НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 677.494.674

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОН В ИЗДЕЛИЯХ ДЛЯ НЕЙРОХИРУРГИИ

Русских В.А.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», Пенза, e-mail: dogvlad2014@gmail.com;
ЗАО НПП «МедИнж», Пенза

Рассматривается перспективный материал – полиэфирэфиркетон и его применение в современных изделиях для нейрохирургии. Материал выделяется высокой биосовместимостью, прочностью, устойчивостью к стерилизации и рентгенпрозрачностью, что позволяет активно внедрять его в медицинскую практику. Основные направления использования данного материала включают производство имплантатов для черепно-лицевой хирургии, межтеловых кейджей для позвоночника, инструментов и устройств для операций на центральной нервной системе. При написании статьи было проанализировано 46 источников в период с 2010 до 2025 года, в обзоре указано 25 источников. Преимущества материала заключаются в низкой плотности, отличной коррозионной устойчивости и полном отсутствии взаимодействия с магнитно-резонансными установками. Однако имеются некоторые ограничения, такие как необходимость дополнительной обработки поверхности для улучшения остеоинтеграции с костными структурами организма и сравнительно высокая стоимость изготовления конечных изделий. Использование аддитивных технологий (таких, как селективное лазерное спекание и стереолитография), позволяющих создавать изделия сложной геометрии и индивидуальной формы, открывает новые возможности для оптимизации свойств материалов и повышения эффективности медицинских процедур. Современные модификации материала, включающие добавки биоактивных компонентов (например, гидроксиапатита), способствуют улучшению остеоинтеграционных характеристик и расширяют сферу применения полиэфирэфиркетона в реконструктивной нейрохирургии. Таким образом, исследование демонстрирует значительный потенциал материала для дальнейших разработок и внедрения инновационных решений в медицине, способствуя повышению стандартов качества лечения и комфортности пациентов.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон (PEEK), биосовместимость, нейрохирургия, имплантаты, аддитивные технологии

REVIEW OF THE USE OF POLYETHERETHEREKETONE MATERIAL IN NEUROSURGERY PRODUCTS

Russkikh V.A.

Penza State Technological University, Penza, e-mail: dogvlad2014@gmail.com;
LLC NPP MedEng, Penza

A promising material, polyesteresterketone, and its use in modern products for neurosurgery are being considered. The material stands out for its high biocompatibility, strength, resistance to sterilization and X-ray transparency, which makes it possible to actively introduce it into medical practice. The main uses of this material include the production of implants for craniofacial surgery, interbody cages for the spine, instruments and devices for operations on the central nervous system. When writing the article, 46 sources were analyzed between 2010 and 2025, and 25 sources were included in the review. The advantages of the material are low density, excellent corrosion resistance and complete absence of interaction with magnetic resonance installations. However, there are some limitations, such as the need for additional surface treatment to improve osseointegration with the body's bone structures and the relatively high cost of manufacturing the final products. The use of additive technologies (such as selective laser sintering and stereolithography), which make it possible to create products with complex geometries and individual shapes, opens up new opportunities for optimizing material properties and improving the effectiveness of medical procedures. Modern modifications of the material, including additives of bioactive components (for example, hydroxyapatite), contribute to the improvement of osseointegration characteristics and expand the scope of application of polyesteresterketone in reconstructive neurosurgery. Thus, the study demonstrates the significant potential of the material for further development and implementation of innovative solutions in medicine, contributing to higher standards of quality of treatment and patient comfort.

Keywords: polyetheretherketone (PEEK), biocompatibility, neurosurgery, implants, additive technologies

Введение

Существующее представление о нейрохирургии ставит жесткие рамки в плане требований к биосовместимости, прочности, устойчивости к стерилизации и рентгенпрозрачности материалов, которые используются производителями медицинских изделий [1]. Одним из самых перспективных материалов для дальнейшего использования в широком спектре изделий для нейрохирургии Ziyi Zhang и Junxing Shao из Китайско-Японской объединенной больницы считают полиэфирэфиркетон (PEEK, polyetheretherketone) [2]. Благодаря

особенному сочетанию физико-химических и биомеханических свойств данный полимер постепенно приходит на место традиционных материалов, которые используются в медицинской области, таких как титан и нержавеющая сталь. В большей степени это касается производства имплантатов и различных инструментов [3].

Цель исследования – рассмотреть ключевые свойства материала PEEK, выделить его качественные преимущества по сравнению с популярными материалами, а также выделить основные изделия из данного материала в нейрохирургической практике.

