

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<https://doi.org/10.52581/1814-1471/81/05>

УДК 60:616-089.843-089.844:546.3:546.82-034.24-19

РАЗРАБОТКА БИОСОВМЕСТИМЫХ СВЕРХЭЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИМПЛАНТАТОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.Э. Гюнтер¹, В.Н. Ходоренко²✉

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Российская Федерация

² Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова
Национального исследовательского Томского государственного университета,
Томск, Российская Федерация

Аннотация

В статье представлены фундаментальные и прикладные исследования по новому направлению в науке и технике «Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы», имеющее мировой приоритет. Сформулированы основные направления разработки нового поколения совершенных биосовместимых сверхэластичных имплантируемых материалов и длительно функционирующих имплантатов с эффектом памяти формы на основе никелида титана. Представлены физические и биологические принципы создания нового класса этих материалов с определенным комплексом свойств для различных областей медицины с использованием технологий индукционной плавки, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, спекания.

Среди созданных материалов большое значение представляют разработки сплавов для длительного функционирования в организме: монолитные эластичные, пористые и сверхтонкие пористо-проницаемые материалы, тканевые и текстильные материалы, изготовленные из тонких нитей на основе никелида титана. Выявлены основные медико-технические требования к новому классу имплантатов будущего. Определены критерии биомеханической совместимости металлических материалов в условиях деформационного воздействия в агрессивных тканевых средах. Сформулированы условия, при которых монолитные и пористые материалы проявляют оптимальные для имплантации свойства. Проведено комплексное исследование свойств клеточных инкубаторов из пористого никелида титана, выявлены морфологические характеристики и закономерности клеточного развития в пористой структуре объемных биоматериалов из никелида титана.

Охарактеризованы основные направления создания уникальных медицинских технологий на основе разработанных материалов. Описаны основы применения биосовместимых сверхэластичных материалов в различных областях медицины. Имплантируемые в организм материалы с памятью формы на основе никелида титана предназначены для применения в стоматологии, травматологии, хирургии, офтальмологии, сосудистой хирургии, онкологии в качестве имплантатов для остеосинтеза, эндопротезирования, замещения дефектов тканей, создания анастомозов и опорных каркасов органов.

Ключевые слова: никелид титана, имплантат, сверхэластичность, ткани организма, биосовместимость, имплантация.

Конфликт интересов: авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н. Разработка биосовместимых сверхэластичных материалов и имплантатов с памятью формы на основе никелида титана для создания высокоэффективных медицинских технологий // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. 2022. Т. 25, № 2. С. 45–56. doi 10.52581/1814-1471/81/05

NEW TECHNOLOGIES

DEVELOPMENT OF BIOCOMPATIBLE SUPERELASTIC MATERIALS AND SHAPE MEMORY IMPLANTS BASED ON TITANIUM NICKELIDE FOR THE CREATION OF HIGHLY EFFECTIVE MEDICAL TECHNOLOGIES

V.E. Gunther¹, V.N. Khodorenko²✉¹ National Research Tomsk State University,
Tomsk, Russian Federation² Siberian Physical-Technical Institute named after acad. V.D. Kuznetsov,
National Research Tomsk State University,
Tomsk, Russian Federation**Abstract**

The paper presents fundamental and applied research in a new direction in science and technology, which has a world priority – medical materials and implants with shape memory. The main directions of the development of a new generation of more advanced biocompatible superelastic implantable materials and long-term shape memory implants based on titanium nickelide are formulated. The physical, biological principles of creating a new class of biocompatible superelastic materials based on titanium nickelide with a certain set of properties for various fields of medicine using technologies of induction melting, self-propagating high-temperature synthesis, and sintering are presented.

Among the materials created, the development of alloys for long-term functioning in a living organism is of great importance: monolithic elastic, porous and ultra-thin porous-permeable materials, fabric and textile materials made of thin filaments based on titanium nickelide. The main medical and technical requirements for a new class of implants of the future have been identified. Criteria for the biomechanical compatibility of metallic materials under deformation conditions in aggressive tissue media have been determined. Conditions are formulated under which monolithic and porous materials exhibit properties that are optimal for implantation. A comprehensive study of the properties of cell incubators made of porous titanium nickelide was carried out, and the morphological characteristics and patterns of cell development in the porous structure of bulk biomaterials made of titanium nickelide were revealed.

The main directions of creation of unique medical technologies based on the developed materials are characterized. The principles of application of biocompatible superelastic materials in various fields of medicine are described. Titanium nickelide-based materials and implants with shape memory implanted into the body are intended for a wide range of medical purposes in dentistry, traumatology, surgery, ophthalmology, vascular surgery, oncology and other fields of medicine as implants for osteosynthesis, endoprosthetics, replacement of tissue defects, creating anastomoses and support frames of organs.

Keywords: titanium nickelide, implant, superelasticity, tissues, biocompatibility, implantation

Conflict of interest: the authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this paper.

