

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 539.213.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-100-107



СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЗЕЕБЕКА С ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ АМОРФНОЙ МАГНИТОМЯГКОЙ ЛЕНТЫ КЛАССА FINEMET

Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Целью работы является обоснование гипотезы о том, что коэффициент Зеебека возможно использовать в качестве показателя изменения внутренней энергии материала. В работе поставлена и решена задача выявления аналитической связи между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии аморфной магнитомягкой ленты путем совместного решения уравнений первого закона термодинамики для изохорного процесса, уравнений связи количества теплоты с температурой при нагревании или охлаждении и уравнения, формализующего эффект Зеебека. При выполнении расчетов и построении графических зависимостей использовались результаты, полученные экспериментально при измерении ТЭДС и определении коэффициентов Зеебека аморфной ленты с применением авторской методики. Эксперименты по нагреву и охлаждению исследуемых образцов аморфной ленты проводились на модуле PocketJaw комплекса Gleeble 3500 с использованием сборочного узла специально разработанной конструкции. Теоретически обосновано, что коэффициент Зеебека прямо пропорционален ТЭДС и обратно пропорционален единице без отношения изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца, а также температуре горячего конца образца. Показано, что коэффициент Зеебека характеризует отношение изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца при термическом воздействии и может быть использован в качестве структурно зависимого параметра, характеризующего начальное внутреннее энергетическое состояние аморфной ленты. Экспериментально подтверждено, что прямой зависимости между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии не наблюдается. Доказана возможность использования метода определения и анализа коэффициентов Зеебека, характеризующего начальное внутреннее энергетическое состояние поверхностей аморфной ленты.

Ключевые слова: аморфная магнитомягкая лента класса Finemet, термоэлектродвижущая сила, коэффициент Зеебека, изменение внутренней энергии, термическое воздействие

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2025-0003).

© Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., 2026

Для цитирования

Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю. Связь коэффициента Зеебека с внутренней энергией аморфной магнитомягкой ленты класса Finemet // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-100-107>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

RELATIONSHIP BETWEEN THE SEEBECK COEFFICIENT AND THE INTERNAL ENERGY OF THE FINEMET-CLASS AMORPHOUS SOFT MAGNETIC RIBBON

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Y.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The aim of this study is to substantiate the hypothesis that the Seebeck coefficient can be used as an indicator of changes in the internal energy of a material. The study formulates and solves the problem of determining an analytical relationship between the Seebeck coefficient and the change in internal energy of an amorphous soft magnetic ribbon by jointly solving the equations of the first law of thermodynamics for an isochoric process, the equations relating the amount of heat to temperature during heating or cooling, and the equation formalizing the Seebeck effect. The calculations and graphical relationships have been based on experimental results obtained by measuring the thermal electromotive force (TEMF) and determining the Seebeck coefficients of an amorphous ribbon using the authors' methodology. Heating and cooling experiments on the investigated amorphous ribbon specimens have been performed using the PocketJaw module of the Gleeble 3500 system with a specially designed assembly. It has been theoretically substantiated that the Seebeck coefficient is directly proportional to the TEMF and inversely proportional to unity minus the ratio of the changes in the internal energies of the cold and hot ends of the specimen, as well as to the temperature of the hot end of the specimen. It has been shown that the Seebeck coefficient characterizes the ratio of changes in the internal energies of the cold and hot ends of the specimen under thermal exposure and can be used as a structure-dependent parameter characterizing the initial internal energy state of an amorphous ribbon. It has been experimentally confirmed that there is no direct dependence between the Seebeck coefficient and the change in internal energy. The possibility of using the method for determining and analyzing Seebeck coefficients to characterize the initial internal energy state of the surfaces of an amorphous ribbon has been demonstrated.

Keywords: Finemet-class amorphous soft magnetic ribbon, thermal electromotive force, Seebeck coefficient, change in internal energy, thermal exposure.

The work was supported financially by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZRU-2025-0003).

