

Предоперационное планирование с применением 3D-печати как способ улучшить результаты хирургического лечения переломов дистального отдела большеберцовой кости

А.Б. Кошкин¹ ✉, М.В. Паршиков¹, С.В. Новиков², А.А. Прохоров³, А.М. Файн^{1,4}

Кафедра травматологии, ортопедии и медицины катастроф

¹ ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» МЗ РФ

127006, Российская Федерация, Москва, ул. Долгоруковская, д. 4

² ГБУЗ «Госпиталь для ветеранов войн № 2 ДЗМ»

109472, Российская Федерация, Москва, Волгоградский проспект, д. 168

³ ГБУЗ «Городская клиническая больница им. С.П. Боткина ДЗМ»

125284, Российская Федерация, Москва, 2-й Боткинский пр., д. 5

⁴ ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»

129090, Российская Федерация, Москва, Б. Сухаревская пл., д. 3

✉ Контактная информация: Кошкин Арсентий Борисович, врач травматолог-ортопед отделения сочетанной травмы № 4 Хирургического госпиталя Университетской клиники Научно-образовательного института клинической медицины им. Н.А. Семашко ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» МЗ РФ. Email: febris@mail.ru

АКТУАЛЬНОСТЬ

Проблема лечения переломов дистального метаэпифиза большеберцовой кости остается актуальной, несмотря на развитие современных методов диагностики, инструментария для остеосинтеза и средств реабилитации ввиду большого количества осложнений, приводящих к стойкой утрате трудоспособности, таких как проблемы с заживлением мягких тканей, инфекционные осложнения, посттравматический артроз голеностопного сустава.

Эти проблемы связаны с высокой частотой высокоэнергетических травм, особенностями мягкотканного футляра и большой подвижностью голеностопного сустава. При этом при лечении многооскольчатых внутрисуставных переломов пилон отсутствует четко прописанный алгоритм операции: выбор доступа, фиксатора, техники репозиции. В последнее время при планировании остеосинтеза все более широкое распространение получают аддитивные технологии, в частности, 3D-печать полноразмерных прототипов перелома.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести анализ методов предоперационного планирования остеосинтеза переломов большеберцовой кости при помощи программного обеспечения и оценить возможности 3D-печати для улучшения результатов хирургического лечения переломов дистального отдела большеберцовой кости.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Поиск источников проводили с использованием электронных баз научной литературы PubMed, eLibrary, Cyberleninka.

Использовали следующие ключевые слова: *pilon fractures, osteosynthesis, preoperative planning, 3D-printing, 3D-model* и соответствующие им термины на русском языке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно данным различных авторов, применение 3D-печати для предоперационного планирования улучшает показатели времени операции, качества репозиции, функционального результата, интраоперационной кровопотери и снижения количества осложнений.

ВЫВОДЫ

Оценка отдаленных результатов применения 3D-печати для предоперационного планирования остеосинтеза переломов пилон продолжается. Но уже сейчас можно сделать выводы о перспективности метода и рекомендовать для широкого применения в рутинной практике травматолога-ортопеда.

Ключевые слова:

переломы пилон, остеосинтез, предоперационное планирование, 3D-печать, 3D-моделирование

Ссылка для цитирования

Кошкин А.Б., Паршиков М.В., Новиков С.В., Прохоров А.А., Файн А.М. Предоперационное планирование с применением 3D-печати как способ улучшить результаты хирургического лечения переломов дистального отдела большеберцовой кости. *Журнал им. Н.В. Склифосовского Неотложная медицинская помощь*. 2024;13(2):247–257. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2024-13-2-247-257>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Благодарность, финансирование

Исследование не имеет спонсорской поддержки

ВАШ — Визуально-аналоговая шкала
 КТ — компьютерная томография
 МРТ — магнитно-резонансная томография
 АО — *Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen* — Ассоциация остеосинтеза
 CAD — *Computer-aided Design* — компьютер-ассистированный дизайн

DICOM — *Digital Imaging and Communications in Medicine* — цифровые изображения и коммуникации в медицине
 PACS — *Picture Archiving Communication System* — коммуникационная система архивирования изображений
 STL — *Stereolithography* — стереолитография

ВВЕДЕНИЕ

Внутрисуставные переломы дистального отдела большеберцовой кости, также известные как переломы пилона, составляют от 5–7% от всех ее повреждений [1, 2]. Термин «пилон» был введен в 1911 году французским хирургом *Etienne Destot* [3], и переводится как «пестик». Таким образом *Destot* хотел описать механическое воздействие дистального отдела большеберцовой кости на таранную кость, подобное давлению пестика на ступку. Повреждения пилона всегда уникальны, они представляют собой «сложный внутрисуставной перелом, покрытый тонким и очень чувствительным мягкотканым футляром» [4], поэтому выбор тактики их лечения всегда сложен и индивидуален.

Предоперационное планирование в широком смысле включает в себя не только учет особенностей анатомического повреждения, разрушения костных и мягкотканых структур, но и тяжесть сопутствующих заболеваний пациента, его функциональную активность. Такие факторы, как пол, возраст, социоэкономический статус, вид занятости пациента, связь травмы с производством, также влияют на определение тактики и, в конечном счете, на результат лечения [5].

Конкретные особенности переломов представлены в различных классификациях. В клинической практике широко используют классификации *Rüedi-Allgöwer* [6] и Ассоциации остеосинтеза (АО) [7], основанные на данных плоскостной рентгенографии. *Rüedi* и *Allgöwer* подразделяют переломы пилона на группы в зависимости от его характера и положения костных фрагментов:

1. Перелом дистального метаэпифиза большеберцовой кости без значительного смещения костных отломков;
2. Перелом дистального метаэпифиза большеберцовой кости со значительным смещением фрагментов;
3. Многооскольчатый перелом дистального метаэпифиза большеберцовой кости со значительным смещением костных фрагментов.

Классификация АО предлагает делить переломы на группы согласно степени повреждения суставной поверхности:

Тип А — внесуставные переломы дистального метаэпифиза большеберцовой кости. Выделение подгрупп А1, А2, А3 основано на количестве отломков метафизарной области и степени их фрагментации.

Тип В — неполные внутрисуставные переломы, при которых происходит раскол суставной поверхности большеберцовой кости, но при этом часть ее остается связанной с диафизом кости. Деление на В1, В2, В3 обусловлено оценкой степени импакции суставной поверхности и характеристикой осколков.

Переломы типа С — внутрисуставные переломы большеберцовой кости с полным отделением линиями перелома суставной поверхности большеберцовой кости от диафиза. Подразделение на С1, С2, С3 связано

с оценкой оскольчатого характера повреждения суставной поверхности и метафизарного отдела кости.

Эти классификации, будучи простыми и понятными, не всегда хороши в плане воспроизводимости, что препятствует их использованию для планирования объема операций [8–11].

Метод компьютерной томографии (КТ) позволил существенно расширить возможности визуализации переломов пилона. На его основе выполнялись исследования по картированию переломов пилона, в результате чего был описан типичный паттерн перелома в виде буквы Y с образованием трех ключевых фрагментов (медиального, включающего внутреннюю лодыжку и максимально нагружаемую часть суставной поверхности, переднелатерального — *Chaput* и заднелатерального — *Volkman* с прикреплениями связочного аппарата) [12].

На основе КТ созданы классификации, более детально описывающие морфологию перелома.

Topliss et al. [13] при анализе компьютерных томограмм выделяют 6 фрагментов, идентификация которых облегчает планирование остеосинтеза (они не обязаны присутствовать все в каждом случае): передний, задний, медиальный, антеролатеральный, постеролатеральный и внутрисуставной с импакцией: переломы с преимущественно сагиттальной (выше энергия травмы, больше вероятность варусной деформации) и с преимущественно коронарной линией перелома (меньше энергия травмы, чаще вальгусная деформация) (рис. 1).

Tang et al. [14] предложили 4-колонную концепцию строения переломов пилона, несколько сходную с классификацией *Topliss*, без упоминания центральных фрагментов. Понимание, какая колонна преимущественно поражена, позволяет определиться с доступом и расположением имплантата (рис. 2).

Leonetti и *Tigani* [15] опубликовали классификационную систему, оценивающую четыре параметра: повреждение суставной поверхности, смещение и количество внутрисуставных фрагментов, направление основной линии перелома и степень оскольчатости (рис. 3).

Проведено большое число исследований, изучающих различные классификации переломов пилона [16–18], которые продемонстрировали противоречивые данные уровня согласованности экспертов. Так, *Ramappa et al.* предложили пятерым травматологам-ортопедам классифицировать 47 компьютерных исследований различных переломов пилона по системам *Rüedi-Allgöwer*, АО и *Topliss*; при этом уровень достоверности согласованности заключений экспертов оказался умеренным [19]. *Palma et al.* [20] отметили высокий уровень согласованности экспертов при использовании классификации *Leonetti-Tigani* у 71 пациента с переломами пилона, однако в исследовании *Xu-Sheng Qiu et al.* [21] при классификации

70 переломов по системам *Ruedi–Allgower*, *AO*, *Topliss*, и *Leonetti–Tigani*, результаты не внушили оптимизма. Классификации *Topliss* и *Leonetti* не были рекомендованы к использованию, а классификация *AO* показала хорошие результаты только на уровне групп переломов.

По-видимому, причиной противоречия и проблемами с воспроизводимостью классификаций *Leonetti* и *Topliss* являлась их сложность: обилие компонентов, обязательных для учета, а также разные возможности компьютерных томографов в разных клиниках и программ для их просмотра. Таким образом, наличие КТ не позволяет создать универсальную, простую и в то же время полную классификацию переломов этой локализации, позволяющую планировать их оперативное лечение.

Места выхода линии перелома за пределы кортикального слоя, положение внутрисуставных фрагментов и распространение перелома на метадиафизарную зону определяют место установки имплантата и, соответственно, хирургический доступ. При этом помимо оценки костной травмы необходим тщательный анализ состояния мягких тканей для определения «мягкотканного окна», идентифицировать (или предположить) интерпозицию мягких тканей, учесть предыдущие и возможные последующие хирургические вмешательства на сегменте — все эти детали существенно влияют на планирование операции. При этом роль магнитно-резонансной томографии (МРТ) в предоперационном планировании переломов пилон остается ограниченной [5], так как имеет вспомогательное значение при главной роли, отведенной КТ.

Также следует учитывать наличие у пациентов сопутствующих повреждений (травмы живота, позвоночника и так далее), которые могут повлиять на положение пациента на операционном столе.

