

несмотря на перспективность, широкое внедрение MediaPipe в клиническую практику требует дальнейшего подтверждения его эффективности и точности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cynthia, C. Measurement of Joint Motion: A Guide to Goniometry / C. Cynthia, D. Norikin, J. White. – 5th ed. – Philadelphia, PA: F A Davis, 2016. – 594 p.
2. Feasibility of 3D Body Tracking from Monocular 2D Video Feeds in Musculoskeletal Telerehabilitation / C. Clemente, G. Chambel, D.C.F. Silva [et al.] // Sensors. - 2023. – Vol. 24, №1. – P. 206.
3. Comparison of computational pose estimation models for joint angles with 3D motion capture / R.I. Hamilton, Z. Glavcheva-Laleva [et al.] // – J Bodyw Mov Ther. - 2024. – Vol. 40. – P. 315-319.
4. Automated, Vision-Based Goniometry and Range of Motion Calculation in Individuals With Suspected Ehlers-Danlos Syndromes/Generalized Hypermobility Spectrum Disorders: A Comparison of Pose-Estimation Libraries to Goniometric Measurements / A. Sabo, N. Mittal, A. Deshpande, [et al.] // J Transl Eng Health Med. - 2024. –Vol.12. – P.140 – 150.
5. A Machine Learning App for Monitoring Physical Therapy at Home / B. Pereira, B. Cunha, P. Viana [et al.] // Sensors. - 2023. – Vol.24, №1. – P. 158.
6. Validation of Angle Estimation Based on Body Tracking Data from RGB-D and RGB Cameras for Biomechanical Assessment / T.B.G. Lafayette, V.H.L. Kunst, P.V.S. Melo, [et al.]. – Sensors, 2022. – Vol.23, №1. – P.3.

Сведения об авторах

А. А. Вилков - студент

К. А. Петрова - студент

И. П. Терентьев *- студент

Д. М. Кривоносов - студент

А. В. Жилияков - доктор медицинских наук, доцент

Е. А. Волокитина - доктор медицинских наук, профессор

Information about the authors

A. A. Vilkov - Student

K. A. Petrova - Student

I. P. Terent'ev - Student

D. M. Krivonosov - Student

A. V. Zhiljakov - Doctor of Sciences (Medicine), Associate Professor

E. A. Volokitina - Doctor of Sciences (Medicine), Professor

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):

terentevivan007@gmail.com

УДК: 616-006.3.04

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОРТЕЗОВ

Ковалев Григорий Сергеевич, Слезкин Савелий Александрович, Смирнов Александр Егорович, Чашина Вилена Игоревна, Жилияков Андрей Викторович, Волокитина Елена Александровна

Кафедра травматологии и ортопедии

ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России

Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. Аддитивные технологии, или 3D-печать, являются инновационной технологией для изготовления индивидуальных ортезов. Она позволяет приводить структуру и форму ортеза в соответствие с анатомией и функциональными потребностями конкретного пациента, персонализируя процесс лечения. Однако широкое применение аддитивного производства в клинической практике на данный момент ограничено вследствие недостатка данных о долгосрочной эффективности, прочности, биосовместимости используемых материалов и экономической целесообразности по сравнению с традиционными методами. **Цель исследования** – сравнительная оценка физико-механических и производственных характеристик различных материалов для 3D-печати индивидуальных ортезов. **Материал и методы.** Проведен систематический поиск в базах данных PubMed, ResearchGate, Science Direct и Scopus за период 2010-2023 гг. В обзор включены исследования, посвященные ортопедическим конструкциям, изготовленным с помощью 3D-печати. Проанализированы физико-механические свойства (модуль Юнга, предел текучести, прочность), параметры производства (температура экструзии, скорость печати, толщина слоя) ортезов из различных материалов (PLA, ABS, PETG, TPU, PCL). **Результаты.** PLA обеспечивает необходимую жесткость, однако характеризуется хрупкостью. ABS отличается высокой прочностью и ударостойкостью, однако для его печати требуется высокая температура. PETG сочетает жесткость и гибкость, а также обладает ударостойкостью, однако проявляет гидрофильные свойства. TPU демонстрирует эластичность и гидрофобность, но не подходит для жесткой фиксации конструкций. PCL является

биосовместимым и биоразлагаемым материалом, однако имеет низкую прочность. Выбор материала должен определяться функциональным назначением ортеза и особенностями анатомической области его применения. **Выводы.** Результаты сравнительного анализа подтверждают, что выбор материала для изготовления ортезов методом 3D-печати должен основываться на комплексной оценке его физико-механических свойств, биосовместимости и соответствия функциональным требованиям конкретного случая. **Ключевые слова:** ортезы, 3D-печать, полимеры, ортопедия, реабилитация.

