



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 546–554

Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 546–554

<https://mmi.sgu.ru>

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-4-546-554>

EDN: <https://elibrary.ru/ZYDAHE>

Обзорная статья

УДК 616.71-089.85/620.17

Обзор результатов механических испытаний по исследованию прочностных свойств остеотомий scarf и chevron первой плюсневой кости

К. А. Марьянкин, А. Р. Халиулова, Л. В. Бессонов, С. И. Киреев,
Н. В. Островский, Д. В. Иванов[✉]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Марьянкин Константин Александрович, студент факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий, kostya.maryankin.04@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7374-388X>, SPIN: 1970-0138, AuthorID: 1307780

Халиулова Алсу Рафаиловна, студент факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий, alisahaliulova03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6565-0440>, SPIN: 5539-7738, AuthorID: 1308092

Бессонов Леонид Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики, bessonov@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-1644>, SPIN: 9022-8177, AuthorID: 774968

Киреев Сергей Иванович, доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых медицинских технологий, kireevsi@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3318-5633>, SPIN: 5885-9996, AuthorID: 620012

Островский Николай Владимирович, доктор медицинских наук, профессор кафедры основ медицины и медицинских технологий, nvostrovsky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8370-2299>, SPIN: 2398-6172, AuthorID: 116256

Иванов Дмитрий Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической теории упругости и биомеханики, ivanovdv.84@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>, SPIN: 4459-1094, AuthorID: 201794

Аннотация. Вальгусная деформация первого пальца стопы является довольно распространенной патологией и диагностируется у четверти взрослого населения. При умеренной и тяжелой деформации показано выполнение остеотомии первой плюсневой кости, самыми распространенными типами которой являются scarf и chevron. Прочностные свойства остеотомий широко исследуются с помощью натурных механических испытаний на образцах трупных и синтетических костей. Данный обзор посвящен биомеханическим натурным исследованиям по оценке прочностных свойств остеотомий scarf и chevron. Был проведен поиск соответствующих научных статей по базам данных PubMed, Google Scholar, Medline, E-Library, опубликованных до мая 2025 г. включительно. Поиск и первичный анализ литературы был проведен в соответствии с методологией PRISMA. Рассматривались статьи, в которых остеотомии подвергались статическим консольным (закрепленные под углом 15 градусов к горизонту) испытаниям на универсальных испытательных машинах. Критериям включения в исследование отвечали 13 работ, которые вошли в обзор. В 10 исследованиях использовалась остеотомия chevron, а в 9 — остеотомия scarf. Остеотомии, смоделированные на трупных костях, показали в среднем более высокие прочностные характеристики по сравнению с синтетическими аналогами. В среднем остеотомия scarf продемонстрировала и меньшую изгибную жесткость, и меньшую максимальную нагрузку по сравнению с остеотомией chevron. Проведенное исследование показывает существенный интерес ученых к исследованию прочностных свойств остеотомий первой плюсневой кости. Количественные параметры прочностных свойств остеотомий



приведены в данной статье и могут быть использованы клиницистами при выборе типа остеотомии для конкретного пациента, а также при валидации биомеханических моделей.

Ключевые слова: hallux valgus, scarf, chevron, биомеханика, консольное нагружение, первая плюсневая кость, бурсит большого пальца, остеотомия, хирургическое лечение, натурные испытания, тип разрушения

Для цитирования: Марьянкин К. А., Халиулова А. Р., Бессонов Л. В., Киреев С. И., Островский Н. В., Иванов Д. В. Обзор результатов натурных испытаний по исследованию прочностных свойств остеотомий scarf и chevron первой плюсневой кости // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 4. С. 546–554. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-4-546-554>, EDN: ZYDAHE

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Review

Review of the results of mechanical tests on the strength properties of the scarf and chevron osteotomies of the first metatarsal bone

К. А. Maryankin, A. R. Khaliulova, L. V. Bessonov,
S. I. Kireev, N. V. Ostrovsky, D. V. Ivanov[✉]

