

В.В. Хоминец, С.А. Пелешок, Д.А. Волов,
М.В. Титова, М.И. Елисеева, С.В. Кушнарев,
А.В. Ширшин, В.Н. Адаменко, Я.И. Небылица

Технологии 3D-печати в лечении пациентов с травмами и заболеваниями предплечья и кисти

Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

Резюме. В последнее десятилетие спектр применения трехмерной печати (3D-печати) в хирургии расширяется. В травматологии, ортопедии и реабилитации поврежденных верхних конечностей растет интерес к созданию шин и ортезов, способных учитывать индивидуальные анатомические особенности человеческого тела. Традиционные ортезы и шины не всегда удобны и могут приводить к таким нежелательным последствиям, как боль, отек, давление или даже отсутствие терапевтического эффекта. Рассматриваются перспективность технологии 3D-печати в медицине с начала ее массового внедрения, особенности моделирования, изготовления и применения средств иммобилизации поврежденных и заболеваний верхних конечностей по данным отечественных и зарубежных публикаций за последние 5 лет. Анализируются данные о функциональности 3D-печатных конструкций шин и ортезов, используемых для иммобилизации верхней конечности, по сравнению с традиционными способами фиксации. Трехмерные изображения пациентов с травмой, полученные с помощью компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии или с использованием 3D-сканера, могут быть использованы для создания виртуальных 3D-моделей предплечья, запястья, пальцев пациента, а 3D-печать с учетом этих анатомических моделей позволяет создавать персонализированные шины и ортезы. Благодаря индивидуальному подходу и использованию разнообразных решений 3D-печать может найти широкое применение в травматологии и ортопедии. В результате такого подхода возникает возможность внедрять и эффективно использовать разнообразные решения, которые найдут поддержку в здравоохранении.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-принтер, трехмерное моделирование, фиксация, кость, предплечье, кисть, пальцы руки, переломы, иммобилизация, лонгеты, ортезы.

Введение. В России ежегодно регистрируется до 12,5 млн различных по характеру и локализации травм (8,4 тыс. случаев на 100 тыс. человек), среди которых переломы костей верхней конечности составляют 0,9 тыс. случаев на 100 тыс. человек. Среди всех закрытых переломов костей этого сегмента около 12% приходится на предплечье и 34% – на переломы в области суставов запястья и фаланг пальцев.

Переломы дистального отдела верхней конечности выявляются во всех возрастных группах населения и, по данным Bunch P.M. et al. [9], составляют 15% от общего количества переломов скелета. По данным Американской академии ортопедии и протезирования, ожидается, что число людей, использующих функциональные повязки (ортезы) при переломах данной локализации, возрастет не менее чем на 31%. Например, к 2020 г. их число будет насчитывать 7,3 млн человек [24].

Тактика лечения закрытых переломов дистального эпифиза лучевой кости, особенно у лиц пожилого возраста, предполагает в большинстве случаев применение гипсовой и/или полимерной повязок и несколько последующих посещений пациентом врача в течение от четырех до восьми недель.

Иногда традиционные гипсовые повязки плохо переносятся пострадавшими из-за локального сдавления, вызывая эпидермальные пузыри или эрозии. Ортезные (мягкотканые) повязки переносятся пациентами более комфортно, хотя иногда на коже у пострадавших появляются признаки контактного дерматита. Полимерные повязки легкие, более удобные,

чем гипсовые, но часто из-за их плохой вентиляции пациентов беспокоят опрелости и зуд.

В настоящее время рассматриваются альтернативные способы изготовления и материалы для фиксации повреждений и заболеваний предплечья и кисти. В последнее десятилетие открыт широкий спектр возможностей применения трехмерной печати по многочисленным направлениям хирургии.

Цель исследования. Показать основные направления в области проектирования, изготовления и применения новых средств для иммобилизации при травмах и заболеваниях верхней конечности при помощи технологии 3D-печати по данным отечественных и зарубежных публикаций за последние 5 лет.

