

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ И ЕГО МЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Левоненко Ю.И., Медюха А.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Шахлевич Г.М. – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Рассмотрена природа эффекта памяти формы в металлических сплавах на примере никелида титана. Описан физический механизм явления, основанный на обратимом мартенситном превращении. Проанализировано сочетание биоинертности, сверхэластичности и способности к восстановлению формы, обуславливающее использование этих материалов в травматологии, сердечно-сосудистой хирургии и стоматологии для создания малотравматичных имплантатов и хирургических инструментов нового поколения.

Ключевые слова: эффект памяти формы, материалы с памятью формы, никелид титана.

Введение. Материалы с памятью формы (далее МПФ) представляют собой класс «умных» материалов, способных после значительной деформации возвращаться к своей первоначальной геометрии при воздействии внешнего стимула, обычно под воздействием температуры. Этот уникальный феномен, открывает широкие перспективы для различных отраслей техники и, особенно, для медицины.

Способность материала изменять форму в заданный момент времени позволяет создавать самоустанавливающиеся импланты, малотравматичные хирургические инструменты и интеллектуальные системы фиксации, которые адаптируются к процессам заживления в организме.

Основная часть. Эффект памяти формы (далее ЭПФ) не является универсальным для всех веществ, а реализуется благодаря специфическим структурно-фазовым превращениям.

В металлических сплавах, наиболее известным из которых является $NiTi$ (никелид титана), ЭПФ основан на обратимом мартенситном превращении – сдвигом бездиффузионном фазовом переходе между высокотемпературной фазой (аустенит) и низкотемпературной фазой (мартенсит). На рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая данный процесс на примере деформирования стержня.[1]

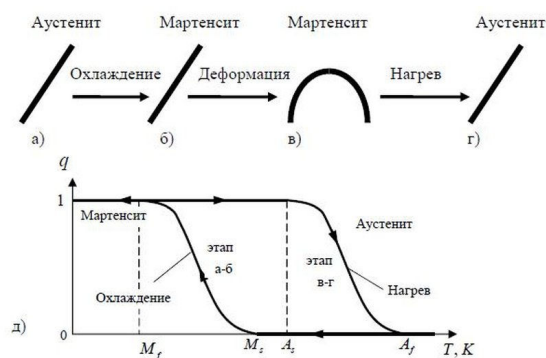


Рисунок 1 – Схема деформирования стержня с ЭПФ

Процесс реализации эффекта включает следующие этапы:

- 1 Деформация в мартенситном состоянии.
- 2 Нагрев и обратное превращение.

При низкой температуре сплав находится в фазе мартенсита, которая характеризуется множеством кристаллографических вариантов (двойников). Приложение механической нагрузки приводит к переориентации этих вариантов – росту одних за счет других. Это явление называется двойникованием и позволяет материалу выдерживать значительные деформации, не вызывая необратимого скольжения дислокаций (пластической деформации). После снятия нагрузки деформация сохраняется, так как состояние является метастабильным.[1]

При нагреве выше температуры аустенитного превращения начинается обратный фазовый переход. Кристаллическая решетка из тетрагональной или ромбоэдрической (мартенсит) перестраивается в высокосимметричную кубическую (аустенит). Поскольку в аустените существует только одно энергетически выгодное расположение атомов, материал неизбежно возвращается к своей первоначальной «запомненной» форме. В ходе этого восстановления генерируются значительные усилия, что и используется в актуаторах и фиксаторах.

Помимо ЭПФ, при деформации в высокотемпературном состоянии сплавы *NiTi* проявляют суперэластичность, возвращаясь к исходной форме сразу после снятия нагрузки.

Уникальные свойства МПФ нашли востребованное применение в медицине, где требуется малотравматичная имплантация и последующая надежная фиксация. Ключевым преимуществом применения нитинола в медицине является его уникальная биосовместимость, обусловленная формированием на поверхности импланта устойчивой инертной оксидной пленки (TiO_2). Эта пленка эффективно пассивирует материал, предотвращая выход токсичных ионов никеля в окружающие ткани и обеспечивая высокую коррозионную стойкость в агрессивной среде организма. Более того, модуль упругости *NiTi*, благодаря эффекту сверхэластичности, максимально приближен к модулю упругости костной ткани среди всех металлических имплантационных материалов. Это уникальное механическое поведение наглядно проиллюстрировано на рисунке 1. [2]