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Konstantin A. Maryankin, kostya.maryankin.04@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7374-388X>, SPIN: 1970-0138, AuthorID: 1307780

Alsu R. Khaliulova, alisahaliulova03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6565-0440>, SPIN: 5539-7738, AuthorID: 1308092

Leonid V. Bessonov, bessonov@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-1644>, SPIN: 9022-8177, AuthorID: 774968

Sergey I. Kireev, kireevsi@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3318-5633>, SPIN: 5885-9996, AuthorID: 620012

Nikolay V. Ostrovsky, nvostrovsky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8370-2299>, SPIN: 2398-6172, AuthorID: 116256

Dmitry V. Ivanov, ivanovdv.84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>, SPIN: 4459-1094, AuthorID: 201794

Abstract. Hallux valgus deformity of the first toe is a fairly common pathology and is diagnosed in a quarter of the adult population. In moderate and severe deformity, osteotomy of the first metatarsal bone is indicated; the most common types of osteotomy are scarf and chevron. The strength properties of osteotomies are widely studied using full-scale mechanical tests on cadaveric and synthetic bone samples. This review is devoted to biomechanical field studies evaluating the strength properties of scarf and chevron osteotomies. A search was conducted for relevant scientific articles in the databases PubMed, Google Scholar, Medline, and E-Library, published up to and including May 2025. The search and primary analysis of the literature were carried out in accordance with the PRISMA methodology. Articles were considered in which osteotomies were subjected to static cantilever (fixed at an angle of 15 degrees to the horizon) tests on universal testing machines. The criteria for inclusion in the study were met by 13 papers that were included in the review. Chevron osteotomy was used in 10 studies, and scarf osteotomy was used in 9 studies. Osteotomies modeled on cadaver bones showed, on average, higher strength characteristics compared to synthetic analogues. By and large, the scarf osteotomy demonstrated lower flexural stiffness and maximum load compared to the chevron osteotomy. It was revealed that the use of additional implants in the form of spokes, plates, and spirals does not necessarily lead to an increase in the strength properties of osteotomy. The conducted research shows a significant interest of scientists in the study of the strength properties of osteotomies of the first metatarsal bone. The quantitative parameters of the strength properties of the osteotomies studied are given in this article and can be used



by clinicians when choosing the type of osteotomy for a particular patient, as well as when validating biomechanical models.

Keywords: hallux valgus, scarf, chevron, biomechanics, cantilever loading, first metatarsal bone, osteotomy, surgical treatment, field studies, type of fracture

For citation: Maryankin K. A., Khaliulova A. R., Bessonov L. V., Kireev S. I., Ostrovsky N. V., Ivanov D. V. Review of the results of mechanical tests on the strength properties of the scarf and chevron osteotomies of the first metatarsal bone. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 546–554 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-4-546-554>, EDN: ZYDAHE

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Биомеханические параметры опорно-двигательной функции стопы играют важную роль в возникновении и прогрессировании распространенной ортопедической патологии, проявляющейся отклонением первого пальца кнаружи (hallux valgus, HV). Это заболевание с точки зрения клинической биомеханики является проявлением деформации первого луча стопы (1ЛС), который включает в себя фаланги первого пальца, первую плюсневую кость (M1), медиальную клиновидную кость стопы, соединенные между собой соответствующими суставами. 1ЛС вместе с прилегающими мышцами и связками играет важную роль в обеспечении опорно-двигательной функции стопы [1].

Основными взаимосвязанными компонентами деформации 1ЛС при HV являются отклонение M1 в сторону, противоположную второй плюсневой кости, а также отклонение большого пальца стопы по направлению ко второму пальцу [2], что сопровождается подвывихом первого плюснефалангового сустава [3]. HV встречается у 23% взрослых в возрасте 18–65 лет и у 35,7% пожилых людей старше 65 лет [4]. При умеренной и тяжелой деформации 1ЛС основным и наиболее эффективным подходом к хирургической коррекции HV является выполнение остеотомии M1 [5]. Остеотомия — это хирургическая операция, при которой хирург целенаправленно рассекает кость, чтобы изменить ее форму, положение и угол между фрагментами [6].