Financial disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Gunther V.E., Khodorenko V.N. Development of biocompatible superelastic materials and shape memory implants based on titanium nickelide for the creation of highly effective medical technologies. *Issues of Reconstructive and Plastic Surgery*. 2022;25(2):45–56. doi 10.52581/1814-1471/81/05

В результате фундаментальной и прикладной деятельности ученых физиков и медиков, инженеров, конструкторов и технологов было создано и внедрено новое направление в науке и технике, имеющее мировой приоритет. Суть этого направления заключается в разработке и приме-

нении класса биосовместимых материалов и длительно функционирующих имплантатов, более совершенных методов лечения. Разработанные материалы позволили создать имплантаты и высокоэффективные медицинские технологии нового поколения, отвечающие более высокому

уровню медико-технических требований и обладающие совокупностью свойств: памятью формы при изменении температуры, сверхэластичностью при температуре тела, коррозионной стойкостью в условиях длительной знакопеременной деформации, высокими параметрами проницаемости и смачиваемости. Многолетний труд исследователей привел к созданию медицинской техники и технологий для широкого круга целей в стоматологии, травматологии, хирургии, нейрохирургии, оториноларингологии, урологии, офтальмологии, онкологии и др. Зажимы различных типов для остеосинтеза костей лицевого скелета и конечностей, имплантаты тел позвонков и фрагменты таза, устройства для создания межкишечных и желудочно-кишечных анастомозов, стенты и имплантаты для сердечно-сосудистой хирургии, материал для замещения дефектов тканей. Разработаны опорные каркасы трахеи, бронхов и пищевода, зубные имплантаты, ортодонтическая система, сплавы для изготовления коронок зубов, кератопротезы, хирургический шовный материал, тканые и сетчатые материалы, инкубаторы клеточных культур и другие сверхэластичные конструкции с памятью формы.

Основные задачи исследований заключались в следующем.

1. Разработать физико-биологические основы создания нового класса медицинских сплавов с памятью формы, отвечающего условиям биохимической и биомеханической совместимости и удовлетворяющие более высокому уровню медико-технических требований.

2. Разработать монолитные и пористые материалы с памятью формы на основе никелида титана, обладающие такой совокупностью свойств, как эластичность в изотермических условиях, память формы при изменении температуры, коррозионная стойкость в условиях длительного функционирования в агрессивных биологических средах.

3. Разработать новое поколение имплантатов на основе никелида титана – сетчатых, тканевых, пористо-проницаемых – для создания высокоэффективных медицинских технологий хирургической пластики и замещения тканей организма.

4. Разработать новые технологии лечения с использованием нового класса имплантационных материалов на основе никелида титана в травматологии, стоматологии, онкологии, хирургии, нейрохирургии, оториноларингологии, урологии, офтальмологии и других разделах медицины.

В связи с поставленными задачами были определены основные направления исследований.

1. Изучение фундаментальных закономерностей поведения биологических тканей и их взаимодействие с имплантируемыми материалами

с памятью формы. Определение физико-механических критериев выбора имплантируемых материалов.

2. Исследование структуры медицинских сплавов на основе никелида титана, закономерностей фазовых переходов, эффектов памяти формы и эластичности, механизмов демпфирования и пластических свойств сплавов.

3. Разработка монолитных и пористых сплавов с памятью формы на основе никелида титана для широкого спектра медицинских целей, создание технических условий, медико-технических требований и технологии производства.

4. Разработка сетчатых, тканевых и пористо-проницаемых имплантатов на основе никелида титана для хирургической пластики и замещения биологических тканей.

5. Экспериментальные исследования взаимодействия клеточных популяций в пористо-проницаемой структуре имплантатов-инкубаторов из никелида титана.

6. Внедрение технологий изготовления и производства нового класса биосовместимых материалов и имплантатов на основе никелида титана.

Серия из 14 коллективных монографий охватывает результаты исследований по различным направлениям. Первое направление связано с разработкой физико-биологических основ создания нового класса биосовместимых сверхэластичных материалов с памятью формы. Важнейшими результатами в этом направлении являются установление фундаментальных закономерности гистерезисного поведения тканей и открытие закона запаздывания биологических тканей. Экспериментальными исследованиями впервые было установлено, что поведение биологических тканей в условиях воздействия внешнего напряжения, деформации и температуры характеризуется запаздывающей реакцией тканей, т.е. между величиной напряжения и деформации тканей в условиях нагрузки и разгрузки, при фиксированной температуре существует гистерезисная зависимость, которая проявляется в возврате деформации и восстановлении формы тканей при более низких напряжениях, чем при напряжениях нагрузки (рис. 1).

Появление гистерезиса связано с необратимым рассеянием энергии в тканях и является мерой эластичности тканей, внутренних потерь (трения), а величина максимальной деформации изменения формы, способной при снятии нагрузки к возврату в исходное состояние. Такая способность живых тканей с запаздыванием реагировать на любые воздействия, включая механические, проявляется в том, что при нагрузке тканей до определенного уровня они сопротивляются, а при снятии напряжения, напротив, сопротивляются снятию нагрузки, оставаясь в напряженном

состоянии. Величина гистерезиса различных тканей является конкретной их характеристикой.