THE CHOICE OF MATERIAL FOR 3D PRINTING OF INDIVIDUAL ORTHOSES

Kovalev Grigory Sergeevich, Slezkin Savely Alexandrovich, Smirnov Alexander Egorovich, Chashchina Vilena Igorevna, Zhilyakov Andrey Viktorovich, Volokitina Elena Alexandrovna
Department of Traumatology and Orthopedics
Ural State Medical University
Yekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. Additive technology, or 3D printing, is an innovative technology for making customized orthoses. It allows you to adjust the structure and shape of the orthosis in accordance with the anatomy and functional needs of a particular patient, personalizing the treatment process. However, the widespread use of additive manufacturing in clinical practice is currently limited due to a lack of data on long-term efficacy, strength, biocompatibility of the materials used and economic feasibility compared to traditional methods. **The aim of the study** is a comparative assessment of the physico-mechanical and manufacturing characteristics of various materials for 3D printing of individual orthoses. **Materials and methods.** A systematic search was conducted in the databases PubMed, ResearchGate, Science Direct and Scopus for the period 2010-2023. The review includes studies on orthopedic structures made using 3D printing. The physico-mechanical properties (Young's modulus, yield strength, strength), production parameters (extrusion temperature, printing speed, layer thickness) of orthoses made of various materials (PLA, ABS, PETG, TPU, PCL) are analyzed. **Results.** PLA provides the necessary rigidity, but is characterized by fragility. ABS is highly durable and impact resistant, but it requires high temperatures to print. PETG combines rigidity and flexibility, and is shock-resistant, but exhibits hydrophilic properties. TPU demonstrates elasticity and hydrophobicity, but is not suitable for rigid fixation of structures. PCL is a biocompatible and biodegradable material, but it has low strength. **Conclusions.** The results of the comparative analysis confirm that the choice of a material for the manufacture of orthoses by 3D printing should be based on a comprehensive assessment of its physico-mechanical properties, biocompatibility and compliance with the functional requirements of a particular case.

Keywords: orthoses, 3D printing, polymers, orthopedics, rehabilitation.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство (АП), также известное как 3D-печать, — это технология создания объектов путем последовательного нанесения слоев материала в соответствии с цифровым проектом [1, 2]. АП позволяет создавать сложные геометрические структуры с высокой точностью и индивидуализацией, что делает его востребованным в различных отраслях, включая здравоохранение: биокаркасы и трансплантаты, системы доставки лекарств, лабораторное и испытательное оборудование, вспомогательные инструменты, ортезы и протезы, имплантаты, модели для планирования операций, инструменты для диагностики и хирургии и другое [3-6].

Ортезы часто применяются для реабилитации пациентов с физическими нарушениями и инвалидностью, такими как переломы, растяжения, артропатии и тендинопатии, а также неврологическими расстройствами [3,7]. Важным ограничением, связанным с использованием 3D-печати в практических целях, является изученность утилитарных свойств материалов, теоретически подходящих для конкретных задач реабилитационного периода. Не менее значимым остается экономический аспект выбора пластика для 3D печати.

Физические характеристики ортезов, такие как эластичность, упругость, гибкость, прочность, твёрдость, плотность и чувствительность к температуре, в конечном счете определяются типом используемого материала. Механические требования к ортезу обусловлены его назначением в медицинских целях, при этом ключевыми являются такие характеристики, как несущая способность и устойчивость к поперечным нагрузкам.

Кроме того, ортопедические изделия подвергаются длительному воздействию биогенных сред, что может негативно сказаться на их характеристиках. Таким образом, крайне

важно провести точную оценку механических характеристик этих материалов, чтобы предотвратить их повреждения и обеспечить хорошую функциональность. Такая оценка дает представление о способности материала выдерживать и адаптироваться к внешним нагрузкам, что позволяет спроектировать и выбрать ортез, который будет эффективно выполнять механические функции в соответствии с назначением [3,4,11,12].