Наиболее популярными в клинической практике способами разделения M1 на два фрагмента признаны остеотомии scarf и chevron [1]. Успех хирургического лечения HV в значительной степени зависит от первичной и окончательной стабильности остеотомии. Для решения вопроса о безопасности и обоснованной возможности ранней нагрузки на стопу в послеоперационном периоде было проведено множество экспериментальных биомеханических исследований. Остеотомии scarf и chevron наиболее подробно изучены с использованием методов биомеханики [7]. В рамках натурных экспериментов на образцах трупных или синтетических костей моделируется остеотомия, которая затем анализируется с использованием универсальных испытательных машин при консольном изгибе [8].

Первое биомеханическое сравнительное исследование остеотомий M1 датируется 1991 г. [9]. Несмотря на довольно большое число работ, посвященных натурным испытаниям остеотомий M1, сравнительный анализ результатов этих работ еще не проводился.

Цель обзора — обобщение опубликованных исследований в области биомеханических статических консольных испытаний остеотомий scarf и chevron с винтовой фиксацией, применяющихся при хирургическом лечении вальгусной деформации первого пальца стопы.

Методы

В данный обзор были включены исследования, в которых в качестве остеотомии для коррекции вальгусной деформации первого пальца стопы были использованы остеотомии scarf и (или) chevron. Авторами был проведен в базах данных Pubmed, Google Scholar, Medline, E-Library поиск научной литературы, посвященной статическим биомеханическим



исследованиям консольного нагружения остеотомий, опубликованной до мая 2025 г. включительно.

Поиск исследований осуществлялся по ключевым словам: вальгусная деформация, бурсит большого пальца стопы, остеотомия, chevron, scarf, хирургическое лечение вальгусной деформации, натурные исследования, натурные испытания, консольное нагружение остеотомии. Поиск и первичный анализ литературы были проведены в соответствии с методологией PRISMA [10].

Результаты

Изначально было найдено 39 статей. После удаления дубликатов окончательно в обзор вошли 13 статей, соответствующих всем критериям отбора. Включенные исследования охватывают период с 1991 по 2025 гг. с заметным ростом количества публикаций после 2010 г. В трех исследованиях остеотомии изучались с применением синтетических материалов (sawbone), в 10 статьях изучались свойства остеотомий на трупном материале. В 10 исследованиях использовалась остеотомия chevron, а в 9 — остеотомия scarf. Средний возраст людей, от которых были получены трупные кости, составляет 78 лет (от 56 до 99). Большая часть костей была получена от женщин (60%), от мужчин — 35% [8, 11, 12], для остальных костей пол не был указан.

Всего в обзор были включены результаты биомеханических исследований со 169 трупными костями и 122 синтетическими образцами. Размеры выборок в исследованиях варьировались от 6 [8] до 60 образцов [13]. Медианное значение составило 16 остеотомий на одно исследование.

Анализ названий статей и поставленных в них целей выявил, что цель большинства исследований (8 из 13) состояла в сравнении биомеханических свойств различных способов фиксации остеотомий, в том числе и новых методов фиксации [5], которые обеспечивают быстрое и прочное закрепление для проведения испытаний в день забора костного материала. В [2] проведен сравнительный анализ биомеханических свойств винтов из титанового и магниевых сплавов, используемых для фиксации при дистальной шевронной остеотомии. В [8, 11, 14] сравнивались разные техники остеотомий scarf и chevron. В работах [13, 15] проведен сравнительный анализ механических свойств и сагиттальной стабильности некоторых методик диафизарных остеотомий.

Фрагменты M1, полученные при выполнении остеотомий, скреплялись преимущественно 3.5 мм винтами [5, 6, 8, 12, 13, 16, 17], в других работах использовались 2.4–3.0 мм винты [2, 3, 8, 11, 14, 15]. В некоторых работах [8, 11–13, 16] винты дополнялись пластинами или спицами Киршнера [6]. В качестве материала используемых имплантатов в большинстве работ (12 из 13) применялся титановый сплав и только в одной статье [2] — винты из магниевого сплава.