Результаты и их обсуждение. Трехмерная печать (быстрое прототипирование, аддитивные технологии, 3D-печать) – это процесс, с помощью которого из результатов автоматизированного проектирования (computer aided design – CAD) поэтапно создается изделие [11, 16]. Данная технология позволяет печатать множеством материалов, варьирующих от широко доступных полимерных материалов, таких как полилактид или полиуретан, до титановых сплавов и коллагена. Рынок производства 3D-принтеров сейчас динамично развивается, и, как ожидается, его оборот вырастет в Соединенных Штатах Америки с 9,9 млрд долларов в 2018 г. до 42,9 млрд долларов к 2025 г. Прогнозируется, что объем продаж в 2019–2025 гг. будет расти в среднем на 20–21%.



Рис. 1. Цикл зрелости технологий на 2013 г., представленный компанией «Gartner»

Перспективность технологии после начала ее массового внедрения можно оценить по «Циклу зрелости технологии» исследовательской компании «Gartner», который демонстрирует закономерности, стадии развития, становление и внедрение новых технологий на основе мониторинга научных журналов и ведущих средств массовой информации (3dprintingindustry.com, gartner.com).

Цикл развития технологий на 2013 г. (вошедших в первую десятку стратегических технологий «Gartner» на 2013 г.), публикуемый заблаговременно до начала следующего года, представлен на рисунке 1. Мы видим, что из пяти этапов технологий развития («от идеи до массового внедрения») в 2013 г. 3D-печать находилась на пике стадии «завышенных ожиданий», на которой информационный всплеск связан не с конкретными достижениями, а с «головокружением от перспектив», когда от новой технологии ждут решения всех проблем, но конкретных решений пока найдено мало.

Несмотря на массовые публикации, практическое применение технологии 3D-печати оставалось неясным. И именно способность новой технологии предложить конкретные решения является основным критерием выживаемости после наступления третьего этапа цикла – охлаждения и «избавление от иллюзий». В последующие годы успехи не только в области машиностроения, авиационной промышленности, но и медицины позволили 3D-печати сохранить к себе устойчивый интерес. После бума технологии в 2013 г. произошла некоторая стагнация, однако именно в медицине технология не просто сохранила свое присутствие, но и укрепила

позиции, потому что именно в этом направлении предложено несколько перспективных решений.

Кривая развития технологии на 2018 г. претерпела изменения (рис. 2): видны процессы развития технологии, и если некоторые ее аспекты только начинают реализовываться, такие, например, как 3D-печать лекарств, то на пике «ожидания» находится 3D-печать хирургических имплантатов.

Если применение аддитивной технологии в регенеративной медицине (3D-биопечать) уже на стадии обсуждения и лабораторных экспериментов перешло в фазу «охлаждения», то технологии «обычной» 3D-печати вышли на «плато продуктивности», что свидетельствует о начале широкого их внедрения. Предполагается массовое внедрение предоперационных анатомических моделей, 3D-печать хирургических инструментов и дальнейшее развитие аддитивной технологии в регенеративной медицине с выходом на «плато продуктивности».

Наблюдается упрощение 3D-моделирования за счет развития программного обеспечения. Развиваются интеграционные процессы среди специалистов аддитивного производства с целью обмена опытом, универсализации 3D-моделей и последующего их накопления на доступных облачных хранилищах.

В 2019 г. по версии издания «Gartner» технология 3D-печати входит в десятку наиболее значимых и перспективных мировых технологий и все шире используется в медицине для образования, предоперационного планирования, протезирования, профессиональной подготовки хирургов, информирования пациентов, создания изделий для использования в медицинской практике [1, 2, 10].