Материалы и методы исследования

При написании статьи было проанализировано 46 источников в период с 2010 до 2025 года, в обзоре указано 25 источников.

Результаты исследования и их обсуждение

Общая характеристика материала PEEK

Этот вид материала относится к группе термопластичных полимеров класса полиакрилкетонов (PAK) [4]. Его строение на молекулярном уровне предоставляет возможность сочетать в себе стойкость к термическому и химическому воздействию с механическими свойствами прочности и жесткости, сравнимыми с металлами [5]. Полиэфирэфиркетон способен эксплуатироваться в высоком температурном диапазоне (до 250 ºС), а также устойчив к методам стерилизации паром и радиацией. Материал способен переносить обработку большинством органических растворителей [6].

Как и любой материал, PEEK обладает своими особенностями:

− высокая механическая прочность (до 4 ГПа составляет модуль упругости);

− абсолютная биосовместимость;

− химическая инертность;

− рентгенпрозрачность;

− возможность использования аддитивных технологий и фрезерования;

− высокая устойчивость к износу [7].

Биосовместимость и остеоинтеграция

Совместимость материала PEEK с органическими тканями и жидкостями была доказана многими клиническими исследованиями и экспериментами. Этот полимер исключает вероятность воспалений острого или хронического характера, а также не оказывает ядовитого влияния на «живые» ткани. По сравнению с металлами, PEEK не вступает в окислительную реакцию и не вызывает обмена ионов в организме [8].

Тем не менее пластик в чистом виде, а точнее его поверхность, плохо взаимодействует с тканью костей. Для того, чтобы решить этот вопрос, разрабатываются и изготавливаются различные модификации:

− с нанесением титана в качестве покрытия поверхности;

− создание микропористости и текстурирования;

− разработка субполимеров на основе PEEK с включением керамического или углеродного наполнения.

Эти способы доработки обеспечивают повышение приживления имплантатов, а также ускоряют восстановление пациента [9].

По этой таблице следует, что полиэфирэфиркетон показывает свои преимущества, что крайне важно в вопросах визуализации при МРТ- и КТ-исследованиях. Кроме того, преимущества демонстрируются в плане снижения веса изделий, а также стойкости к коррозии [13].

Применение PEEK в медицинских изделиях для нейрохирургии

Полиэфирэфиркетон может применяться в различных изделиях медицинского назначения.

− Имплантаты для черепно-лицевой хирургии (рис. 1). Для краниопластики PEEK полезен благодаря своим свойствам прочности и совместимости. Он применяется для восстановления дефектов черепных костей. Изготовленные с использованием аддитивных технологий имплантируемые изделия по данным томографий предоставляют возможность полностью повторить анатомические особенности формы головы пациента и обеспечить прекрасный внешний вид. Изделия из этого материала обладают полной прозрачностью при проведении исследований с использованием рентгеновских волн, а также не создают артефактов на снимках в таких исследованиях [14].

Рис. 1. Черепно-лицевые имплантаты из PEEK BONABYTE
Примечание: составлено автором по данным источников [15]

Сравнение PEEK с традиционными материалами

Свойство	Титан	Нерж. сталь	PEEK
Биосовместимость	Высокая	Средняя	Очень высокая
Рентгенопрозрачность	Нет	Нет	Да
Вес	Высокий	Высокий	Низкий
Жёсткость (ГПа)	~110	~190	~4
Коррозионная устойчивость	Хорошая	Средняя	Отличная
Совместимость с МРТ	Частичная	Ограниченная	Полная

Примечание: составлено автором по данным источников [10-12].

− Межтеловые кейджи для позвоночника (рис. 2). В хирургии позвоночника PEEK используют фирмы-производители кейджей межпозвонковых дисков, применяемых на операциях по лечению спондилодеза. Эта модель стабилизирует сегмент позвоночника и помогает сращиванию костей позвоночника. Это обеспечивается низким модулем упругости, близким к показателям костной ткани. PEEK снижает риск проседания имплантата в тело позвонка, и равномерно распределяется нагрузка на само изделие [16].

Рис. 2. Кейджи ООО «Эндокарбон», г. Пенза
Примечание: составлено автором по данным источников [17]

− Инструменты и вспомогательные устройства. Полиэфирэфиркетон обладает высокой устойчивостью к многократной стерилизации, что прекрасно подходит для производства инструментов хирурга, различных зажимов, ретракторов и направляющих (рис. 3). А диэлектрические свойства обеспечивают применение подобных изделий в электрохирургии [18].

