

Наиболее оптимальные способы фиксации имплантата к ребрам

А.К. Валиев¹, А.Г. Сальков¹, О. Ефименко², В.Д. Вешуткин³, А.Е. Жуков³

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России; Россия, 115522 Москва, Каширское шоссе, 24;

²ООО «ТИОС»; Россия, 117393 Москва, ул. Новаторов, 6;

³ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»; Россия, 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Контакты: Александр Геннадьевич Сальков salkov1994@mail.ru

Введение. Хирургическое вмешательство продолжает оставаться наиболее значимым вариантом лечения при большинстве злокачественных опухолей грудной стенки. При наличии обширных дефектов использование мышечных и кожно-мышечных лоскутов не обеспечивает необходимую жесткость и каркасность грудной стенки. Оптимальным методом в данном случае является индивидуальное эндопротезирование дефектов грудной стенки, которое разрабатывается на основе антропометрических данных каждого пациента.

Выбор варианта фиксации имплантата к костным структурам является актуальным вопросом онкоортопедии, поскольку надежная фиксация снижает риск развития послеоперационных осложнений и позволяет обеспечить каркасность грудной стенки. На сегодняшний день нет единого мнения о наиболее оптимальном методе крепления имплантата.

Цель исследования – определение наиболее надежного варианта фиксации имплантата к ребрам при реконструкции реберно-мышечного каркаса грудной клетки после хирургического вмешательства при опухолях грудной стенки для снижения риска возникновения нестабильности металлоконструкции в послеоперационном периоде, сокращения периода госпитализации и улучшения качества жизни пациентов и эстетических результатов.

Материалы и методы. Проведен эксперимент с использованием 9 свиных ребер. Определена прочность 3 различных методов фиксации имплантата к ребрам: с помощью винтов, расположенных под углами 90° и 45° к кости, и с использованием разнонаправленной фиксации.

Результаты. Наибольшая прочность конструкции наблюдалась при фиксации имплантата с помощью винтов, расположенных под углом 90° к кости (максимальная сила отрыва – 131 кг, средняя – 86 кг). При его креплении к ребрам с помощью винтов, расположенных под углом 45° к кости, и разнонаправленной фиксации прочность была меньше: максимальная сила отрыва – 34 и 39 кг соответственно, средняя – 27 и 32 кг соответственно.

Заключение. Фиксация имплантата с помощью винтов, расположенных под углом 90° к кости, является наиболее оптимальным способом. Эта технология может применяться у пациентов с опухолевым поражением грудной стенки, которым выполнена ее обширная резекция. Применение данного метода способствует снижению риска возникновения нестабильности металлоконструкции в послеоперационном периоде, сокращению периода госпитализации и улучшению качества жизни пациентов и эстетических результатов хирургического вмешательства.

Ключевые слова: фиксация имплантата, ребра, грудная стенка, реконструкция, 3D-имплантат, эксперимент, каркасность грудной стенки, прочность имплантата, опухолевое поражение грудной стенки

Для цитирования: Валиев А.К., Сальков А.Г., Ефименко О. и др. Наиболее оптимальные способы фиксации имплантата к ребрам. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2025;17(1):84–90.

DOI: <https://doi.org/10.17650/2219-4614-2025-17-1-84-90>

THE MOST OPTIMAL TECHNIQUES OF IMPLANT ATTACHMENT TO THE RIBS

A.K. Valiev¹, A.G. Salkov¹, O. Efimenko², V.D. Veshutkin³, A.E. Zhukov³

¹N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Ministry of Health of Russia; 24 Kashirskoe Shosse, Moscow 115522, Russia;

²LLS “TIOS”; 6 Novatorov St., Moscow 117393, Russia;

³Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev; 24 Minina St., Nizhny Novgorod 603155, Russia

Contacts: Alexander Gennadievich Salkov salkov1994@mail.ru

Introduction. Surgical intervention remains the most significant treatment approach for the majority of malignant tumors of the thoracic cage. In the presence of massive defects, the use of muscle and musculocutaneous flaps does not provide the necessary rigidity and structure of the thoracic wall. The optimal method in this case is personalized endoprosthesis of the thoracic wall defects developed based on anthropometric data of each individual patient.