For citation

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Y. Relationship Between the Seebeck Coefficient and the Internal Energy of the Finemet-Class Amorphous Soft Magnetic Ribbon. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-100-107>

Введение

Аморфные металлы отличаются от кристаллических отсутствием строгой периодической упорядоченности атомов. Однако аморфность не означает полное хаотическое распределение атомов, а подразумевает лишь отсутствие дальнего периодического порядка. Локальная координация атомов, аналогичная кристаллической структуре, сохраняется, поэтому аморфные вещества характеризуются короткодействующим порядком (короткодействующей координацией) [1-4]. Именно с короткодействующим и среднечисленным порядком, а не с дальнедействующим периодичностью тесно связаны физические свойства аморфных материалов.

Продуктом метода быстрой закалки является сверхтонкая лента, используемая для производства, например, магнитопроводов высокочастотных устройств [5-7]. Важно, что аморфные ленты из материала типа Finemet на основе железа имеют состав, позволяющий получить нанокристаллическое состояние путем термической обработки в определенном интервале температур [8-10]. Сплавы с такой структурой

обладают существенно лучшим сочетанием магнитных свойств по сравнению с аморфным состоянием: высокой магнитной проницаемостью μ , низкой коэрцитивной силой H_C , повышенной индукцией B_S [11-13]. На производстве, чтобы произвести готовую продукцию из нанокристаллического материала, проводят отжиг уже собранного магнитопровода.

Разупорядоченная структура аморфного материала определяет его избыточную энергию Гиббса в сравнении с кристаллическим состоянием. Эта избыточная энергия представляет собой термодинамическую движущую силу для самопроизвольных атомных перестроек (структурной релаксации), которая значительно изменяет физические свойства аморфного материала [2, 14-16]. Механизм структурной релаксации тесно связан с активацией локальных атомных перестроек. В аморфных системах атомные позиции не фиксированы жестко, а характеризуются определенной вероятностью перехода между энергетическими минимумами локального потенциала. Эти переходы приводят к постепенному приближению конфигурации системы к состоянию с минимальной свободной энергией.

В ходе структурной релаксации уменьшается внутренняя и свободная энергия за счет приближения локальных структур к термодинамически более стабильным конфигурациям [2, 14]. Наблюдается изменение плотности и объема – материал обычно уплотняется из-за более эффективной упаковки атомов и может стать более пластичным или менее упругим в зависимости от направления релаксации.

Внутренняя энергия – это функция состояния системы, то есть ее величина зависит только от текущего состояния системы (температуры, объема, давления), а не от того, как система пришла в это состояние. В то же время хорошо известен эффект Зеебека, который заключается в возникновении в цепи из последовательно соединенных разнородных материалов разности электрических потенциалов – термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) из-за того, что различные части системы (горячие и холодные концы) находятся при разных температурах. Это создает градиент химического потенциала, который и порождает электрическое поле. С позиции внутренней энергии в цепи происходит непрерывный обмен – часть внутренней энергии системы, например в виде тепловой, переходит в электрическую. При этом в самих материалах при прохождении тока будет меняться внутренняя энергия (например, за счет джоулева тепла), а результирующая ТЭДС показывает, какую работу по перемещению заряда можно получить в этой цепи. Таким образом, ТЭДС демонстрирует, как макроскопические параметры (разница температур) порождают электрический потенциал, который напрямую связан с распределением внутренней энергии (и энтропии) в системе [2, 17, 18]. В более общем виде второе начало термодинамики утверждает, что в изолированной системе энтропия стремится к максимуму, а ТЭДС как раз показывает, как эта тенденция реализуется через энергетические обмены [19].

В основе термоэлектрических эффектов лежат явления, возникающие при неравномерном распределении температуры в материале, а также при взаимодействии носителей заряда с кристаллической решеткой. Эти процессы весьма чувствительны к особенностям микроструктуры сплавов: электронному спектру, типу носителей тока и характеру их взаимодействия с ионной и магнитной подсистемами и т.п. [20]. Аморфные магнитомягкие сплавы переходных металлов являются в этом отношении чрезвычайно сложными системами. Поэтому с теоретической точки зрения задача описания зависимости ТЭДС от температуры и состава этих сплавов достаточно трудна и до настоящего времени не получила вполне адекватного решения.