− Нейростимуляторы и корпуса приборов. Данный материал подходит для изготовления корпусов интракраниальных нейростимуляторов, катетеров и систем доставки лекарств. Устойчивость к химическому воздействию PEEK, а также его стабильность при долговременном воздействии с биологическими тканями делает его идеальным вариантом для длительной имплантации [20].

Виды технологий производства и обработки

PEEK может быть обработан механическими методами в виде фрезеровки и сверления, а также изделия могут быть изготовлены с использованием аддитивных технологий [21]. 3D-печать материала PEEK требует экструдеров, способных нагреваться до высоких температур (свыше 400 °− плазменная обработка;

− гидроабразивная текстуризация;

− лазерное травление.

Эти методы включают в технологический процесс производства изделий с целью повышения адгезии к тканям костей, а также для улучшения включения в структуру костей [23].

Рис. 3. Лапароскопический инструмент из PEEK-диэлектрик от Microline Surgical
Примечание: составлено автором по данным источников [19]

Перспективы и ограничения

Хотя PEEK обладает большим рядом достоинств, он имеет и свои недостатки:

− более высокая стоимость в сравнении с металлами;

− низкое взаимодействие с поверхностью костей при отсутствии предварительной обработки;

− потребность в модификации для эффективного включения в структуру костей [24].

Но развитие технологий обработки поверхности, разработка композитных материалов на основе PEEK (PEEK-углерод, PEEK-керамика), а также снижение стоимости аддитивных технологий делают материал и изделия из него более доступными.

В перспективе можно ожидать более широкий спектр применения полиэфирэфиркетона для производства нейрохирургических навигационных систем, миниатюрных сенсоров и даже биоразлагаемых имплантатов [25].

Благодаря своим свойствам PEEK становится ключевым компонентом инноваций в различных областях, особенно в медицине. Ожидается, что в ближайшем будущем применение PEEK значительно расширится, охватывая сферы нейрохирургии, диагностики и восстановительной медицины.

Применение в нейрохирургии

Одним из главных направлений развития станет использование PEEK в производстве нейрохирургических навигационных систем. Современная медицина активно внедряет методы точной визуализации и планирования хирургических операций, особенно в деликатных областях, таких как мозг и центральная нервная система. Нейронавигационные системы помогают врачам точно определить расположение патологических очагов, снизить риск осложнений и обеспечить успешность операции. Свойства PEEK обеспечивают стабильность конструкции, совместимость с человеческим организмом и устойчивость к стерилизации.

Примером таких приложений являются:

• прозрачные рентгенопрозрачные маркеры для точного определения местоположения опухолей;

• навигационные рамки для стереотаксического размещения электродов;

• роботизированные платформы для автоматизации хирургического вмешательства.

Сенсорные решения на основе PEEK

Кроме того, ожидается широкое распространение миниатюрных сенсорных приборов, изготовленных из PEEK. Это связано с развитием методов биоинженерии и необходимостью постоянного контроля жизненно важных показателей человеческого тела. В связи с исключительными свойствами материала (устойчивость к воздействию среды организма, отсутствие токсичности) он идеально подходит для долгосрочного внедрения внутрь организма.

Наиболее перспективные направления

• Миниатюрные кардиостимуляторы: датчики сердечного ритма, способные непрерывно контролировать состояние сердечно-сосудистой системы.

• Биосенсоры уровня сахара крови: постоянное отслеживание концентрации глюкозы для диабетиков.

• Имплантируемые дозаторы лекарств: автоматическое введение препаратов в нужное время и нужном количестве.

Роль PEEK в создании биоразлагаемых имплантатов

Особое внимание уделяется разработке биоразлагаемых имплантатов на основе PEEK. Сегодня многие традиционные медицинские имплантаты требуют повторных оперативных вмешательств для удаления, что увеличивает риски осложнений и снижает качество жизни пациентов. Разработка биоразлагаемых конструкций позволит избежать таких сложностей.

Некоторые потенциальные продукты:

• каркасы для костной ткани: восстанавливают костные дефекты путем направленной регенерации собственных клеток пациента;

• протезы суставов: облегчают восстановление подвижности после травм и болезней опорно-двигательного аппарата;

• стенты для сосудистой сети: поддерживают кровообращение в пораженных участках сосудов и постепенно растворяются по мере восстановления естественной циркуляции.

