



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2023.4.06

УДК 531/534: [57+61]

## МЕТОДИКА МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ КОНСОЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ ПЛЮСНЕВЫХ КОСТЕЙ СТОПЫ

Д.В. Иванов, А.В. Доль, Л.В. Бессонов, С.И. Киреев, А.О. Гуляева

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 11 октября 2023  
Одобрена: 10 декабря 2023  
Принята к публикации: 12 декабря 2023

#### Ключевые слова:

остеотомия, натурный эксперимент, плюсневая кость, стопа, испытательная машина

### АННОТАЦИЯ

Актуальными вопросами современной ортопедии являются разработка и внедрение методов количественной оценки биомеханических параметров остеотомий. Анализ характеристик разных видов остеотомий имеет важное значение, так как может способствовать снижению частоты осложнений и улучшению способов хирургического лечения стопы. Для проведения экспериментов на кости с неизменными механическими свойствами была разработана и апробирована новая методика закрепления образцов кости, позволяющая проводить механические испытания на консольный изгиб и/или осевое сжатие в день изъятия костного материала, что ранее было невозможно из-за ряда проблем. В ходе работы было изготовлено универсальное стальное устройство, позволяющее закреплять образец консольно под углом 15 градусов к горизонту. Универсальность устройства заключается в том, что трубу, в которой крепится образец, можно отсоединить и затем установить на неподвижной траверсе испытательной машины, что обеспечит осевое сжатие образца под углом 15 градусов к вертикальной оси. Также проведен сравнительный анализ клеевых составов трех типов для закрепления материала в устройстве. Было выявлено, что смесь цианоакрилатного клея и пищевой соды позволяет проводить эксперименты без потери механических свойств костной ткани. Таким образом, разработанная и описанная авторами статьи методика позволяет в короткие сроки готовить образцы плюсневой кости для испытаний при консольном нагружении, что исключает изменение свойств костных тканей в связи с длительным перерывом между изъятием и экспериментом, а также в связи с заморозкой кости.

© ПНИПУ

### Введение

Вальгусная деформация первого пальца стопы характеризуется его боковым отклонением наружу, которое обусловлено медиальным смещением дистального конца первой плюсневой кости. Данная патология обнаруживается у 2–4 % населения [27]. При

умеренной или тяжелой деформации часто выполняются остеотомии первой плюсневой кости для выравнивания первого луча стопы [32, 37]. Существует множество способов выполнения остеотомий [14–16, 20]. Все эти способы имеют свои преимущества и недостатки [18, 35, 40]. В то же время понимание биомеханических характеристик разных способов остеотомий [38] (в

- © **Иванов Дмитрий Валерьевич** – ведущий научный сотрудник, e-mail: [ivanovdv.84@yandex.ru](mailto:ivanovdv.84@yandex.ru)  
iD: 0000-0003-1640-6091  
© **Доль Александр Викторович** – старший научный сотрудник, e-mail: [dolav86@yandex.ru](mailto:dolav86@yandex.ru)  
iD: 0000-0001-5842-1615  
© **Бессонов Леонид Валентинович** – старший научный сотрудник, e-mail: [bessonov@squ.ru](mailto:bessonov@squ.ru)  
iD: 0000-0002-5636-1644  
© **Киреев Сергей Иванович** – ведущий научный сотрудник, e-mail: [kireevsi@rambler.ru](mailto:kireevsi@rambler.ru) iD: 0000-0002-3318-5633  
© **Гуляева Алёна Олеговна** – аспирант, e-mail: [nano-bio@squ.ru](mailto:nano-bio@squ.ru)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

частности, жесткости конструкции при физиологических нагрузках) имеет важное значение, так как может способствовать снижению частоты осложнений и/или улучшению тактики хирургического лечения вальгусной деформации первого пальца стопы [33]. Первые работы, связанные с исследованием эффективности остеотомий, основывались на оценках по данным рентгенографии [22], а также на анализе их геометрических особенностей [24] и датируются 80-ми годами прошлого столетия. Стабильность фиксации при различных способах остеотомий ранее экспериментально уже оценивалась и на трупных образцах [13, 20, 28, 34], и на образцах, выполненных из синтетического материала [23, 26, 36]. Оценка первичной жесткости конструкции при остеотомии имеет важнейшее значение, так как остеотомия, характеризующаяся лучшей стабильностью, позволяет лучше переносить вес в раннем послеоперационном периоде [3, 12, 17].

