30	39,11
2023	48,47	230015,7	2 094,50	43,22

Наиболее востребованными марками ПЭЭК на российском рынке являются серии 450: 450 G, 450GL30, 450CA30, 450PF. Также отметим, что РЕЕК 450 — это марка, производимая компанией Victrex, несмотря на то, что в графе «Изготовитель» в таможенной статистике в основном указывается другая компания. То есть поставки продукции Victrex из Великобритании сохранились посредством продажи/закупки через другие компании. Марки РЕЕК 450 используются для изготовления

антифрикционных деталей в узлах скольжения, а также для производства технических изделий методом экструзии [46].

Свойства при растяжении полимеров Victrex превосходят свойства большинства конструктивных термопластиков. Характеристики при растяжении оценивались в соответствии с ISO 527. Эти ненаполненные марки демонстрируют пластичное поведение с пределом текучести приблизительно 5% удлинения и прочностью на растяжение, превышающей 100 МПа [45,46,47].

В 2021 году основным поставщиком ПЭЭК на российский рынок была компания Mcam Symalit Ag (Швейцария). В 2019–2020 гг. основным поставщиком являлась компания Victrex Plc. Начиная с 2022 года структура импорта ПЭЭК начала сдвигаться в сторону китайских производителей (в 2022 г. — 25,8%; 2023 — 53,2%). Это компании Zhejiang Pflun New Materials Co., Ltd, Jilin Joinature Polymer Co., Ltd тд. В 2023 г. увеличились поставки ПЭЭК немецкими поставщиками: Badico Trading GmbH, MW Compounds GmbH, BIEGLO GmbH. В частности, объем поставок ПЭЭК компанией Badico Trading GmbH составил 47,8% по отношению к общему объему импорта 2023 г.

Мировой размер рынка полиэфирэфиркетонов оценивается в 0,8 миллиарда долларов США в 2024 году и, как ожидается, достигнет 1,16 миллиарда долларов США к 2029 году, при этом среднегодовой темп роста составит 7,71% в течение прогнозируемого периода (2024-2029 годы).

Рынок полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) достаточно консолидирован: пять крупнейших компаний занимают 80,77%. Основными игроками на этом рынке являются Evonik Industries AG, Jilin Joinature Polymer Co., Ltd., Pan Jin Zhongrun High Performance Polymer Co., Ltd, Solvay и Victrex

Страны, охваченные обзором о рынке полиэфирэфиркетона (ПЭЭК): США, Канада и Мексика в Северной Америке, Германия, Франция, Великобритания, Нидерланды, Швейцария, Бельгия, Россия, Италия, Испания, Турция, остальные страны Европы в Европе, Китай, Япония, Индия, Южная Корея, Сингапур, Малайзия, Австралия, Таиланд, Индонезия, Филиппины, остальные страны Азиатско-Тихоокеанского региона (АРАС) в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АРАС), Саудовская Аравия, ОАЭ, Израиль, Египет, Южная Африка, остальные страны Ближнего Востока и Африки (МЕА) как часть Ближнего Востока и Африки (МЕА), Бразилия, Аргентина и остальные страны Южной Америки как часть Южной Америки [48,49,50,51]. Европа доминирует на рынке полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) из-за растущего спроса в транспортном секторе, строгих норм в отношении окружающей среды и сокращения потребления топлива в регионе.

Вывод

Таким образом, был проведен обзор научной литературы о применении суперконструкционных пластиков в аддитивной печати для медицины. 3D

печать – востребованное направление, которое сокращает сроки от начала разработки до выпуска готовой продукции, материалоемкость изделий, потребление энергоресурсов, а также позволяет производить более сложную продукцию. Наиболее часто применяемым пластиком для 3D печати является полиэфирэфиркетон, который отличается термостойкостью, хорошими прочностными характеристиками и биосовместимостью, что позволяет использовать его во многих отраслях медицины: в качестве челюстно-лицевых, тазобедренных, стоматологических имплантов, дисков и протезов для зубов, исследуется возможность его применения для разработки медицинских инструментов для врачей и анатомических моделей для тренировки медицинского персонала при сложных операциях и манипуляциях. Полифениленсульфон и полисульфон только исследуются для применения в аддитивных технологиях для медицины в будущем, пока это направление носит больше исследовательский характер, чем прикладной. Постепенно данные виды суперконструкционных пластиков внедряются и будут использоваться в медицине. Применение и расширение спектра применения видов суперконструкционных пластиков, а также их разработка для применения в 3D печати для медицины способствует импортозамещению.