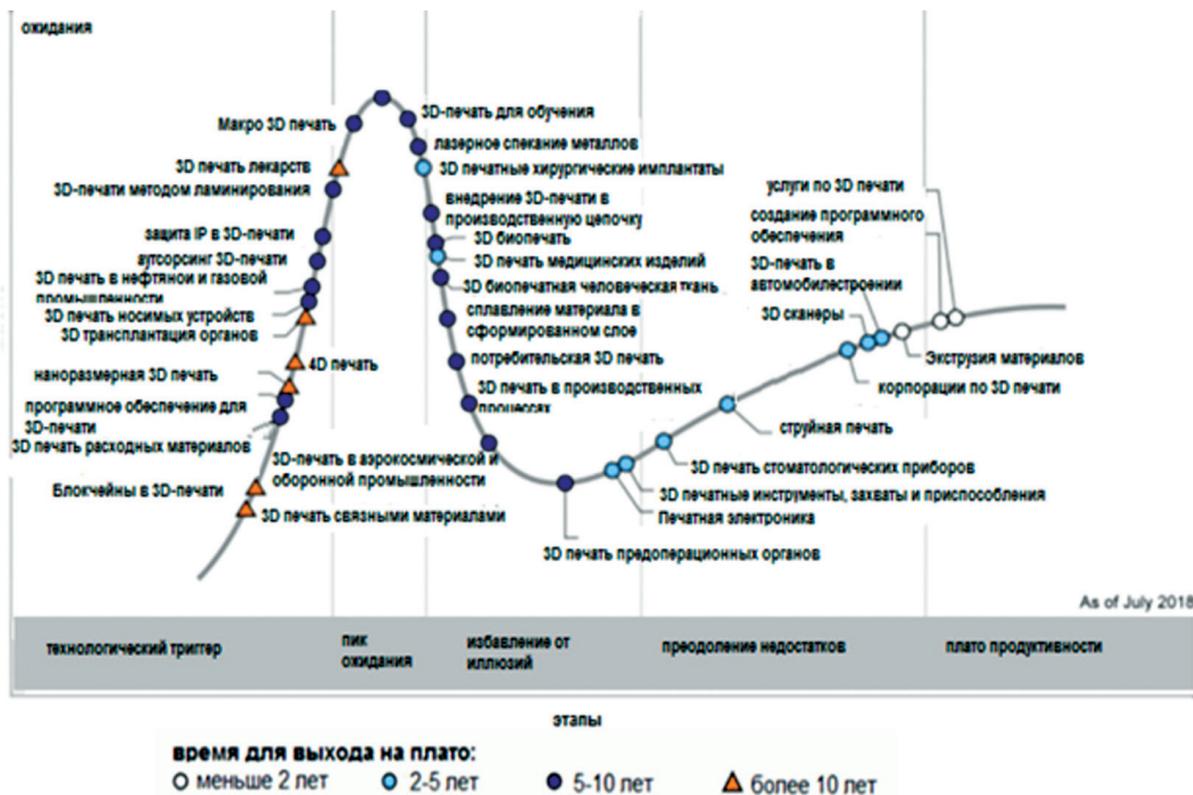


Рис. 2. Цикл зрелости технологий на 2018 г., представленный компанией «Gartner»

Процесс создания индивидуальной модели делится на три части: получение данных трехмерных изображений, цифровая обработка изображений и трехмерная печать. Точность трехмерного печатного объекта зависит от точности предварительно полученного изображения [26].

Используемые методики визуализации, включающие магнитно-резонансную томографию (МРТ), компьютерную томографию (КТ), позитронно-эмиссионную томографию, ультразвуграфию и др., позволяют получать файлы в формате цифровых изображений и коммуникации в медицине (Digital Imaging and Communications in Medicine – DICOM), которые в дальнейшем преобразуются в формат файлов стандартного языка тесселяции (Standard Tessellation Language – STL), используемого для осуществления 3D-печати. Перевод DICOM в читаемый 3D-принтером формат (управляющие команды в формате G-Code) включает несколько этапов, и для каждого шага может потребоваться собственное программное обеспечение [3, 31].

При выборе методик трехмерной печати для конкретной задачи оцениваются несколько показателей: время, необходимое для завершения печати, доступность принтера и материалов, свойства материалов (цвет, прозрачность, влагостойкость, биосовместимость, температурные характеристики). Из известных методик 3D-печати в медицине в настоящее время находят применение стереолитография (Stereolithography – SLA), многоструйное моделирование (Multi-jet Modeling – MJM), селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering – SLS), моделиро-

вание послойным наплавлением (Fused Deposition Modeling – FDM, или Fused Filament Fabrication – FFF).

