

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА

*Петрова-Буркина О.А., м.н.с.*

*Институт технической акустики НАН Беларуси,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассмотрены термоэлектрические явления, возникающие в материалах с памятью формы на основе никелида титана состава Ti-50 ат.% Ni при фазовых и структурных превращениях.

Ключевые слова: термокинетическая ЭДС, эффект Бенедикса, никелид титана.

Классические термоэлектрические явления на границе раздела между различными металлами являются объектом пристального внимания в течение длительного времени. Это связано с тем, что они находят широкое практическое применение в различных областях техники. Наряду с классическими термоэлектрическими явлениями, такими как эффекты Пельтье, Зеебека, Томсона, возможны и термоэлектрические явления, наблюдаемые в однородных металлических образцах в результате фазовых и структурных превращений [1–5]. Исследованию проявления таких термоэлектрических явлений в материалах, обладающих эффектом памяти формы, и посвящена данная статья. В качестве объекта исследования выбраны проволочные образцы никелида титана Ti-50 ат.% Ni. При комнатных температурах материал находится в низкотемпературном мартенситном состоянии, а обратный фазовый переход осуществляется при температурах, не превышающих 100 °С ( $A_k = 74$  °С).

Эффект термокинетической ЭДС – явление возникновения ЭДС при нестационарном нагревании однородного металлического участка разомкнутой электрической цепи. При этом обязательным условием возникновения такого рода термоЭДС является реализация фазового превращения в зоне температурного воздействия. Первоначально был обнаружен в однородных вольфрамовой пленке и железной проволоке, в которых фазовые превращения реализуются при температуре 700–800 °С [1]. Было установлено [6], что при движении зоны нагрева вдоль проводника (при условии протекания в зоне нагрева фазового перехода) наряду с изменением электронных свойств за счет термоупругого фазового превращения в никелиде титана возникает термокинетическая ЭДС, которая составляет порядка 0,22 мВ. При изменении направления перемещения на противоположное полярность термоЭДС также изменяется.

Установлено [7], что при термоциклировании проволочных образцов никелида титана состава Ti-50 ат.% Ni значение термокинетической ЭДС падает, и уже после 70-го цикла термокинетической ЭДС практически не наблюдается. Падение значения термокинетической ЭДС при термоциклировании связано с увеличением плотности дефектов, что приводит в исследуемом образце к снижению характеристических температур и образованию промежуточной R-фазы, которая обладает очень высоким электросопротивлением. Также установлено, что при термоциклировании на зависимостях термокинетической ЭДС от времени появляются два экстремума ЭДС, соответствующих началу и окончанию нагрева образца. В этом случае проявление термоЭДС связывается с существованием областей с различными химическими потенциалами и подобно термоЭДС, возникающей в термопаре. Увеличение температуры в локальной зоне нагрева до 240 °С приводит к восстановлению величины термокинетической ЭДС до максимального 0,22 мВ. При этом температура отжига в интервале 400–800 °С не влияет на величину наводимой термокинетической ЭДС в никелиде титана состава Ti-50 ат.% Ni.

Проведены исследования электросопротивления при нестационарном нагреве образца Ti-50 ат.% Ni [8]. Установлено, что характер поведения электросопротивления при нестационарном нагреве схож с поведением термокинетической ЭДС. Существует зона уменьшения электросопротивления до некоторого установившегося значения, что связывается с инерционностью процесса нагрева. При дальнейшем движении зоны нагрева образца с температурой равной или выше температуры обратного фазового перехода в материале  $A_k$ , величина электросопротивления возрастает и стабилизируется по абсолютному значению, порядка 60 мкОм·см для первого термоцикла. Термоциклирование образца, как и в случае с термокинетической ЭДС, приводит к появлению двух экстремумов