Несмотря на растущее число публикаций, посвященных применению АТ в ортопедии, [13] существует ряд пробелов, которые ограничивают широкое внедрение этой технологии в клиническую практику. В частности, отсутствуют стандартизированные протоколы проектирования, изготовления и оценки 3D-печатных ортезов, что затрудняет сравнение результатов различных клинических испытаний [14]. Кроме того, недостаточно данных о связи свойств пластика, долгосрочной эффективности, а также безопасности ортезов, изготовленных методом 3D-печати [5].

Цель исследования – оценить физико-механические и производственные характеристики различных материалов для 3D-печати индивидуальных ортезов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Поиск необходимых публикаций проводился с использованием баз данных PubMed, ResearchGate, Science Direct и Scopus. Ключевые слова для поиска: 3D printing, additive manufacturing, rapid prototyping, orthosis, orthoses, brace, splin, custom-made, personalized, biomechanics, gait analysis, comfort, patient satisfaction, complications, finite element analysis, а также термины, относящиеся к специфическим типам ортезов (например, "ankle-foot orthosis", "knee orthosis", "spinal orthosis") и материалам для печати (например, "PLA", "ABS", "nylon", "TPU"). Критерии включения: описательные и когортные исследования, опубликованные в рецензируемых журналах 2010-2023 годов с участием пациентов различного возраста, пола и этнической принадлежности, нуждающихся в ортезах. Исследования, не прошедшие рецензирование, были исключены из корпуса анализируемых публикаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы считаем, что все рассматриваемые нами полимерные материалы - полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтиленгликольтерефталат-гликоль (PETG), термопластичный полиуретан (TPU), поликапролактон (PCL), имеют взаимосвязанные характеристики. В связи с этим мы использовали матричный тип категоризации и выделили следующие домены свойств пластмасс для 3D печати:

- Первый (механические свойства): прочность на растяжение, модуль упругости и относительное удлинение при разрыве.
- Второй (физические параметры): температура стеклования, плотность и термическая стабильность материала.
- Третий (технические параметры 3D-печати): температура экструзии, скорость охлаждения расплава и адгезионные характеристики между слоями.

Детально рассмотрев каждый выделенный домен, мы выделили критические диапазоны основных свойств, которые потребуются для создания и успешного применения ортеза. Далее приведено сравнение найденных нами материалов для аддитивного производства, внимание акцентировалось на физико-механических и производственных особенностях. Кроме того, проведена оценка удобства использования этих материалов в клинической практике врачами-ортопедами, что позволило выявить их сильные и слабые стороны.

Механические свойства:

Жесткость, упругость и сопротивление деформации: PLA и ABS имеют высокий модуль Юнга (PLA: 2800-3600 МПа, ABS: 2174 ± 285 МПа) и низкий коэффициент Пуассона (PLA: 0.3, ABS: 0.35), обеспечивая высокую жесткость и устойчивость к деформации. Предел текучести PLA (~40 МПа) и ABS (~20.7 МПа) подтверждают их способность выдерживать нагрузки без деформации. PETG обладает меньшей жесткостью (модуль Юнга: 1472 ± 270

МПа), но считается хорошим компромиссом между жесткостью и гибкостью (прочность на изгиб: 53.7 ± 2.4 МПа). TPU и PCL имеют низкий модуль Юнга (TPU: 13.2 ± 0.3 МПа, PCL: 62 ± 26 МПа) и высокую эластичность, подходя для гибких ортезов.

Прочность, долговечность и сопротивление разрушению: ABS имеет высокую ударную вязкость (12.6 ± 1.1 кДж/м²) и предел прочности при растяжении (25-33 МПа), что делает его самым прочным материалом для ортезов. PLA менее прочен к ударам, несмотря на высокую жесткость. TPU, обладая эластичностью (предел прочности при растяжении: 23.1 ± 0.6 МПа), хорошо сопротивляется разрыву, но не подходит для больших нагрузок.