Как правило, M1 при испытаниях с выполненной на ней остеотомией с одной стороны фиксируют с помощью собственных зажимов испытательной машины [3, 6, 8, 11, 14]. В [5] для этого применялся цианоакрилатный клей. В четырех исследованиях [8, 13, 15, 17] для фиксации кости применяли полиэфирную смолу, а в двух работах [2, 12] — винтовой крепеж.

Изгибная жесткость scarf остеотомий на трупных костях, скрепленных только винтами, составила от 24.8 до 52 Н/мм (медиана 24.8 Н/мм) [3, 5], а chevron — от 20 до 60 Н/мм (медиана 38.2 Н/мм) [17]. Изгибная жесткость scarf остеотомий, исследованных на синтетических образцах, составила 14 Н/мм [15], chevron — от 13 до 58 Н/мм (медиана 33.8 Н/мм) [2, 15].

Максимальная нагрузка scarf остеотомий на трупных костях варьировалась от 124 до 150 Н (медиана 124.3 Н) [5, 11], chevron — от 16 до 150 Н (медиана 185.5 Н) [11, 17]. Максимальная нагрузка scarf остеотомий на синтетических костях варьировалась от 74.7 до 90.5 Н (медиана 85.6 Н) [14, 15], chevron — от 54.8 до 144 Н (медиана 139.6 Н) [2, 16]. Прочностные характеристики остеотомий приведены в табл. 1, а их медианные значения — в табл. 2.



Таблица 1 / Table 1

Изгибная жесткость и максимальная нагрузка при разных остеотомиях
Flexural stiffness and maximum load of different osteotomies

Источ-ник	Материал	Тип фиксатора*	Остеотомия	Изгибная жесткость, Н/мм	Максимальная нагрузка, Н
[3]	труп.	винты 2.0 и 3.0 мм	scarf	52.0 ± 48.0	124.6 ± 56.8
[5]	труп.	винты 2.2 мм	scarf	24.8	124.0
[6]	труп.	спица Киршнера, винты 3.5 мм, винты 4.0 мм	chevron	38.2 24.9	227.9 232.4
[11]	труп.	винты 2.4 мм	scarf	–	150.0
[11]	труп.	винты 2.4 мм	chevron	–	150.0
[8]	труп.	винты	scarf	52.1	124.63
[8]	труп.	пластина, винты 3.5 мм	scarf dorsomedial	7.0	110.0
[8]	труп.	пластина, винты 3.5 мм	scarf plantar	24.8	196.2
[13]	труп.	скобы 3.5 мм, винты 3.5 мм, пластина	scarf	111.0	428.4 кПа
[12]	труп.	винты 3.5 мм, пластина 2.7 мм	chevron	33.0	220.9
[17]	труп.	винты 3.5 мм	chevron дорсальный	20.0	16.0
[13]	труп.	винты 3.5 мм	chevron плантарный	60.0	70.0
[13]	труп.	скобы 3.5 мм, винты 3.5 мм, пластина	chevron	48.0	205.3 кПа
[2]	синт.	магнелиевые винты (внутренний 2.0 мм, внешний — 3.0 мм)	chevron	43.06 ± 17.59	144.2 ± 7.43
[2]	синт.	винты 2.0 и 3.0 мм	chevron	46.6 ± 12.14	141.4 ± 10.85
[14]	синт.	винты 2.5 мм и L-пластина	scarf	–	90.5 ± 20.5
[16]	синт.	винты 2.5 мм, 1.3 мм, пластина	chevron	24.67	54.8
[15]	синт.	винты 2.7 мм	scarf	14.4 ± 2.6	74.7 ± 26.4
[15]	синт.	винты 2.7 мм	chevron	16.6 ± 3.3	137.8 ± 19.1

Примечание. *Если материал не указан, то имплантаты изготовлены из титанового сплава.

Note. *If the material is not specified, the implants are made of titanium alloy.