The choice of implant fixation technique to the bone structures is an important question in orthopedic oncology because reliable fixation decreases the risk of postoperative complications and allows to achieve rigid structure of the thoracic wall. Currently, there is no consensus on the most optimal technique for implant attachment.

Aim. To determine the most reliable technique of implant fixation to the ribs in reconstruction of the rib and muscle frame of the thoracic cage after surgical intervention for tumors of the thoracic wall to decrease the risk of instability of the metal construction in the postoperative period and hospitalization time and to increase the quality of life and esthetic results of the patients.

Materials and methods. An experiment using 9 porcine ribs was performed. The accuracy of 3 different techniques of implant fixation to the ribs was determined: using screws oriented at the 90° angle, at the 45° angle relative to the bone, and using multidirectional fixation.

Results. The highest strength of the construction was observed in fixation of the implant using screws oriented at the 90° angle relative to the bone (maximal separation force – 131 kg, mean – 86 kg). Attachment to the ribs using screws oriented at the 45° angle relative to the bone and multidirectional fixation showed lower strength: maximal separation force was 34 and 39 kg, respectively, mean – 27 and 32 kg, respectively.

Conclusion. Fixation of the implant using screws oriented at the 90° angle relative to the bone is the most optimal method. This technique can be used in patients with tumor lesions in the thoracic wall who underwent extensive resection. The use of this method decreases the risk of metal construction instability in the postoperative period, decreases hospitalization time, and improves the quality of life and esthetic results in patients after surgical intervention.

Keywords: implant fixation, ribs, thoracic wall, reconstruction, 3D implant, experiment, thoracic wall rigidity, implant strength, tumor lesions in the thoracic wall

For citation: Valiev A.K., Salkov A.G., Efimenko O. et al. The most optimal techniques of implant attachment to the ribs. *Sarkomy kostei, miagkikh tkanei i opukholi kozhi = Bone and Soft Tissue Sarcomas, Tumors of the Skin* 2025;17(1):84–90. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17650/2219-4614-2025-17-1-84-90>

Введение

Реконструкция реберно-мышечного каркаса грудной клетки имеет большое значение для поддержания жизненно важных функций дыхательной и сердечно-сосудистой систем, важна при опухолях грудной стенки [1–3]. Это обусловлено необходимостью восстановления анатомии и функций грудной клетки после хирургических вмешательств, травм или аномалий для предотвращения серьезных нарушений дыхания и потенциально летальных исходов [3–5].

Разработка и усовершенствование методов восстановления каркасности грудной клетки являются актуальными задачами хирургии [3, 6]. Используют различные методы фиксации имплантата к ребрам [7, 8]. Основное внимание уделяется тому, как обеспечить адекватные стабилизацию и срастание кости с имплантатом при минимизации риска ее дополнительного повреждения и способствовать заживлению [6, 9, 10].

Один из распространенных методов фиксации имплантата к ребрам при хирургических вмешательствах на грудной клетке заключается в использовании специальных фиксаторов и проволоки для его прикрепления к ребрам [6, 11, 12]. Имплантат может быть фиксирован к мягким тканям грудной стенки с последующим форми-

рованием мягкотканной оболочки вокруг него для улучшения стабильности и эстетических результатов [13, 14]. В случаях, когда необходима более жесткая фиксация, применяют пластины и винты для остеосинтеза [15].

Выбор оптимального метода фиксации имплантата к ребрам зависит от ряда факторов, включая характер и объем реконструкции, состояние тканей пациента, предпочтения хирурга и доступные ресурсы. Окончательное решение принимается индивидуально после тщательной оценки случая.