Заключение

PEEK (полиэфирэфиркетон) представляет собой инновационный материал, который активно применяется в современной нейрохирургической практике. Его широкое применение обусловлено уникальным набором свойств, что включает в себя высокую биосовместимость, превосходные механические свойства, устойчивость к многократной стерилизации разными способами и отличную визуализацию в процессе исследования популярными системами диагностики (компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, рентгеновское исследование).

В современном мире этот полимер имеет широкий спектр применения в различных областях нейрохирургии, куда включаются реконструкция черепа (краниопластика), операции на восстановление функций по-

звоночника (спинальная хирургия), а также изготовление специализированного инструментария для операционных воздействий на тканях нервной системы. К примеру, имплантируемые изделия из PEEK обеспечивают минимизацию осложнений, повышение качества жизни пациентов после травм головы или позвоночника, а также надежно стабилизируют и фиксируют кости и ткани.

Дальнейшее развитие этой области медицинских имплантируемых изделий заключается в расширении знаний и навыков в методах обработки заготовок и обработке материала для снижения стоимости изделий и PEEK, что сделает их доступными и более известными в кругах нейрохирургов и медицинских учреждений данной области медицины. Таким образом, в плане внедрения изделий открываются новые горизонты для повышения эффективности применения имплантатов из PEEK в клинической практике и улучшения результатов лечения заболеваний ЦНС и опорно-двигательного аппарата тяжелой степени.

Список источников

1. Elnaggar M.A., Elnoamany H.A., Eissa M.K. Clinical evaluation of 3D PEEK implants for skull bone defects repair: a single center case serious // Egypt J Neurosurg. 2025. Vol. 40. № 11. DOI: 10.1186/s41984-025-00374-0. URL: https://rdcu.be/evtFd (дата обращения: 15.05.2025).

2. Ni J., Zheng Y., Liu N., Wang X., Fang X., Phukan R. et al. Radiological evaluation of anterior lumbar fusion using PEEK cages with adjacent vertebral autograft in spinal deformity long fusion surgeries // Eur Spine J. 2015. Vol. 24(4). P. 791–799. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25618451/ (дата обращения: 15.05.2025).

3. Aghali A. Craniofacial bone tissue engineering: Current approaches and potential therapy // Cells Basel, Switz. 2021. Vol. 10 (11). P. 2993. DOI: 10.3390/cells10112993.

4. Aydin S., Kucukyuruk B., Abuzayed B., Aydin S., Sanus G.Z. Cranioplasty: review of materials and techniques // J Neurosci Rural Pract. 2011. Vol. 2(2). P. 162–167.

5. Gheorgheanu V.A., Gingu O.I., Antoniak H.O. Modern possibilities and prospects of using bone grafts and biomaterials for bone tissue regeneration: from clinical needs to advanced biomaterials research // Appl Sci. 2023. Vol. 13(14). № 8471.

6. Купер Д.Дж., Розенфельд Дж.В., Мюррей Л., Араби Ю.М., Дэвис А.Р., Д'Урсо П., Коссманн Т., Понсфорд Дж., Сеппельт И., Рейли П., Вулф Р. Декомпрессивная краниэктомия при диффузном травматическом повреждении головного мозга // N Engl J Med. 2011. Vol. 364(16). С. 1493–502. DOI: 10.1056/nejmoa1102077.

7. Li J., von Campe G., Pepe A., Gsaxner C., Wang E., Chen X., et al. Automatic skull defect restoration and cranial implant generation for cranioplasty // Med. Image Anal. 2021. Vol. 73. № 102171. DOI: 10.1016/j.media.2021.102171.

8. Lamaye N., Veschini L., Coward T. Assessing biocompatibility & mechanical testing of 3D-printed PEEK versus milled PEEK // Heliyon. 2022. Vol. 8(12). P. 1-13. Advance online publication. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e12314.

9. Punchak M., Chung L.K., Lagman C., Bui T.T., Lazareff J., Rezzadeh K., Jarrahy R., Yang I. Outcomes following polyetheretherketone (PEEK) cranioplasty: Systematic review and meta-analysis // Journal of clinical neuroscience : official journal of the Neurosurgical Society of Australasia. 2017. Vol. 41. P. 30–35. DOI: 10.1016/j.jocn.2017.03.028.

10. Godbole S.D., Chandak A.V., Balwani T.R. Poly Ether Ether Ketone (PEEK) Applications in Prosthodontics – A Review "Peek into PEEK at Peak" // Journal of Evolution of Medical and Dental Sciences. 2020. Vol. 9, No. 43. P. 3242-3246. DOI: 10.14260/jemds/2020/711. EDN: YFCNLH.