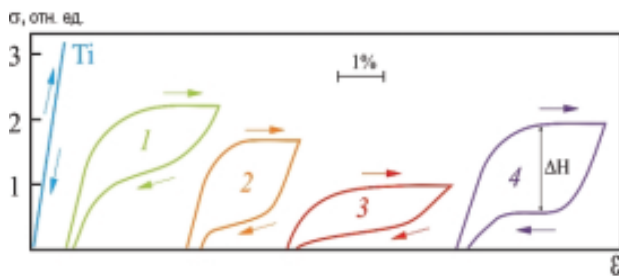


Рис. 1. Гистерезисное поведение различных тканей организма: 1 – волосы; 2 – кость; 3 – collagen; 4 – сплав на основе никелида титана в условиях изменения функций состояния системы

Fig. 1. Hysteresis behavior of various tissues of the body: 1 – hair; 2 – bone; 3 – collagen; 4 – alloy based on titanium nickelide under conditions of changing system state functions

Главное значение открытого закона запаздывания биологических тканей проявляется в том, что их гистерезисное эластичное поведение предъявляет определенные критерии и медико-технические требования к выбору имплантируемых в организм материалов, имплантатов, созданию аппаратов и инструментов. Оптимальный имплантат должен быть по своим свойствам подобен живой ткани, а именно, иметь заданный гистерезис на диаграмме «нагрузка–разгрузка», проявлять соответствующий тканям уровень величины обратимой деформации, обладать высокой степенью восстановления формы и значительным сопротивлением усталости материала.

Традиционные медицинские материалы – титан, тантал, нержавеющая сталь, кобальт-хром-молибденовые сплавы – этим требованиям не соответствуют и поэтому не могут использоваться для длительного функционирования в организме в качестве материала имплантата.

Разработан новый класс материалов на основе никелида титана, удовлетворяющий свойствам тканей и условиям их гистерезисного поведения (рис. 2).

С помощью различных технологий получения материалов на основе никелида титана – методов индукционной плавки, порошковой металлургии и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), были созданы монокристаллические и пористо-проницаемые материалы с заданным комплексом свойств для различных направлений медицины (марки сплавов: ТН-10, ТН-ХЭ, ТН-20, ТН-1А, ТН-1В) (рис. 3).

Данный класс материалов характеризуется оптимальным сочетанием удельного веса, прочности и пластичности, износо- и циклоустойкости, коррозионной стойкости и значительным сопротивлением усталости.

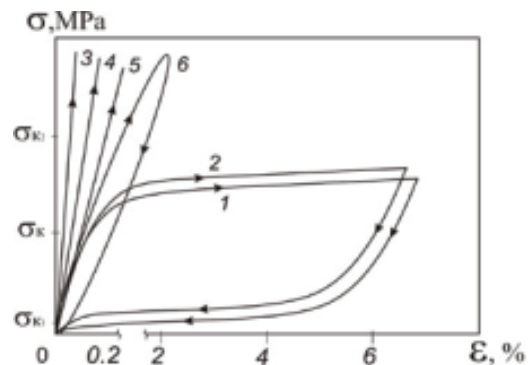


Рис. 2. Деформационная зависимость в условиях нагрузки и разгрузки биологических тканей и различных материалов: 1 – биоткань (кость, collagen, хрящ и др.); 2 – никелид титана; 3 – нержавеющая сталь; 4 – тантал; 5 – титан; 6 – полимеры

Fig. 2. Deformation dependence under conditions of loading and unloading of biological tissues and various materials: 1 – biological tissue (bone, collagen, cartilage, etc.); 2 – titanium nickelide; 3 – stainless steel; 4 – tantalum; 5 – titanium; 6 – polymers



Рис. 3. Монокристаллические сплавы на основе никелида титана
Fig. 3. Monolithic alloys based on titanium nickelide

Физические и биологические исследования поведения нового класса материалов позволили установить фундаментальный закон взаимодействия материалов и имплантатов с тканями организма. Детальный анализ коррозионной стойкости, фармакодинамических и антимикробных свойств, особенностей дезинфекции и стерилизации, а также токсикология и канцерогенность определили новый класс материалов с высоким уровнем медицинских, технических требований и спецификаций. На основе разработанных материалов были изготовлены разнообразные конструкции – имплантаты для решения конкретных задач в различных областях медицины (рис. 4).

Наиболее эффективным материалом медицинского назначения является пористо-проницаемый никелид титана, получаемый методом СВС и спекания. Пористые сплавы на основе никелида титана, нашли применение благодаря

своим хорошим функциональным свойствам, а также простоте и высокой производительности метода их получения (рис. 5). Он широко используется сегодня в большинстве областей медицины.