Роль 3D-печати не ограничивается использованием в образовании и планировании хирургических вмешательств, она также может быть использована в изготовлении индивидуальных средств иммобилизации (лонгет, шин и ортезов) [13, 15, 32–34].

При закрытых переломах костей предплечья и кисти без смещения или с допустимым смещением костных отломков обычно используют гипсовые или полимерные повязки. Иммобилизация переломов указанной локализации гипсовой повязкой занимает в среднем от 10 до 30 мин. К недостаткам гипсовой циркулярной повязки можно отнести трудности в соблюдении гигиены кожи, сложное моделирование окон, которые используются для обработки ран, а также ее вес. Повязки из быстротвердеющих полимеров легкие, водостойкие, просты в изготовлении, но имеют строгую технологию наложения. При этом полимерные повязки имеют некоторые ограничения, такие как низкая воздухопроницаемость, ограниченная прозрачность и невозможность повторить анатомические особенности сегмента конечности.

Любая иммобилизация приводит к гипотрофии мышц и нередко к миогенным контрактурам.

При фиксации готовыми моделями шин, лонгет, ортезов не всегда удается повторить анатомические особенности сегмента поврежденной конечности, не учитывается степень травмы, особенно после оперативного лечения многооскольчатых переломов. Эффективность ортеза зависит от правильности его использова-

ния (размер, объем, структура) с целью зафиксировать место повреждения или перелома и правильного распределения силы давления поверхности ортеза на кожу, особенно в местах близкого прилегания кости [6, 35].

При создании шин и ортезов для лечения переломов верхней конечности необходимо новое решение для достижения таких качеств, как достаточная прочность, наличие вентиляции, легкий вес, водонепроницаемость, регулируемая фиксация, комфортабельность для пациента.

Известно, что по мере разрешения отека мягких тканей при переломе гипсовая повязка требует коррекции. В этот момент появляется возможность заменить иммобилизацию гипсовой повязкой на 3D-печатный вариант шины, лонгеты, ортеза.

Сетчатая и оконная структура трехмерной конструкции способствует не только лучшей вентиляции кожи, но и при необходимости позволяет использовать датчики импульсного ультразвука низкой интенсивности для стимуляции роста костной ткани.

Пациентам, которым требуется длительная иммобилизация ортезной повязкой, важны ее физиотерапевтические качества [6, 35].

Процесс изготовления индивидуальной шины или ортеза включает стандартный цикл: получение данных сканирования поверхности, моделирование и обработку цифровой модели, 3D-печать готового изделия с последующей примеркой и при необходимости – доработкой.

Использование бесконтактного ручного сканера при сканировании поверхности верхней конечности может заменить КТ- или МРТ-визуализацию [27].

На сегодняшний день основными требованиями к изготовлению ортеза при помощи 3D-сканирования являются комфорт для пациента и стабильная фиксация костных отломков. Проведение точного анатомического поверхностного сканирования обеспечивает максимально точное прилегание фиксирующей повязки к анатомическим особенностям сегмента конечности и направлено на минимизацию дискомфорта ощущений для больного [6].

До сканирования при использовании некоторых моделей сканера могут наноситься геометрические отметки на поврежденной конечности пациента для указания области сканирования и сопоставления отсканированных поверхностей с цифровой моделью. Чтобы получить дополнительные данные для создания последующей трехмерной конструкции, в некоторых случаях сканируют две анатомические области (здоровую и пострадавшую). Цифровые данные здорового сегмента конечности могут быть использованы как эталонные, так как после травмы некоторое время сохраняется отек мягких тканей поврежденной конечности [12].

Проблемой при сканировании при болезни Паркинсона, ревматоидном артрите и др. заболеваниях могут быть произвольные движения верхней конечностью. В этом случае при помощи ручных лазерных сканеров «оцифровываются» гипсовые слепки рук в разных плоскостях и под разными углами [30].