Важно также понимать, насколько остеотомия снижает жесткость кости в сравнении с интактной костью [20]. Такие сравнения обычно выполняются с помощью одноосных испытательных машин [28, 31], а кости (интактные и после остеотомии) с их помощью исследуются на осевую и изгибную жесткость. При этом кость размещается не строго вертикально или горизонтально, а под углами 13 градусов к вертикали и 15 градусов к горизонтали соответственно [36, 20, 13]. Как правило, у испытательных машин нет в комплекте специальных устройств, позволяющих крепить образцы под углом к рабочей поверхности, поэтому авторы используют собственноручно спроектированные и разработанные устройства, но в статьях не дают их подробного описания. При этом процесс закрепления кости в самом удерживающем устройстве, как правило, связан с приклеиванием [28, 31], которое подразумевает длительный период набора прочности клеевого состава, или с утяжкой винтами, что в свою очередь может привести к нарушению целостности костной ткани. При этом на костях, извлеченных из тела в ходе хирургического лечения, целесообразно делать эксперименты в первые 2-3 часа после операции, а значит, вариант с долгим приклеиванием не является оптимальным.

Данная работа сосредоточена на проблемах проведения натуральных механических экспериментов с человеческими костями, а также на их решении.

Проблемы при механических экспериментах на биологических костях:

- проведение эксперимента в короткие сроки после извлечения кости, чтобы кость не высохла и не изменила свои механические свойства;
- быстрое и прочное закрепление кости в испытательной машине.

Обычно одноосные механические испытательные машины имеют только захваты для растяжения мягких тканей и гладкие платформы для одноосного сжатия образцов. Такие инструменты не могут быть использованы для проведения экспериментов, при которых необходимо закрепить образец консольно или под острым углом к горизонтали или вертикали. Поэтому необходима разработка устройства быстрого и надежного крепления образца, которая могла бы быть демонтирована от испытательной машины в короткие сроки и без ее повреждения.

Также не существует способов для быстрого и прочного крепления образца сложной формы (например, кость) без повреждения его целостности и/или высыхания. Как правило, для этого используют двухкомпонентную эпоксидную смолу, которая полностью отвердевает при комнатной температуре не ранее, чем через 12 часов после смешивания, что негативно сказывается на образце кости, так как она может существенно изменить свои свойства за это время и потерять влагу. Если же соблюдать условия хранения кости при температуре не выше 5 градусов, то эпоксидная смола может вообще не затвердеть. При этом фиксирующий состав должен быть существенно прочнее исследуемого образца, чтобы деформация клея не влияла на результат эксперимента.

В качестве альтернативы эпоксидной смоле были протестированы составы на основе цианоакрилатного клея и термокля.

Таким образом, цель данной работы состояла в разработке и апробации новой методики (способа) закрепления образцов кости для проведения механических испытаний на консольный изгиб и/или осевое сжатие в день изъятия костного материала. Для этого было разработано металлическое устройство крепления образца кости и апробирован клеевой состав быстрого затвердевания для закрепления кости в устройстве.

## Материалы и методы

Для выполнения механических испытаний было изготовлено универсальное стальное устройство (рис. 1), позволяющее закреплять образец консольно под углом 15 градусов к горизонту.

Закрепление образца под углом 15 градусов к горизонту обеспечивается за счет наклона трубы 5 на (рис. 1, а). Универсальность устройства реализуется тем, что трубу 5 можно отсоединить от устройства и затем закрепить на неподвижной траверсе (рис. 1, б) испытательной машины, что обеспечит осевое сжатие образца под углом 15 градусов к вертикальной оси. На рис. 1, в, г показан пример закрепления образца первой плюсневой кости в устройстве.