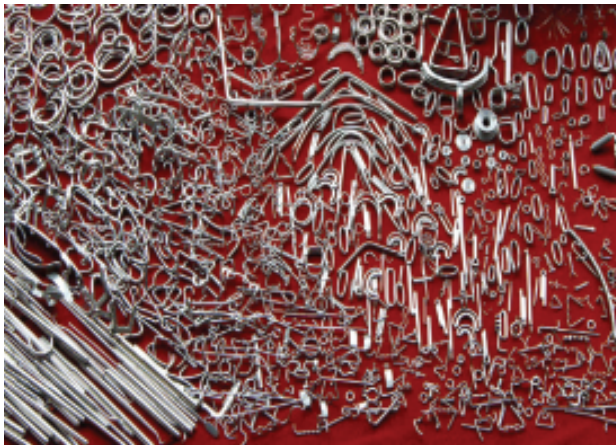


Рис. 4. Индивидуальные конструкции имплантатов из сплава никелида титана для различных областей медицины

Fig. 4. Individual designs of titanium nickelide alloy implants for various fields of medicine



Рис. 5. Пористо-проницаемый материал на основе никелида титана

Fig. 5. Porous-permeable material based on titanium nickelide

Эффективность применения пористого никелида титана связана с его уникальными характеристиками – проявлять высокие эластичные свойства подобно тканям организма и изменять форму при изменении температуры и напряжения, а также, что особенно важно, он обладает высокой степенью проницаемости. С учетом применения пористого никелида титана в медицине, его поровое пространство приобретает важное функциональное значение. В процессе функционирования имплантата оно заполняется тканями организма и тканевыми жидкостями, питающими эти ткани. Металлическая матрица вступает в комплексное (механическое, электро-

химическое, тепловое и гидродинамическое) взаимодействие с тканями и жидкостями.

Впервые было показано, что имплантация пористо-проницаемого эластичного материала на основе никелида титана создает условия адекватного взаимодействия ткани и имплантата. Исходя из того, что тканям организма свойственны ряд характеристик, имеющих наиважнейшее значение, такие как проницаемость, смачиваемость, пористость, созданы уникальные конструкции из литых, пористо-проницаемых материалов для длительного функционирования в организме. Имплантаты, изготовленные из таких материалов, позволяют качественно по-новому решить проблему создания искусственных органов, эндопротезов и тканевых систем (рис. 6). Они, как и ткани, характеризуются гистерезисным поведением и с запаздыванием реагируют на изменение напряжения и деформации, имеют заданное распределение пор по размерам и соответствующий уровень проницаемости и смачиваемости.



Рис. 6. Пористо-проницаемые имплантаты на основе никелида титана для различных областей медицины

Fig. 6. Porous-permeable implants based on titanium nickelide for various fields of medicine

Особенности взаимодействия новых материалов и имплантатов с тканями организма заключаются в том, что они способны длительное время функционировать в организме, обеспечивая стабильную регенерацию клеток, и создавать надежную фиксацию с тканями организма за счет образования и роста тканей в порах имплантата. Реакция, например, костных тканей на имплантат заключается в том, что в порах последнего со временем образуется зрелая костная ткань со структурой, аналогичной матричной кости. Зарождение и рост костной ткани в пористой структуре имплантата происходит одновременно во многих порах, которая затем разрастается и соединяется в единую тканевую систему,

заполняя поры имплантата и соединяющие их каналы. Полное формирование костной ткани в порах внутри имплантата происходит в основном к 3 мес, а структурная картина ткани в порах со временем практически не меняется (рис. 7).

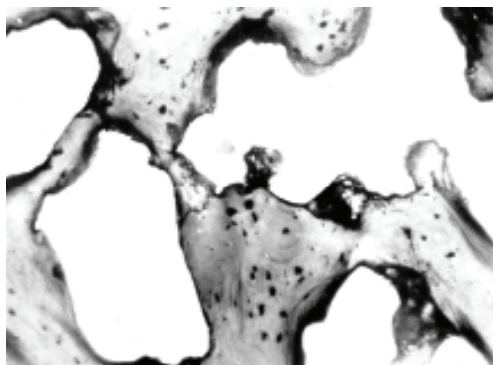


Рис. 7. Структура пористого проницаемого никелида титана с образованной в нем костной тканью через 3 мес после имплантации. Ув $\times 500$

Fig. 7. Structure of porous permeable titanium nickelide with bone tissue formed in it 3 months after implantation

Разработанные материалы предопределили создание уникальных медицинских технологий лечения с использованием биосовместимых имплантатов нового поколения, которые способны проявлять в условиях знакопеременного внешнего воздействия аналогичные с тканями организма свойства. Так, новые технологии в хирургии позвоночника представлены методами лечения компрессионных клиновидных переломов тел позвонков задней и передней внутренней фиксации сверхэластичными имплантатами с памятью формы и способами восстановления опороспособности позвоночника с использованием широкого спектра пористо-проницаемых имплантатов (рис. 8).