Физические свойства:

Температура обработки: PLA и TPU требуют низкой температуры экструзии (PLA: 205-220°C, TPU: 200-220°C), что упрощает печать. PCL также имеет низкую температуру экструзии (80-120°C). PETG требует более высокой температуры (230-240°C), а ABS – самой высокой (245-265°C). Температура платформы варьируется от 40-60°C для PCL до 90-105°C для ABS.

Скорость печати и разрешение: TPU может печататься при широкой скорости (40-100 мм/с), позволяя сбалансировать скорость и качество. PLA (50-70 мм/с) и ABS (60 мм/с) имеют средние скорости печати. PETG (45 мм/с) и PCL (30-40 мм/с) печатаются медленнее, что может увеличить время производства, но повысить качество.

Плотность заполнения и расход материала: плотность заполнения варьируется в зависимости от требований к жесткости и прочности ортеза. Расход материала зависит от параметров печати и геометрии изделия.

Технические параметры:

Плотность и вес: ABS имеет наименьшую плотность (1.04 г/см³), что делает его легким. TPU и PLA имеют схожую плотность (TPU: 1.20-1.24 г/см³, PLA: 1.24-1.25 г/см³), в то время как PETG имеет наибольшую плотность (1.27 г/см³).

Гидрофобность/гидрофильность: TPU является гидрофобным (угол смачиваемости >90°) и подходит для условий с влагой. PLA и PETG гидрофильные (угол смачиваемости PLA: 64-79°, PETG: ~74°), что может привести к изменению свойств со временем. ABS имеет среднюю гидрофильность.

Размерная точность и термостойкость: PLA, ABS и PETG имеют высокую точность размеров. PLA показывает наименьшую деформацию при нагреве (0.46-0.7%), в то время как ABS (0.85%) и PETG (~1.18%) более подвержены деформации.

Общие сведения:

PLA является популярным материалом благодаря своей высокой жесткости и прочности, что делает его оптимальным выбором для создания стабильных ортопедических конструкций, требующих точности и стабильности размеров. Однако его слабые стороны, такие как склонность к ломкости и водопоглощение, ограничивают его использование в условиях, где требуются высокая ударная стойкость и долговечность, особенно в условиях высокой влажности. Эти особенности делают PLA предпочтительным для статичных ортезов, обеспечивающих стабильность и поддержку без значительных механических воздействий.

ABS имеет важные преимущества в виде прочности и гибкости, что делает его отличным выбором для ситуаций, требующих устойчивости к ударным нагрузкам. Он также обеспечивает высокую размерную точность, что важно для сложных анатомических форм. Однако ABS требует более сложного процесса печати, в том числе поддержания высокой температуры платформы, а также склонен к деформации при охлаждении. Эти факторы следует учитывать при выборе ABS, особенно в приложениях, где необходима высокая ударная стойкость и стабильность при активном использовании.

PETG представляет собой сбалансированное решение между жесткостью PLA и гибкостью ABS, что делает его хорошим выбором для ортезов, которые должны сочетать средние требования к прочности и гибкости. Его высокая прочность и стабильность делают

его подходящим для приложений, требующих надежной фиксации, однако чувствительность к влаге и температурам требует тщательного контроля условий эксплуатации. PETG может быть полезен в тех случаях, где необходима определенная гибкость, но без ущерба для прочности.

TPU выделяется среди других материалов своей высокой гибкостью и эластичностью, что делает его наилучшим выбором для создания мягких и комфортных ортезов, особенно в тех случаях, где требуется адаптация к движениям пациента. Его гидрофобные свойства позволяют TPU сохранять свои характеристики в условиях контакта с влагой, что делает его особенно пригодным для изготовления вставок и повязок, где необходимо комфортное прилегание и устойчивость к внешним условиям. Благодаря своей устойчивости к деформации, TPU идеально подходит для мягких ортопедических изделий, которые должны быть гибкими и обеспечивать комфорт пациенту.

PCL выделяется своей биоразлагаемостью и биосовместимостью, что делает его уникальным материалом для применения в специфических медицинских приложениях, особенно в детской ортопедии или в случаях, требующих временной поддержки. Его способность разлагаться в организме, и высокая гибкость делают его идеальным для временных ортезов, которые могут быть использованы в процессе реабилитации и не требуют долгосрочного нахождения в теле пациента.