значений электросопротивления, соответствующих началу и окончанию процесса нагрева образца. Однако, в отличие от поведения термокинетической ЭДС, термоциклирование образца приводит к изменению не только значения электросопротивления с 60 мкОм·см до 80 мкОм·см в процессе нагрева, но и начального с 73 мкОм·см до 85 мкОм·см, т. е. значение электросопротивления изменяется как в высокотемпературной В2, так и в мартенситной В19'-фазе. Изменение значения электросопротивления, как и в случае с термокинетической ЭДС, связано с тем, что в исследуемом сплаве никелида титана при термоциклировании фазовый переход осуществляется через ромбоэдрическую R-фазу. Это приводит к изменению вида температурной зависимости электросопротивления – появлению пика. Еще одной возможной причиной может быть фазовый наклеп никелида титана при мартенситном превращении, т. е. происходит накопление искажений внутренней структуры материала.

Эффект Бенедикса заключается в возникновении в однородном изотропном материале устойчивой термоЭДС при наличии двух различных градиентов температуры, если концы образца поддерживаются при одинаковой температуре. Этот эффект наблюдается как в металлах, так и в полупроводниках [2, 3]. Экспериментальные исследования показали возможность наведения такой термоЭДС и в никелиде титана состава Ti-50 ат.% Ni. При создании двух градиентов температуры противоположного направления: 30 °С/см и 55 °С/см в образце наводится постоянная по величине термоЭДС порядка 130 мкВ [9]. Ее проявление в никелиде титана связано с наличием градиента температур, который приводит к существованию неравновесной концентрации носителей электрического заряда в образце. При термоциклировании образца значение термоЭДС уменьшается и в 15-м термоцикле составляет 70 мкВ. При этом прекращение нагрева сопровождается двумя резкими пиками значения термоЭДС. Предполагается, что такое поведение термоЭДС связано с изменением характеристических температур при термоциклировании образца TiNi. К 15-му термоциклу в материале появляется R-фаза, и образец при охлаждении до комнатной температуры полностью не переходит в низкотемпературную мартенситную фазу В19', т. е. не происходит полного фазового превращения.

Явление возникновения устойчивой во времени термоЭДС наблюдается так же и в деформированном в мартенситном состоянии проволоочном образце Ti-50 ат.% Ni при нагреве его вблизи области деформации [4, 9]. Локальный нагрев проволоки до температуры выше  $A_k$  в точках, отстоящих от области деформации, вызывает возникновение устойчивой во времени ЭДС до 100 мкВ, а нагрев области деформации до температуры  $A_k$  вызывал восстановление формы образца. Причем знак термоЭДС меняется в зависимости от расположения нагреваемого участка по отношению к месту деформации. Наибольшее значение ЭДС наблюдалось при приближении зоны нагрева к границе деформированного участка образца.

Описанные термоэлектрические явления в никелиде титана могут найти практическое применение при проектировании датчиков различных исполнительных механизмов. Кроме того, знание механизмов и особенностей наведения термоЭДС и электросопротивления в сплаве с эффектом памяти формы позволит более полно контролировать и изучать термоупругие превращения в этих материалах. Так как термоЭДС зависит от возмущения решетки вблизи дефекта не только величиной, но и знаком эффекта, а также проявляет достаточно высокую чувствительность к упругим напряжениям, это может быть использовано для контроля однородности физико-механических свойств материала.

#### Список использованных источников

1. Фурмаков, Е. Ф. Электрический ток, вызванный движением поверхности раздела фаз в металле / Е. Ф. Фурмаков // *Фундаментальные проблемы естествознания*. – Санкт-Петербург, 1999. – Т. 1, вып. 21. – С. 377–378.
2. Benedicks, C. Tetziger Stand grundlegenden Keuntrisse der Thermoelektrizität / C. Benedicks // *Erg. Exact. Naturwiss.* – 1929. – Bd. 8. – P. 26–67.
3. Anatyshuk, L. I. Thermoelectric Phenomena under Large Temperature Gradients / L. I. Anatyshuk, L. P. Bulat // *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano-Structured Materials* / D. M. Rowe; editor by D. M. Rowe. – CRC Press: New York, London, Tokyo, 2005. – Chapter 3. – С. 3-1–3-11.
4. Шушкевич, В. Л., Рубаник, В. В., Рубаник мл., В. В. Термоэлектронные явления в TiNi // *Сборник материалов XLIII международной конференции «Актуальные проблемы прочности»*, Витебск, 27 сент.–1 окт. 2004 г.: в 2 ч. – Витебск, 2004. – Ч. 1. – С. 345–

346.