Создание персонализированной ортезной повязки для сегмента верхней конечности с учетом индивиду-

альных анатомических особенностей человеческого тела может быть затруднено сложностью поддержания устойчивого положения предплечья, кисти и пальцев в зависимости от степени гипер- или гипотонуса мышц. Поскольку для изготовления индивидуального ортеза необходима полная геометрия поверхности руки (как тыльной, так и ладонной), предложена специальная опора, способная поддерживать руку в оптимальном положении, чтобы избежать искажения получаемых данных при сканировании [7].

Задача проектирования индивидуальных повязок заключается в создании оболочки конструкции в зависимости от места повреждения конечности с целью контроля плотности и толщины вентилируемой структуры ортеза относительно поверхности анатомического сегмента.

Предложена технология создания персонализированных ортезов за счет использования типовых трехмерных моделей, доступных в сети интернет и собранных в стандартную библиотеку шаблонов. Предполагается, что ортезы, изготовленные на основе заранее определенных моделей, будут наиболее экономичными [26].

На этапе 3D-печати создаются наряду с самим фиксирующим устройством необходимые части конструкции, такие как гибкие зазоры, петли или блокирующие компоненты [21]. Процесс их создания включает частичное поверхностное утолщение в виде сплошной оболочки и образование специальных окон.

Согласно публикации Y.-J. Chen et al. [12], для лечения пациентов с переломами костей предплечья и кисти был изготовлен 3D-печатный ортез округлой формы. В местах прилегания повязки к анатомическим областям запястья и кисти приклеивались специальные подушечки (прокладки), чтобы избежать локального давления самой повязки и появления ссадин на коже.

S.J. Kim et al. [19] описывают повязку для запястья при туннельном синдроме, напечатанную на 3D-принтере после сканирования руки от середины предплечья до кончиков пальцев в положении тыльной флексии кисти. Внутренняя поверхность ортеза, изготовленного из термопластичного полиуретана толщиной 1,8 мм, была сглажена посредством постпечатной обработки и отделена на 1 мм от поверхности кожи сегмента конечности для осуществления вентиляции. Также в литературе активно обсуждается вопрос о внедрении 3D-печати в реабилитационную практику [22, 24, 25].

J. Li et al. [22] ссылаются на специально разработанную систему настройки, которая помогает создавать 3D-печатные модели повязок для иммобилизации повреждений кисти и предплечья. Использование такой системы настройки предлагает следующие конструктивные решения: деление на 2 или 3 части в зависимости от размера лонгеты; создание сетчатых узоров (окон) для уменьшения веса, а также для увеличения вентиляции; образование вдоль длинной кромки каждой разделенной части лонгеты крепежных элементов, чтобы облегчить сборку; закругление кромок для предотвращения повреждения кожи из-за острых или шероховатых краев [24, 25, 30].

Предложенный способ сокращает длительность этапов 3D-сканирования, CAD-манипуляций и времени печати до нескольких часов, однако общая продолжительность процесса проектирования все же превышает длительность этапа наложения традиционной гипсовой или полимерной повязок.

Ожоги кистей рук часто осложняются миогенными и артрогенными контрактурами пальцев, наличием гипертрофических, киллоидных рубцов с повреждением периферических нервов [8]. N. Ho-Sung et al. [17] для лечения ожоговых пациентов рекомендуют изготавливать лонгеты (шины) для пальцев кистей индивидуально с помощью 3D-печати с учетом особенностей ожоговой травмы.

H. Kim et al. [18] предлагают гибридную технологию производства, которая использует трехмерную печать и технологию литья под давлением, сокращающую стоимость и время изготовления. Конструкция ортеза разделяется на две части: окружающий кожу внутренний слой, создаваемый при помощи 3D-печати из акрилонитрил бутадиен стиролового пластика (ABS), и внешнюю оболочку, прикрепленную к внутренней структуре, которая защищает травмированную область от внешнего воздействия.

D. Palousek et al. [29] отмечают, что если общее время, необходимое для создания функциональной повязки для верхней конечности с применением 3D-печати технологией FDM, составляет примерно 9–10 ч, реже – до 23–24 ч, то с использованием гибридной технологии на построение внутренней 3D-структуры тратится 3,5–4 ч. Длительность 3D-печати внутреннего слоя иммобилизирующей повязки можно еще сократить, если высоту слоя печати уменьшить примерно на 0,2 мм [18].