Выбор метода и времени хирургического вмешательства зависит от общего состояния пациента, состояния мягких тканей, морфологии перелома, а также опыта хирурга. Задачами лечения являются реконструкция суставной поверхности большеберцовой кости, восстановление оси, длины и ротации конечности, защита мягкотканного футляра, а также стабильная фиксация, позволяющая осуществлять раннюю разработку движений в голеностопном суставе [3, 22–24].

Методики хирургического лечения переломов пилон включает внутреннюю фиксацию [16], наружную фиксацию с ограниченной внутренней фиксацией или без нее [25–27], либо первичный артродез [2]. «Золотым стандартом» в лечении переломов пилон с момента публикации работ *Helfet* [28], *Patterson et al.* [29] и *Sirkin et al.* [30] стала двухэтапная тактика лечения, состоящая из наложения аппарата наружной фиксации в экстренном порядке и перехода к погружному остеосинтезу после спадения отека и заживления кожных покровов. Данная тактика в англоязычной литературе получила название «*span, scan, plan*» [31] — вытянуть, сканировать, планировать», и отражает необходимость выполнения планирования окончательной фиксации на основании данных КТ перелома пилон строго после наложения дистракционного аппарата [32].

В настоящее время, несмотря на устоявшийся протокол лечения переломов пилон и широкий выбор оперативных методик, отсутствует оптимальная так-

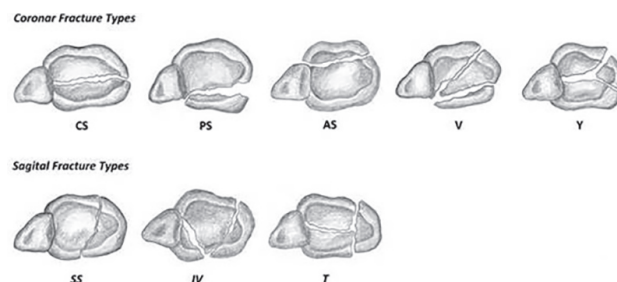


Рис. 1. Классификация переломов пилон *Topliss* [13]
Fig. 1. Topliss classification system of pilon fractures [13]



Рис. 2. Классификация переломов пилон *Tang* [14]
Fig. 2. Tang classification system of pilon fractures [14]

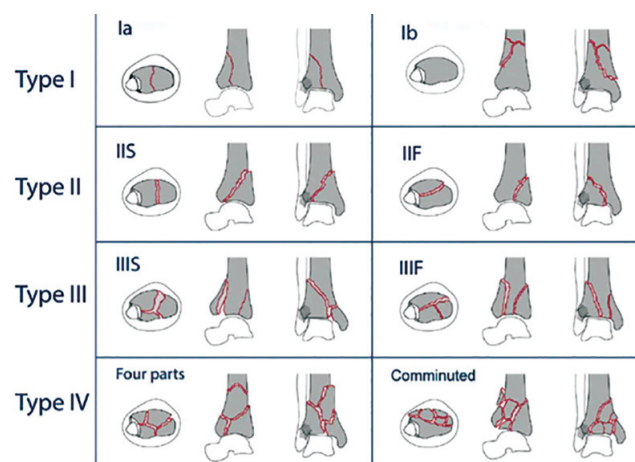


Рис. 3. Классификация переломов пилон *Leonetti–Tigani* [15]
Fig. 3. Leonetti-Tigani classification system of pilon fractures [15]

тика первого уровня доказательности [33]. При этом необходимость его планирования, особенно репозиции, — исключительно важный элемент. Вероятность плохого результата репозиции при определенном виде лечения является показанием к выбору другого [34]. Опубликованы клинические рекомендации с блок-схемами принятия решений при планировании [1, 35]. При анализе ранних и отдаленных результатов хирургического лечения переломов пилон до сих пор регистрируется большое количество осложнений. *Duckworth et al.* сообщают о 27,5% осложнений, включающих прежде всего инфекцию (17,6%), а также потерю репозиции, компартмент-синдром, комплексный региональный болевой синдром и инфицированное несращение перелома [36].

Pollak et al. [37] для изучения качества жизни пациентов, перенесших лечение перелома пилон, применяли опросник *SF-36* [38]. Авторы отметили, что 43% ранее работающих пациентов были вынуждены отказаться от работы и 68% из них связали этот факт с перенесенным ранее переломом. Более поздние исследования лишь подтвердили эти данные: не менее 75% пациентов, перенесших хирургическое лечение переломов пилон, жаловались на заметное ухудшение функции голеностопного сустава, а две трети опро-

шенных испытывают боли в голеностопном суставе ежедневно [39–43]. Более того, эти пациенты очень долго возвращаются к прежней активности: через 12 месяцев после операции на работу возвращаются лишь 57% пациентов [44]. В течение 2 лет после операции у 50% пациентов развивается посттравматический артроз голеностопного сустава [28].

Улучшение понимания морфологии перелома и оптимизация планирования лечения — залог успеха [45].

В широком смысле планирование представляет собой комплекс мер, необходимых для достижения главной задачи, при лечении пациентов с переломом пилона: консолидации в оптимальные сроки и сохранение артикуляции в голеностопном суставе. В него включается анатомичная репозиция со стабильной фиксацией и профилактика осложнений — вторичного смещения костных фрагментов и гнойной инфекции.

Michael Leslie [46] выделяет пять этапов планирования: 1) определение конкретных задач операции (их, как правило, несколько); 2) определение хирургических доступов; 3) оценка состояния мягких тканей; 4) подбор имплантата (имплантатов); 5) разработка послеоперационного ведения.

Hak et al. [47] выделяют три этапа предоперационного планирования ортопедических операций: 1) работа с диагностическими изображениями; 2) непосредственно хирургическая тактика: пошаговый план операции; 3) логистика операционной: требования к операционному столу, инструментарий, особенности анестезии, необходимые инструменты и имплантаты. Переход от рентгенограмм на пленке к цифровому изображению, по мнению многих, мог бы символизировать конец эры классического предоперационного планирования [48]. Однако в настоящее время для предоперационного планирования доступно стандартное офисное программное обеспечение (*Adobe PhotoShop™*, *Microsoft Office™*, *Apple KeyNote™*) [49, 50]. Кроме того, создается все больше и больше специализированных программ, предназначенных для планирования ортопедических операций, таких как *TraumaCAD™*, *MediCAD™*, *OrthoView™*, *Orthoplan™*, *Click2Correct™* и другие. Принцип работы этих программ заключается в возможности импорта файлов диагностических изображений PACS — (*picture archiving communication system* — коммуникационная система архивирования изображений) с локальной диагностической рабочей станцией, выделением отдельных фрагментов перелома и виртуальной репозиции и использованием базы данных имплантов для подбора имплантата соответствующей формы и длины [51].

При очевидных преимуществах применения программного обеспечения для предоперационного планирования необходимо отметить ограничения метода: 1) организационные: требования к компьютерной технике, установленной в стационаре, необходимость покупки и продления лицензии программного обеспечения, обучения врачей; 2) ограничения программного обеспечения: необходимость актуализации базы данных имплантатов на фоне меняющейся ситуации на рынке закупок, отсутствие возможности индивидуального моделирования имплантата под особенности конкретного перелома и сложности в экстраполяции репозиции перелома на экране монитора в реальные действия в операционной. В связи с этим возникает необходимость в поиске новых методов планирования

операции, например, применения аддитивных технологий.

Цель исследования: провести анализ методов предоперационного планирования остеосинтеза переломов большеберцовой кости при помощи программного обеспечения и оценить возможности 3D-печати для улучшения результатов хирургического лечения переломов дистального отдела большеберцовой кости.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Поиск источников проводили с использованием электронных баз научной литературы *PubMed*, *eLibrary*, *Cyberleninka*.

Использовали следующие ключевые слова: *pilon fractures*, *osteosynthesis*, *preoperative planning*, *3D-printing*, *3D-model* и соответствующие им термины на русском языке. Глубина поиска информации — 10 лет. Для проведения анализа и оценки литературных данных были определены критерии включения источников в аналитическое исследование.

Критерием включения источников в исследование являлось наличие полного текста статьи или структурированного с указанием конкретных количественных данных реферата.

Критерий исключения: клинические примеры, тезисы докладов, неопубликованные работы, исследования, имеющие признаки «дублирования» (схожий протокол исследования, группы, число пациентов и др.). В случае обнаружения «дублирующих» статей выбирали более поздний по дате публикации источник.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение 3D-печати в травматологии и ортопедии за последние 10 лет все чаще входит в рутинную практику [52–67]. Появляются все больше исследований, посвященных ее использованию, прежде всего для предоперационного планирования [68]. Трехмерная (3D)-печать — быстро развивающаяся технология, позволяющая создать реальный физический объект, обладающий всеми характеристиками его цифрового прототипа. В ходе печати 3D-принтер слой за слоем создает объект без каких-либо искажений. 3D-печать была изобретена и запатентована американским инженером Charles Hull (*USA Patent No. 4575330*, 1986) [69] и предназначалась для использования в промышленности и архитектуре. Однако достаточно быстро технология нашла свое применение в медицине.

Pal et al. [61] выделяют следующие стадии 3D-печати:

1. Создание компьютер-ассистированного дизайна (*computer aided design*, CAD). Цифровая 3D-модель создается путем «сшивания» серии изображения срезов КТ или МРТ при помощи профессиональных CAD-программ. Изображения, полученные при ультразвуковом исследовании, позитронно-эмиссионной томографии и некоторых других исследований сохраняются в формате DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) и далее проходят пост-обработку в программах CAD, создающих 3D-модель.

2. Конверсия в файл стереолитографии (STL) — это критическая стадия в процессе создания 3D-модели. Информация об объекте в формате STL хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность. Чем больше разрешение у файла, тем больше треугольных граней и тем больше размер

файла. Перед загрузкой файл *STL* должен быть очищен от помех, выполнена коррекция размеров модели, ее ориентация в пространстве, затем файл переносят на принтер.

3. Настройки 3D-принтера, калибровка, настройка скорости печати, установка материала печати.

4. Собственно печать. На большинстве современных принтеров этот процесс полностью автоматический и требует контроля только в случае возникновения ошибки печати.

5. Пост-процессинг. Снятую 3D-модель очищают от кожуха, шлифуют, готовят к использованию.