Учитывая, что ТЭДС возникает из-за потока носителей заряда, направленного от более нагретой области к более холодной, который создается градиентом температуры, а внутренняя энергия материала влияет на подвижность носителей, то внутренняя энергия аморфных материалов косвенно влияет на ТЭДС через температурную зависимость процессов, связанных с переносом заряда и рассеянием носите-

лей в материале [21]. Результаты исследований по определению коэффициента Зеебека в различных аморфных магнитомягких материалах, выполненные авторами настоящей работы, позволили сделать предположение о существенной разнице энергетического состояния поверхностей аморфной ленты и степени протекания структурной релаксации при термическом воздействии.

Между внутренней энергией аморфных материалов и ТЭДС действительно существует связь, но она опосредованная и сложная, так как зависит от множества факторов: структуры материала, механизмов рассеяния носителей заряда, температурных условий и других параметров. Бесспорно, структура аморфного материала сильно влияет на его ТЭДС. Главная особенность таких материалов в том, что у них нет дальнего порядка в расположении атомов – сохраняется только ближний порядок, то есть ближайшее окружение каждого атома довольно хаотично, но координационное число, как у ответствующего кристалла, остается. Это сказывается на рассеянии носителей заряда. Поверхность Ферми в таких сплавах размыта, что напрямую меняет коэффициент Зеебека (удельную ТЭДС). Именно эта локальная неупорядоченность и запускает особые механизмы, изменяющие ТЭДС. Кроме того, при кристаллизации аморфных материалов образуются кристаллиты, что приводит к появлению межфазных границ и изменению электропроводности и ТЭДС [22]. И, наконец, ТЭДС возникает из-за потока носителей заряда, который создается градиентом температуры, а внутренняя энергия материала влияет на подвижность носителей. Прямая связь внутренней энергии и ТЭДС проявляется через температурную зависимость: с ростом температуры увеличивается средняя энергия носителей заряда, что усиливает градиент концентрации носителей заряда вдоль материала и приводит к росту ТЭДС [20, 23]. Поэтому представляет интерес исследование влияния разности температур в цепи на внутреннюю энергию и ТЭДС.

Необходимо учитывать, что исследование внутренней энергии представляет собой целый комплекс подходов: от простых опытов до сложных теоретических моделей. Абсолютное значение внутренней энергии в большинстве случаев измерить напрямую невозможно – определяют только ее изменение. Неопределенность устраняется выбором стандартного состояния за начало отсчета [2]. Часто прибегают к косвенным измерениям, при которых изменение внутренней энергии находят по результатам прямых измерений других величин (температуры, давления, объема, количества теплоты и работы). Помимо экспериментальных наблюдений используют наглядные опыты, демонстрирующие, как меняется внутренняя энергия. Применяют комбинацию методов: сочетают калориметрию с термодинамическими расчетами или статистическими методами.

Результаты исследований, выполненных авторами с применением оригинальной методики измерения ТЭДС с определением значений коэффициентов Зеебека, показали хорошее согласование с известными

из литературных источников данными других исследователей, что позволило авторам сделать заключение о возможности использования наряду с другими методами испытания аморфных материалов измерения ТЭДС, и коэффициентов Зеебека в качестве структурно-зависимых параметров, характеризующих энергетическое состояние поверхностей аморфной ленты и протекание структурной релаксации. В связи с вышесказанным целью данной работы является обоснование гипотезы, что коэффициент Зеебека возможно использовать в качестве показателя изменения внутренней энергии материала.

Методика исследований

Для достижения поставленной цели была поставлена и решена задача выявления аналитической связи этих параметров путем совместного решения уравнений первого закона термодинамики для изохорного процесса, уравнений связи количества теплоты с температурой при нагревании или охлаждении и уравнения, формализующего эффект Зеебека. При выполнении расчетов и построении графических зависимостей использовались результаты, полученные экспериментально при измерении ТЭДС и определении коэффициентов Зеебека аморфной ленты с применением авторской методики, подробно рассмотренной в работах [24-26]. Эксперименты по нагреву и охлаждению исследуемых образцов проводились на модуле PocketJaw комплекса Gleeble 3500 с использованием сборочного узла специально разработанной конструкции*. В качестве образцов использовались мерные отрезки быстрозакаленной аморфной ленты из сплава типа «Finemet» (5БДСР) шириной 20 мм и длиной 60±1 мм. Исследованию подвергалась контактная (прилегающая к вращающемуся медному диску при разливке) и свободная (затвердевающая без физического воздействия диска) поверхности. В ходе экспериментов для контактной и свободной поверхностей при термических циклах нагрева и охлаждения на каждом из образцов ленты были определены максимальные достигаемые температуры горячего конца образцов ($TC2$, °C), текущие значения ТЭДС (E , мкВ) и коэффициенты Зеебека (K_z , мкВ/°C), методика определения которого приведена в работе [20].