Таблица 2 / Table 2

Медианные значения прочностных характеристик остеотомий
Median values of osteotomy strength characteristics

Остеотомия	Материал	Максимальная нагрузка, Н	Изгибная жесткость, Н/мм
scarf	труп.	124.3	24.8
chevron	труп.	185.5	38.2
scarf	синт.	85.6	14.0
chevron	синт.	139.6	33.8



Обсуждение

Несмотря на то, что известно более 130 различных вариантов остеотомий M1, применяемых при хирургическом лечении HV, самыми популярными из них являются scarf и chevron. Оба этих типа считаются идентичными с точки зрения клинических результатов лечения, однако chevron менее инвазивен [2]. Во многих современных биомеханических работах остеотомии исследуются на прочность при статическом консольном нагружении с применением универсальных испытательных машин. Первая подобная работа была опубликована еще в 1991 г., а последняя — в 2025 г. Неугасающий интерес ученых к этому вопросу подтверждает факт актуальности и необходимости обобщения накопленных данных по прочностным свойствам остеотомий. В данной работе обобщены данные по механическим испытаниям остеотомий scarf и chevron на трупных и синтетических образцах первой плюсневой кости.

Выявлено, что остеотомии, смоделированные на трупных костях, показали в среднем более высокие прочностные характеристики по сравнению с аналогами, изготовленными на синтетических костях. В среднем остеотомия scarf продемонстрировала меньшую изгибную жесткость и максимальную нагрузку по сравнению с chevron. Этот вывод справедлив для моделей на трупных и на синтетических костях (см. табл. 2). В то же время в работе [11] оба вида остеотомии scarf и chevron показали идентичную прочность.

Отметим, что использование дополнительных имплантатов в виде спиц, пластин, спиралей не обязательно ведет к увеличению прочностных свойств остеотомии, что было доказано экспериментально [8, 11, 13, 16]. Однако в работе [15] выявлено существенное увеличение прочностных характеристик при дополнении винтов пластиной: максимальная сила составила 16 Н при установке только винтов и 220 Н при дополнении их пластиной, а изгибная жесткость при этом увеличилась с 2.1 до 33.0 Н/мм.

В исследовании [8] выявлена разница биомеханических свойств между двумя вариантами проведения остеотомии scarf: плантарной (операция, при которой плоскость опилов направлена от плантарной к дорсальной поверхности кости) и дорсомедиальной (операция, при которой плоскость опилов направлена от дорсальной к плантарной поверхности кости в проксимально-дистальном направлении). Для плантарной фиксации изгибная жесткость составила 24.8 ± 10.7 Н/мм при максимальной нагрузке 192.6 Н, а для дорсомедиальной — 7.0 ± 7.6 Н/мм и 110.0 Н соответственно. Плантарный вариант оказался гораздо прочнее по показателям изгибной жесткости и максимально выдерживаемой нагрузки. Подобное исследование [17] также выявило разницу между плантарным и дорсальным вариантами остеотомии chevron. Плантарный способ в данном исследовании также оказался прочнее: изгибная жесткость 70.0 ± 41.0 Н/мм против изгибной жесткости дорсального варианта 16.0 ± 12.1 Н/мм.

Найдены работы, в которых исследуются прочностные свойства остеотомий с использованием разных материалов изготовления винтов [2]. Титановые имплантаты демонстрируют несколько более высокие показатели прочности по сравнению с магниевыми аналогами (46.6 ± 12.14 Н/мм и 43.06 ± 17.59 Н/мм соответственно).

У данного исследования есть ряд ограничений. Относительно небольшое количество включенных исследований отражает специализированный характер механических испытаний с объектами такого типа. Различия в технике крепежа образцов в испытательной машине, а также в типах и типоразмерах используемых имплантатов ограничивают возможности прямого сравнения результатов испытаний. Это подтверждается довольно широким диапазоном количественных прочностных характеристик остеотомий. В исследованных работах оценивается воздействие статических нагрузок, что может не в полной мере отражать физиологические условия функционирования остеотомий. Данное исследование может быть полезно при разработке стандартов натурных испытаний с остеотомиями первой плюсневой кости и других костей, что, в свою очередь, облегчит анализ, интерпретацию данных, а также сравнение результатов исследований, выполненных разными научными группами.