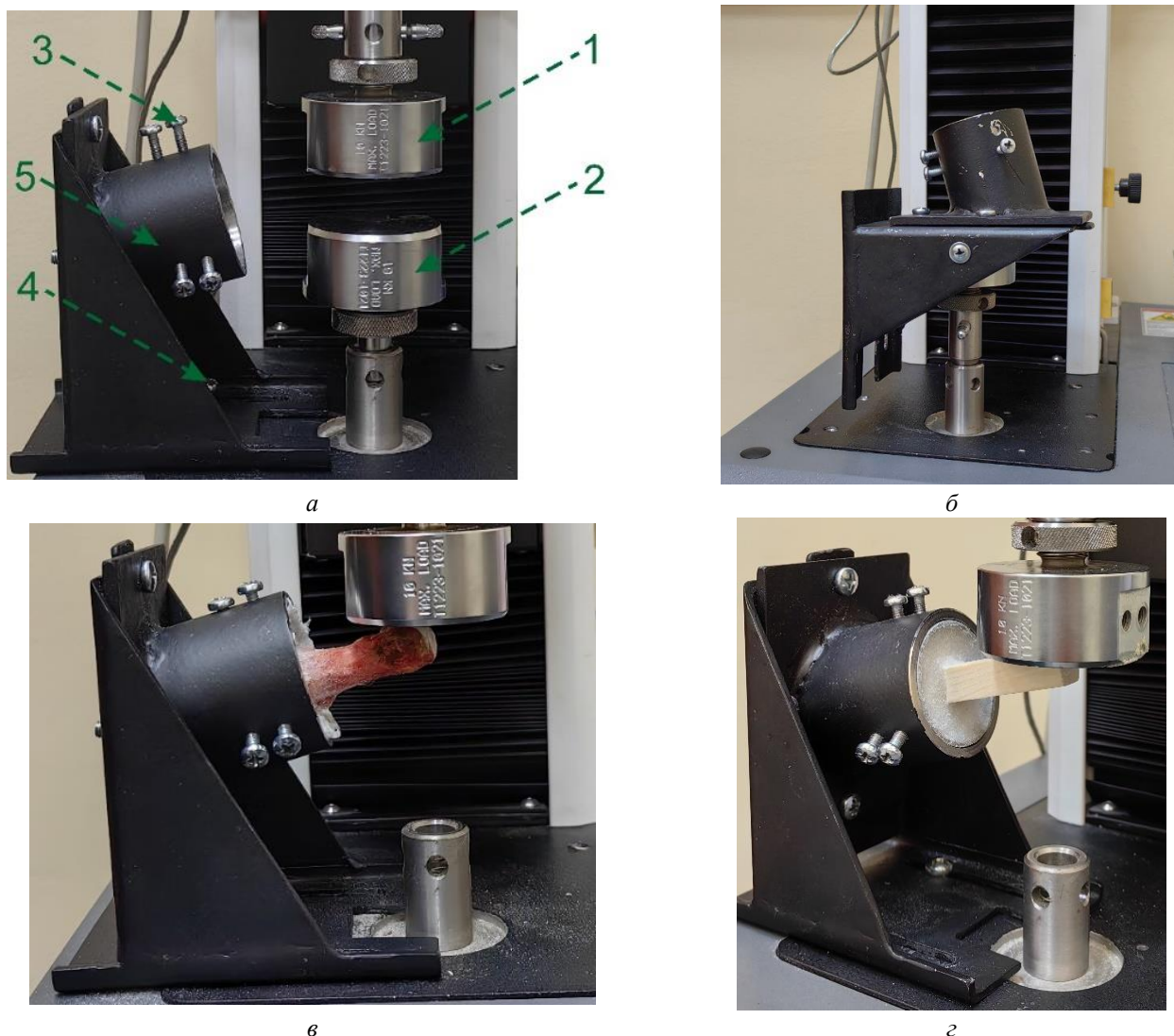


Рис. 1. Разработанное устройство для консольного закрепления образцов: *а* – вертикальное положение (*1* – подвижная траверса, *2* – неподвижная траверса, *3* – винты для крепления образца в устройстве, *4* – винты крепления устройства на основании испытательной машины, *5* – труба для крепления образцов в устройстве); *б* – вариант крепления на неподвижной траверсе. Образцы, закрепленные в устройстве перед испытанием: *в* – первая плюсневая кость; *г* – рейка из древесины

В данной работе проводились натурные механические эксперименты по консольному изгибу образца с помощью испытательной машины *Instron 3342* с нагрузочной ячейкой 500 Н. В качестве исследуемых образцов были выбраны строганные деревянные рейки (балка квадратным сечением 10 на 10 мм), произведенные из массива сосны сорта «Экстра». Были проведены две серии экспериментов. Все образцы в рамках каждой серии были изготовлены из одной рейки, не имеющей сучков и других дефектов, а волокна древесины располагались вдоль оси каждого образца.

В качестве клеевой смеси были использованы составы трех типов:

- эпоксидная смола с отвердителем;
- полимерный термоклей для клеевого пистолета;
- цианоакрилатный клей с щелочным полимеризующим агентом (пищевая сода).

Сравнивались жесткости при консольном закреплении деревянных образцов. Выбор древесины обосновывался его достаточно однородной структурой, без сучков и неровностей. Образцы с одного торца закреплялись с помощью клеевых составов в канализационной трубе, выполненной из поливинилхлорида (ПВХ, толщина стенки 1 мм, внешний диаметр трубы 40 мм), а также в специально изготовленной разъемной форме (без оболочки из ПВХ-трубы), показанной на рис. 2. Разъемная форма изготавливалась с помощью метода 3D-печати. Длина трубы выбиралась равной 25 мм, длина образца – 65 мм. Таким образом, рабочая часть образца составляла 40 мм. Длина образца выбиралась исходя из средней длины первой плюсневой кости.

При креплении образца в устройстве добивались того, чтобы винты прочно фиксировались в образце, что



Рис. 2. Разъемная форма для подготовки образцов и образец, закрепленный с помощью эпоксидной смолы



Рис. 3. Исследованные образцы.

Слева-направо: образцы в ПВХ-оболочке (термоклей, эпоксидная смола, цианоакрилатный клей), без оболочки (эпоксидная смола, цианоакрилатный клей)

продемонстрировано на рис. 3: отверстия от винтов продавливают ПВХ-оболочку и надежно внедряются в клеевой состав, не давая проворачиваться или смещаться образцу в устройстве.

Закрепление эпоксидной смолой проводилось путем заливки состава в емкость (ПВХ-оболочку или разъемную форму для заливки) с размещенным образцом. Закрепление термоклеем проводилось путем заполнения емкости с образцом из специального термопистолета.