Однако базовые принципы остеосинтеза при фиксации имплантатов к ребрам не полностью соблюдаются из-за уникальных анатомии и физиологии грудной клетки [9, 10]. Она имеет особую структуру и подвержена постоянным движениям в процессе дыхания, что создает дополнительные требования к фиксации имплантатов [8]. Традиционный метод бикортикальной фиксации включает в себя аккуратное сверление, определение глубины и установку винтов; при этом необходимо учитывать возможные риски для структур, расположенных за внутренней кортикальной пластиной кости [16].

Сегодня в ряде случаев используют конвергентную биаксиальную фиксацию. Остеосинтез осуществляется

с помощью монокортикальных фиксирующих винтов стандартной длины, которые не требуют предварительного сверления [15]. Применение данной методики позволяет создать систему, способствующую снижению рисков, повышению эффективности хирургического вмешательства и обеспечению надежности фиксации при переломах ребер [5]. Следует отметить, что технология биаксиальной фиксации предполагает использование винтов одной необходимой длины, а не набора винтов различной длины, что упрощает процесс и делает его более удобным [11].

Применение технологии 3D-печати расширило возможности создания персонализированных протезов для восстановления больших участков грудной клетки после проведения радикальных операций при онкологических заболеваниях [2]. В связи с развитием в ряде случаев нестабильности отдельных фланцев имплантатов в послеоперационном периоде у пациентов с опухолевым поражением грудной стенки, подвергшихся обширной резекции грудной стенки с реконструкцией дефекта 3D-имплантатом, принято решение о проведении настоящего эксперимента.

Цель исследования — определение наиболее надежного способа фиксации имплантата к ребрам.

Материалы и методы

Использованы 9 свиных ребер, предварительно отваренных в солевом растворе, очищенных и денатурированных от остатков мяса. Далее выполнена компьютерная томография (КТ) всех препаратов обработанных костей (толщина среза 1 мм) и подготовлены 9 образцов индивидуальных титановых имплантатов. Препараты и образцы имплантатов разделены на 3 группы: фиксации имплантата с помощью винтов, установленных под углами 90° , 45° к кости, и разнонаправленной фиксации (винты установлены под углом 90° к кости с поворотом на 10° вправо и влево в шахматном порядке).

Подготовительный этап эксперимента включал разработку схемы проведения испытаний и изготовление образцов и необходимой оснастки. На основе виртуальных моделей ребер, полученных по данным КТ, подготовлены образцы крепления имплантатов для 3 способов фиксации (рис. 1–3).

Разработка образцов по данным КТ позволяет достичь полной конгруэнтности поверхности имплантатов и кости, что повышает надежность их фиксации. Для обеспечения возможности закрепления образцов в тисках испытательной машины конструкция снабжена захватами. В зависимости от способа установки винтов захваты различались. Для образцов имплантатов, которые прикрепляли к кости с помощью винтов, расположенных под углом 90° , и путем разнонаправленной фиксации, выполнен разъемный верхний захват (рис. 4), а для образцов, установленных с помощью

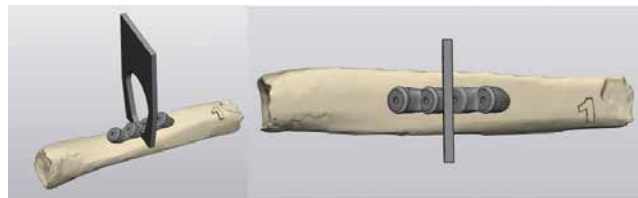


Рис. 1. Образец крепления имплантата с помощью винтов, расположенных под углом 45° к кости

Fig. 1. An example of implant attachment using screws oriented at the 45° angle relative to the bone



Рис. 2. Образец крепления имплантата с помощью винтов, расположенных под углом 90° к кости

Fig. 2. An example of implant attachment using screws oriented at the 90° angle relative to the bone



Рис. 3. Образец крепления имплантата с помощью винтов, расположенных под углом 90° к кости с поворотом на 10° вправо и влево в шахматном порядке