Полученный полноразмерный трехмерный прототип перелома обеспечивает отличную визуализацию перелома во всех плоскостях, позволяет оперирующей бригаде оценить все специфические характеристики перелома, подтвердить его тип, характер смещения отломков, расположение линии перелома, количество отломков, повреждение колонн, наличие костного дефекта. Вместе с этим 3D-модель создает условия для индивидуального, точного и рационального планирования. Хирургу доступна простая визуализация всех деталей перелома перед операцией, что является очевидным преимуществом и основанием для выработки оптимального плана операции. Возможность симуляции остеосинтеза на 3D-модели способна повысить точность репозиции и стабильность фиксации [70]. Использование 3D-моделей при лечении переломов в области голеностопного сустава демонстрирует уникальные преимущества, такие как точная репозиция, правильный подбор имплантатов [71], уменьшение времени операции и интраоперационной кровопотери.

Zheng *et al.* [72] провели сравнение хирургического лечения переломов пилона по современным стандартам АО со способом лечения, дополненным 3D-модель-ассистированием у 100 пациентов, разделив их на две группы по 50 человек в контрольной и 3D-группе. При этом в 3D-группе выявлены статистически значимые результаты улучшения качества анатомичной репозиции по *Burwell-Charnley* [73], снижения времени операции, интраоперационной кровопотери, количества интраоперационных рентгеновских снимков, доли хороших и отличных результатов по сравнению с контрольной группой. При этом в обеих группах не было выявлено существенно значимых различий по доле осложнений.

Bai *et al.* [55] в ходе метаанализа рандомизированных исследований 486 пациентов, проходивших лечение переломов пилона (в 3D-группах насчитывалось 242 пациента) отметили статистически значимое преимущество 3D-группы по показателям сокращения времени операции, кровопотери, также по улучшению послеоперационных функциональных результатов, данных визуальной аналоговой шкалы (ВАШ), доли хороших и отличных результатов и качества анатомичной репозиции. В некоторых из исследований метаанализа также отмечалось преимущество 3D-группы по таким показателям, как частота инфекционных осложнений [74, 75], время заживления перелома [76, 77], частота развития посттравматического артроза [77] или неправильно сросшихся переломов [72, 79]. Однако в метаанализ вошло много исследований, где производилась только интраоперационная оценка без анализа отдаленных результатов, поэтому влияние 3D-моделирования на отдаленные результаты лечения переломов пилона еще предстоит изучить.

В метаанализе Yang S. [78] на основании 12 клинических исследований, включающих 641 пациента, отметили несомненное преимущество применения 3D-моделирования при остеосинтезе по длительности оперативного вмешательства, снижения интраоперационной кровопотери, снижения лучевой нагрузки во время операции, а также большим количеством отличных результатов и даже снижением среднего времени заживления перелома по сравнению с обычными операциями без применения 3D-моделей. Авторы связывают это с возможностью создать максимально реалистичную картину перелома, оценить количество и направление смещения фрагментов, состояние суставной поверхности, наличие костных дефектов. Полученные знания воплощаются в стратегии операции, более глубоком анализе методов фиксации с пониманием размера и локализации имплантатов, что положительно влияет на качество репозиции.

Об уменьшении интраоперационной кровопотери и времени операции при использовании 3D-моделей в планировании остеосинтеза свидетельствуют и другие исследователи [48, 79, 80].

Kang H.J. [81] в своей работе отметил, что использование 3D-моделей внутрисуставных переломов пилона в 56% случаев привели к изменению выбора пластины по отношению к выбранной только по данным КТ.

Oki *et al.* [82] сообщают об успешном использовании 3D-планирования хирургического лечения перелома пилона в сочетании с дислокацией головки малоберцовой кости: учитывая отсутствие дефицита длины малоберцовой кости, вывих не был диагностирован, однако 3D-планирование позволило обнаружить дефицит длины большеберцовой кости, что способствовало обнаружению вывиха головки малоберцовой кости. Операция была выполнена в два этапа: сначала устранение вывиха и фиксация малоберцовой кости, далее — остеосинтез перелома пилона.

Тем не менее, использование 3D-моделей имеет некоторые ограничения. Во-первых, при изготовлении 3D-модели используют КТ-информацию о костных структурах без данных о состоянии мягких тканей и их кровоснабжения. Также отсутствие «мягких тканей» на 3D-модели может дезориентировать хирурга в плане места укладки пластины и направления проведения винтов, как это описано в статье по 3D-моделированию остеосинтеза вертлужной впадины и лучезапястного сустава [83, 84]. Во-вторых, непосредственно, печать одной 3D-модели занимает, в среднем, 10–12 часов, что затрудняет ее использование в неотложных случаях, а с учетом времени программной обработки более длительный процесс предоперационной подготовки несколько дезавуирует экономии времени во время операции [85]. Более того, технология 3D-печати подразумевает использование специфического программного обеспечения, квалифицированный персонал, наличие 3D-принтеров и расходных материалов, что может удорожать стоимость лечения, хотя со временем стоимость использования этой технологии постепенно снижается [86]. Существует мнение, что 3D-печать, безусловно полезная при планировании остеосинтеза сложных переломов, не должна использоваться рутинно в 100% случаев [87]. Разумеется, при внедрении использования 3D-моделей необходимо учитывать кривую обучения персонала, что может влиять на время изготовления моделей и их качество [88].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение 3D-моделей в планировании хирургического лечения переломов дистального отдела большеберцовой кости позволяет сократить время операции, упростить выбор и адаптацию соответствующих имплантатов для остеосинтеза. Сама техника создания 3D-прототипов продолжает свое развитие: известны публикации об использовании искусственного интеллекта в создании этих моделей: появилась информация о так называемой 4D-печати, при которой матери-

алу прототипа придают механические свойства кости [89–91].