Закрепление составом цианоакрилатного клея проходило поэтапно. Сначала в форму с установленным образцом наливался тонкий слой клея из тюбика. Далее клей засыпался пищевой содой, в результате чего происходила практически мгновенная реакция затвердевания состава. Непрореагировавшая сода удалялась с поверхности, после чего наливался новый слой клея, и процедура по засыпке содой повторялась. В результате получалась структура клеевого состава, показанная на рис. 4.

Испытания на консольный изгиб проводились со скоростью 2 мм/мин [20], при этом фиксировались перемещение подвижной траверсы и нагрузка.

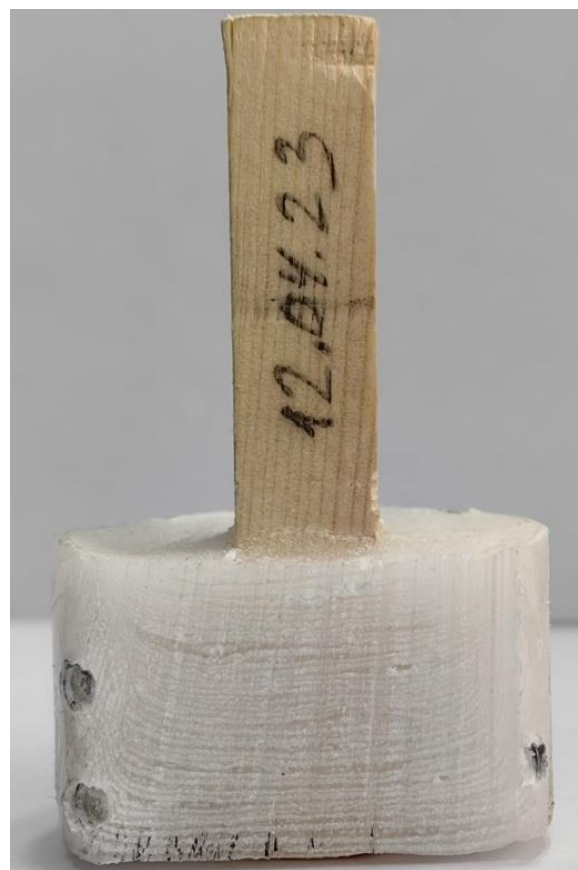


Рис. 4. Поперечный спил образца, закрепленного в цианоакрилатном клее

Сравнивались углы наклона графиков «нагрузка-перемещение» для 8 образцов (4 образца, закрепленных эпоксидной смолой, 3 образца, закрепленных цианоакрилатным клеем, и 1 образец, закрепленный термоклеем).

При обработке экспериментов эпоксидная смола считалась «эталон», а жесткости образцов, закрепленных другими составами, сравнивались с жесткостью образцов, закрепленных эпоксидной смолой. Следует отметить, что образцы, фиксированные термоклеем, для повышения его жесткости перед экспериментом выдерживались в холодильнике при температуре +5 градусов Цельсия в течение 3 часов.

## Результаты

Получены кривые (рис. 5) «Нагрузка-Перемещение» (Н-мм) для 7 образцов первой рейки из древесины, закрепленных, как показано на рис. 3, при их консольном изгибе (образцы располагались под углом 15 градусов к горизонтали).

Далее из серии экспериментов был исключен вари-

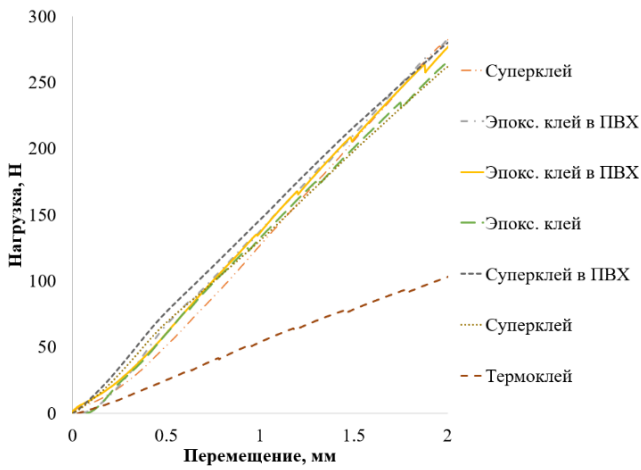


Рис. 5. Кривые «Нагрузка-Перемещение» (Н-мм) для 7 образцов первой рейки из древесины