11. Гветадзе Р.Ш., Дмитриева Н.А., Воронин А.Н. Особенности адгезии микроорганизмов к стоматологическим материалам, используемым для формирования контура десны при протезировании с опорой на дентальные имплантаты // Стоматология. 2019. Т. 98, № 5. С. 118-123. DOI: 10.17116/stomat201998051118. EDN: SPABNC.

12. Ghafoor R. Sneak Peek on Polyetheretherketone (Peek) in Dentistry – A Narrative Review // Biomedical Journal of Scientific and Technical Research. 2022. Vol. 44, No. 2. DOI: 10.26717/bjstr.2022.44.007023. EDN: PFVQYE.

13. Ступак В.В., Мишинов С.В., Садовой М.А., Копорушко Н.А., Мамонова Е.В., Панченко А.А., Красовский И.Б. Современные материалы, используемые для закрытия дефектов костей черепа // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 4. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=26626 (дата обращения: 01.07.2025).

14. Thapa A.J., Lei B.X., Zheng M.G., Li Z.J., Liu Z.H., Deng Y.F. The Surgical Treatment of Posttraumatic Skull Base Defects with Cerebrospinal Fluid Leak // Journal of neurological surgery. Part B, Skull base. 2018. Vol. 79(2). P. 205–216. DOI: 10.1055/s-0037-1606555.

15. Frassanito P., Fraschetti F., Bianchi F., Giovannenze F., Caldarelli M., Scoppettuolo G. Management and prevention of cranioplasty infections. Child's nervous system // Official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery. 2019. Vol. 35(9). P. 1499–1506. DOI: 10.1007/s00381-019-04251-8.

16. Nimonkar S., Godbole S., Belkhode V., Nimonkar P., Pisulkar S Effect of rehabilitation of completely edentulous patients with complete dentures on temporomandibular disorders: a systematic review // Cureus. 2022. Vol. 14. № e28012. DOI: 10.7759/cureus.28012.

17. Lu T., Liu X., Qian S., et al. Multilevel surface engineering of nanostructured TiO2 on carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone // Biomaterials. 2014. Vol. 35. P. 5731-5740. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2014.04.003.

18. Luo C., Liu Y., Peng B., et al. PEEK for oral applications: recent advances in mechanical and adhesive properties // Polymers (Basel). 2023. Vol. 15. № 386. DOI: 10.3390/polym15020386.

19. Ding L., Lu W., Zhang J., Yang C., Wu G. Preparation and performance evaluation of duotone 3D-printed polyetheretherketone as oral prosthetic materials: a proof-of-concept study. Polymers (Basel). 2021. Vol. 13. № 1949. DOI: 10.3390/polym13121949.

20. de Araújo Nobre M., Moura Guedes C., Almeida R., Silva A., Sereno N. The all-on-4 concept using polyetheretherketone (PEEK) – Acrylic resin prostheses: follow-up results of the development group at 5 years and the routine group at one year // Biomedicines. 2023. Vol. 11. № 3013. DOI: 10.3390/biomedicines11113013.

21. Shuvalov S.D., Tolkachev V.S., Bazhanov S.P., Shulga A.E., Ostrovskij V.V., Ulyanov V.Yu. The use of implants made from different materials in lumbar spinal fusion surgery (Review) // Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2024. Vol. 20(4). P. 388–395. EDN: FNOARA. DOI: 10.15275/ssmj388.

22. Chang V., Hartzfeld P., Langlois M., Mahmood A., Seyfried D. Outcomes of cranial repair after craniectomy // J Neurosurg. 2010. Vol. 112. P. 1120–1124. DOI: 10.3171/2009.6.JNS09133. PMID: 19612971.

23. Eolchiian S.A. Complex skull defects reconstruction with CAD/CAM titanium and polyetheretherketone (PEEK) implants // Burdenko's Journal of Neurosurgery. 2014. Vol. 78(4). P. 3-13.

24. Wang H., Zhang K., Cao H., Zhang X., Li Ye., Wei Q., Zhang D., Jia Q., Bie Li. Seizure after cranioplasty: incidence and risk factors // J Craniofac Surg. 2017. Vol. 28(1). DOI: 10.1097/SCS.0000000000003863.

25. Moiduddin K., Mian S.H., Elseufy S.M., Alkhalefah H., Ramalingam S., Sayeed A. Polyether-ether-ketone (PEEK) and its 3D-printed quantitate assess – ment in cranial reconstruction // J Funct Biomater. 2023. Vol. 14(8). № 429.