Оценка отдаленных результатов продолжается, появляется все больше исследований, подтверждающих положительное влияние использования этого высокотехнологичного метода. Это позволяет сделать вывод о его перспективности и рекомендовать для широкого применения в рутинной практике травматолога-ортопеда.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mauffrey C, Vasario G, Battiston B, Lewis C, Beazley J, Seligson D. Tibial pilon fractures: a review of incidence, diagnosis, treatment, and complications. *Acta Orthop Belg.* 2011;77(4):432–440. PMID: 21954749
2. Beaman DN, Gellman R. Fracture reduction and primary ankle arthrodesis: a reliable approach for severely comminuted tibial pilon fracture. *Clin Orthop Relat Res.* 2014;472(12):3823–3834. PMID: 24844887 <https://doi.org/10.1007/s11999-014-3683-x>
3. Destot EAJ. Traumatismes du pied et rayons X: Malleoles-Astragale-Calcanéum-Avant-pied. Paris: Masson; 1911.
4. Carter TH, Duckworth AD, Oliver WM, Molyneux SG, Amin AK, White TO. Open Reduction and Internal Fixation of Distal Tibial Pilon Fractures. *JBJS Essent Surg Tech.* 2019;9(3):e29. PMID: 32021729 <https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.18.00093>
5. Saad BN, Yingling JM, Liporace FA, Yoon RS. Pilon Fractures: Challenges and Solutions. *Orthop Res Rev.* 2019;11:149–157. PMID: 31576179 <https://doi.org/10.2147/ORR.S170956>
6. Rüedi T. Fractures of the lower end of the tibia into the ankle joint: results 9 years after open reduction and internal fixation. *Injury.* 1973;5(2):130–134. PMID: 4774764 [https://doi.org/10.1016/s0020-1383\(73\)80089-0](https://doi.org/10.1016/s0020-1383(73)80089-0)
7. Müller ME. Müller AO Classification of Fractures-Long Bones. Berlin, Germany: Springer-Verlag; 2010.
8. Dirschl DR, Adams GL. A critical assessment of factors influencing reliability in the classification of fractures, using fractures of the tibial plafond as a model. *J Orthop Trauma.* 1997;11(7):471–476. PMID: 9334947 <https://doi.org/10.1097/00005131-199710000-00003>
9. Ramappa M, Bajwa A, Singh A, Mackenney P, Hui A, Port A. Interobserver and intraobserver variations in tibial pilon fracture classification systems. *Foot (Edinb).* 2010;20(2–3):61–63. PMID: 20609577 <https://doi.org/10.1016/j.foot.2010.06.002>
10. Martin JS, Marsh JL, Bonar SK, DeCoster TA, Found EM, Brandser EA. Assessment of the AO/ASIF fracture classification for the distal tibia. *J Orthop Trauma.* 1997;11(7):477–483. PMID: 9334948 <https://doi.org/10.1097/00005131-199710000-00004>
11. Swiontkowski MF, Sands AK, Agel J, Diab M, Schwappach JR, Kreder HJ. Interobserver variation in the AO/OTA fracture classification system for pilon fractures: is there a problem? *J Orthop Trauma.* 1997;11(7):467–470. PMID: 9334946 <https://doi.org/10.1097/00005131-199710000-00002>
12. Cole PA, Mehrle RK, Bhandari M, Zlowodzki M. The pilon map: fracture lines and comminution zones in OTA/AO type 43C3 pilon fractures. *J Orthop Trauma.* 2013;27(7):e152–e156. PMID: 23360909 <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e318288a7e9>
13. Topliss CJ, Jackson M, Atkins RM. Anatomy of pilon fractures of the distal tibia. *J Bone Joint Surg Br.* 2005;87(5):692–697. PMID: 15855374 <https://doi.org/10.1302/0301-620X.87B5.15982>
14. Tang X, Tang PF, Wang MY, Lü DC, Liu MZ, Liu CJ, et al. Pilon fractures: a new classification and therapeutic strategies. *Chin Med J (Engl).* 2012;125(14):2487–2492. PMID: 22882927
15. Leonetti D, Tigani D. Pilon fractures: A new classification system based on CT-scan. *Injury.* 2017;48(10):2311–2317. PMID: 28774706 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.07.026>
16. White TO, Guy P, Cooke CJ, Kennedy SA, Droll KP, Blachut PA, et al. The results of early primary open reduction and internal fixation for treatment of OTA 43C-type tibial pilon fractures: a cohort study. *J Orthop Trauma.* 2010;24(12):757–763. PMID: 21076248 <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e3181d04bc0>
17. Keiler A, Riechelmann F, Thöni M, Brunner A, Ulmar B. Three-dimensional computed tomography reconstruction improves the reliability of tibial pilon fracture classification and preoperative surgical planning. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020;140(2):187–195. PMID: 31529150 <https://doi.org/10.1007/s00402-019-03259-8>
18. Byun SE, Choi W, Choi Y, Ahn T-K, Kim HK, Yoon S, et al. Impact of two- and three-dimensional computed tomography use on intraobserver and interobserver reliabilities of pilon fracture classification and treatment recommendation. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2019;105(7):1407–1412. PMID: 31542310 <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.07.011>
19. Palma J, Villa A, Mery P, Abarca M, Mora A, Peña A, et al. A New Classification System for Pilon Fractures Based on CT Scan: An Independent Interobserver and Intraobserver Agreement Evaluation. *J Am Acad Orthop Surg.* 2020;28(5):208–213. PMID: 31800439 <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-19-00390>
20. Qiu XS, Li XG, Qi XY, Wang Z, Chen YX. What Is the Most Reliable Classification System to Assess Tibial Pilon Fractures? *J Foot Ankle Surg.* 2020;59(1):48–52. PMID: 31882147 <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2019.07.002>
21. Tomás-Hernández J. High-energy pilon fractures management: State of the art. *EFORT Open Rev.* 2017;1(10):354–361. PMID: 28461913 <https://doi.org/10.1302/2058-5241.1.000016>
22. d'Heurle A, Kazemi N, Connelly C, Wyrick JD, Archdeacon MT, Le TT. Prospective Randomized Comparison of Locked Plates Versus Nonlocked Plates for the Treatment of High-Energy Pilon Fractures. *J Orthop Trauma.* 2015;29(9):420–423. PMID: 26165256 <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000386>
23. Lomax A, Singh A, Jane M N, Senthil K C. Complications and early results after operative fixation of 68 pilon fractures of the distal tibia. *Scott Med J.* 2015;60(2):79–84. PMID: 25630506 <https://doi.org/10.1177/0036933015569159>
24. Zhao L, Li Y, Chen A, Zhang Z, Xi J, Yang D. Treatment of type C pilon fractures by external fixator combined with limited open reduction and absorbable internal fixation. *Foot Ankle Int.* 2013;34(4):534–542. PMID: 23447509 <https://doi.org/10.1177/1071100713480344>
25. Артемьев, А. А., Загородний, Н. В., Ивашкин, А. Н., Абакиров, М. Д., Плетнев, В. В. Внешний остеосинтез по Илизарову как метод окончательной фиксации сложных переломов голеностопного сустава. *Клиническая практика.* 2015;(1):10–16.
26. Giannoudis VP, Ewins E, Taylor DM, Foster P, Harwood P. Clinical and Functional Outcomes in Patients with Distal Tibial Fracture Treated by Circular External Fixation: A Retrospective Cohort Study. *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2021;16(2):86–95. PMID: 34804224 <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10080-1516>
27. Helfet DL, Koval K, Pappas J, Sanders RW, DiPasquale T. Intraarticular “pilon” fracture of the tibia. *Clin Orthop Relat Res.* 1994;(298):221–228. PMID: 8118979
28. Patterson MJ, Cole JD. Two-staged delayed open reduction and internal fixation of severe pilon fractures. *J Orthop Trauma.* 1999;13(2):85–91. PMID: 10052781 <https://doi.org/10.1097/00005131-199902000-00003>
29. Sirkin M, Sanders R, DiPasquale T, Herscovici D Jr. A staged protocol for soft tissue management in the treatment of complex pilon fractures. *J Orthop Trauma.* 1999;13(2):78–84. PMID: 10052780 <https://doi.org/10.1097/00005131-199902000-00002>
30. Stillhard PF, Frima H, Sommer C. Pilonfrakturen – Überlegungen zur Versorgung und Zugänge. *Oper Orthop Traumatol.* 2018;30(6):435–456. PMID: 30334079 <https://doi.org/10.1007/s00064-018-0570-8>
31. Tornetta P 3rd, Gorup J. Axial computed tomography of pilon fractures. *Clin Orthop Relat Res.* 1996;(323):273–276. PMID: 8625591 <https://doi.org/10.1097/00005086-199602000-00037>
32. Calori GM, Tagliabue L, Mazza E, de Bellis U, Pierannunzii L, Marelli BM, et al. Tibial pilon fractures: which method of treatment? *Injury.* 2010;41(11):1183–1190. PMID: 20870227 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2010.08.041>
33. Teeny SM, Wiss DA. Open reduction and internal fixation of tibial plafond fractures. Variables contributing to poor results and complications. *Clin Orthop Relat Res.* 1993;(292):108–117. PMID: 8519097
34. Manegold S, Springer A, Märdia S, Tsitsilonis S. Treatment Algorithm for Pilon Fracture – Clinical and Radiological Results. *Algorithmus léčby zlomenin pilonu – klinické a radiologické výsledky. Acta Chir Orthop Traumatol Cech.* 2019;86(1):11–17. PMID: 30843508
35. Duckworth AD, Jefferies JG, Clement ND, White TO. Type C tibial pilon fractures: short- and long-term outcome following operative intervention. *Bone Joint J.* 2016;98-B(8):1106–1111. PMID: 27482025 <https://doi.org/10.1302/0301-620X.98B8.36400>
36. Pollak AN, McCarthy ML, Bess RS, Agel J, Swiontkowski MF. Outcomes after treatment of high-energy tibial plafond fractures. *J Bone Joint Surg Am.* 2003;85(10):1893–1900. PMID: 14563795 <https://doi.org/10.2106/00004623-200310000-00005>
37. Ware J, Snow KK, Kosinski M, Gandek B. SF36 Health Survey: Manual and Interpretation Guide. Lincoln, RI: Quality Metric, Inc; 1993. p. 30.