Fig. 3. An example of implant attachment using screws oriented at the 90° angle relative to the bone with 10° rotation to the right and to the left in checked order

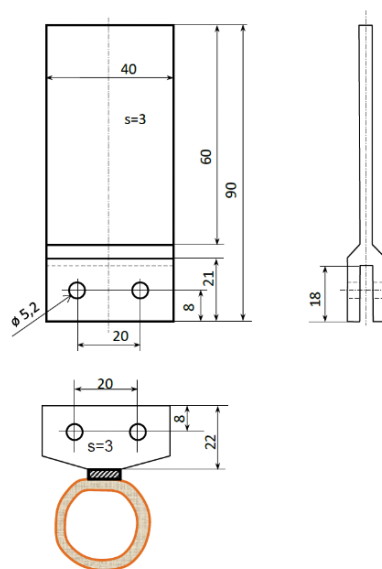


Рис. 4. Схема верхнего захвата образцов имплантатов с фиксацией с помощью винтов, расположенных под углом 90° к кости, и путем разнонаправленной фиксации

Fig. 4. A diagram of upper capture of the implants using fixation screws oriented at the 90° angle relative to the bone and using multidirectional fixation

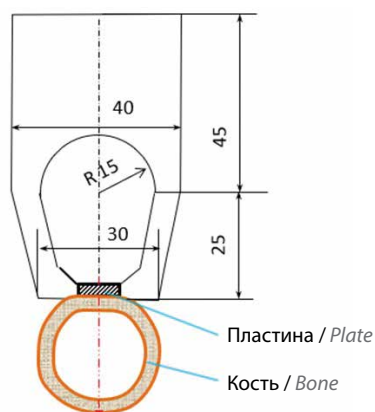


Рис. 5. Схема верхнего захвата образцов имплантатов с фиксацией с помощью винтов, установленных под углом 45° к кости
Fig. 5. A diagram of upper capture of the implants using fixation screws oriented at the 45° angle relative to the bone

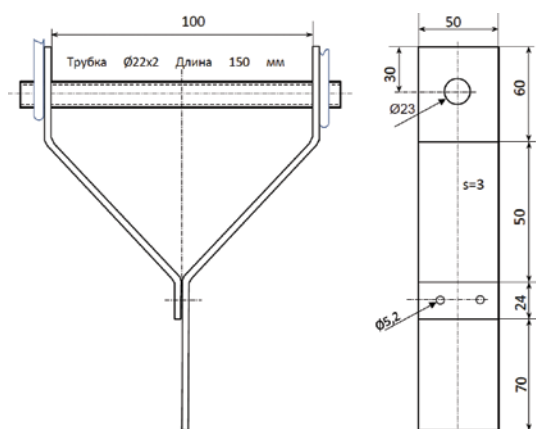


Рис. 6. Схема нижнего захвата образцов имплантатов с фиксацией с помощью винтов, установленных под углом 45° к кости
Fig. 6. A diagram of lower capture of the implants using fixation screws oriented at the 45° angle relative to the bone

винтов, расположенных под углом 45° к кости, — неразъемный верхний захват с отверстием для установки винтов (рис. 5). Для закрепления в нижних тисках испытательной машины разработан и проведен нижний захват (рис. 6). Передача давления на кость осуществлялась посредством текстильных тяг. Схемы сборки, оснастки и объектов испытаний представлены на рис. 7.

Образцы изготовлены из титанового сплава Ti-6Al-4V (ГОСТ Р ИСО 5832-3 методом селективного лазерного плавления (3D-печать) на аддитивной установке TruPrint 2000).