На рис. 1 приведена схема расположения выделенных в образце аморфной ленты элементарных объемов в горячих и холодных концах с указанием точек крепления термопар $TC2$ и $TC3$ применительно к условиям проведенных экспериментов.

Выделенные элементарные объемы имеют одинаковые геометрические размеры и объемы, имеют одинаковую массу m и в пределах длины исследуемого образца – одинаковую удельную теплоемкость c . Тогда количество теплоты для этих элементарных объемов, находящихся в горячем (θ_r) и холодном (θ_x) концах образца, определяются соответственно как

$$\theta_r = cm(TC2_i - TC2_0), \quad (1)$$

* Эксперименты на комплексе Gleeble 3500 проходили при участии лаборанта-исследователя Потапова И.М.

$$\theta_x = cm(TC3_i - TC3_0), \quad (2)$$

где $TC2_i$, $TC3_i$ – текущие значения температур в выделенных элементарных объемах горячего и холодного концов образца соответственно, а $TC2_0$, $TC3_0$ – начальные значения температур в этих элементарных объемах.

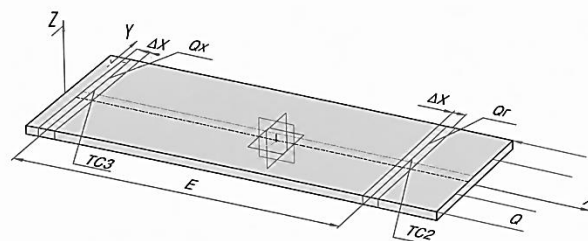


Рис. 1. Схема расположения выделенных элементарных объемов в холодных и горячих концах исследуемого образца аморфной ленты с точками крепления термопар

Fig. 1. Schematic arrangement of the selected elementary volumes at the cold and hot ends of the investigated amorphous ribbon specimen with thermocouple attachment points

Разделив уравнение (2) на (1), получим

$$\frac{\theta_x}{\theta_r} = \frac{TC3_i - TC3_0}{TC2_i - TC2_0}. \quad (3)$$

При условии, что начальные значения температур горячего и холодного концов одинаковы, то есть $TC2_0 = TC3_0$, и выбираются за нулевую точку отсчета, уравнение (3) упростится и примет вид

$$\frac{\theta_x}{\theta_r} \approx \frac{TC3_i}{TC2_i}. \quad (4)$$

С другой стороны, формализованная запись эффекта Зеебека представляет собой уравнение вида

$$E = K_z(TC2_i - TC3_i), \quad (5)$$

или

$$\frac{E}{K_z} = TC2_i - TC3_i, \quad (6)$$

где E – текущее значение ТЭДС.

После деления обеих частей уравнения (6) на $TC2_i$ получим

$$\frac{E}{K_z TC2_i} = 1 - \frac{TC3_i}{TC2_i} \quad (7)$$

или

$$\frac{TC3_i}{TC2_i} = 1 - \frac{E}{K_z TC2_i}. \quad (8)$$

При подстановке (8) в (4) после простейших преобразований получим

$$\frac{E}{K_z TC2_i} \approx 1 - \frac{\theta_x}{\theta_r}. \quad (9)$$

С другой стороны, согласно первому закону термодинамики, связь количества теплоты с изменением внутренней энергии определяется уравнением

$$\theta = \Delta U + A, \quad (10)$$

где ΔU – изменение внутренней энергии системы; A – работа, совершенная системой на преодоление внешних сил.