Для лечения ревматоидного полиартрита мелких костей предложена 3D-печатная шина с амортизирующими вставками. Созданные эластомерные шарниры при данной технологии позволяют защищать болезненные выступы костей, сокращают динамическое давление и предоставляют возможность для пациентов одевать и снимать повязки [29].

Прилегающие к коже материалы не должны вызывать токсических и аллергических реакций. Так, по данным Y.-J. Chen et al. [12] полипропилен и полиамид (PA2200), применяемые при 3D-печати ортопедических конструкций, были зарегистрированы в Китайском управлении по контролю за продуктами и лекарствами (China Food and Drug Administration – CFDA) и одобрены как материалы I класса для реабилитационных устройств.

Материал на основе полимолочной кислоты используется главным образом из-за низкой стоимости, коммерческой доступности и биосовместимости [26]. В других случаях трехмерная печать выполнялась из термопластичного полиуретана [19], ABS [18].

Новым направлением, которое может быть достигнуто современными способами 3D-печати, считается интеграция нескольких материалов в рамках одной функциональной повязки [29].

Заключение. 3D-печать в области медицины находит все большее применение. Успешное использование этой технологии вносит определенный вклад в лечение пациентов с травмами и заболеваниями верхней конечности. 3D-печатные ортезы, шины и лонгеты оказывают положительное влияние на качество жизни пациентов, страдающих ортопедическими проблемами и хроническими заболеваниями, требующими иммобилизации.

Перспективы использования технологии трехмерной печати связаны с сокращением расходов на 3D-принтеры, материалов для печати и эффективным взаимодействием специалистов, поддерживающих 3D-печать. Затраты на 3D-принтеры и материалы для печати, вероятно, сократятся с течением времени, как это уже происходило на примере других современных технологий.

Для дальнейшего развития 3D-печати необходимо адаптировать имеющиеся или создать полноценные специализированные CAD-программы для моделирования ортезов, шин и лонгет. Необходимо использовать преимущества подходов CAD, позволяющих добиться экономии затрат рабочего времени специалистов за счет оптимизации в области проектирования, которые уже внедрены в других областях медицины, включая нейрохирургию [14, 31], сердечно-сосудистую хирургию [5, 20], пластическую хирургию [7], челюстно-лицевую хирургию, ортопедию и трансплантацию органов [4, 23, 28].

Требуют дальнейшего изучения вопросы, связанные с применением 3D-печатных изделий в полевых и экстремальных условиях и возможностью их использования в остром периоде травмы. Необходимы исследования по сравнительному анализу консолидации переломов верхней конечности при использовании традиционных способов фиксации и с применением 3D-печатных лонгет и отрезков. Кроме того, оценке подлежат обоснованность применения, функциональность и биосовместимость созданных при помощи 3D-печати средств иммобилизации верхней конечности.

Литература

1. Кушнарев, С.В. Создание трехмерных физических моделей на основе изображений компьютерной томографии (первый опыт) / С.В. Кушнарев [и др.] // Известия Росс. воен.-мед. акад. – 2018. – № 4. – С. 53–56.
2. Нагибович, О.А. 3D-печать для медицины / О.А. Нагибович [и др.] // Первая российская конференция: физика – наукам о жизни: тез. докл. – СПб., 2016. – С. 155.
3. Нагибович, О.А. Применение технологии 3D-печати в медицине / О.А. Нагибович [и др.] // Клин. патофизиол. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 14–21.
4. Ayoub, A.F. A novel approach for planning orthognathic surgery: the integration of dental casts into three-dimensional printed mandibular models / A.F. Ayoub [et al.] // Int. J. Oral. Maxillofac Surg. – 2014. – Vol. 43. – P. 454–459.
5. Bangeas, P. Rapid prototyping in aortic surgery / P. Bangeas [et al.] // Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery. – 2016. – Vol. 22. – P. 513–514.
6. Baronio, G. A Critical Analysis of a Hand Orthosis Reverse Engineering and 3D Printing Process / G. Baronio [et al.] // Applied Bionics and Biomechanics. – 2016. – P. 1–7.
7. Baronio, G. Concept and Design of a 3D Printed Support to Assist