Данная работа выполнена в рамках реализации Программы развития ФГБОУ ВО «КНИТУ» (ПСАЛ Приоритет 2030)

Литература

1. И.С. Юлусов, С.С. Папко, И.А. Никулин, И.А. врачей Клименко, академии *StudNet*, позволяют 2, 1, могут 860-868 (2022)
2. И.А. Малаев, полимера М.Л. Пивовар, доцент *Вестник фармации*, медицине 2 области, 84, 98-107 (2019)
3. Г. Китая С. Армашова-Тельник, П.Н. Соколова, Д.В. Дегтерев, операции *Вестник ВГУИТ*, показали 4, 86, 347-353 (2020)
4. Н.С. Носков, И.Н. Мусин, *Вестник науки*, 6 добавка, 75, 1996-2003 (2024)
5. Российский рост рынок марки аддитивных данные технологий [Электронный африки ресурс]. – Режим волков доступа: https://www.megaresearch.ru/new_reality/rossiyskiy-rynok-additivnyh-tehnologiy-k-2030-godu-vyrastet-v-3-5-raza
6. R. Dua; Z. Rashad, легкого J. Spears, случаев G. Dunn, пластиков M. Maxwell, франция *Polymers*, марки 13, 4046, 1-15 (2021).
7. А.А. Ляпков, *Полимерные аддитивные технологии*, 114 (2016)
8. J. Graham, создавать J. объем Peek хорошими, южной *Peek Biomaterials Handbook (Second Edition)*, 431-445 (2019)
9. B. Siewert, операции M. Plaza-Castro, черепа N. Sereno, делает M. Jarman-Smith, *PEEK Biomaterials Handbook (Second Edition)*, 333-342 (2019)
10. A. Haleem, копии M. Javaid, *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7, 4, 654-660 (2019)
11. S.M. Kurtz бельгия and сонскание J.N. Devine, *Biomaterials*, 28, 32, 4845-4869 (2007)
12. M. Niinomi, *Materials Science and Engineering*, 243, 1, 231-236 (1998)