Заключение

Проведенное обзорное исследование показывает существенный интерес ученых к исследованию прочностных свойств остеотомий первой плюсневой кости. В обзоре аккумулированы прочностные свойства остеотомий scarf и chevron, исследованных при статическом консольном нагружении, проведенном на универсальных испытательных машинах. Количественные параметры прочностных свойств исследованных остеотомий приведены в данной статье и могут быть использованы клиницистами при выборе типа остеотомии для конкретного пациента, а также при валидации биомеханических моделей.

Список литературы

1. Guo J., Wang L., Mao R., Chang C., Wen J., Fan Y. Biomechanical evaluation of the first ray in pre-/post-operative hallux valgus: A comparative study // *Clinical Biomechanics*. 2018. Vol. 60. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.06.002>
2. Sahin A., Gulabi D., Buyukdogan H., Agar A., Kilic B., Mutlu I., Erturk C. Is the magnesium screw as stable as the titanium screw in the fixation of first metatarsal distal chevron osteotomy? A comparative biomechanical study on sawbones models // *Journal of Orthopaedic Surgery*. 2021. Vol. 29, iss. 3. Art. 23094990211056439. DOI: <https://doi.org/10.1177/23094990211056439>
3. 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 // *The Journal of Foot & Ankle Surgery*. 2003. Vol. 42, iss. 3. P. 161–164. DOI: <https://doi.org/10.1053/jfas.2003.50029>
4. Cai Y., Song Y., He M., He W., Zhong X., Wen H., Zhong X., Wen H., Wei Q. Global prevalence and incidence of hallux valgus: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Foot and Ankle Research*. 2023. Vol. 16, iss. 1. Art. 63. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13047-023-00661-9>
5. Иванов Д. В., Доль А. В., Бессонов Л. В., Куреев С. И., Гуляева А. О. Методика механических испытаний при консольном нагружении плюсневых костей стопы // *Российский журнал биомеханики*. 2023. Т. 27, № 4. С. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2023.4.06>, EDN: QWJFLW
6. Kasperek M. F., Benca E., Hirtler L., Willegger M., Boettner F., Zandieh S., Holinka J., Windhager R., Schuh R. Biomechanical evaluation of the proximal chevron osteotomy in comparison to the Lapidus arthrodesis for the correction of hallux valgus deformities // *International Orthopaedics (SICOT)*. 2022. Vol. 46, iss. 10. P. 2257–2264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00264-022-05514-x>
7. Esses S. I., McGuire R., Jenkins J., Finkelstein J., Woodard E., Watters W. C., Goldberg M. J., Keith M., Turkelson C. M., Wies J. L., Sluka P., Boyer K. M., Hitchcock K. The treatment of symptomatic osteoporotic spinal compression fractures // *American Academy of Orthopaedic Surgeon*. 2011. Vol. 19, iss. 3. P. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.5435/00124635-201103000-00007>
8. Klos K., Simons P., Hajduk A.-S., Hoffmeier K. L., Gras F., Fröber R., Hofmann G. O., Mückley T. Plantar versus dorsomedial locked plating for Lapidus arthrodesis: A biomechanical comparison // *Foot & Ankle International*. 2011. Vol. 32, iss. 11. P. 1081–1085. DOI: <https://doi.org/10.3113/FAI.2011.1081>
9. Shereff M. J., Sobel M. A., Kummer F. J. The stability of fixation of first metatarsal osteotomies // *Foot & Ankle*. 1991. Vol. 11, iss. 4. P. 208–211. DOI: <https://doi.org/10.1177/107110079101100404>
10. Page M. J., Moher D., Bossuyt P. M., Boutron I., Hoffmann T. C., Mulrow C. D. et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews // *BMJ*. 2021. Vol. 372, iss. 160. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
11. Newman A. S., Negrine J. P., Zeeovie M., Stanford P., Walsh W. R. A biomechanical comparison of the Z step-cut and basilar crescentic osteotomies of the first metatarsal // *Foot & Ankle International*. 2000. Vol. 21, iss. 7. P. 584–587. DOI: <https://doi.org/10.1177/107110070002100710>
12. Schuh R., Hofstaetter J. G., Benca E., Willegger M., von Skrbensky G., Zandieh S., Wanivenhaus A., Holinka J., Windhager R. Biomechanical analysis of two fixation methods for proximal chevron osteotomy of the first metatarsal // *International Orthopaedics (SICOT)*. 2014. Vol. 38, iss. 5. P. 983–989. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00264-014-2286-1>
13. Trnka H.-J., Parks B. G., Ivancic G., Chu I.-T., Easley M. E., Schon L. C., Myerson M. S. Six first metatarsal shaft osteotomies: Mechanical and immobilization comparisons // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2000. Vol. 381. P. 256–265. DOI: <https://doi.org/10.1097/00003086-200012000-00030>