38. Cutillas-Ybarra MB, Lizaur-Utrilla A, Lopez-Prats FA. Prognostic factors of health-related quality of life in patients after tibial plafond fracture. A pilot study. *Injury*. 2015;46(11):2253–2257. PMID: 26115581 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.06.025>
39. Harris AM, Patterson BM, Sontich JK, Vallier HA. Results and outcomes after operative treatment of high-energy tibial plafond fractures. *Foot Ankle Int*. 2006;27(4):256–265. PMID: 16624215 <https://doi.org/10.1177/107110070602700406>
40. Boraiah S, Kemp TJ, Erwtaman A, Lucas PA, Asprinio DE. Outcome following open reduction and internal fixation of open pilon fractures. *J Bone Joint Surg Am*. 2010;92(2):346–352. PMID: 20124061 <https://doi.org/10.2106/JBJS.H.01678>
41. van den Berg J, Monteban P, Roobroeck M, Smeets B, Nijs S, Hoekstra H. Functional outcome and general health status after treatment of AO type 43 distal tibial fractures. *Injury*. 2016;47(7):1519–1524. PMID: 27129909 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.04.009>
42. Marsh JL, Weigel DP, Dirschl DR. Tibial plafond fractures. How do these ankles function over time? *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85(2):287–295. PMID: 12571307
43. Bonato LJ, Edwards ER, Gosling CM, Hau R, Hofstee DJ, Shuen A, et al. Patient reported health related quality of life early outcomes at 12 months after surgically managed tibial plafond fracture. *Injury*. 2017;48(4):946–953. PMID: 28233519 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.11.012>
44. Zeng J, Xu C, Xu G, Zhang W, Wang D, Li H, et al. Evaluation of Ankle Fractures in 228 Patients from a Single Center Using Three-Dimensional Computed Tomography Mapping. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:855114. PMID: 35372321 <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.855114>
45. Leslie M. Pilon Fractures. C C V5. 2021. <https://ota.org/sites/files/2021-06/LE%20F%26A1%20Pilon%20Fractures.pdf> [Accessed May 16, 2024].
46. Hak DJ, Rose J, Stahel PF. Preoperative planning in orthopedic trauma: benefits and contemporary uses. *Orthopedics*. 2010;33(8):581–584. PMID: 20704156 <https://doi.org/10.3928/01477447-20100625-21>
47. Pilson HT, Reddix RN Jr, Mutty CE, Webb LX. The long lost art of preoperative planning--resurrected? *Orthopedics*. 2008;31(12):orthosupersite.com/view.asp?rID=32932. PMID: 19226056 <https://doi.org/10.3928/01477447-20081201-19>
48. Galán-Olleros M, García-Coiradas J, Llanos S, Valle-Cruz JA, Marco F. Fracture planning is easy: Development of a basic method of digital planning based on the traditional pencil and paper technique. Planificar fracturas es sencillo: desarrollo de un método básico de planificación digital basado en la técnica tradicional con lápiz y papel. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol*. 2022;66(5):328–340. PMID: 34366259 <https://doi.org/10.1016/j.recot.2021.05.002>
49. Ordas-Bayon A, Cabrera Ortiz D, Logan K, Pesantez R. Enhancing Preoperative Planning in Orthopedic Trauma Surgery Using a Presentation Software. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo)*. 2021;56(4):517–522. PMID: 34602675 <https://doi.org/10.1055/s-0040-1721853>
50. Steinberg EL, Segev E, Drexler M, Ben-Tov T, Nimrod S. Preoperative Planning of Orthopedic Procedures using Digitalized Software Systems. *Isr Med Assoc J*. 2016;18(6):354–358. PMID: 27468530
51. Benum P, Aamodt A, Nordsletten L. Customised femoral stems in osteopetrosis and the development of a guiding system for the preparation of an intramedullary cavity: a report of two cases. *J Bone Joint Surg Br*. 2010;92(9):1303–1305. PMID: 20798453 <https://doi.org/10.1302/0301-620X.92B9.24415>
52. Davidovitch RI, Weil Y, Karia R, Forman J, Looze C, Liebergall M, et al. Intraoperative syndesmotomic reduction: three-dimensional versus standard fluoroscopic imaging. *J Bone Joint Surg Am*. 2013;95(20):1838–1845. PMID: 24132357 <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.00382>
53. Chana-Rodríguez F, Mañanes RP, Rojo-Manaute J, Gil P, Martínez-Gómez JM, Vaquero-Martín J. 3D surgical planning and pre contoured plates for acetabular fractures. *Injury*. 2016;47(11):2507–2511. PMID: 27599393 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.08.027>
54. Bai J, Wang Y, Zhang P, Liu M, Wang P, Wang J, et al. Efficacy and safety of 3D print-assisted surgery for the treatment of pilon fractures: a meta-analysis of randomized controlled trials. *J Orthop Surg Res*. 2018;13(1):283. PMID: 30419933 <https://doi.org/10.1186/s13018-018-0976-x>
55. Meng M, Wang J, Sun T, Zhang W, Zhang J, Shu L, et al. Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics. *J Orthop Translat*. 2022;34:22–41. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2022.03.001>
56. Chepelev L, Wake N, Ryan J, Althobaity W, Gupta A, Arribas E, et al. Radiological Society of North America (RSNA) 3D printing Special Interest Group (SIG): guidelines for medical 3D printing and appropriateness for clinical scenarios. *3D Print Med*. 2018;4(1):11. PMID: 30649688 <https://doi.org/10.1186/s41205-018-0030-y>
57. Auricchio F, Marconi S. 3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology. *EFORT Open Rev*. 2017;1(5):121–127. PMID: 28461938 <https://doi.org/10.1302/2058-5241.1.000012>
58. Skelley NW, Smith MJ, Ma R, Cook JL. Three-dimensional Printing Technology in Orthopaedics. *J Am Acad Orthop Surg*. 2019;27(24):918–925. PMID: 31268868 <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-18-00746>
59. Alemayehu DG, Zhang Z, Tahir E, Gateau D, Zhang DF, Ma X. Preoperative Planning Using 3D Printing Technology in Orthopedic Surgery. *Biomed Res Int*. 2021;2021:7940242. PMID: 34676264 <https://doi.org/10.1155/2021/7940242>
60. Pal AK, Bhanakar U, Ray B. Three-dimensional (3D) printing: A potentially versatile tool in the field of medicine. *Indian J Clin Anat Physiol*. 2022;9(2):78–84. <https://doi.org/10.18231/j.ijcap.2022.020>
61. Morgan C, Khatri C, Hanna SA, Ashrafian H, Sarraf KM. Use of three-dimensional printing in preoperative planning in orthopaedic trauma surgery: A systematic review and meta-analysis. *World J Orthop*. 2020;11(1):57–67. PMID: 31966970 <https://doi.org/10.5312/wjo.v11.i1.57>
62. Ertürk C, Ayyıldız S, Erdöl C. Orthopedics and 3D technology in Turkey: A preliminary report. *Jt Dis Relat Surg*. 2021;32(2):279–289. PMID: 34145802 <https://doi.org/10.52312/jdrs.2021.20>
63. Zheng W, Su J, Cai L, Lou Y, Wang J, Guo X, et al. Application of 3D-printing technology in the treatment of humeral intercondylar fractures. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2018;104(1):83–88. PMID: 29248764 <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2017.11.012>
64. Zheng W, Tao Z, Lou Y, Feng Z, Li H, Cheng L, et al. Comparison of the Conventional Surgery and the Surgery Assisted by 3d Printing Technology in the Treatment of Calcaneal Fractures. *J Invest Surg*. 2018;31(6):557–567. PMID: 28925760 <https://doi.org/10.1080/0894193.2017.1363833>
65. Xie L, Chen C, Zhang Y, Zheng W, Chen H, Cai L. Three-dimensional printing assisted ORIF versus conventional ORIF for tibial plateau fractures: A systematic review and meta-analysis. *Int J Surg*. 2018;57:35–44. PMID: 30081183 <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2018.07.012>
66. Wong RMY, Wong PY, Liu C, Chung YL, Wong KC, Tso CY, et al. 3D printing in orthopaedic surgery: a scoping review of randomized controlled trials. *Bone Joint Res*. 2021;10(12):807–819. PMID: 34923849 <https://doi.org/10.1302/2046-3758.1012.BJR-2021-0288.R2>
67. Moya D, Gobatto B, Valente S, Roca R. Uso de planificación preoperatoria e impresión 3D en ortopedia y traumatología: ingresando en una nueva era [Use of preoperative planning and 3D printing in orthopedics and traumatology: entering a new era]. *Acta Ortop Mex*. 2022;36(1):39–47. PMID: 36099572
68. Hull CW. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patent Number: 4575330. United States; 1986.
69. Zhuang Y, Cao S, Lin Y, Li R, Wang G, Wang Y. Minimally invasive plate osteosynthesis of acetabular anterior column fractures using the two-incision minimally invasive approach and a preshaped three dimension plate. *Int Orthop*. 2016;40(10):2157–2162. PMID: 26768591 <https://doi.org/10.1007/s00264-015-3111-1>
70. Yang L, Shang XW, Fan JN, He ZX, Wang JJ, Liu M, et al. Application of 3D Printing in the Surgical Planning of Trimalleolar Fracture and Doctor-Patient Communication. *Biomed Res Int*. 2016;2016:2482086. PMID: 27446944 <https://doi.org/10.1155/2016/2482086>
71. Zheng W, Chen C, Zhang C, Tao Z, Cai L. The Feasibility of 3D Printing Technology on the Treatment of Pilon Fracture and Its Effect on Doctor-Patient Communication. *Biomed Res Int*. 2018;2018:8054698. PMID: 29581985 <https://doi.org/10.1155/2018/8054698>
72. Burwell HN, Charnley AD. The treatment of displaced fractures at the ankle by rigid internal fixation and early joint movement. *J Bone Joint Surg Br*. 1965;47(4):634–660. PMID: 5846764
73. Li Y, Yuan Z. Application of rapid prototype and 3D printing in therapy of complex pilon fractures. *Chin J Orthop Trauma*. 2016;18(1):42–46.
74. Gu H, Zhang Y, Lv X, Zhao A, Zhu M, Zhang J, et al. 3D printing technology in applicatoin of tibial PILON fractures. *Chin J Trauma Disabil Med*. 2017;24:8–10.
75. Ou Yang HW, Zhao XD, Shi KM. Clinical application of 3D printing technique in the treatment of high energy Pilon fracture. *Chin Cont Med Edu*. 2017;9(17):130–131.
76. Huang J, Wang XP, Deng ZC, Wu W-W, Chen L-Y, Hu S-Q, et al. Application of three-dimensional reconstruction using mimics software to repair of pilon fracture. *J Clin Tis Eng Res*. 2015;19(44):7167–7171.
77. Yang S, Lin H, Luo C. Meta-Analysis of 3D Printing Applications in Traumatic Fractures. *Front Surg*. 2021;8:696591. PMID: 34532337 <https://doi.org/10.3389/fsurg.2021.696591>
78. Jiang M, Chen G, Coles-Black J, Chuen J, Hardidge A. Three-dimensional printing in orthopaedic preoperative planning improves intraoperative metrics: a systematic review. *ANZ J Surg*. 2020 Mar;90(3):243–250. PMID: 31701621 <https://doi.org/10.1111/ans.15549>
79. Xiong L, Li X, Li H, Chen Z, Xiao T. The efficacy of 3D printing-assisted surgery for traumatic fracture: a meta-analysis. *Postgrad Med J*. 2019;95(1126):414–419. PMID: 31324729 <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2019-136482>
80. Kang HJ, Kim BS, Kim SM, Kim YM, Kim HN, Park JY, et al. Can Preoperative 3D Printing Change Surgeon's Operative Plan for Distal Tibia Fracture? *Biomed Res Int*. 2019;2019:7059413. PMID: 30886862 <https://doi.org/10.1155/2019/7059413>
81. Oki S, Kobayashi H, Kubota H, Umezue T, Nagasaki M, Iwabu S. A Pilon Fracture With Fibular Head Dislocation Treated With the Use of 3D Preoperative Planning: A Case Report and Literature Review. *J Foot Ankle Surg*. 2021;60(2):404–407. PMID: 33423890 <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2020.09.014>
82. Merema BJ, Kraeima J, Ten Duis K, Wendt KW, Warta R, Vos E, et al. The design, production and clinical application of 3D patient-