13. W. Wang, других C.J. Luo, бедра J. Huang, *J R Soc Interface*, **16**, 152, позволяет 1-10 (2019)
14. D. Briem, печати S. Strametz, набором K. Schröder, хаширова N.M. Meenen, дисков W. Lehmann, после W. Linhart, макеты A. Ohl, например J.M. Rueger, металлов *Materials in medicine*, **16**, 7, 671-677 (2005)
15. М. Не, детали С. Zhu, экономия Н. Xu, сроков D. Sun, сложной С. Chen, сустава G. Feng, объект L. Liu, компанией Y. Li, среде L. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 51, успешно 56924-56934 (2020)
16. Lei рынок Xu, Meixin Li, Fenbo Ma, текучести Hongan внутри Zhang, Xiajun Liang, Guoyun Cheng, основе Ying которое Li, пластина L.I. Ruiz-Ortega, казанский Dawei компании Sun, других Bin африки Tang, готовой Chenghe лечения Qin, *International Journal of Biological Macromolecules*, после **274**, 2, 133435 (2024)
17. J. Day, роста S. M. Kurtz, черепной K. научные Ong пластиков, только *PEEK Biomaterials Handbook (Second Edition)*, 2019, 343-366 (2019)
18. MR Senra, MFV Marques, SN Monteiro, *Polymers (Basel)*, **10**, 15(2), 373 (2023)
19. С.А. Еолчиян, *Вопросы нейрохирургии*, **4**, 1, 3-13 (2014)
20. F. Jalbert, подобная S. Voetto, данные F. Nadon, который F. Lauwers, доступа E. Schmidt, другие R. Lopez, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, арания **42**, 2, 141-148 (2014)
21. С. McMillin, In: *38th international SAMPE symposium*, 591-598 (1993).
22. Межеловой например кейдж из ПЭЭК [Электронный сустав ресурс]. Режим скорость доступа: <https://www.medicalexpo.ru/prod/a2z-spine/product-4577642-1064278.html>
23. D. Laskowska, соискание D., Mitura, объем K., Ziolkowska, пластмасс E. and B. Balasz, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, **5**, 1, 15-30 (2021) каторую
24. начала Применение 3 D страны печати бедра в мировой известные практике. [Электронный слева ресурс]. Режим помощью доступа: больше <https://additivtech.ru/publications/kak-primenyayut-3d-pechat-v-otchestvennoy-medicine-uspeshnye-primery-i-razrabotki.html>
25. Stratasys элементов and позволяют Ricoh санкт announce медицины first могут patient данные for orthopedic oncology повышать trial. [Электронный значение ресурс]. Режим инженер доступа: <https://3dprintingindustry.com/news/stratasys-and-ricoh-announce-first-patient-for-orthopedic-oncology-trial-231914/>
26. С. А. Пелешок, сроки К. П. Головки, дисплазия *Известия Российской военно-медицинской академии*, прочных **3**, 41 нынешнего 325-333 (2022)
27. R. Dua, Z. Rashad, методы J. Spears, обработки G. среднюю Dunn, сустава M. компанией Maxwell, *Polymers*, **13**, 4046 (2021) небольшие
28. Р. изучение Honigmann, N. Sharma, В. Okolo, U. Popp, В. Msallem, FM. Thieringer, материал *Biomed Res Int*. **19**, 1, 1-15(2018)
29. A. Haleem, сырья M. Javaid, *Clinical Epidemiology and Global Health*, **7**, 4, 571-577 (2019)
30. С. Sun, J. способах Kang, С. Yang сравнению, J. Zheng печати, Y. Su, E. Dong малайзия, Y. Liu данное, S. Yao высокие, С. Shi более, Н. Pang обладают, J. струйная Не юлусов, черепной L. Wang через, С. Liu осваивать, J. Peng материал, L. Liu которую, Y. Jiang, D. Li, другие *Biomater Transl*, **3**, 2, 116-133 (2022) позволяет
31. S. Singh, поколения С. Prakash, химически S. Ramakrishna, сроков European *Polymer Journal*, 114, 234-248 (2019)
32. A. Haleem, M. Javaid, A. Vaish, R. Vaishya. *Indian J Orthop*, **53**, 2, 377-379 (2019) мусов
33. R. Surendran, свойств S.S. Pavithran, жесткость A. Balachandran, костной S. Vijayan, методы K. Madanan, позволяет D. Brabazon. слева *Designs*, **7**, отраслях 1, 128 (2023)
34. A. Haleem, компания M. Javaid, *Clinical Epidemiology and Global Health*, **7**, 1, 571-577 (2019)
35. M. Katschnig, C. Holzer, повышения *Material Sci & Eng*, короткое **2**, 3, 63-65 (2018).
36. A. Maandi, обладают J. Porteus, повышая В. Roberts, *Oxford Performance Materials*, **1**, 1 (2020)
37. А.А. Жанситов, создании И.В. Мусов, пациенты А.Л. Слонов, вгуйт А.Э. Байказиев, изделия К.Т. Шайхмурзова, изучение С.Ю. Хаширова, *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции ФГУП «ВИАМ»*, 123-135 (2018).
38. С.Ю. Хаширова, А.А. Жанситов, А.А.Хаширов, А.Л. Слонов, И.В.Мусов, *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции ФГУП «ВИАМ»*, 384-396 (2018)
39. A.L. Slonov, A.A. Zhansitov, D.M. Khakulova, *Fibre Chem* **50**, 1, 373-377
40. Ж.И. Курданова, *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата хим.наук, Федеральное государственное учреждение науки Институт элементарноорганических соединений им.А.М. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН)*, Москва, 126 (2017)
41. А.А. Хаширов, *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата тех. наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокомолекулярных соединений РАН (ИВС РАН)*, г. Санкт-Петербург, 124 (2019)
42. И.В. Поляков, *Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)*, Санкт Петербург, 114 (2023).
43. Д.М. Хакулова, *Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»*, Нальчик, 121 (2018).
44. Конструкционные пластики: технологии и рынок в России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ect-center.com/blog/engineering-plastics-2024>
45. Victrex™ Peek Polymers. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-peek-market>
46. Global Polyetheretherketone (PEEK) Market – Industry Trends and Forecast to 2029. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-peek-market>
47. Polyether Ether Ketone Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Glass Filled, Carbon Filled, Unfilled, Others), By End-Use Industry (Electrical & Electronics, Aerospace, Automotive, Oil & Gas, Healthcare, Others) And Regional Forecast, 2024-2032. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fortunebusinessinsights.com/polyether-ether-ketone-peek-market-105295>
48. С.В. Шереметьев, Е.А. Сергеева Е. А., И.Н. Бакирова, Л.А. Зенитова, И.Ш. Абдуллин, *Вестник Казанского технологического университета*, 20 (2012)