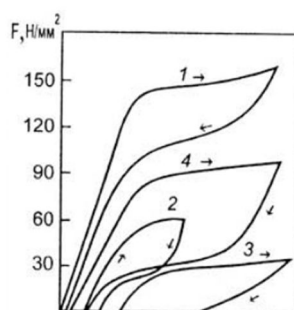


Рисунок 1 – Диаграмма деформации биологических материалов: 1 – волос, 2 – кость, 3 – мягкая ткань, 4 – *NiTi*

Как видно из диаграммы, представленной на рисунке 1, биологические материалы (волосы, кость, мягкая ткань) демонстрируют нелинейное поведение при нагрузке. Ключевое преимущество никелида титана заключается в том, что его кривая деформации (4) практически повторяет гистерезисное поведение живых тканей. Это свойство, известное как псевдоупругость, позволяет импланту деформироваться вместе с костью или мягкими тканями, не повреждая их и не создавая зон патологического напряжения, что является фундаментальным условием для физиологической регенерации.

Благодаря уникальному сочетанию эффекта памяти формы и сверхэластичности, никелид титана нашел широкое клиническое применение в различных областях медицины. В травматологии и ортопедии из него изготавливают самофиксирующиеся скобы и пластины для остеосинтеза. Имплант вводят в деформированном состоянии, а при нагреве до температуры тела он восстанавливает форму, создавая стабильную компрессию костных отломков на протяжении всего периода заживления.[2]

В сердечно-сосудистой хирургии ключевым продуктом стали самораскрывающиеся стенты. Стенты доставляется в сжатом виде к месту сужения артерии, они раскрываются до заданной формы, восстанавливая кровоток и работая в физиологическом режиме благодаря сверхэластичности материала.[3]

В стоматологии сверхэластичные ортодонтические дуги из *NiTi* обеспечивают постоянное, но щадящее усилие на зубы на всем протяжении их перемещения, что делает лечение более комфортным и сокращает его сроки.

А также в хирургической практике никелид титана применяется для создания активных пинцетов и зажимов при лапароскопических операциях. Благодаря эффекту памяти формы, рабочие инструменты из трубок *NiTi*, которые могут изменять угол захвата при нагреве электрическим током прямо во время операции. Это позволяет хирургу манипулировать тканями в труднодоступных местах с большей точностью и меньшей травматичностью. Кроме того, сверхэластичность материала обеспечивает постоянное, но щадящее усилие захвата, не повреждая биологические ткани.

Во всех этих случаях – будь то имплант, работающий внутри организма, или инструмент в руках хирурга – никелид титана выступает не просто как пассивный материал, а как функциональный элемент, способный адаптироваться к биомеханике живых тканей, минимизировать риск повреждений и обеспечить долговременную эффективность лечения.

Заключение. Материалы с памятью формы стали настоящим мостом между физикой и медициной. Благодаря пониманию того, как работают мартенситные превращения в металлах, удалось создать импланты, которые умеют подстраиваться под организм. И чем глубже понимание их природы, тем больше возможностей открывается для медицины будущего. Дальнейшее развитие этого направления связано с поиском новых биосовместимых сплавов, расширением температурного срабатывания и разработкой композитных материалов, способных реагировать не только на температуру, но и на магнитные поля или электрический ток непосредственно в организме пациента.

Список литературы

1. Место конструкций из никелида титана в лечении травм и заболеваний опорно-двигательной системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mesto-konstruktsiy-iz-nikelida-titana-v-lechenii-travm-i-zabolevaniy-oporno-dvigatelnoy-sistemy/viewer>. Дата доступа: 05.03.2026
2. Наука и жизнь, живой протез в живой ткани [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://m.nkj.ru/archive/articles/10001/?ysclid=mmdaazsqry218190330>. Дата доступа: 05.03.2026
3. Применение сплавов с памятью формы в медицине [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/304053124_PRIMENENIE_SPLAVOV_S_PAMATU_FORMY_V_MEDICINE. Дата доступа: 05.03.2026

UDC 620.22:615.465

THE SHAPE MEMORY EFFECT IN METAL ALLOYS AND ITS MEDICAL APPLICATION

Liavonenko Y.I., Mediukha A.Y.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Shakhlevich G.M. – Cand. of Sci. (Phys. And Math.), associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. The nature of the shape memory effect in metal alloys is considered on the example of titanium nickelide. The physical mechanism of the phenomenon based on the reversible martensitic transformation is described. The combination of bioinertness, superelasticity and the ability to restore the shape, which determines the use of these materials in traumatology, cardiovascular surgery and dentistry for the creation of low-traumatic implants and surgical instruments of the new generation, is analyzed.

Keywords: shape memory effect, shape memory materials, nickel-titanium.