Следующий этап эксперимента включал проведение испытаний на лабораторном оборудовании. Сначала все образцы имплантатов были закреплены на свиных ребрах. Образцы фиксировали бикортикаль-

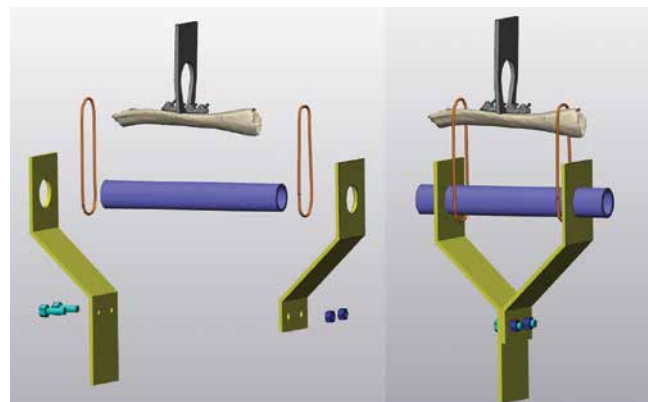


Рис. 7. Визуализация сборки всех элементов конструкции
Fig. 7. Visualization of assembly of all elements of the construction

но с помощью кортикальных винтов с угловой стабильностью $\varnothing 2,7$ мм (рис. 8). Эти винты имеют коническую резьбу на шляпке, которая входит в контакт с конической резьбой в отверстии образцов. Таким образом винт фиксируется для предотвращения его выкручивания из-за создаваемых в процессе эксплуатации вибраций.

Для установки винтов предварительно были сделаны отверстия с помощью сверла $\varnothing 2$ мм, для чего



Рис. 8. Свиные ребра и макеты костей, изготовленные из фотополимера

Fig. 8. Porcine ribs and bone mock-ups made of photopolymer

в отверстие образца имплантата установлен направлятель для сверла. Далее каждый образец закрепляли в испытательной машине и выполняли замеры нагружения (рис. 9–11). Испытания проводили на базе испытательной лаборатории сопротивления материалов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева на испытательной машине МИ-50У (рис. 12). Нагружение опытных образцов выполняли со скоростью 10 мм/мин.



Рис. 9. Начало эксперимента
Fig. 9. Start of the experiment



Рис. 10. Момент отрыва имплантата, фиксированного с помощью винтов, установленных под углом 45°
Fig. 10. The moment of separation of an implant attached using screws oriented at the 45° angle



Рис. 11. Момент отрыва имплантата, фиксированного с помощью винтов, установленных под углом 90°
Fig. 11. The moment of separation of an implant attached using screws oriented at the 90° angle



Рис. 12. Испытательная установка МИ-50У
Fig. 12. Experimental unit MI-50U

Результаты

Наибольшая прочность конструкции наблюдалась при фиксации имплантата с помощью винтов, расположенных под углом 90° к кости (максимальная сила отрыва 131 кг, средняя — 86 кг). При фиксации имплантата к ребру с помощью винтов, расположенных под углом 45° к кости, и с помощью разнонаправленной фиксации прочность была меньше: максимальная сила отрыва 34 и 39 кг соответственно, средняя — 27 и 32 кг соответственно.

Таким образом, фиксация имплантата к ребрам с помощью винтов, установленных под углом 90° к кости, обеспечивает наибольшую прочность, что указывает на эффективность и надежность этого метода при реконструкции грудной клетки с использованием 3D-имплантатов после хирургического вмешательства при опухолях грудной стенки.

Заключение

Выбор варианта фиксации имплантата к костным структурам является актуальным вопросом онкоортопедии, поскольку надежная фиксация снижает риск развития послеоперационных осложнений и позволяет обеспечить каркасность грудной стенки.

Фиксация имплантата с помощью винтов, расположенных под углом 90° к кости, является наиболее оптимальным способом. Эта технология может применяться у пациентов с опухолевым поражением грудной стенки, которым выполнена ее обширная резек-

ция. Применение данного метода способствует снижению риска возникновения нестабильности металлоконструкции в послеоперационном периоде, со-

кращению периода госпитализации и улучшению качества жизни пациентов и эстетических результатов хирургического вмешательства.