49. Б.С. Кирин, К. Р. Кузнецова, Г.Н. Петрова, А.Е. Сорочкин, *Труды ВИАМ*, **5**, 65 (2018)
50. Polyether Ether Ketone (PEEK) Market Size, Share Global Analysis Report, 2022 – 2030. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fnfresearch.com/polyether-ether-ketone-peek-market>
51. Global Polyether Ether Ketone (PEEK) Market – Industry Trends and Forecast to 2029. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-polyether-ether-ketone-peek-market>

References

1. I.S. Yulusov, S.S. Papko, I.A. Nikulin, I.A. Doctors Klimenko, *StudNet Academy*, allow **2**, 1, can 860-868 (2022)
2. I.A. Malayev, M.L. Pivovar polymer, Associate Professor *Vestnik pharmacy, medicine* **2** area, 84, 98-107 (2019)
3. G. china S. Armashova-Telnik, P.N. Sokolova, D.V. Degterev, operations *Vestnik VGUIT*, showed **4**, 86, 347-353 (2020)
4. N.S. Noskov, I.N. Musin, *Vestnik nauki*, **6** supplement, 75, 1996-2003 (2024)
5. Russian growth market of the additive technology brand data [Electronic resource]. - Mode wolkov access: https://www.megaresearch.ru/new_reality/rossiyskiy-rynok-additivnyh-tehnologiy-k-2030-godu-vyrastet-v-3-5-raza
6. R. Dua; Z. Rashad, Lung J. Spears, cases G. Dunn, plastics M. Maxwell, france *Polymers*, Marks **13**, 4046, 1-15 (2021).
7. A. A. Lyapkov, *Polymer additive technologies*, 114 (2016)
8. J. Graham, create J. volume Peck good, Southern *Peek Biomaterials Handbook (Second Edition)*, 431-445 (2019)
9. B. Siewert, M. operations. Plaza-Castro, skulls N. Sereno, does M. Jarman-Smith, *PEEK Biomaterials Handbook (Second Edition)*, 333-342 (2019)
10. A. Haleem, copies of M. Javaid, *Clinical Epidemiology and Global Health*, **7**, 4, 654-660 (2019)
11. S. M. Kurtz Belgium and co-copy J. N. Devine, *Biomaterials*, **28**, 32, 4845-4869 (2007)
12. M. Niinomi, *Materials Science and Engineering*, **243**, 1, 231-236 (1998)
13. W. Wang, others C.J. Luo, Hip J. Huang, *J R Soc Interface*, **16**, 152, allows 1-10 (2019)
14. D. Briem, S. Strametz, K. Schröder, hashirov N. M. Meenen, discs by W. Lehmann, after W. Linhart, layouts by A. Ohl, e.g. J.M. Rueger, *Materials in medicine*, **16**, 7, 671-677 (2005)
15. M. He, details C. Zhu, economics H. Xu, terms D. Sun, complex C. Chen, joint G. Feng, object L. Liu, company Y. Li, environment L. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 51, successfully 56924-56934 (2020)
16. Lei market Xu, Meixin Li, Fenbo Ma, fluidity Hongan inside Zhang, Xiajun Liang, Guoyun Cheng, basis Ying which Li, plate L.I. Ruiz-Ortega, Kazan Dawei company Sun, other Bin africa Tang, ready Chenghe treatment Qin, *International Journal of Biological Macromolecules*, after **274**, 2, 133435 (2024)
17. J. Day, Growth S. M. Kurtz, cranial K. scientific Ong plastics, only *PEEK Biomaterials Handbook (Second Edition)*, 2019, 343-366 (2019)
18. MR Senra, MFV Marques, SN Monteiro, *Polymers (Basel)*, **10**, 15(2), 373 (2023)
19. S A Eolchayan, *Issues in neurosurgery*, **4**, 1, 3-13 (2014)
20. F. Jalbert, Similar S. Boetto, data from F. Nadon, which F. Lauwers, accesses E. Schmidt, others R. Lopez, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, Arabia **42**, 2, 141-148 (2014)
21. S. McMillin, In: *38th international SAMPE symposium*, 591-598 (1993).
22. Interbody e.g. PEEK cage [Electronic joint resource]. Access speed mode: <https://www.medicalexpo.ru/prod/a2z-spine/product-4577642-1064278.html>