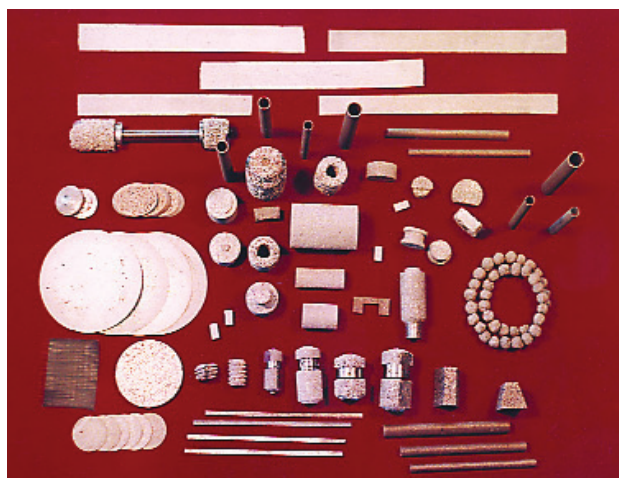


Рис. 8. Набор пористо-проницаемых имплантатов для вертебрологии

Fig. 8. Set of porous-permeable implants for vertebrology

Впервые описаны методы коррекции деформации позвоночника аппаратами с памятью

формы и методы комбинированного лечения повреждений позвоночника с использованием пористых и беспористых эластичных имплантатов с памятью формы. Высокоэффективными являются разработки методов динамической коррекции деформации позвоночника в амбулаторных условиях. Эластично и мягко действующие рабочие элементы корректоров с «памятью» позволяют исключить во многих случаях хирургические методы лечения позвоночника в детском возрасте.

Сверхэластичные имплантаты с памятью формы открыли новые возможности лечения в костной онкологии. Разработаны и представлены методы пластического возмещения дефектов тканей. При этом решены задачи сохранения функции и опороспособности тканей позвоночника. Важным результатом в разработке новых методов лечения костных тканей явилась возможность остеосинтеза с использованием матриц из пористо-проницаемого материала на основе никелида титана, включая остеосинтез в условиях воспалительного процесса, что является несомненным вкладом в разработку методов хирургического лечения хронического остеомиелита.

Большой цикл исследований был проведен по направлению травматологии и ортопедии. Разработаны методы оперативного лечения плечевого пояса имплантатами с памятью формы, остеосинтез при суставных переломах и переломах трубчатых костей, остеосинтез при оперативном лечении бедренной кости. Разработаны щадящие методы лечения повреждений плюсневых костей и костей кисти с помощью миниатюрных имплантатов.

Сегодня нет такого раздела травматологии, в котором не были бы усовершенствованы традиционные методы лечения остеосинтеза или не разработаны новые эффективные технологии лечения повреждений костных тканей. Разработано более 200 различных дизайнов имплантатов для травматологии (рис. 9).

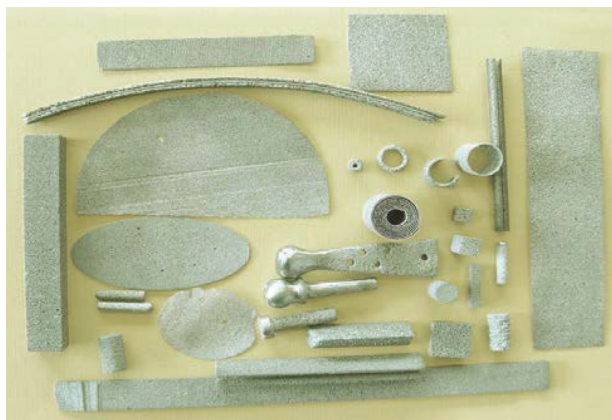


Рис. 9. Травматологический набор сверхэластичных имплантатов с памятью формы

Fig. 9. Trauma set of superelastic shape memory implants

Новые технологии в стоматологии разработаны, прежде всего, в челюстно-лицевой хирургии. Широкий спектр разработок включает уникальные методы остеосинтеза фиксаторами с памятью формы при травмах и заболеваниях лицевого скелета, переломах нижней и верхней челюсти и скуловой кости, остеосинтез после остеотомии челюстей и при удалении злокачественных новообразований полости рта и глотки, а также переломы, осложнившиеся остеомиелитом.

Одним из крупных результатов во внедрении новых биосовместимых сверхэластичных материалов и имплантатов с гистерезисным поведением является разработка методов эндопротезирования костей лицевого скелета (рис. 10).



a



б

Рис. 10. Набор имплантатов для челюстно-лицевой хирургии: а – для средней зоны лица; б – комбинированный эндопротез нижней челюсти

Fig. 10. A set of implants for maxillofacial surgery: а – for the middle zone of the face; б – combined lower jaw endoprosthesis

Эндопротезирование нижней и верхней челюстей, орбиты и височно-челюстного сустава с помощью композиций пористо-проницаемых,

монокристаллических и тканевых сетчатых имплантатов, соответствующих по форме костным дефектам, выводит стоматологию на качественно новый уровень. Созданные имплантаты функционируют как замещенные костные ткани на протяжении всей дальнейшей жизни.

Важным разделом стоматологии, в который внесен значительный вклад, является ортопедия и дентальная имплантология. Представлены разработки новых методов протезирования с использованием сверхэластичных имплантатов с памятью формы. Структура имплантатов способна адаптироваться к тканевой системе и нести значительные функциональные нагрузки.

Дентальную имплантацию выполняли с использованием конструкций на основе пористо-проницаемых эластичных материалов, адаптированных к биологическим системам. Биохимическая и биомеханическая совместимость с тканями организма, наличие сквозной проницаемой пористости обеспечивали их гармоничное взаимодействие с костным ложем реципиента и длительное функционирование ортопедической конструкции как неотъемлемой части структуры восстановленного зубочелюстного аппарата.