Однозначно можно сказать, что выбор материала для изготовления индивидуального ортеза с помощью 3D-печати должен в первую очередь основываться на требованиях конкретной ортопедической задачи, которая в свою очередь зависит от стадии реабилитации, вида и локализации травмы и т.п.

ОБСУЖДЕНИЕ

Данный систематический обзор анализирует физико-механические свойства материалов для индивидуальных ортезов, изготовленных с помощью аддитивных технологий (3D-печати), которые позволяют создавать изделия, учитывающие анатомические особенности пациентов и потребности в фиксации. Однако существует ряд ограничений: недостаток качественных исследований, необходимость дальнейших испытаний для оценки долгосрочной эффективности и безопасности, а также отсутствие стандартизированных протоколов проектирования, изготовления и оценки АТ-ортезов, позволивших бы ввести различные исследования и внедрять их в практику

Ключевым моментов в создании ортеза заключается в точном определении требований к механическим, физическим и конструкторским свойствам ортеза. Так при его создании необходимо учитывать особенности пораженного участка тела, характер повреждения, а также цели лечения. Здесь нам на помощь приходит современное разнообразие материалов и методов 3D-печати материалов, которые позволяют нам создавать эффективные и комфортные ортезы, решающие поставленные перед ними задачи на разных этапах реабилитации [4, 15, 18].

Например, для стабилизации позвоночника в шейном отделе и снижения нагрузки на мышцы целесообразно использовать нейлон и ABS, оптимальны благодаря их высокому уровню жесткости, стабильности и легкости. Для грудного отдела предпочтительнее умеренная жесткость, тут кстати будут PETG и ABS. При рассмотрении поражений поясничного отдела стоит отметить TPU/TPЕ и PETG, которые обеспечат необходимую гибкость и компрессию для облегчения симптомов протрузий и межпозвонковых грыж.^{14,19–22}

Для ортезов на конечности будут предъявляться другие требования. Для максимально адаптации конструкции к условиям анатомической области и минимизации ограничений мелкой моторики на пальцах кисти нам следует использовать PLA и TPU/TPЕ, обладающие гибкостью и легкостью. Для обеспечения стабильности и жесткости в локтевом суставе -PETG и ABS. А В отношении стопы и голеностопного сустава TPU/TPЕ и PETG демонстрируют отличные амортизирующие и нагрузочные характеристики [17, 21, 22].

Модуль упругости материала также является важным параметром, от которого зависит будет ли наше изделие абсолютно стабильно или сможет адаптироваться к движениям пациента [7, 23].

Биологическая совместимость материалов имеет первостепенное значение в медицинской практике. Клинические испытания подтверждают долговременную безопасность материалов, а их низкая теплопроводность, особенно у TPU/TPE, способствует снижению потоотделения и улучшению комфорта при длительном ношении [7, 24, 25].

Важным аспектом также является и функциональные потребности пациентов. Однако в данном вопросе проведено меньше всего исследований и нельзя точно сказать о преимуществах того или иного пластика, судить можно на основании их физических свойств. Так для активных пациентов можно предложить нейлон и ABS, в виду их высокой прочности и легкости. TPU/TPE, с их превосходной эластичностью, находят применение в мягких ортезах, где требуется поддержание подвижности [26, 29].

Также не следует забывать об экологическом и экономическом факторах, которые важны для массового производства. PLA и ABS представляют собой экономически выгодные решения, сохраняя функциональность на высоком уровне. Экологический вопрос изучен не до конца, но мы не исключаем возможность переработки и повторного использования наших изделий, что является благоприятным фактором [4, 13, 15].