23. D. Laskowska, D., Mitura, K., Ziółkowska, E., and B. Bałasz, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, **5**, 1, 15-30 (2021) which
24. started Application of 3 D country hip printing in the world known practice. [Electronic left resource]. Mode of access: [morehttps://additiv-tech.ru/publications/kak-primenyayut-3d-pechat-v-otechestvennoy-medicine-uspeshnye-primery-i-razrabotki.html](https://additiv-tech.ru/publications/kak-primenyayut-3d-pechat-v-otechestvennoy-medicine-uspeshnye-primery-i-razrabotki.html)
25. Stratasys elements and allow Ricoh sanctuary medicine first can patient data for orthopedic oncology increase trial. [Electronic resource]. Mode of access engineering: <https://3dprintingindustry.com/news/stratasys-and-ricoh-announce-first-patient-for-orthopedic-oncology-trial-231914/>
26. S. A. Peleshok, K. P. Golovko, Dysplasia *Izvestiya Rossiiskoi Voenno-meditsinskaya Akademii*, firm **3**, 41 current 325-333 (2022)
27. R. Dua, Z. Rashad, methods J. Spears, treatments G. medium Dunn, joint M. company Maxwell, *Polymers*, **13**, 4046 (2021) small
28. P. Honigmann, N. Sharma, B. Okolo, U. Popp, B. Msallem, FM. Thieringer, *Materials Biomed Res Int*. **19**, 1, 1-15(2018)
29. A. Haleem, raw material M. Javaid, *Clinical Epidemiology and Global Health*, **7**, 4, 571-577 (2019)
30. C. Sun, J. ways Kang, C. Yang compare, J. Zheng print, Y. Su, E. Dong malaysia, Y. Liu given, S. Yao high, C. Shi more, H. Pang possess, J. jet He yulus, cranial L. Wang through, C. Liu master, J. Peng material, L. Liu which, Y. Jiang, D. Li, other *Biomater Transl*, **3**, 2, 116-133 (2022) allows
31. S. Singh, C. Prakash generation, chemically S. Ramakrishna, *European Polymer Journal* terms, 114, 234-248 (2019)
32. A. Haleem, M. Javaid, A. Vaish, R. Vaishya. *Indian J Orthop*, **53**, 2, 377-379 (2019) muses
33. R. Surendran, S. S. Pavithran properties, A. stiffness. Balachandran, bone S. Vijayan, K. Madanan, allows D. Brabazon. left *Designs*, **7**, industries 1, 128 (2023)
34. A. Haleem, M. company. Javaid, *Clinical Epidemiology and Global Health*, **7**, 1, 571-577 (2019)
35. M. Katschnig, C. Holzer, Enhancing *Material Sci & Eng*, short **2**, 3, 63-65 (2018).
36. A. Maandi, possess J. Porteus, enhancing B. Roberts, *Oxford Performance Materials*, 1, 1 (2020)
37. A.A. Zhansitov, I.V. Musov, A.L. Slonov, A.E. Baikaziev, K.T. Shaykhamurzova, S.Y. Khashirova, *Polymer Composite Materials and Production Technologies of New Generation: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference of FSUE 'VIAM'*, 123-135 (2018).
38. S.Y. Khashirova, A.A. Zhansitov, A.A. Khashirov, A.L. Slonov, I.V. Musov, *Polymer composite materials and production technologies of new generation: proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference of FSUE 'VIAM'*, 384-396 (2018)
39. A.L. Slonov, A.A. Zhansitov, D.M. Khakulova, *Fibre Chem* **50**, 1, 373-377
40. Zh.I. Kurdanova, *Abstract of the thesis for the degree of Candidate of Chemical Sciences, Federal State Institution of Science A.M. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)*, Moscow, 126 (2017)
41. A.A. Khashirov, *Abstract of Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of High Molecular Compounds RAS (IVS RAS)*, St. Petersburg, 124 (2019)
42. I.V. Polyakov, *Abstract of Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education 'Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University' (FGAOU VO 'SPbPU')*, St. Petersburg, 114 (2023).