Контурную пластику мягких и костных тканей лица осуществляли путем замещения волоконным никелидом титана после препарирования и мобилизации тканей в проекции изъязнения (рис. 11).



Рис. 11. Волоконный никелид титана

Fig. 11. Fiber titanium nickelide

В настоящее время разработанные методы протезирования позволяют расширить показания к имплантации зубов. Созданный литой сплав со сверхэластичными свойствами имеет фундаментальное значение в стоматологии. Протезы из такого сплава характеризуются малым удельным весом, высокой эластичностью и соответствием медико-техническим и эстетическим требованиям применения.

В ортодонтической стоматологии разработан новый класс сверхэластичных ортодонтических аппаратов и основанные на их применении новые

методы ортодонтического лечения. Аппараты воздействуют на тканевую систему по заданной программе в соответствии с индивидуальными особенностями пациента.

Новые медицинские технологии в хирургии с использованием сверхэластичных имплантатов с гистерезисным поведением разработаны в торакоабдоминальной и желудочно-кишечной хирургии, гастроэнтерологии и колопроктологии, в хирургии паренхиматозных органов, трахеи и бронхов, в реконструктивной сосудистой и клеточной хирургии (рис. 12, 13).



Рис. 12. Набор для дилатации и коррекции полых органов для сосудистой хирургии

Fig. 12. Set for dilatation and correction of hollow organs for vascular surgery



Рис. 13. Варианты имплантатов для формирования анастомозов в желудочно-кишечной хирургии

Fig. 13. Variants of implants for the formation of anastomoses in gastrointestinal surgery

Впервые разработаны методы компрессионного желудочно-кишечного и межкишечного анастомоза с использованием сверхэластичных имплантатов с памятью формы. Эффективным является способ формирования терминального толстокишечного и тонко-толстокишечного клапанного анастомоза. Разработаны новые

принципы оперативного лечения трахеи и бронхов с использованием пористо-проницаемых эластичных имплантатов, близких по свойствам к тканям организма. Метод резекции желудка осуществляется на качественно новом уровне: вместо традиционного ручного шва для формирования гастроэнтероанастомоза используется имплантат с гистерезисным поведением и памятью формы. Новый метод позволяет значительно снизить уровень осложнений.

Предложены новые принципы хирургического лечения трахеи и бронхов с использованием трикотажной сетки (рис. 14). Были разработаны пористо-проницаемый эластичный материал и имплантаты из тонких (40–60 мкм) нитей, свойства которых подобны таковым тканей организма.



Рис. 14. Трикотажные материалы из тонких (40–60 мкм) нитей

Fig. 14. Knitted materials from thin (40–60 microns) threads

Широкий спектр новых оперативных технологий лечения разработан в оториноларингологии. Созданы эластичные протезы наковальни и

среднего уха, эндопротезы барабанной перепонки и ушной раковины.

Ряд новых уникальных разработок представлены в урологии и гинекологии. Разработаны методы лечения стриктур уретры и предраковых заболеваний шейки матки с использованием тканых и трикотажных сверхэластичных имплантатов с памятью формы.

В офтальмологии предложены новые методы лечения тяжелых отслоек сетчатки с использованием эластичных нитей с памятью формы. Предложен способ формирования культи глазного яблока на основе волоконного никелида титана. Разработан новый проникаемый самофиксирующий кератопротез.

Криохирургические технологии лечения осуществляются высокочастотными пористо-проницаемыми криоаппликаторами нового поколения (рис. 15). Разработаны методы криолечения гемангиом, доброкачественных новообразований различных тканей, криолечение при поражениях печени, пищевода и других органов.



Рис. 15. Криоаппликаторы из никелида титана со статическими и подвижными рабочими элементами различной конфигурации

Fig. 15. Titanium nickelide cryoapplicators with static and movable working elements of various configurations

Основу рабочих элементов крионосителей составляют пористые никелид-титановые стержни заданной сквозной пористости и соответствующей структуры пор. Температура рабочей части криоаппликаторов составляет -196°C , они обладают большой теплоемкостью, малой теплопроводностью и создают условия мгновенного воздействия на поверхность любой биологической ткани. Достоинства материала, из которого они изготовлены, определяются тем, что он инертен по отношению к тканям, не корродирует при соприкосновении с водой и дезинфицирующими жидкостями. Новые криоинструменты позволили обеспечить лучший подход

к различным рельефам покровных тканей и различной локализации в полости рта, ушном и носовом проходах, по наружной и внутренней поверхности век и т.д.

Пористо-проницаемые никелид-титановые аппликаторы по сравнению с крупногабаритными промышленными аппаратами позволяют более четко локализовать процесс отвода тепла (криовоздействия) без повреждения окружающих тканей, свободно оперировать в полости рта, на дужках неба, языке, веках и других труднодоступных участках, создавать необходимую степень охлаждения тканей. Применение инструментов из никелида титана позволило качественно улучшить криовоздействие, сделать его более доступным к различным тканям, локальным, простым в исполнении и относительно дешевым.