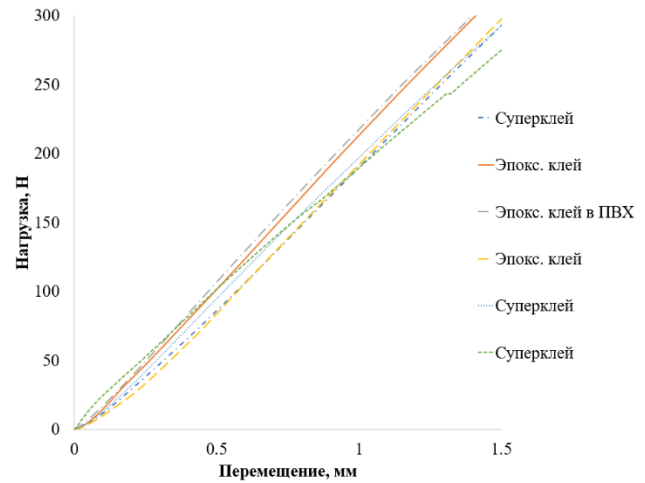


Рис. 6. Кривые «Нагрузка-Перемещение» (Н-мм) для 6 образцов второй рейки из древесины



Рис. 7. Образец первой плюсневой кости с выполненной остеотомией типа *scarf*, закрепленный одним концом с помощью цианоакрилатного клея

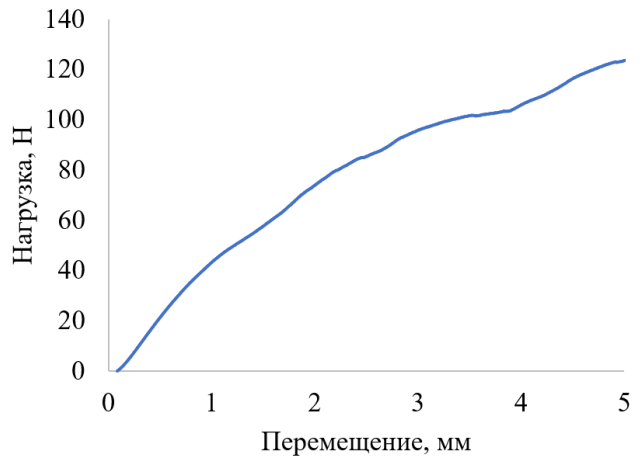


Рис. 8. Диаграмма «Нагрузка-Перемещение» для исследованной первой плюсневой кости с выполненной остеотомией типа *scarf*

ант крепления образцов термоклеем, так как жесткость такой фиксации оказалась существенно ниже двух других, схожих по своим характеристикам (рис. 5). Кривые «Нагрузка-Перемещение», полученные в ходе серии экспериментов на 6 образцах из второй рейки, показаны на рис. 6.

Также был проведен один эксперимент с *scarf*-osteotomy первой плюсневой кости (рис. 7). Кость была изъята при ампутации конечности. Остеотомия закреплялась с помощью цианоакрилатного клея. Ее изгибная диаграмма приведена на рис. 8.

## Обсуждение

Вопросами прочности и оценки механических свойств конструкций, имплантируемых в человека, занимаются многие авторы. Для этого применяют различные методы: численное биомеханическое

моделирование [4, 6, 8, 9], натурные экспериментальные исследования [7, 10, 11, 31], экспериментальное исследование параметров физической активности [1] и другие. Как правило, натурные экспериментальные испытания проводят либо на трупных тканях [20, 34], либо на объектах, выполненных из искусственных материалов [26, 36], по механическим свойствам схожих с реальными объектами тела человека [29, 30]. В то же время проблеме проведения испытаний с биологическими тканями в короткие сроки после их извлечения из тела человека уделяется мало внимания [5]. Данная работа посвящена разработке и апробации методики проведения механических испытаний с плюсневыми костями человека в день изъятия костного материала. С этой целью было разработано устройство для крепления образца кости и апробирован клеевой состав быстрого затвердевания для крепления кости в

устройстве. Проведена серия испытаний с образцами из основных реек, а также эксперимент с остеотомией *scarf* первой плюсневой кости. В качестве исследуемых клеевых составов были рассмотрены эпоксидная смола (как эталонный в соответствии с работами [36, 20]), цианоакрилатный клей и термоклей.

Как было указано выше, способ крепления образцов термоклеем был исключен из экспериментов ввиду низкой жесткости состава. Таким образом, осталось два варианта, очень близких по механическим характеристикам.

Сравнение жесткости двух способов закрепления (с помощью смеси из цианоакрилатного клея (суперклея) с пищевой содой и двухкомпонентной эпоксидной смолой) проводилось на основе анализа коэффициента линейной регрессионной зависимости [2], связывающей перемещение и нагрузку. По каждому эксперименту был вычислен такой коэффициент, и к ним был применен метод однофакторного дисперсионного анализа. Результаты приведены в табл.

Приведенные значения разности (разность, деленная на ошибку разности) меньше критериального значения распределения Стьюдента, что позволяет считать результаты опытов с цианоакрилатным клеем и эпоксидной смолой статистически неразличимыми.

Следует отметить существенную разницу между средними угловыми коэффициентами для образцов из первой и второй реек, что свидетельствует о сильном различии жесткостей этих образцов. Однако в обоих случаях два способа крепления показали статистически неразличимые (в рамках своей серии экспериментов) результаты.