Л И Т Е Р А Т У Р А / R E F E R E N C E S

1. Агаев Д.К., Сушенцов Е.А., Софронов Д.И. и др. Применение компьютерного моделирования и 3D-технологий в онкоортопедии. Саркомы костей, мягких тканей и опухолей кожи 2019;11(4):5–16.
Agaev D.K., Sushentsov E.A., Sofronov D.I. et al. The use of computer modeling and 3D-technologies in oncoorthopedia. Literature review. Sarkomy kostei, miagkikh tkanei i opukholi kozhi = Bone and Soft Tissue Sarcomas, Tumors of the Skin 2019;11(4):5–16. (In Russ.).
2. Snow A., Ring A., Struycken L. et al. Incidence of radiation induced sarcoma attributable to radiotherapy in adults: a retrospective cohort study in the SEER cancer registries across 17 primary tumor sites. Cancer Epidemiol 2021;70:101857. DOI: 10.1016/j.canep.2020.101857
3. Сальков А.Г., Валиев А.К., Харатишвили Т.К. и др. Первый опыт успешной тотальной экстирпации грудины с замещением дефекта индивидуальным 3D-имплантом и синтетической пластиной. Клинический случай. Саркомы костей, мягких тканей и опухолей кожи 2020;12(1):62–7.
Salkov A.G., Valiev A.K., Kharatishvili T.K. et al. First experience of successful total extirpation of sternum with replacement of the defect by an individual 3D-implant and synthetic plate. Clinical case. Sarkomy kostei, miagkikh tkanei i opukholi kozhi = Bone and Soft Tissue Sarcomas, Tumors of the Skin 2020;12(1):62–7. (In Russ.).
4. Анисеня И.И., Топольницкий Е.Б., Хакимов Х.И. и др. Успешная реконструкция каркаса грудной стенки сверхэластичными никелид-титановыми 3D-модулями у пациента с многократно местно-рецидивирующей лейомиосаркомой. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2022;14(2):44–51. DOI: 10.17650/2782-3687-2022-14-2-44-51
Anisenya I.I., Topolnitsky E.B., Khakimov Kh.I. et al. Successful reconstruction of the chest wall frame with superelastic nickel-titanium 3D modules in a patient with multiple locally recurrent leiomyosarcoma. Sarkomy kostei, miagkikh tkanei i opukholi kozhi = Bone and Soft Tissue Sarcomas, Tumors of the Skin 2022;14(2):44–51. (In Russ.). DOI: 10.17650/2782-3687-2022-14-2-44-51
5. Smelt J., Pontiki A., Jahangiri M. et al. Three-Dimensional printing for chest wall reconstruction in thoracic surgery: building on experience. Thorac Cardiovasc Surg 2020; 68(4):352–6. DOI: 10.1055/s-0039-1678611
6. Топольницкий Е.Б., Михед Р.А., Марченко Е.С. и др. Замещение обширного дефекта грудной стенки в сочетании с устранением послеоперационной вентральной грыжи после комбинированного лечения рака молочной железы, осложненного остеомиелитом грудины и ребер. Вестник хирургии им. И.И. Грекова 2021;180(2):78–82.
Topolnitsky E.B., Mikhed R.A., Marchenko E.S. et al. Replacement of an extensive chest wall defect in combination with the elimination of a postoperative ventral hernia after combined treatment of breast cancer complicated by osteomyelitis of the sternum and ribs. Vestnik hirurgii im. I.I. Grekova = Bulletin of Surgery named after I.I. Grekov 2021;180(2):78–82. (In Russ.).
7. Leonardi B., Carlucci A., Noro A. et al. Three-Dimensional printed models for preoperative planning and surgical treatment of chest wall disease: a systematic review. Technologies 2021;9(4):97. DOI: 10.3390/technologies9040097
8. Wijerathne H., Langston J.C., Yang Q. et al. Mechanisms of radiation-induced endothelium damage: Emerging models and technologies. Radiother Oncol 2021;158:21–32. DOI: 10.1016/j.radonc.2021.02.007