К числу результатов, имеющих особое научное и практическое значение, относятся разработки лечения заболеваний внутренних органов методами клеточной терапии. Впервые в мировой практике созданы изотермические пористо-проницаемые матрицы, используемые в качестве инкубаторов – носителей клеточных культур (рис. 16). На их основе разработаны уникальные методы и технические средства лечения таких сложных болезней, как сахарный диабет, заболевания печени, поджелудочной железы, костного мозга.

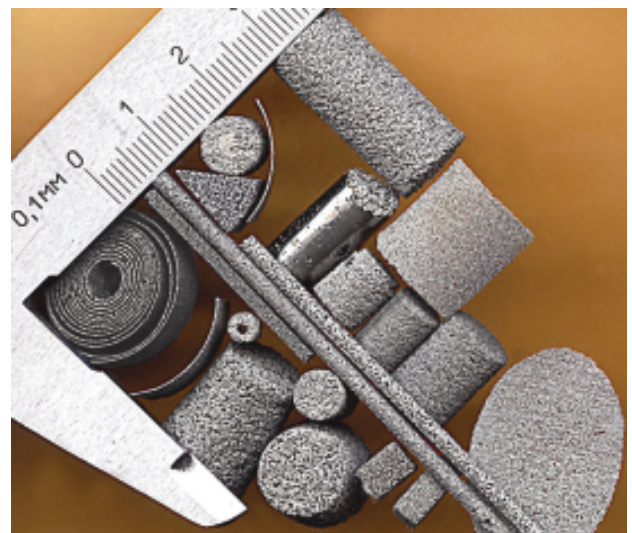


Рис. 16. Никелид-титановые инкубаторы – носители клеточных культур

Fig. 16. Nickel-titanium cell culture carrier incubators

Многие методы оперативного лечения основаны на применении нового класса созданных инструментов, имеющих высокий уровень таких свойств, как износостойкость, гибкость и эластичность режущей рабочей части инструмента, возможность изменения формы в соответствии с требованиями хирурга (рис. 17).



Рис. 17. Хирургические инструменты из никелида титана
Fig. 17. Surgical instruments made of titanium nickelide

Научная новизна разработок российских ученых [1–14] заключается в установлении

общих закономерностей поведения биологических систем живой природы, в том числе тканей организма, феномена гистерезисного поведения биологических тканей и создание уникальных технологий лечения с использованием биосовместимых сверхэластичных материалов и имплантатов нового поколения, с соответствующими гистерезисными свойствами, близкими по поведению к тканям организма. Трудом ученых – физиков и медиков – внесен существенный вклад в разработку эффективных технологий лечения в различных областях медицины [1–14]. Созданные материалы и имплантаты качественно соответствуют новому уровню медико-технических требований: они способны длительное время функционировать в организме, эластично реагировать на изменение формы тканей органов и не разрушаться после многократного воздействия последних. Такие материалы и имплантаты позволили создать новое поколение медицинской техники и новые высокоэффективные медицинские технологии хирургического лечения при решении широкого круга задач в различных областях медицины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Чекалкин Т.А. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Томск: МИЦ, 2011. 534 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 1).
2. Ланишаков В.А., Гюнтер В.Э., Плоткин Г.А. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в травматологии и ортопедии. Томск: МИЦ, 2010. 282 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 2).
3. Фомичев Н.Г., Гюнтер В.Э., Луцик А.А. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в хирургии позвоночника. Томск: МИЦ, 2011. 374 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 3).
4. Сысолятин П.Г., Гюнтер В.Э., Сысолятин С.П. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в челюстно-лицевой хирургии. Томск: МИЦ, 2012. 384 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 4).
5. Миргазизов М.З., Гюнтер В.Э., Галонский В.Г. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Материалы и имплантаты с памятью формы в стоматологии. Томск: МИЦ, 2011. 220 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 5).
6. Бахаев В.В., Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в гинекологии. Томск: МИЦ, 2010. 220 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 6).
7. Шкуратов С.И., Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в урологии. Томск: МИЦ, 2009. 248 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 7).
8. Звигинцев М.А., Гюнтер В.Э., Старосветский С.И. и др. Медицинские материалы с памятью формы при стоматологическом лечении больных сахарным диабетом. Томск: МИЦ, 2010. 168 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 8).
9. Мельник Д.Д., Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Пористо-проницаемые криоапликаторы из никелида титана в медицине. Томск: МИЦ, 2010. 306 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 9).
10. Ивченко О.А., Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в сосудистой хирургии. Томск: МИЦ, 2012. 178 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 10).

11. Дамбаев Г.Ц., Гюнтер В.Э., Зиганшин Р.В. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в хирургии. Томск: МИЦ, 2012. 398 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 11).
12. Штофин С.Г., Гюнтер В.Э., Анищенко В.В. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в панкреатобилиарной хирургии. Томск: МИЦ, 2013. 126 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 12).
13. Чойнзонов Е.А., Гюнтер В.Э., Мухаммедов М.Р. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в онкологии. Томск: МИЦ, 2013. 336 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 13).
14. Запускалов И.В., Гюнтер В.Э., Стеблюк А.Н. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в офтальмологии. Томск: МИЦ, 2012. 192 с. (Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера: в 14 т.; т. 14).