Эксперимент по изгибу первой плюсневой кости (см. рис. 8), закрепленной с помощью цианоакрилатного клея, позволил проверить техническую возможность крепления таких образцов

данным составом. Кроме того, в ходе эксперимента не наблюдалось эффектов проворачивания или выскальзывания кости из массива клея. Более того, максимальная сила (124 Н), полученная в ходе эксперимента, которую выдерживает образец с остеотомией, хорошо коррелировала со значениями других авторов [20] и оказалась близка к средним значениям (150 Н), полученным ими в ходе аналогичных экспериментов. Таким образом, состав показал надежную фиксацию и в случае взаимодействия с поверхностью реальной костной ткани.

К ограничениям данной работы следует отнести тот факт, что основная серия экспериментов проведена на образцах из древесины, которая является довольно неоднородным материалом, а также то, что был проведен всего один эксперимент с остеотомией первой плюсневой кости.

Кроме того, отметим, что в данной работе не было оценено влияние скорости нагружения на результаты экспериментов. Скорость нагружения 2 мм/мин была взята из опубликованных статических испытаний остеотомий [20], чтобы в будущем при наборе достаточного количества образцов можно было сравнить получаемые прочностные характеристики остеотомий с опубликованными показателями.

В то же время предлагаемая методика и способ быстрого закрепления образцов костей позволяют проводить эксперименты в день изъятия костного материала.

Продолжение данной работы будет сосредоточено на наборе образцов плюсневых костей и проведении с ними экспериментов на консольный изгиб и осевое сжатие. Данные результаты позволят провести сравнительный анализ жесткости разных остеотомий, а также осуществить верификацию [21] компьютерных биомеханических моделей остеотомий первой

#### Сравнение жесткости двух способов закрепления

	Рейка 1		Рейка 2	
	Эпоксидная смола	Суперклей	Эпоксидная смола	Суперклей
Средний угловой коэффициент для графиков	145,1	137,0	214,9	194,5
Среднее квадратичное отклонение	4,4	6,5	6,2	12,8
Ошибка среднего	2,6	3,8	3,6	7,4
Разность	8,1		20,4	
Ошибка разности	4,5		8,2	
Разность / ошибка разности	1,8		2,5	
t -критерий	2,777			

плюсневой кости [25]. Видится интересным проведение динамических и циклических испытаний остеотомий [19, 26], а также изучение жесткости остеотомий под действием изгибных нагрузок [39].

## Заключение

Разработана методика подготовки образцов плюсневой кости для исследований на универсальных испытательных машинах. Предлагаемая методика позволяет быстро и надежно зафиксировать кость для дальнейших механических экспериментов при консольных и осевых нагружениях на испытательных

машинах. Методика предполагает крепление кости (или любого другого образца) с одного конца с помощью смеси цианоакрилатного клея и пищевой соды. Методика позволяет готовить образцы в короткие сроки, что исключает изменение свойств костных тканей в связи с длительным перерывом между изъятием и экспериментом, а также в связи с заморозкой кости.

Состав был проверен на взаимодействие с образцом из костной ткани, изъятым не позднее 3 часов в ходе хирургической операции. Методика подготовки образца обеспечила надежную фиксацию кости без свободного хода или выскальзывания.