- specific implants with drilling guides for acetabular surgery. *Injury*. 2017;48(11):2540–2547. PMID: 28899562 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.08.059>
83. Stockmans F, Dezillie M, Vanhaecke J. Accuracy of 3D Virtual Planning of Corrective Osteotomies of the Distal Radius. *J Wrist Surg*. 2013;2(4):306–314. PMID: 24436834 <https://doi.org/10.1055/s-0033-1359307>
 84. Cho W, Job AV, Chen J, Baek JH. A Review of Current Clinical Applications of Three-Dimensional Printing in Spine Surgery. *Asian Spine J*. 2018;12(1):171–177. PMID: 29503698 <https://doi.org/10.4184/asj.2018.12.1.171>
 85. Coakley M, Hurt DE. 3D Printing in the Laboratory: Maximize Time and Funds with Customized and Open-Source Labware. *J Lab Autom*. 2016;21(4):489–495. PMID: 27197798 <https://doi.org/10.1177/2211068216649578>
 86. Buijze GA, Leong NL, Stockmans F, Axelsson P, Moreno R, Ibsen Sørensen A, et al. Three-Dimensional Compared with Two-Dimensional Preoperative Planning of Corrective Osteotomy for Extra-Articular Distal Radial Malunion: A Multicenter Randomized Controlled Trial. *J Bone Joint Surg Am*. 2018;100(14):1191–1202. PMID: 30020124 <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.00544>
 87. Pehde CE, Bennett J, Lee Peck B, Gull L. Development of a 3-D Printing Laboratory for Foot and Ankle Applications. *Clin Podiatr Med Surg*. 2020;37(2):195–213. PMID: 32146978 <https://doi.org/10.1016/j.cpm.2019.12.011>
 88. Pugliese R, Regondi S. Artificial Intelligence-Empowered 3D and 4D Printing Technologies toward Smarter Biomedical Materials and Approaches. *Polymers (Basel)*. 2022;14(14):2794. PMID: 35890571 <https://doi.org/10.3390/polym14142794>
 89. Mondal K, Tripathy PK. Preparation of Smart Materials by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *Materials (Basel)*. 2021;14(21):6442. PMID: 34771968 <https://doi.org/10.3390/ma14216442>
 90. Vasiladiis AV, Koukoulis N, Katakalos K. From Three-Dimensional (3D)- to 6D-Printing Technology in Orthopedics: Science Fiction or Scientific Reality? *J Funct Biomater*. 2022;13(3):101. PMID: 35893469 <https://doi.org/10.3390/jfb13030101>
- ## REFERENCES
1. Mauffrey C, Vasario G, Battiston B, Lewis C, Beazley J, Seligson D. Tibial pilon fractures: a review of incidence, diagnosis, treatment, and complications. *Acta Orthop Belg*. 2011;77(4):432–440. PMID: 21954749
 2. Beaman DN, Gellman R. Fracture reduction and primary ankle arthrodesis: a reliable approach for severely comminuted tibial pilon fracture. *Clin Orthop Relat Res*. 2014;472(12):3823–3834. PMID: 24844887 <https://doi.org/10.1007/s11999-014-3683-x>
 3. Destot EAJ. Traumatismes du pied et rayons X: Malleoles-Astragale-Calcanéum-Avant-pied. Paris: Masson; 1911.
 4. Carter TH, Duckworth AD, Oliver WM, Molyneux SG, Amin AK, White TO. Open Reduction and Internal Fixation of Distal Tibial Pilon Fractures. *JBJS Essent Surg Tech*. 2019;9(3):e29. PMID: 32021729 <https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.18.00093>
 5. Saad BN, Yingling JM, Liporace FA, Yoon RS. Pilon Fractures: Challenges and Solutions. *Orthop Res Rev*. 2019;11:149–157. PMID: 31576179 <https://doi.org/10.2147/ORR.S170956>
 6. Rüedi T. Fractures of the lower end of the tibia into the ankle joint: results 9 years after open reduction and internal fixation. *Injury*. 1973;5(2):130–134. PMID: 4774764 [https://doi.org/10.1016/s0020-1383\(73\)80089-0](https://doi.org/10.1016/s0020-1383(73)80089-0)
 7. Müller ME. Müller AO Classification of Fractures-Long Bones. Berlin, Germany: Springer-Verlag; 2010.
 8. Dirschl DR, Adams GL. A critical assessment of factors influencing reliability in the classification of fractures, using fractures of the tibial plafond as a model. *J Orthop Trauma*. 1997;11(7):471–476. PMID: 9334947 <https://doi.org/10.1097/00005131-199710000-00003>
 9. Ramappa M, Bajwa A, Singh A, Mackenney P, Hui A, Port A. Interobserver and intraobserver variations in tibial pilon fracture classification systems. *Foot (Edinb)*. 2010;20(2–3):61–63. PMID: 20609577 <https://doi.org/10.1016/j.foot.2010.06.002>
 10. Martin JS, Marsh JL, Bonar SK, DeCoster TA, Found EM, Brandser EA. Assessment of the AO/ASIF fracture classification for the distal tibia. *J Orthop Trauma*. 1997;11(7):477–483. PMID: 9334948 <https://doi.org/10.1097/00005131-199710000-00004>
 11. Swiontkowski MF, Sands AK, Agel J, Diab M, Schwappach JR, Kreder HJ. Interobserver variation in the AO/OTA fracture classification system for pilon fractures: is there a problem? *J Orthop Trauma*. 1997;11(7):467–470. PMID: 9334946 <https://doi.org/10.1097/00005131-199710000-00002>
 12. Cole PA, Mehrle RK, Bhandari M, Zlowodzki M. The pilon map: fracture lines and comminution zones in OTA/AO type 43C3 pilon fractures. *J Orthop Trauma*. 2013;27(7):e152–e156. PMID: 23360909 <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e318288a7e9>
 13. Topliss CJ, Jackson M, Atkins RM. Anatomy of pilon fractures of the distal tibia. *J Bone Joint Surg Br*. 2005;87(5):692–697. PMID: 15855374 <https://doi.org/10.1302/0301-620X.87B5.15982>
 14. Tang X, Tang PF, Wang MY, Lü DC, Liu MZ, Liu CJ, et al. Pilon fractures: a new classification and therapeutic strategies. *Chin Med J (Engl)*. 2012;125(14):2487–2492. PMID: 22882927
 15. Leonetti D, Tigani D. Pilon fractures: A new classification system based on CT-scan. *Injury*. 2017;48(10):2311–2317. PMID: 28774706 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.07.026>
 16. White TO, Guy P, Cooke CJ, Kennedy SA, Droll KP, Blachut PA, et al. The results of early primary open reduction and internal fixation for treatment of OTA 43.C-type tibial pilon fractures: a cohort study. *J Orthop Trauma*. 2010;24(12):757–763. PMID: 21076248 <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e318d04bc0>
 17. Keiler A, Riechelmann F, Thöni M, Brunner A, Ulmar B. Three-dimensional computed tomography reconstruction improves the reliability of tibial pilon fracture classification and preoperative surgical planning. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(2):187–195. PMID: 31529150 <https://doi.org/10.1007/s00402-019-03259-8>
 18. Byun SE, Choi W, Choi Y, Ahn T-K, Kim HK, Yoon S, et al. Impact of two- and three-dimensional computed tomography use on intraobserver and interobserver reliabilities of pilon fracture classification and treatment recommendation. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2019;105(7):1407–1412. PMID: 31542310 <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.07.011>
 19. Palma J, Villa A, Mery P, Abarca M, Mora A, Peña A, et al. A New Classification System for Pilon Fractures Based on CT Scan: An Independent Interobserver and Intraobserver Agreement Evaluation. *J Am Acad Orthop Surg*. 2020;28(5):208–213. PMID: 31800439 <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-19-00390>
 20. Qiu XS, Li XG, Qi XY, Wang Z, Chen YX. What Is the Most Reliable Classification System to Assess Tibial Pilon Fractures? *J Foot Ankle Surg*. 2020;59(1):48–52. PMID: 31882147 <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2019.07.002>
 21. Tomás-Hernández J. High-energy pilon fractures management: State of the art. *EFORT Open Rev*. 2017;1(10):354–361. PMID: 28461913 <https://doi.org/10.1302/2058-5241.1.000016>
 22. d'Heurle A, Kazemi N, Connelly C, Wyrick JD, Archdeacon MT, Le TT. Prospective Randomized Comparison of Locked Plates Versus Nonlocked Plates for the Treatment of High-Energy Pilon Fractures. *J Orthop Trauma*. 2015;29(9):420–423. PMID: 26165256 <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000386>
 23. Lomax A, Singh A, Jane M N, Senthil K C. Complications and early results after operative fixation of 68 pilon fractures of the distal tibia. *Scott Med J*. 2015;60(2):79–84. PMID: 25630506 <https://doi.org/10.1177/0036933015569159>
 24. Zhao L, Li Y, Chen A, Zhang Z, Xi J, Yang D. Treatment of type C pilon fractures by external fixator combined with limited open reduction and absorbable internal fixation. *Foot Ankle Int*. 2013;34(4):534–542. PMID: 23447509 <https://doi.org/10.1177/1071100713480344>
 25. Artem'ev AA, Zagorodniy NV, Ivashkin AN, Bytadaev ZM, Abakirov MD. Challenges and perspectives of aesthetic surgery of low limbs. *Journal of Clinical Practice*. 2015;6(1):4–9. (in Russ.) <https://doi.org/10.17816/clinpract614-9>
 26. Giannoudis VP, Ewins E, Taylor DM, Foster P, Harwood P. Clinical and Functional Outcomes in Patients with Distal Tibial Fracture Treated by Circular External Fixation: A Retrospective Cohort Study. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2021;16(2):86–95. PMID: 34804224 <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10080-1516>
 27. Helfet DL, Koval K, Pappas J, Sanders RW, DiPasquale T. Intraarticular "pilon" fracture of the tibia. *Clin Orthop Relat Res*. 1994;(298):221–228. PMID: 8118979
 28. Patterson MJ, Cole JD. Two-staged delayed open reduction and internal fixation of severe pilon fractures. *J Orthop Trauma*. 1999;13(2):85–91. PMID: 10052781 <https://doi.org/10.1097/00005131-199902000-00003>
 29. Sirkin M, Sanders R, DiPasquale T, Herscovici D Jr. A staged protocol for soft tissue management in the treatment of complex pilon fractures. *J Orthop Trauma*. 1999;13(2):78–84. PMID: 10052780 <https://doi.org/10.1097/00005131-199902000-00002>
 30. Stillhard PF, Frima H, Sommer C. Pilonfrakturen – Überlegungen zur Versorgung und Zugänge. *Oper Orthop Traumatol*. 2018;30(6):435–456. PMID: 30334079 <https://doi.org/10.1007/s00064-018-0570-8>
 31. Tornetta P 3rd, Gorup J. Axial computed tomography of pilon fractures. *Clin Orthop Relat Res*. 1996;(323):273–276. PMID: 8625591 <https://doi.org/10.1097/00003086-199602000-00037>
 32. Calori GM, Tagliabue L, Mazza E, de Bellis U, Pierannunzi L, Marelli BM, et al. Tibial pilon fractures: which method of treatment? *Injury*. 2010;41(11):1183–1190. PMID: 20870227 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2010.08.041>
 33. Teeny SM, Wiss DA. Open reduction and internal fixation of tibial plafond fractures. Variables contributing to poor results and complications. *Clin Orthop Relat Res*. 1993;(292):108–117. PMID: 8519097
 34. Manegold S, Springer A, Märdia S, Tsitsilonis S. Treatment Algorithm for Pilon Fracture - Clinical and Radiological Results. Algorithmus léčby zlomenin pilonu – klinické a radiologické výsledky. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*. 2019;86(1):11–17. PMID: 30843508
 35. Duckworth AD, Jefferies JG, Clement ND, White TO. Type C tibial pilon fractures: short- and long-term outcome following operative intervention. *Bone Joint J*. 2016;98-B(8):1106–1111. PMID: 27482025 <https://doi.org/10.1302/0301-620X.98B8.36400>
 36. Pollak AN, McCarthy ML, Bess RS, Agel J, Swiontkowski MF. Outcomes after treatment of high-energy tibial plafond fractures. *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85(10):1893–1900. PMID: 14563795 <https://doi.org/10.2106/00004623-200310000-00005>
 37. Ware J, Snow KK, Kosinski M, Gandek B. SF36 Health Survey: Manual and Interpretation Guide. Lincoln, RI: Quality Metric, Inc; 1993. p.30.