Выбор материала для 3D-печати ортезов представляет собой многоуровневую задачу, требующую учета широкого спектра факторов, от клинических до экономических. Оптимальное сочетание механических, биологических и экологических характеристик позволяет создавать ортезы, которые не только соответствуют функциональным требованиям, но и обеспечивают высокий уровень комфорта для пациентов. Продолжающиеся исследования в области материаловедения и медицинских технологий способствуют развитию персонализированного подхода к лечению и улучшению качества жизни пациентов. Нашей целью в дальнейшем мы видим систематизацию числовых данных, с целью упрощения выбора материала на основании его свойств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Investigation of effects of processing parameters on the impact strength and microstructure of thick tri-material based layered composite fabricated via extrusion based additive manufacturing / I. Khan, U. Farooq, M. Tariq [et al.] // *J Eng Res.* – 2023. – №1.
2. Sala, F. A feasibility analysis of a 3D customized upper limb orthosis / F. Sala, M. Carminati, G. D'Urso, C. Giardini / *Procedia CIRP.* – 2022. – №110. – P. 207-212.
3. An Insight into the Characteristics of 3D Printed Polymer Materials for Orthoses Applications: Experimental Study / S.H Mian., E. Abouel Nasr, K. Moiduddin / *Polymers.* – 2024. – №16(3). – P. 403.
4. Franco Urquiza, E.A. Advances in Additive Manufacturing of Polymer-Fused Deposition Modeling on Textiles: From 3D Printing to Innovative 4D Printing—A Review/ E.A. Franco Urquiza // *Polymers.* – 2024. – №16(5). – P. 700.
5. A state-of-the-art guide to the sterilization of thermoplastic polymers and resin materials used in the additive manufacturing of medical devices/ R. Told, Z. Ujfalusi, A. Pentek [et al.] // *Mater Des.* – 2022. – №223. – P. 111119.
6. Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications / M.A. Islam, M.H. Mobarak, M.I.H. Rimon [et al.] // *Polym Test.* – 2024. – №132. – P. 108364.
7. A review of extrusion-based additive manufacturing of multi-materials-based polymeric laminated structures / I. Khan, I. Barsoum, M. Abas [et al.] // *Compos Struct.* – 2024. – №349. – P. 118490.
8. A feasibility analysis of a 3D customized upper limb orthosis / F. Sala, M. Carminati, G. C. D'Urso, // Giardini. *Procedia CIRP.* – 2022. – №110. – P.207-212.
9. Choo, Y.J. 3D printing technology applied to orthosis manufacturing: narrative review / Y.J. Choo, M. Boudier-Revéret, M.C. Chang // *Ann Palliat Med.* – 2020. – №9(6). – P. 4262270-4264270.
10. Combining multi-scale surface texturing and DLC coatings for improved tribological performance of 3D printed polymers / M. Marian, D.F. Zambrano, B. Rothammer [et al.] // *Surf Coat Technol.* – 2023. – №466. – P. 129682.
11. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review / P. Tack, J. Victor, P. Gemmel, L. Annemans // *Biomed Eng OnLine.* – 2016. – №15. – P.115.
12. Haleem, A. 3D printed medical parts with different materials using additive manufacturing / A. Haleem, M. Javaid // *Clin Epidemiol Glob Health.* – 2020. – №8(1). – P.215-223.
13. Alkhalefah Predicting Mechanical Properties of Polymer Materials Using Rate-Dependent Material Models: Finite Element Analysis of Bespoke Upper Limb Orthoses / S.H. Mian, U. Umer, K. H. Moiduddin // *Polymers.* – 2024. – №16(9). – P.1220.
14. Joseph, A. A Systematic Review of the Contribution of Additive Manufacturing toward Orthopedic Applications / A. Joseph, V. Uthirapathy // *ACS Omega.* – 2024. – №9(44). – P. 44042-44075.