5. Рубаник, В. В. Термокинетическая ЭДС в сплаве TiNi при инициировании прямого фазового перехода // В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., А. В. Лесота // Вестник Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина. Естественные и технические науки. – 2015 г. – Т. 20, вып. 2. – С. 490–493.
6. Рубаник, В. В. Термокинетическая ЭДС в никелиде титана / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Материалы, технологии, инструменты. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2012. – Т. 17, № 1. – С. 25–27.
7. Rubanik, V. V. Peculiarities of thermoelectric force behaviour in nikelide titane upon non-stationary heating / V. V. Rubanik, V. V. Rubanik Jr., O. A. Petrova-Burkina // Materials Science Forum. – Switzerland: Trans Tech Publications, 2013. – V. 738-739. – P. 292–296.
8. Рубаник, В. В. Электросопротивление никелида титана при нестационарном нагреве / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., О. А. Петрова-Буркина // Письма о материалах. – Уфа, 2012. – Т. 2, № 2. – С. 71–73.
9. Рубаник, В. В. Проявление термоэлектрических явлений в NiTi / В. В. Рубаник, О. А. Петрова-Буркина, В. В. Рубаник // Научное издание под редакцией В. Е. Громова / Влияние электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов, Новокузнецк 2011. – С. 60–68.

УДК 577.354.4

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА

*Милюкина С.Н., к.т.н., доц., Марущак Ю.И., студ.*

*Витебский государственный технологический университет,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассмотрены особенности электрических свойств живых тканей и их практическое применение. Проведен анализ научной литературы, посвящённой современному состоянию вопроса, и дальнейших перспективных направлений исследований.

Ключевые слова: электропроводность, живой организм, электрокожные характеристики, кожно-гальваническая реакция, электродермальность, активность.

Все обменные процессы в организме так или иначе определяются его электрическими свойствами, начиная с разности потенциалов на внутренней и внешней поверхности плазматической мембраны клетки, которая регулирует её обмен веществ, и заканчивая нервной активностью, которая контролирует вообще все процессы. Таким образом, электропроводящие свойства живого вещества являются определяющими параметрами функционирования организма, – с его возникновением биоэлектрические явления появляются и при его гибели они гаснут и пропадают.

Если на человека внезапно действуют раздражающие факторы, то электрическое сопротивление его тела резко меняется, при этом физическая природа внешних воздействий не имеет значения. Это может быть и яркий свет, и прикосновение горячим предметом, и сообщение человеку неожиданной, важной для него информации, – во всех случаях результат один – электропроводность тела человека увеличивается, являясь своеобразным индикатором реакции биосистемы на внешнее воздействие. Причём изменение во времени величины электропроводности зависит как от самого действующего внешнего фактора, так и от его интенсивности. Но во всех случаях увеличение электропроводности происходит гораздо быстрее, чем ее последующее восстановление к нормальным значениям [1].

Рассматривая электрическое сопротивление человеческого организма, различают сопротивление его внутренней неоднородной среды и сопротивление кожного покрова. Основной вклад в электропроводность внутренней среды вносят кровь, лимфа, межклеточная и внутриклеточная жидкости, являясь, по сути, электролитами. Хорошими проводниками кроме жидких сред организма являются также мышцы, подкожная клетчатка и жировая ткань. В среднем сопротивление внутренних органов может быть принято равным ~1000 Ом, хотя электропроводность отдельных органов и тканей, конечно, различна.