## Список литературы

1. Белокрылов Н.М., Скрябин В.Л., Сотин А.В., Миллер Г.В., Шарова Л.В., Шмурак М.И. Исследование индивидуального эксплуатационного ресурса эндопротеза тазобедренного сустава // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 97–103.
2. Гланц С. Медико-биологическая статистика. – М.: Практика, 1998. – 459 с.
3. Голядкина А.А., Полиенко А.В., Киреев С.И., Курманов А.Г., Киреев В.С. Анализ биомеханических параметров остеотомии первой плюсневой кости // Российский журнал биомеханики. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 400–410.
4. Джеббар Н., Бачири А., Бутабут Б. Трехмерный конечно-элементный анализ влияния ударной нагрузки от импактора переменной массы на распределение напряжений на поверхности «кость-имплантат» // Российский журнал биомеханики. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 10–21.
5. Доль А.В. Механические свойства атеросклеротических бляшек, покрышек и стенок: испытания на мобильном стенде // Российский журнал биомеханики. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 81–88.
6. Донник А. М., Коссович Л.Ю., Оленко Е.С. Поведение сегмента грудного отдела позвоночника при оскольчатом переломе позвонка до и после хирургического лечения. Биомеханический эксперимент // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 25–39.
7. Лызикив А.А., Шилько С.В., Дробыш Т.В., Каплан М.Л., Тихманович В.Е., Куликович Ю.К. Анализ прочности большой подкожной вены человека как материала для протезирования артерий // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 85–94.
8. Маслов Л.Б., Дмитрюк А.Ю., Жмайло М.А., Коваленко А.Н. Исследование прочности эндопротеза тазобедренного сустава из полимерного материала // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 19–33.
9. Розов Р.А., Хигучи К.У., Брунски Дж., Трезубов В.Н., Смердов А.А., Мишнев М.Л. Трехмерный конечно-элементный анализ влияния утраты дентального имплантата на распределение напряжения в имплантационном протезе нижней челюсти // Российский журнал биомеханики. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 24–35.
10. Садырин Е.В., Егина Д.В., Волков С.С., Айзикович С.М. Оценка плотности и микрогеометрических характеристик пломб из стеклоиономерного цемента и композитного материала: биомеханическое *ex vivo* исследование // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 67–73.
11. Чернева С., Петков В., Войнарович С., Алексиев А., Кислица О., Масючок О. Механические свойства биосовместимых покрытий титан-стекло-углерод для применения в ортопедических имплантатах и деталях для остеосинтеза // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 49–59.
12. Budhabhatti S.P., Erdemir A., Petre M., Sferra J., Donley B., Cavanagh P.R. Finite element modeling of the first ray of the foot: a tool for the design of interventions // J. Biomech Eng. – 2007. – Vol. 129, No. 5. – P. 750–756.
13. Campbell J.T., Schon L.C., Parks B.G., Wang Y., Berger B.I. Mechanical comparison of biplanar proximal closing wedge osteotomy with plantar plate fixation versus crescentic osteotomy with screw fixation for the correction of metatarsus primus varus // Foot Ankle Int. – 1998. – Vol. 19, No. 5 – P. 293–299.
14. Crevoisier X., Mouhsine E., Ortolano V., Udin B., Dutoit M. The scarf osteotomy for the treatment of hallux valgus deformity: a review of 84 cases // Foot Ankle Int. – 2001. – Vol. 22. – P. 970–976.
15. Dereymaecker G. Scarf osteotomy for correction of hallux valgus. Surgical technique and results as compared to distal chevron osteotomy // Foot Ankle Clin. – 2000. – Vol. 5. – P. 513–524.
16. Donnelly R.E., Saltzman C.L., Kile T.A., Johnson K.A. Modified chevron osteotomy for hallux valgus // Foot Ankle Int. – 1994. – Vol. 15. – P. 642–645.
17. Easley M.E., Trnka H.J. Current concepts review: hallux valgus part II: operative treatment // Foot Ankle Int. – 2007. – Vol. 28. – P. 748–758.
18. Elshazly O., Abdel Rahman A.F., Fahmy H., Sobhy M.H., Abdelhadi W. Scarf versus long chevron osteotomies for the treatment of hallux valgus: a prospective randomized controlled study // Foot Ankle Surg. – 2019. – Vol. 25, No. 4. – P. 469–477.
19. Erdil M., Ceylan H.H., Polat G., Kara D., Bozdog E., Sunbuloglu E. A new mini-external fixator for treating hallux valgus: a preclinical, biomechanical study // J Foot Ankle Surg. – 2016. – Vol. 55, No. 1. – P. 35–38.
20. Favre P., Farine M., Snedeker J.G., Maquieira G.J., Espinosa N. Biomechanical consequences of first metatarsal osteotomy