15. Translation into Arabic of the Quebec User Evaluation of Satisfaction with assistive Technology 2.0 and validation in orthosis users /H. Bakhsh, F. Franchignoni, G. Ferriero, A. Giordano // *Int J Rehabil Res Int Z Rehabil Rev Int Rech Readaptation*. – 2014. – №37(4) – P.361-367.
16. A novel workflow to fabricate a patient-specific 3D printed accommodative foot orthosis with personalized latticed metamaterial / Y.F. Hudak, J.S. Li, S. Cullum [et al.] // *Med Eng Phys*. – 2022. – №104. – P.103802.
17. Modeling and Testing of Flexible Structures with Selected Planar Patterns Used in Biomedical Applications/ P. Marsalek, M. Sotola, D. Rybansky [et al.] // *Materials*. – 2020. – №14(1). – P.140.
18. Chalgham, A. Mechanical Properties of FDM Printed PLA Parts before and after Thermal Treatment / A. Chalgham, A. Ehrmann, I. Wickenkamp // *Polymers*. – 2021. – №13(8).
19. Design for AM: Contributions from surface finish, part geometry and part positioning/ A. Castelão, B.A.R. Soares, C.M. Machado [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2019. – №84. – P.491-495.
20. Design principles, manufacturing and evaluation techniques of custom dynamic ankle-foot orthoses: a review study. / G. Rogati, P. Caravaggi, A. Leardini [et al.] // *J Foot Ankle Res*. – 2022. – №15(1) – P.38.
21. Use of cast immobilisation versus removable brace in adults with an ankle fracture: multicentre randomised controlled trial / R. Kearney, R. McKeown, H. Parsons [et al.] // *BMJ*. – 2021. – №374. – P.1506.
22. Design of Monitorable Wrist Orthosis Based on 3D Printing/R. Sheng, G. Jiang, K. Liu, R. Liu // *Zhongguo Yi Liao Qi Xie Za Zhi*. – 2021. – №45(5). – P.507-511.
23. Investigations on the Fatigue Behavior of 3D-Printed and Thermoformed Polylactic Acid Wrist-Hand Orthoses/ D. Popescu, F. Baci, D. Vlăscianu [et al.] // *Polymers*. – 2023. – №15(12). – P.2737.
24. 3D-Printed Hand Splints versus Thermoplastic Splints: A Randomized Controlled Pilot Feasibility Trial / L. Waldburger, R. Schaller, C. Furthmüller [et al.] // *Int J Bioprinting*. – 2021. – №8(1). – P.474.
25. An industrial oriented workflow for 3D printed, patient specific orthopedic cast / M. Formisano, L. Iuppariello, A. Casaburi [et al.] // *SN Appl Sci*. – 2021. – №3(11). – P.830.
26. A Comparative Study for Material Selection in 3D Printing of Scoliosis Back Brace / A. Ronca, V. Abbate, D.F. Redaelli [et al.] // *Materials*. – 2022. – №15(16). – P.5724.
27. Sorimpuk, N.P. Design of thermoformable three dimensional-printed PLA cast for fractured wrist / N.P. Sorimpuk, W.H. Choong, B.L. Chua // *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. – 2022. – №1217(1). – P. 012002.
28. Effect of personalized wrist orthosis for wrist pain with three-dimensional scanning and printing technique: A preliminary, randomized, controlled, open-label study / S.J. Kim, S.J. Kim, Y.H. Cha [et al.] // *Prosthet Orthot Int*. – 2018. – №42(6). – P. 363-643.
29. Production time and user satisfaction of 3-dimensional printed orthoses for chronic hand conditions compared with conventional orthoses: A prospective case series / T. Oud, Y. Kerkum, P. De Groot [et al.] // *J Rehabil Med - Clin Commun*. – 2021. – №4. – P.1-7.
30. Overview of In-Hospital 3D Printing and Practical Applications in Hand Surgery / M. Keller, A. Gübeli, F. Thieringer [et al.] // *BioMed Res Int*. – 2023. – №1. – P.1-14.

Сведения об авторах

Г.С. Ковалев – студент
 С.А. Слезкин – студент
 А.Е. Смирнов – студент
 В.И. Чашина – студент
 А.В. Жилияков – доктор медицинских наук, доцент
 Е.А. Волокитина – доктор медицинских наук, профессор

Information about the authors

G.S. Kovalev – Student
 S.A. Slezkin – Student
 A.E. Smirnov – Student
 V.I. Chashchina – Student
 A.V. Zhilyakov – Doctor of Sciences (Medicine), Associate Professor
 E.A. Volokitina – Doctor of Sciences (Medicine). Professor

***Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):**

kovalev.gregory.26@mail.ru

УДК 616.12

СТЕНТИРОВАНИЕ СОННЫХ АРТЕРИЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С КАРОТИДНОЙ ЭНДАРЭКТОМИЕЙ

Леонтьев Леонид Дмитриевич¹, Кардапольцев Лев Владимирович²

¹Кафедра хирургических болезней

ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России,

² ГАУЗ СО «Свердловская областная клиническая больница № 1»

Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. Стентирование сонных артерий (ССА) и каротидная эндартерэктомия (КЭЭ) – два основных метода хирургической коррекции стеноза сонных артерий, направленных на предотвращение ишемического инсульта.