38. Cutillas-Ybarra MB, Lizaaur-Utrilla A, Lopez-Prats FA. Prognostic factors of health-related quality of life in patients after tibial plafond fracture. *A pilot study. Injury.* 2015;46(11):2253–2257. PMID: 26115581 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.06.025>
39. Harris AM, Patterson BM, Sontich JK, Vallier HA. Results and outcomes after operative treatment of high-energy tibial plafond fractures. *Foot Ankle Int.* 2006;27(4):256–265. PMID: 16624215 <https://doi.org/10.1177/107110070602700406>
40. Boraiah S, Kemp TJ, Erwtaman A, Lucas PA, Asprinio DE. Outcome following open reduction and internal fixation of open pilon fractures. *J Bone Joint Surg Am.* 2010;92(2):346–352. PMID: 20124061 <https://doi.org/10.2106/JBJS.H.01678>
41. van den Berg J, Monteban P, Roobroeck M, Smeets B, Nijs S, Hoekstra H. Functional outcome and general health status after treatment of AO type 43 distal tibial fractures. *Injury.* 2016;47(7):1519–1524. PMID: 27129909 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.04.009>
42. Marsh JL, Weigel DP, Dirschl DR. Tibial plafond fractures. How do these ankles function over time? *J Bone Joint Surg Am.* 2003;85(2):287–295. PMID: 12571307
43. Bonato LJ, Edwards ER, Gosling CM, Hau R, Hofstee DJ, Shuen A, et al. Patient reported health related quality of life early outcomes at 12 months after surgically managed tibial plafond fracture. *Injury.* 2017;48(4):946–953. PMID: 28233519 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.11.012>
44. Zeng J, Xu C, Xu G, Zhang W, Wang D, Li H, et al. Evaluation of Ankle Fractures in 228 Patients from a Single Center Using Three-Dimensional Computed Tomography Mapping. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:855114. PMID: 35372321 <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.855114>
45. Leslie M. Pilon Fractures. C V C5. 2021. <https://ota.org/sites/files/2021-06/LE%20F%26A1%20Pilon%20Fractures.pdf> [Accessed May 16, 2024].
46. Hak DJ, Rose J, Stahel PF. Preoperative planning in orthopedic trauma: benefits and contemporary uses. *Orthopedics.* 2010;33(8):581–584. PMID: 20704156 <https://doi.org/10.3928/01477447-20100625-21>
47. Pilson HT, Reddix RN Jr, Mutty CE, Webb LX. The long lost art of preoperative planning-resurrected? *Orthopedics.* 2008;31(12):orthosupersite.com/view.asp?riid=32932. PMID: 19226056 <https://doi.org/10.3928/01477447-20081201-19>
48. Galán-Olleros M, García-Coiradas J, Llanos S, Valle-Cruz JA, Marco F. Fracture planning is easy: Development of a basic method of digital planning based on the traditional pencil and paper technique. Planificar fracturas es sencillo: desarrollo de un método básico de planificación digital basado en la técnica tradicional con lápiz y papel. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol.* 2022;66(5):328–340. PMID: 34366259 <https://doi.org/10.1016/j.recot.2021.05.002>
49. Ordas-Bayon A, Cabrera Ortiz D, Logan K, Pesantez R. Enhancing Preoperative Planning in Orthopedic Trauma Surgery Using a Presentation Software. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo).* 2021;56(4):517–522. PMID: 34602675 <https://doi.org/10.1055/s-0040-1721833>
50. Steinberg EL, Segev E, Drexler M, Ben-Tov T, Nimrod S. Preoperative Planning of Orthopedic Procedures using Digitalized Software Systems. *Isr Med Assoc J.* 2016;18(6):354–358. PMID: 27468530
51. Benum P, Aamodt A, Nordsletten L. Customised femoral stems in osteopetrosis and the development of a guiding system for the preparation of an intramedullary cavity: a report of two cases. *J Bone Joint Surg Br.* 2010;92(9):1303–1305. PMID: 20798453 <https://doi.org/10.1302/0301-620X.92B9.24415>
52. Davidovitch RI, Weil Y, Karia R, Forman J, Looze C, Liebergall M, et al. Intraoperative syndesmotomic reduction: three-dimensional versus standard fluoroscopic imaging. *J Bone Joint Surg Am.* 2013;95(20):1838–1843. PMID: 24132357 <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.00382>
53. Chana-Rodríguez F, Mañanes RP, Rojo-Manaute J, Gil P, Martínez-Gómez JM, Vaquero-Martín J. 3D surgical printing and pre contoured plates for acetabular fractures. *Injury.* 2016;47(11):2507–2511. PMID: 27599393 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.08.027>
54. Bai J, Wang Y, Zhang P, Liu M, Wang P, Wang J, et al. Efficacy and safety of 3D print-assisted surgery for the treatment of pilon fractures: a meta-analysis of randomized controlled trials. *J Orthop Surg Res.* 2018;13(1):283. PMID: 30419933 <https://doi.org/10.1186/s13018-018-0976-x>
55. Meng M, Wang J, Sun T, Zhang W, Zhang J, Shu L, et al. Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics. *J Orthop Translat.* 2022;34:22–41. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2022.03.001>
56. Chepelev L, Wake N, Ryan J, Althobaity W, Gupta A, Arribas E, et al. Radiological Society of North America (RSNA) 3D printing Special Interest Group (SIG): guidelines for medical 3D printing and appropriateness for clinical scenarios. *3D Print Med.* 2018;4(1):11. PMID: 30649688 <https://doi.org/10.1186/s41205-018-0030-y>
57. Auricchio F, Marconi S. 3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology. *EFORT Open Rev.* 2017;1(5):121–127. PMID: 28461938 <https://doi.org/10.1302/2058-5241.1.000012>
58. Skelley NW, Smith MJ, Ma R, Cook JL. Three-dimensional Printing Technology in Orthopaedics. *J Am Acad Orthop Surg.* 2019;27(24):918–925. PMID: 31268868 <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-18-00746>
59. Alemayehu DG, Zhang Z, Tahir E, Gateau D, Zhang DF, Ma X. Preoperative Planning Using 3D Printing Technology in Orthopedic Surgery. *Biomed Res Int.* 2021;2021:7940242. PMID: 34676264 <https://doi.org/10.1155/2021/7940242>
60. Pal AK, Bhanakar U, Ray B. Three-dimensional (3D) printing: A potentially versatile tool in the field of medicine. *Indian J Clin Anat Physiol.* 2022;9(2):78–84. <https://doi.org/10.18231/j.ijcap.2022.020>
61. Morgan C, Khatri C, Hanna SA, Ashrafian H, Sarraf KM. Use of three-dimensional printing in preoperative planning in orthopaedic trauma surgery: A systematic review and meta-analysis. *World J Orthop.* 2020;11(1):57–67. PMID: 31966970 <https://doi.org/10.5312/wjo.v11.i1.57>
62. Ertürk C, Ayyıldız S, Erdöl C. Orthopedics and 3D technology in Turkey: A preliminary report. *Jt Dis Relat Surg.* 2021;32(2):279–289. PMID: 34145802 <https://doi.org/10.52312/jdrs.2021.20>
63. Zheng W, Su J, Cai L, Lou Y, Wang J, Guo X, et al. Application of 3D-printing technology in the treatment of humeral intercondylar fractures. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2018;104(1):83–88. PMID: 29248764 <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2017.11.012>
64. Zheng W, Tao Z, Lou Y, Feng Z, Li H, Cheng L, et al. Comparison of the Conventional Surgery and the Surgery Assisted by 3d Printing Technology in the Treatment of Calcaneal Fractures. *J Invest Surg.* 2018;31(6):557–567. PMID: 28925760 <https://doi.org/10.1080/0894193.9.2017.1365833>
65. Xie L, Chen C, Zhang Y, Zheng W, Chen H, Cai L. Three-dimensional printing assisted ORIF versus conventional ORIF for tibial plateau fractures: A systematic review and meta-analysis. *Int J Surg.* 2018;57:35–44. PMID: 30081183 <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2018.07.012>
66. Wong RMY, Wong PY, Liu C, Chung YL, Wong KC, Tso CY, et al. 3D printing in orthopaedic surgery: a scoping review of randomized controlled trials. *Bone Joint Res.* 2021;10(12):807–819. PMID: 34923849 <https://doi.org/10.1302/2046-3758.1012.BJR-2021-0288.R2>
67. Moya D, Gobbato B, Valente S, Roca R. Uso de planificación preoperatoria e impresión 3D en ortopedia y traumatología: ingresando en una nueva era [Use of preoperative planning and 3D printing in orthopedics and traumatology: entering a new era]. *Acta Ortop Mex.* 2022;36(1):39–47. PMID: 36099572
68. Hull CW. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patent Number: 4575330. United States; 1986.
69. Zhuang Y, Cao S, Lin Y, Li R, Wang G, Wang Y. Minimally invasive plate osteosynthesis of acetabular anterior column fractures using the two-incision minimally invasive approach and a preshaped three dimension plate. *Int Orthop.* 2016;40(10):2157–2162. PMID: 26768591 <https://doi.org/10.1007/s00264-015-3111-1>
70. Yang L, Shang XW, Fan JN, He ZX, Wang JJ, Liu M, et al. Application of 3D Printing in the Surgical Planning of Trimalleolar Fracture and Doctor-Patient Communication. *Biomed Res Int.* 2016;2016:2482086. PMID: 27446944 <https://doi.org/10.1155/2016/2482086>
71. Zheng W, Chen C, Zhang C, Tao Z, Cai L. The Feasibility of 3D Printing Technology on the Treatment of Pilon Fracture and Its Effect on Doctor-Patient Communication. *Biomed Res Int.* 2018;2018:8054698. PMID: 29581985 <https://doi.org/10.1155/2018/8054698>
72. Burwell HN, Charnley AD. The treatment of displaced fractures at the ankle by rigid internal fixation and early joint movement. *J Bone Joint Surg Br.* 1965;47(4):634–660. PMID: 5846764
73. Li Y, Yuan Z. Application of rapid prototype and 3D printing in therapy of complex pilon fractures. *Chin J Orthop Trauma.* 2016;18(1):42–46.
74. Gu H, Zhang Y, Lv X, Zhao A, Zhu M, Zhang J, et al. 3D printing technology in applicatoin of tibial PILON fractures. *Chin J Trauma Disabil Med.* 2017;24:8–10.
75. Ou Yang HW, Zhao XD, Shi KM. Clinical application of 3D printing technique in the treatment of high energy Pilon fracture. *Chin Cont Med Edu.* 2017;9(17):130–131.
76. Huang J, Wang XP, Deng ZC, Wu W-W, Chen L-Y, Hu S-Q, et al. Application of three-dimensional reconstruction using mimics software to repair of pilon fracture. *J Clin Tis Eng Res.* 2015;19(44):7167–7171.
77. Yang S, Lin H, Luo C. Meta-Analysis of 3D Printing Applications in Traumatic Fractures. *Front Surg.* 2021;8:696591. PMID: 34532337 <https://doi.org/10.3389/fsurg.2021.696591>
78. Jiang M, Chen G, Coles-Black J, Chuen J, Hardidge A. Three-dimensional printing in orthopaedic preoperative planning improves intraoperative metrics: a systematic review. *ANZ J Surg.* 2020 Mar;90(3):243–250. PMID: 31701621 <https://doi.org/10.1111/ans.15549>
79. Xiong L, Li X, Li H, Chen Z, Xiao T. The efficacy of 3D printing-assisted surgery for traumatic fracture: a meta-analysis. *Postgrad Med J.* 2019;95(1126):414–419. PMID: 31324729 <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2019-136482>
80. Kang HJ, Kim BS, Kim SM, Kim YM, Kim HN, Park JY, et al. Can Preoperative 3D Printing Change Surgeon's Operative Plan for Distal Tibia Fracture? *Biomed Res Int.* 2019;2019:7059413. PMID: 30886862 <https://doi.org/10.1155/2019/7059413>
81. Oki S, Kobayashi H, Kubota H, Umezui T, Nagasaki M, Iwabu S. A Pilon Fracture With Fibular Head Dislocation Treated With The Use of 3D Preoperative Planning: A Case Report and Literature Review. *J Foot Ankle Surg.* 2021;60(2):404–407. PMID: 33423890 <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2020.09.014>
82. Merema BJ, Kraeima J, Ten Duis K, Wendt KW, Warta R, Vos E, et al. The design, production and clinical application of 3D patient-specific implants with drilling guides for acetabular surgery. *Injury.* 2017;48(11):2540–2547. PMID: 28899562 <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.08.059>
83. Stockmans F, Dezillie M, Vanhaecke J. Accuracy of 3D Virtual Planning of Corrective Osteotomies of the Distal Radius. *J Wrist Surg.* 2013;2(4):306–314. PMID: 24436834 <https://doi.org/10.1055/s-0033-1359307>
84. Cho W, Job AV, Chen J, Baek JH. A Review of Current Clinical Applications of Three-Dimensional Printing in Spine Surgery. *Asian Spine J.* 2018;12(1):171–177. PMID: 29503698 <https://doi.org/10.4184/asj.2018.12.1.171>