- in treating hallux valgus // *Clin Biomech* (Bristol, Avon). – 2010. – Vol. 25, No. 7. – P. 721–727.
21. Henninger H.B., Reese S.P., Anderson A.E., Weiss J.A. Validation of computational models in biomechanics // *Proc Inst Mech Eng H*. – 2010. – Vol. 224, No. 7. – P. 801–812.
  22. Jahss M.H., Troy A.I., Kummer F. Roentgenographic and mathematical analysis of first metatarsal osteotomies for metatarsus primus varus: a comparative study // *J. Foot & Ankle Int.* – 1985. – No. 5. – P. 280–321.
  23. Kim J.S., Cho H.K., Young K.W., Kim J.S., Lee K.T. Biomechanical comparison study of three fixation methods for proximal chevron osteotomy of the first metatarsal in hallux valgus // *Clin Orthop Surg*. – 2017. – Vol. 9, No. 4. – P. 514–520.
  24. Kummer F.J. Mathematical analysis of first metatarsal osteotomies // *J. Foot & Ankle Int.* – 1989. – Vol. 9, No. 6. – P. 281–289.
  25. Li Y., Wang Y., Wang F., Tang K., Tao X. Biomechanical comparison between rotational scarf osteotomy and translational scarf osteotomy: a finite element analysis // *Orthop. Surg.* – 2023. – DOI: 10.1111/os.13903.
  26. Liu C., Huang L., Zhang H., Chang F., Li S., Ma S., Zhang Y., Ren L. Biomechanical comparison between bioabsorbable and medical titanium screws in distal chevron osteotomy of first metatarsal in hallux valgus treatment // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* – 2022. – Vol. 131, No. 105260.
  27. Myerson M. *Foot and ankle disorders // Hallux Valgus*. WB Sanders & CO., Philadelphia, 1999. – 633 p.
  28. Newman A.S., Negrine J.P., Zecovic M., Stanford P., Walsh W.R. A biomechanical comparison of the Z step-cut and basilar crescentic osteotomies of the first metatarsal // *Foot Ankle Int.* – 2000. – Vol. 7. – P. 584–587.
  29. O'Neill F., Condon F., Mc Gloughlin T., Lenehan B., Coffey C., Walsh M. Validity of synthetic bone as a substitute for osteoporotic cadaveric femoral heads in mechanical testing: a biomechanical study // *Bone Joint Res.* – 2012. – Vol. 1, No. 4. – P. 50–55.
  30. Patel P.S., Shepherd D.E., Hukins D.W. Compressive properties of commercially available polyurethane foams as mechanical models for osteoporotic human cancellous bone // *BMC Musculoskelet Disord.* – 2008. – Vol. 9, No. 9. – P. 137.
  31. Popoff I., Negrine J.P., Zecovic M., Svehla M., Walsh W.R. The effect of screw type on the biomechanical properties of SCARF and crescentic osteotomies of the first metatarsal // *J Foot Ankle Surg.* – 2003. – Vol. 42, No. 3. – P. 161–164.
  32. Robinson A.H., Limbers J.P. Modern concepts in the treatment of hallux valgus // *J. Bone Joint Surg.* – 2005. – Vol. 87. – P. 1038–1045.
  33. Sammarco V.J., Acevedo J. Stability and fixation techniques in first metatarsal osteotomies // *Foot Ankle Clin.* – 2001. – Vol. 6, No. 3. – P. 409–432.
  34. Scott A.T., De Orio J.K., Montijo H.E., Glisson R.R. Biomechanical comparison of hallux valgus correction using the proximal chevron osteotomy fixed with a medial locking plate and the Ludloff osteotomy fixed with two screws // *Clin Biomech* (Bristol, Avon). – 2010. – Vol. 25, No. 3. – P. 271–276.
  35. Smith A.M., Alwan T., Davies M.S. Perioperative complications of the Scarf osteotomy // *J. Foot & Ankle Int.* – 2003. – Vol. 24, No. 3. – P. 222–227.
  36. Smith K., Lidtke R.H., Oliver N.G., Maker J.M. Mechanical comparison of cortical screw fixation versus locking plate fixation in first metatarsal base osteotomy // *J Foot Ankle Surg.* – 2014. – Vol. 53, No. 5. – P. 529–33.
  37. Trnka H.J. Osteotomies for hallux valgus correction // *Foot Ankle Clin.* – 2005. – Vol. 10, No. 1. – P. 15–33.
  38. Trnka H.J., Parks B.G., Ivanic G. Six first metatarsal shaft osteotomies: mechanical and immobilization comparisons // *Clin. Orthop. Relat. Res.* – 2000. – Vol. 381. – P. 256–265.
  39. Unal A.M., Baran O., Uzun B., Turan A.C. Comparison of screw-fixation stabilities of first metatarsal shaft osteotomies: a biomechanical study // *Acta Orthop Traumatol Turc.* – 2010. – Vol. 44, No. 1. P. – 70–75.
  40. Vopat B.G., Lareau C.R., Johnson J., Reinert S.E., DiGiovanni C.W. Comparative study of scarf and extended chevron osteotomies for correction of hallux valgus // *Foot Ankle Spec.* – 2013. – Vol. 6, No. 6. – P. 409–416.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках Государственного задания FSRR-2023-0009.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## METHOD OF MECHANICAL TESTS FOR CANTILEVER LOADING OF THE METATARSAL BONES

D.V. Ivanov, A.V. Dol, L.V. Bessonov, S.I. Kireev, A.O. Gulyaeva

Saratov State University, Saratov, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 11 October 2023  
Approved: 10 December 2023  
Accepted for publication: 12 December 2023

---

#### Key words:

osteotomy, full-scale experiment,  
metatarsal, foot, testing machine

### ABSTRACT

The development and implementation of methods for quantitative assessment of biomechanical parameters of osteotomies are important issues in modern orthopedics. The analysis of characteristics of different types of osteotomies is of great significance, as it can contribute to reducing complications and improving surgical treatment of the foot. In order to conduct experiments on bones with unchanged mechanical properties, a new method of fixing bone samples was developed and tested, which allows for mechanical testing in cantilever bending and/or axial compression on the day of bone material extraction, which was previously impossible due to a number of problems. During the study, a universal steel device was designed that allows for fixing the sample at a 15-degree angle to the horizontal. The device's universality lies in the fact that the tube, in which the sample is fixed, can be detached and then installed on a stationary crossbar of the testing machine, which ensures axial compression of the sample at a 15-degree angle to the vertical axis. A comparative analysis of adhesive compositions of three types for fixing the material in the device was also conducted. It was found that a mixture of cyanoacrylate glue and baking soda allows for conducting experiments without loss of mechanical properties of bone tissue. Thus, the developed and described methodology by the authors allows for preparing samples of the metatarsal bone for testing under cantilever loading in a short period of time, which eliminates changes in the properties of bone tissues due to a long break between extraction and experiment, as well as due to bone freezing.

---

© PNRPU