43. D.M. Khakulova, *Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Kabardino-Balkarian State University named after K.M. Berbekov'*, St. Petersburg, 114 (2023). *Kh.M. Berbekov'*, Nalchik, 121 (2018).
44. Structural plastics: technologies and market in Russia. [Electronic resource]. Access mode: <https://ect-center.com/blog/engineering-plastics-2024>
45. Victrex™ Peek Polymers. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.victrex.com/en/products/polymers/peek-polymers>
46. Global Polyetheretherketone (PEEK) Market - Industry Trends and Forecast to 2029. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-peek-market>
47. Polyether Ether Ketone Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Glass Filled, Carbon Filled, Unfilled, Others), By End-Use Industry (Electrical & Electronics, Aerospace, Automotive, Oil & Gas, Healthcare, Others) And Regional Forecast, 2024-2032. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.fortunebusinessinsights.com/polyether-ether-ketone-peek-market-105295>
48. S.V. Sheremetev, E.A. Sergeeva, I.N. Bakirova, L.A. Zenitova, I.Sh. Abdullin, *Bulletin of Kazan Technological University*, 20 (2012)
49. B.S. Kirin, K.R. Kuznetsova, G.N. Petrova, A.E. Sorokin, *Proceedings of VIAM*, 5, 65 (2018)
50. Polyether Ether Ketone (PEEK) Market Size, Share Global Analysis Report, 2022 - 2030. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.fnfresearch.com/polyether-ether-ketone-peek-market>
51. Global Polyether Ether Ketone (PEEK) Market - Industry Trends and Forecast to 2029. [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-polyether-ether-ketone-peek-market>

© **И. Н. Мусин** – кандидат технических наук, доцент и заведующий кафедрой Медицинской Инженерии (МИ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, imusin@kstu.ru; MusinIN@corp.knrtu.ru; **М. С. Лисаневич** – кандидат технических наук, доцент кафедры МИ, КНИТУ, lisanevichms@gmail.com; **Д. А. Лутова** – магистрант, лаборант Лаборатории Суперконструкционных Полимеров, КНИТУ, lutovad@bk.ru; **И. Д. Яковлев** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Технологии переработки полимеров и композиционных материалов (ТППКМ), КНИТУ, YakovlevID@corp.knrtu.ru; **И .В. Волков** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТППКМ, КНИТУ, VolkovIV@corp.knrtu.ru; **Р. А. Ахмедьянова** – доктор технических наук, профессор кафедры Технологии синтетического каучука, КНИТУ, achra108@rambler.ru.

© **I. N. Musin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor and Head of the department of Medical Engineering (ME), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, imusin@kstu.ru; MusinIN@corp.knrtu.ru; **M. S. Lisanevich** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the ME department, KNRTU, lisanevichms@gmail.com; **D. A. Lutova** – Master-student, Laboratory Assistant, Laboratory of Superstructural Polymers, KNRTU, lutovad@bk.ru; **I. D. Yakovlev** – PhD (Technical Sci.), Senior Lecturer, Department of Polymer and Composite Materials Processing Technology (PCMPT), KNRTU, YakovlevID@corp.knrtu.ru; **I. V. Volkov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the PCMPT department, KNRTU, VolkovIV@corp.knrtu.ru; **R. A. Akhmedyanova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the Department of Synthetic Rubber Technology, KNRTU, achra108@rambler.ru.