- Hand Scanning for the Realization of Customized Orthosis / G. Baronio [et al.] // Appl. Bionics Biomech. – 2017. – P. 1–8.
8. Brown, M. Postburn contractures of the hand / M. Brown [et al.] // Hand Clin. – 2017. – Vol. 33. – P. 317–331.
 9. Bunch, P.M. A biomechanical approach to distal radius fractures for the emergency radiologist / P.M. Bunch [et al.] // Emerg. Radiol. – 2016. – Vol. 23, № 2. – P. 175–285.
 10. Chae, M.P. Emerging Applications of Bedside 3D Printing in Plastic Surgery / M.P. Chae [et al.] // Front Surg. – 2015. – Vol. 2. – P. 25.
 11. Chae, M.P. Image-guided 3D-printing and haptic modeling in plastic surgery / M.P. Chae [et al.] // London: CRC Taylor and Francis Press, 2014. – P. 819–830.
 12. Chen, Y.-J. Application of 3D-printed and patient-specific cast for the treatment of distal radius fractures: initial experience / Y.-J. Chen [et al.] // 3D Printing in Medicine. – 2017. – Vol. 3, № 11. – P. 1–9.
 13. Gadia, A. Emergence of Three-Dimensional Printing Technology and Its Utility in Spine Surgery / A. Gadia [et al.] // Asian Spine J. – 2018. – Vol. 12, № 2. – P. 365–371.
 14. Garg, B. Current status of 3D printing in spine surgery / B. Garg, N. Mehta // J. Clin. Orthop. Trauma. – 2018. – P. 1–8.
 15. Garg, B. Outcome and safety analysis of 3D printed patient specific pedicle screw jigs for complex spinal deformities: A comparative study / B. Garg [et al.] // J. Spine – 2018. – P. 1–21.
 16. Gerstle, T.L. A plastic surgery application in evolution: three-dimensional printing / T.L. Gerstle [et al.] // Plast. Reconstr. Surg. – 2014. – Vol. 133. – P. 446–451.
 17. Ho-Sung, N. The Application of Three-Dimensional Printed Finger Splints for Post Hand Burn Patients: A Case Series Investigation / N. Ho-Sung [et al.] // Ann. Rehabil. Med. – 2018. – Vol. 42, № 4. – P. 634–638.
 18. Kim, H. Case study: hybrid model for the customized wrist orthosis using 3D printing / H. Kim [et al.] // J. Mech. Sci. Technol. – 2015. – Vol. 29, № 12. – P. 5151–5156.
 19. Kim, S.J. 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 [et al.] // Prosthetics and Orthotics International. – 2018. – Vol. 42, № 6. – P. 636–643.
 20. Lazar, H.L. Three-dimensional printing in cardiac surgery: Enhanced imagery results in enhanced outcomes / H. L. Lazar // J. Card. Surg. – 2018. – Vol. 33. – P. 1–28.
 21. Li, J. Feasibility study applying a parametric model as the design generator for 3D-printed orthosis for fracture immobilization / J. Li [et al.] // 3D Printing in Medicine. – 2018. – Vol. 4, № 1. – P. 1–15.
 22. Li, J. Rapid customization system for 3D-printed splint using programmable modeling technique – a practical approach / J. Li [et al.] // 3D Printing in Medicine. – 2018. – Vol. 4. – P. 1–6.
 23. Li, C. Applications of Three-Dimensional Printing in Surgery / C. Li [et al.] // Surgical Innovation – 2016. – Vol. 24, № 1. – P. 82–88.
 24. Lin, H. A rapid and intelligent designing technique for patient-specific and 3D-printed orthopedic cast / H. Lin [et al.] // 3D Print Med. J. – 2015. – Vol. 2, № 4. – P. 1–10.
 25. Lunsfort, C. Innovations with 3-dimensional printing in physical medicine and rehabilitation: a review of the literature / C. Lunsfort [et al.] // PM&R J. – 2016. – Vol. 8, № 12. – P. 1201–1212.
 26. Souza M.A. Proposal of custom made wrist orthoses based on 3D modelling and 3D printing / M.A. Souza [et al.] // 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). – 2017. – P. 3789–3792.
 27. Negi S. Basics and applications of rapid prototyping medical models / S. Negi [et al.] // Rapid Prototyping J. – 2014. – Vol. 20, № 3. – P. 256–267.
 28. Olszewski, R. Accuracy of three-dimensional, paper-based models generated using a low-cost, three-dimensional printer / R. Olszewski [et al.] // J. Craniomaxillofac. Surg. – 2014. – Vol. 42, № 8. – P. 1847–1852.
 29. Palousek, D. Pilot study of the wrist orthosis design process / D. Palousek [et al.] // Rapid Prototyping J. – 2014. – Vol. 20, № 1. – P. 27–32.
 30. Paterson, A.M. Comparing additive manufacturing technologies for customised wrist splints / A.M. Paterson [et al.] // Rapid Prototyping J. – 2015. Vol. 21, № 3. – P. 230–243.
 31. Pucci J.U. Connolly Three-dimensional printing: technologies, applications, and limitations in neurosurgery / J.U. Pucci [et al.] // Biotechn. Advances. – 2017. – Vol. 35, № 5. – P. 521–529.
 32. Trauner, K.B. The Emerging Role of 3D Printing in Arthroplasty and Orthopedics / K.B. Trauner // J. Arthroplasty. – 2018. – Vol. 33. – P. 2352–2354.
 33. Vaish, A. 3D printing and its applications in Orthopedics / A. Vaish [et al.] // J. Clin. Orthop. Trauma. – 2018. – Vol. 9. – P. S74–75.
 34. Wong, T.M. The use of three-dimensional printing technology in orthopaedic surgery: A review / T.M. Wong [et al.] // J. Orthop. Surg. – 2017. – Vol. 25, № 1. – P. 1–7.
 35. Yu-an, J. Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses: A Review / J. Yu-an [et al.] // CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation. – 2015. – Vol. 36. – P. 199–204.