85. Coakley M, Hurt DE. 3D Printing in the Laboratory: Maximize Time and Funds with Customized and Open-Source Labware. *J Lab Autom.* 2016;21(4):489–495. PMID: 27197798 <https://doi.org/10.1177/2211068216649578>
86. Buijze GA, Leong NL, Stockmans F, Axelsson P, Moreno R, Ibsen Sørensen A, et al. Three-Dimensional Compared with Two-Dimensional Preoperative Planning of Corrective Osteotomy for Extra-Articular Distal Radial Malunion: A Multicenter Randomized Controlled Trial. *J Bone Joint Surg Am.* 2018;100(14):1191–1202. PMID: 30020124 <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.00544>
87. Pehde CE, Bennett J, Lee Peck B, Gull L. Development of a 3-D Printing Laboratory for Foot and Ankle Applications. *Clin Podiatr Med Surg.* 2020;37(2):195–213. PMID: 32146978 <https://doi.org/10.1016/j.cpm.2019.12.011>
88. Pugliese R, Regondi S. Artificial Intelligence-Empowered 3D and 4D Printing Technologies toward Smarter Biomedical Materials and Approaches. *Polymers (Basel).* 2022;14(14):2794. PMID: 35890571 <https://doi.org/10.3390/polym14142794>
89. Mondal K, Tripathy PK. Preparation of Smart Materials by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *Materials (Basel).* 2021;14(21):6442. PMID: 34771968 <https://doi.org/10.3390/ma14216442>
90. Vasiliadis AV, Koukoulas N, Katakalo K. From Three-Dimensional (3D)- to 6D-Printing Technology in Orthopedics: Science Fiction or Scientific Reality? *J Funct Biomater.* 2022;13(3):101. PMID: 35893469 <https://doi.org/10.3390/jfb13030101>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кошкин Арсентий Борисович

врач травматолог-ортопед отделения сочетанной травмы № 4 Хирургического госпиталя Университетской клиники Научно-образовательного института клинической медицины им. Н.А. Семашко ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» МЗ РФ;
<https://orcid.org/0000-0002-7616-2255>, febris@mail.ru;
 45%: сбор и обработка материала, анализ полученных данных, написание и редактирование текста

Паршиков Михаил Викторович

доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры травматологии, ортопедии и медицины катастроф ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» МЗ РФ, заслуженный изобретатель РФ;
<https://orcid.org/0000-0003-4201-4577>, parshikovmikhail@gmail.com;
 25%: концепция и дизайн исследования, анализ полученных данных, редактирование текста

Новиков Сергей Викторович

кандидат медицинских наук, заведующий отделением травматологии № 2 ГБУЗ ГВБ № 2 ДЗМ;
<https://orcid.org/0000-0002-5667-5184>, nadin-79@bk.ru;
 10%: сбор и обработка материала, анализ полученных материалов

Прохоров Андрей Алексеевич

врач травматолог-ортопед отделения травматологии № 27 ГБУЗ «ГКБ им. С.П. Боткина ДЗМ»;
<https://orcid.org/0000-0002-4130-1307>, dr.prohorov.aa@yandex.ru;
 10%: сбор и обработка материала, анализ полученных данных

Файн Алексей Максимович

доктор медицинских наук, заведующий научным отделением неотложной травматологии опорно-двигательного аппарата ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ», профессор кафедры травматологии, ортопедии и медицины катастроф ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» МЗ РФ;
<https://orcid.org/0000-0001-8616-920X>, finn.loko@mail.ru;
 10%: анализ полученных данных, редактирование текста

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Preoperative Planning Using 3D Printing as a Way to Improve the Outcomes of Surgical Treatment for Pilon Fractures

A.B. Koshkin¹ ✉, M.V. Parshikov¹, S.V. Novikov², A.A. Prokhorov³, A.M. Fain^{1,4}

Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Medicine

¹ Russian University of Medicine

Dolgorukovskaya Str. 4, Moscow, Russian Federation 127006

² Hospital for War Veterans No. 2

Volgogradskiy Ave. 168, Moscow, Russian Federation 109472

³ Botkin City Clinical Hospital

2nd Botkinskiy drive 5, Moscow, Russian Federation 125284

⁴ N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine

Bolshaya Sukharevskaya Sq. 3, Moscow, Russian Federation 129090

✉ **Contacts:** Arsenty B. Koshkin, Traumatologist Orthopedist, Department of Combined Trauma No. 4, Surgical Hospital of the University Clinic, N.A. Semashko Scientific and Educational Institute of Clinical Medicine, Russian University of Medicine. Email: febris@mail.ru

RELEVANCE Despite the development of modern diagnostic methods, osteosynthesis instruments and rehabilitation, surgical management of distal tibia fractures remains a great problem due to the high complication rate leading to permanent disability, such as problems with soft tissue healing, infectious complications, post-traumatic arthrosis of the ankle joint.

These complications are associated with the high incidence of high-energy injuries, soft-tissue envelope features, and the wide range of movements in the ankle joint. At the same time, in the treatment for comminuted intra-articular pilon fractures, there is no clearly defined operation algorithm: choice of access, reduction and fixation techniques. Recently, when planning osteosynthesis, additive technologies have become increasingly widespread, in particular, 3D printing of full-size fracture prototypes.

AIM OF STUDY To analyze preoperative planning methods of osteosynthesis in pilon fractures and evaluate 3D-printing for the improvement of surgical treatment of pilon fractures.

MATERIAL AND METHODS The literature search was carried out in the databases of medical publications: PubMed, eLibrary, Cyberleninka. The search was performed using the following terms: pilon fractures, osteosynthesis, preoperative planning, 3D-printing, 3D-model, and the corresponding terms in Russian.

RESULTS According to various authors, the use of 3D printing in preoperative planning improves the parameters of operative duration, reduction quality, functional outcome, intraoperative blood loss, and reduces the number of complications.

CONCLUSIONS Evaluation of the long-term results of using 3D printing in preoperative planning for osteosynthesis in pilon fractures is ongoing. But even now we can draw conclusions about the prospects of the method and recommend it for widespread use in the routine practice of the orthopedic traumatologist.

Keywords: pilon fractures, osteosynthesis, preoperative planning, 3D-printing, 3D-model

For citation Koshkin AB, Parshikov MV, Novikov SV, Prokhorov AA, Fain AM. Preoperative Planning Using 3D Printing as a Way to Improve the Outcomes of Surgical Treatment for Pilon Fractures. *Russian Sklifosovsky Journal of Emergency Medical Care*. 2024;13(2):247–257. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2024-13-2-247-257> (in Russ.)

Conflict of interest Authors declare lack of the conflicts of interests

Acknowledgments, sponsorship The study has no sponsorship

Affiliations

Arsenty B. Koshkin	Traumatologist Orthopedist, Department of Combined Trauma No. 4, Surgical Hospital of the University Clinic, N.A. Semashko Scientific and Educational Institute of Clinical Medicine, Russian University of Medicine; https://orcid.org/0000-0002-7616-2255 , febris@mail.ru; 45%, collection and processing of material, analysis of data obtained, text writing and editing
Mikhail V. Parshikov	Doctor of Medical Sciences, Full Professor, Professor, Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Medicine, Russian University of Medicine, Ministry of Health of the Russian Federation; Honored Inventor of the Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-4201-4577 , parshikovmikhail@gmail.com; 25%, study concept and design, data analysis, text editing
Sergey V. Novikov	Candidate of Medical Sciences, Head, Department of Traumatology No. 2, Hospital for War Veterans No. 2; https://orcid.org/0000-0002-5667-5184 , nadin-79@bk.ru; 10%, collection and processing of material, analysis of data obtained
Andrey A. Prokhorov	Traumatologist Orthopedist, Traumatology Department No. 27, Botkin City Clinical Hospital; https://orcid.org/0000-0002-4130-1307 , dr.prokhorov.aa@yandex.ru; 10%, collection and processing of material, analysis of data obtained
Alexey M. Fain	Doctor of Medical Sciences, Head, Scientific Department of Emergency Traumatology of the Musculoskeletal System, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine; Professor, Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Medicine, Russian University of Medicine; https://orcid.org/0000-0001-8616-920X , finn.loko@mail.ru; 10%, analysis of data obtained, text editing

Received on 11.01.2023

Review completed on 13.10.2023

Accepted on 26.03.2024

Поступила в редакцию 11.01.2023

Рецензирование завершено 13.10.2023

Принята к печати 26.03.2024