9. Валиев А.К., Кононец П.В., Харатишвили Т.К. Применение индивидуализированных 3D-имплантов в лечении обширных опухолей грудной стенки: клинические случаи. Сеченовский вестник 2023;14(2):57–66. DOI: 10.47093/2218-7332.2023.14.2.57-66
Valiev A.K., Kononets P.V., Kharatishvili T.K. The use of individualized 3D implants in the treatment of extensive tumors of the chest wall: clinical cases. Sechenovskij vestnik = Sechenovsky Bulletin 2023;14(2):57–66. (In Russ.). DOI: 10.47093/2218-7332.2023.14.2.57-66
10. Wang L., Yan X., Zhao J. et al. Expert consensus on resection of chest wall tumors and chest wall reconstruction. Transl Lung Cancer Res 2021;10(11):4057–83. DOI: 10.21037/tlcr-21-935
11. Мюллер М.Е., Альговер М., Шнайдер Р., Виллинеггер Х. Руководство по внутреннему остеосинтезу: методика, рекомендованная группой АО (Швейцария): пер. А.В. Королева. М.: Ad Marginem, 1996. 750 с.
Muller M.E., Allgover M., Schneider R., Willenegger H. Guidelines for internal osteosynthesis: a technique recommended by the AO group (Switzerland): transl. A.V. Korolev. Moscow: Ad Marginem, 1996. 750 p.
12. Xu S., Dou Y., Zhao G. et al. Autologous ilium graft combination with Y-shaped titanium plate fixation for chest wall reconstruction after resection of primary sternal tumors—a clinical study from three institutions. Transl Cancer Res 2020;9(2):930–6. DOI: 10.21037/tcr.2019.12.36
13. Pontiki A.A., Natarajan S., Parker F.N.H. et al. Chest wall reconstruction using 3-Dimensional printing: functional and mechanical results. Ann Thorac Surg 2022;114(3):979–88. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2021.07.103
14. Gonfiotti A., Salvicchi A., Voltolini L. Chest-wall tumors and surgical techniques: State-of-the-art and our institutional experience. J Clin Med 2022;11(19):5516. DOI: 10.3390/jcm11195516
15. Prisciandaro E., Hustache-Castaing R., Michot A. et al. Chestwall resection and reconstruction for primary and metastatic sarcomas: an 11-year retrospective cohort study. Interact Cardiovasc Thorac Surg 2021;32(5):744–52. DOI: 10.1093/icvts/ivab003
16. Aragón J., Pérez Méndez I. Dynamic 3D printed titanium copy prosthesis: a novel design for large chest wall resection and reconstruction. J Thorac Dis 2016;8(6):385–9. DOI: 10.21037/jtd.2016.03.94

Вклад авторов

А.К. Валиев: разработка концепции исследования, написание текста статьи;

А.Г. Сальков, В.Д. Вешуткин: написание текста статьи;

О. Ефименко: руководство моделированием и подготовкой имплантатов;

А.Е. Жуков: проведение эксперимента, обработка данных.

Authors' contributions

A.K. Valiev: development of the research concept, article writing;

A.G. Salkov, V.D. Veshutkin: article writing;

O. Efimenko: guidance on implant modeling and preparation;

A.E. Zhukov: conducting an experiment, data processing.

ORCID авторов / ORCID of authors

А.К. Валиев / A.K. Valiev: <https://orcid.org/0000-0002-2038-3729>

А.Г. Сальков / A.G. Salkov: <https://orcid.org/0009-0006-0400-3331>

О. Ефименко / O. Efimenko: <https://orcid.org/0000-0003-3635-4380>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование выполнена без спонсорской поддержки.

Funding. The study was completed without external funding.

Статья поступила: 03.11.2024. **Принята к публикации:** 08.12.2024. **Опубликована онлайн:** 31.03.2025.

Article submitted: 03.11.2024. **Accepted for publication:** 08.12.2024. **Published online:** 31.03.2025.