14. Bohnert L., Radeideh A., Bigolin G., Gautier E., Lottenbach M. Mechanical testing of maximal shift scarf osteotomy with inside-out plating compared to classic scarf osteotomy with double screw fixation // *The Journal of Foot & Ankle Surgery*. 2018. Vol. 57, iss. 6. P. 1056–1058. DOI: <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2018.02.010>
15. Shaw N., Wertheimer S., Krueger J., Haut R. A mechanical comparison of first metatarsal diaphyseal osteotomies for the correction of hallux abducto valgus // *The Journal of Foot & Ankle Surgery*. 2001. Vol. 40, iss. 5. P. 271–276. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1067-2516\(01\)80062-4](https://doi.org/10.1016/s1067-2516(01)80062-4)
16. 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 // *Clinics in Orthopedic Surgery*. 2017. Vol. 9, iss. 4. P. 514–520. DOI: <https://doi.org/10.4055/cios.2017.9.4.514>
17. Sharma K. M., Parks B. G., Nguyen A., Schon L. C. Plantar-to-Dorsal compared to dorsal-to-plantar screw fixation for proximal chevron osteotomy: A biomechanical analysis // *Foot & Ankle International*. 2005. Vol. 26, iss. 10. P. 854–858. DOI: <https://doi.org/10.1177/107110070502601011>