V.V. Khominets, S.A. Peleshok, D.A. Volov, M.V. Titova, M.I. Eliseeva,
S.V. Kushnarev, A.V. Shirshin, V.N. Adamenko, Ya.I. Nebylitsa

3D printing technologies in the treatment of patients with injuries and diseases of the forearm and hand

Abstract. In the last decade, the range of applications of three-dimensional printing (3D printing) in surgery has been expanding. In traumatology, orthopedics and rehabilitation of injuries of the upper limbs, there is growing interest in creating splints and orthoses that can take into account the individual anatomical features of the human body. Traditional orthoses and splints are not always convenient and can lead to undesirable consequences such as pain, swelling, pressure, or even lack of therapeutic effect. The prospects of 3D printing technology in medicine from the beginning of its mass introduction, the features of modeling, manufacturing and application of means for immobilization of injuries and diseases of the upper extremities according to domestic and foreign publications over the past 5 years are considered. The data on the functionality of 3D-printed tire structures and orthoses used to immobilize the upper limb are analyzed in comparison with traditional methods of fixation. Three-dimensional images of patients with injuries obtained using computed tomography, magnetic resonance imaging or using a 3D scanner can be used to create virtual 3D models of the forearm, wrist, fingers of the patient, and 3D printing with these anatomical models allows you to create personalized tires and orthoses. Thanks to an individual approach and the use of various solutions, three-dimensional printing can be widely used in traumatology and orthopedics. As a result of this approach, it becomes possible to implement and effectively use a variety of solutions that will find support in healthcare.

Key words: additive technologies, 3D printing, 3D printer, three-dimensional modeling, fixation, bone, forearm, hand, fingers, fractures, immobilization, splints, orthoses.

Контактный телефон: +7-911-211-81-93; e-mail: vmeda-nio@mil.ru