REFERENCES

1. Gunther V.E., Khodorenko V.N., Chekalkin T.L. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy* [Medical materials and shape memory implants]. Tomsk, MITS Publ., 2011. 534 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 1 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 1]). (In Russ.).
2. Lanshakov V.A., Gunther V.E., Plotkin G.L. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v travmatologii i ortopedii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in traumatology and orthopedics]. Tomsk, MITS Publ., 2010. 282 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 2 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 2]). (In Russ.).
3. Fomichev N.G., Gunther V.E., Lutsik A.A. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v khirurgii pozvonochnika*. [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in spinal surgery]. Tomsk, MITS Publ., 2011. 374 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 3 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 3]). (In Russ.).
4. Sysolyatin P.G., Gunther V.E., Sysolyatin S.P. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v chelyustno-litsevoy khirurgii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in maxillofacial surgery]. Tomsk, MITS Publ., 2012. 384 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 4 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 4]). (In Russ.).
5. Mirgazizov M.Z., Gunther V.E., Galonsky V.G. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Materialy i implantaty s pamyat'yu formy v stomatologii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory materials and implants in dentistry]. Tomsk, MITS Publ., 2011. 220 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 5 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 5]). (In Russ.).
6. Bakhaev V.V., Gunther V.E., Dambayev G.Ts. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v ginekologii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in gynecology]. Tomsk, MITS Publ., 2010. 220 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 6 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 6]). (In Russ.).
7. Shkuratov S.I., Günther V.E., Dambayev G.Ts. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v urologii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in urology. Vol. 7]. Tomsk, MITS Publ., 2009. 248 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 7 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 7]). (In Russ.).
8. Zvigintsev M.A., Gunther V.E., Starosvetsky S.I. et al. *Meditinskiye materialy s pamyat'yu formy pri stomatologicheskoy lechenii bol'nykh sakharnym diabetom* [Medical materials with shape memory in the dental treatment of patients with diabetes mellitus]. Tomsk, MITS Publ., 2010. 168 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 8 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 8]). (In Russ.).
9. Melnik D.D., Gunther V.E., Dambayev G.Ts. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Poristopronitsayemye krioprikladnyye iz nikelida titana v meditsine* [Medical materials and shape memory implants. Porous-permeable cryoapplicators from titanium nickelide in medicine. Vol. 9]. Tomsk, MITS Publ., 2010. 306 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 9 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 9]). (In Russ.).

10. Ivchenko O.A., Gunther V.E., Dambayev G.Ts. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v sosudistoy khirurgii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in vascular surgery]. Tomsk, MITS Publ., 2012. 178 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 10 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 10]). (In Russ.).
11. Dambayev G.Ts., Gunther V.E., Ziganshin R.V. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v khirurgii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in surgery. Vol. 11]. Tomsk, MITS Publ., 2012. 398 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 11 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 11]). (In Russ.).
12. Shtofin S.G., Gunther V.E., Anishchenko V.V. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v pankreatobiliarnoy khirurgii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in pancreatobiliary surgery]. Tomsk, MITS Publ., 2013. 126 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 12 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 12]). (In Russ.).
13. Choinzonov E.L., Gunther V.E., Mukhammedov M.R. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v onkologii* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in oncology]. Tomsk, MITS Publ., 2013. 336 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 13 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 13]). (In Russ.).
14. Zapuskalov I.V., Gunther V.E., Steblyuk A.N. et al. *Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy Implantaty s pamyat'yu formy v oftal'mologii* [Medical materials and shape memory implants Shape memory implants in ophthalmology]. Tomsk, MITS Publ., 2012. 192 p. (Meditinskiye materialy i implantaty s pamyat'yu formy: v 14 t.; t. 14 [Medical materials and shape memory implants: In 14 volumes. Ed. V.E. Gyunter. Vol. 14]). (In Russ.).

Сведения об авторах

Гюнтер Виктор Эдуардович – заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор кафедры физики металлов физического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36).

<https://orcid.org/0000-0002-6803-5934>

Ходоренко Валентина Николаевна  – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник лаборатории медицинских материалов и имплантатов с памятью формы Сибирского физико-технического института им. акад. В.Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета (Россия, 634050, г. Томск, пл. Новособорная, д. 1).

<https://orcid.org/0000-0002-5705-4072>

e-mail: hodor_val@mail.ru

Information about authors

Victor E. Gunther, Honored Scientist of the Russia, Dr. Techn. Sci., Professor, the Department of Physics of Metals, Physical Faculty, National Research Tomsk State University (36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia).

<https://orcid.org/0000-0002-6803-5934>

Valentina N. Khodorenko , Cand. Phys.-Math. sci., Senior Researcher, the Laboratory of Medical Materials and Implants with the Memory of the Form, Siberian Physical-Technical Institute named after acad. V.D. Kuznetsov, National Research Tomsk State University (1, Novosobornaya Sq., Tomsk, 634050, Russia)

<https://orcid.org/0000-0002-5705-4072>

e-mail: hodor_val@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2022; одобрена после рецензирования; принята к публикации 25.02.2022
The paper was submitted 11.01.2022; approved after reviewing 02.02.2022; accepted for publication 25.02.2022