References

1. Guo J., Wang L., Mao R., Chang C., Wen J., Fan Y. Biomechanical evaluation of the first ray in pre-/post-operative hallux valgus: A comparative study. *Clinical Biomechanics*. 2018, vol. 60, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.06.002>
2. Sahin A., Gulabi D., Buyukdogan H., Agar A., Kilic B., Mutlu I., Erturk C. Is the magnesium screw as stable as the titanium screw in the fixation of first metatarsal distal chevron osteotomy? A comparative biomechanical study on sawbones models. *Journal of Orthopaedic Surgery*, 2021, vol. 29, iss. 3, art. 23094990211056439. DOI: <https://doi.org/10.1177/23094990211056439>
3. 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. *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, 2003, vol. 42, iss. 3, pp. 161–164. DOI: <https://doi.org/10.1053/jfas.2003.50029>
4. Cai Y., Song Y., He M., He W., Zhong X., Wen H., Zhong X., Wen H., Wei Q. Global prevalence and incidence of hallux valgus: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Foot and Ankle Research*, 2023, vol. 16, iss. 1, art. 63. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13047-023-00661-9>
5. Ivanov D. V., Dol A. V., Bessonov L. V., Kireev S. I., Gulyaeva A. O. Methods of mechanical tests for cantilever loading of metatarsal foot bones. *Russian Journal of Biomechanics*, 2023, vol. 27, iss. 4, pp. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.15593/RJBiomech/2023.4.06>, EDN: OVYCKA
6. Kasperek M. F., Benca E., Hirtler L., Willegger M., Boettner F., Zandieh S., Holinka J., Windhager R., Schuh R. Biomechanical evaluation of the proximal chevron osteotomy in comparison to the Lapidus arthrodesis for the correction of hallux valgus deformities. *International Orthopaedics (SICOT)*, 2022, vol. 46, iss. 10, pp. 2257–2264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00264-022-05514-x>
7. Esses S. I., McGuire R., Jenkins J., Finkelstein J., Woodard E., Watters W. C., Goldberg M. J., Keith M., Turkelson C. M., Wies J. L., Sluka P., Boyer K. M., Hitchcock K. The treatment of symptomatic osteoporotic spinal compression fractures. *American Academy of Orthopaedic Surgeon*, 2011, vol. 19, iss. 3, pp. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.5435/00124635-201103000-00007>
8. Klos K., Simons P., Hajduk A.-S., Hoffmeier K. L., Gras F., Fröber R., Hofmann G. O., Mückley T. Plantar versus dorsomedial locked plating for Lapidus arthrodesis: A biomechanical comparison. *Foot & Ankle International*, 2011, vol. 32, iss. 11, pp. 1081–1085. DOI: <https://doi.org/10.3113/FAI.2011.1081>
9. Shereff M. J., Sobel M. A., Kummer F. J. The stability of fixation of first metatarsal osteotomies. *Foot & Ankle*, 1991, vol. 11, iss. 4, pp. 208–211. DOI: <https://doi.org/10.1177/107110079101100404>
10. Page M. J., Moher D., Bossuyt P. M., Boutron I., Hoffmann T. C., Mulrow C. D. et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 2021, vol. 372, iss. 160. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
11. Newman A. S., Negrine J. P., Zeeovie M., Stanford P., Walsh W. R. A biomechanical comparison of the Z step-cut and basilar crescentic osteotomies of the first metatarsal. *Foot & Ankle International*, 2000, vol. 21, iss. 7, pp. 584–587. DOI: <https://doi.org/10.1177/107110070002100710>
12. Schuh R., Hofstaetter J. G., Benca E., Willegger M., von Skrbensky G., Zandieh S., Wanivenhaus A., Holinka J., Windhager R. Biomechanical analysis of two fixation methods for proximal chevron osteotomy of the first metatarsal. *International Orthopaedics (SICOT)*, 2014, vol. 38, iss. 5, pp. 983–989. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00264-014-2286-1>
13. Trnka H.-J., Parks B. G., Ivanic G., Chu I.-T., Easley M. E., Schon L. C., Myerson M. S. Six first



- metatarsal shaft osteotomies: Mechanical and immobilization comparisons. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2000, vol. 381, pp. 256–265. DOI: <https://doi.org/10.1097/00003086-200012000-00030>
14. Bohnert L., Radeideh A., Bigolin G., Gautier E., Lottenbach M. Mechanical testing of maximal shift scarf osteotomy with inside-out plating compared to classic scarf osteotomy with double screw fixation. *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, 2018, vol. 57, iss. 6, pp. 1056–1058. DOI: <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2018.02.010>
 15. Shaw N., Wertheimer S., Krueger J., Haut R. A mechanical comparison of first metatarsal diaphyseal osteotomies for the correction of hallux abducto valgus. *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, 2001, vol. 40, iss. 5, pp. 271–276. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1067-2516\(01\)80062-4](https://doi.org/10.1016/s1067-2516(01)80062-4)
 16. 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. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 2017, vol. 9, iss. 4, pp. 514–520. DOI: <https://doi.org/10.4055/cios.2017.9.4.514>
 17. Sharma K. M., Parks B. G., Nguyen A., Schon L. C. Plantar-to-dorsal compared to dorsal-to-plantar screw fixation for proximal chevron osteotomy: A biomechanical analysis. *Foot & Ankle International*, 2005, vol. 26, iss. 10, pp. 854–858. DOI: <https://doi.org/10.1177/107110070502601011>

Received / Поступила в редакцию 19.06.2025

Accepted / Принята к публикации 05.09.2025

Published / Опубликовано 28.11.2025