Для рассматриваемого изохорного примера, принятого в качестве допущения в условиях отсутствия внешних сил на систему, когда $A \approx 0$ при переходе к выделенным единичным объемам $\theta_r = \Delta U_r$ и $\theta_x = \Delta U_x$, тогда

$$\frac{\theta_x}{\theta_r} = \frac{\Delta U_x}{\Delta U_r}. \quad (11)$$

Окончательно при подстановке (11) в (9) после преобразований получим

$$\frac{E}{K_z} = TC2_i \left(1 - \frac{\Delta U_x}{\Delta U_r} \right), \quad (12)$$

$$K_z = \frac{E}{TC2_i \left(1 - \frac{\Delta U_x}{\Delta U_r} \right)}. \quad (13)$$

Уравнения (12) и (13) являются разной формой записи связи коэффициента Зеебека с изменением внутренней энергии системы, причем в (12) левая и правая части уравнения измеряются в °С, а в (13) единицы измерения соответствуют единицам измерения коэффициента Зеебека, то есть мкВ/°С. В безразмерных единицах измерения форма записи (12) и (13) может быть представлена в виде

$$\frac{E}{K_z TC2_i} = 1 - \frac{\Delta U_x}{\Delta U_r} \text{ или } \frac{\Delta U_x}{\Delta U_r} = 1 - \frac{E}{K_z TC2_i}. \quad (14)$$

Полученные результаты и их обсуждение

Анализируя полученные уравнения (13) и (14), следует отметить, что при значениях $TC2_i = 0$ знаменатели этих уравнений обращаются в ноль. Это имеет безусловный физический смысл, подтверждающий отсутствие возникновения ТЭДС.

Отношения изменений внутренней энергии холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_r}$ входят в уравнение (11) первого закона термодинамики для изохорного процесса и в уравнение, формализующее эффект Зеебека (14). Были построены кривые изменения этих отношений в зависимости от значений температуры $TC2_i$ при разных значениях коэффициента Зеебека, которые приведены на **рис. 2**. На этом же графике приведены зависимости изменения отношений изменений температур $\frac{TC3_i}{TC2_i}$. При построении экспериментально-теоретических кривых значения E и $TC2_i$ были взяты из массивов экспериментальных данных, а

величину K_z определяли из уравнения прямой при аппроксимации зависимости ТЭДС от изменения температур $\Delta T_i = TC2_i - TC3_i$.

Из **рис. 2** видно, что эти отношения с повышением температуры нагрева монотонно снижаются. При этом для всех исследуемых образцов с различными коэффициентами Зеебека по обеим поверхностям наблюдается совпадение кривых $\frac{TC3_i}{TC2_i}$ при изменении температуры

$TC2_i$, что свидетельствует о постоянстве термических условий воздействия на образцы и отсутствии их влияния на ТЭДС. Однако в то же самое время расположение кривых $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_r}$ при изменении температуры $TC2_i$ для

разных значений коэффициента Зеебека существенно различается. Сдвиг кривых вниз на графике свидетельствует об уменьшении значений $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_r}$, что возможно

при увеличении ΔU_r , причем

$$\Delta U_r = U_{ri} - U_{r0}, \quad (15)$$

где U_{ri} – текущее значение внутренней энергии горячего конца образца; U_{r0} – начальная внутренняя энергия горячего конца образца.

Тогда при условно постоянном ΔU_x из уравнения (15), несомненно, следует, что увеличение ΔU_r может быть связано либо с более высоким начальным уровнем внутренней энергии U_{r0} , либо с понижением текущего значения внутренней энергии U_{ri} при термическом воздействии, характеризуемом величиной температуры $TC2_i$. Поскольку для исследуемых образцов при постоянных термических условиях ожидать существенную разницу текущих значений внутренней энергии для выделенных элементарных объемов едва ли возможно, то будет верно предположение, что изменение значений коэффициентов Зеебека характеризует изменение начального уровня значений внутренней энергии аморфного материала U_{r0} . При этом чем выше находится кривая на графике, тем больше изменения энергетического уровня горячего конца образца ΔU_r для этой кривой. Другими словами, различное положение кривых $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_r}$ связано с различным

исходным энергетическим состоянием материала U_{r0} . Связь коэффициента Зеебека с изменением внутренней энергии при термическом воздействии на быстрозакаленную аморфную ленту может быть проиллюстрирована зависимостью, приведенной на **рис. 3**. Для примера на этом рисунке представлены кривые изменения усредненных значений коэффициентов Зеебека в зависимости от отношения изменений внутренних энергий холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_r}$ для свободной и контактной поверхностей при температуре $TC2_i = 100^\circ\text{C}$.

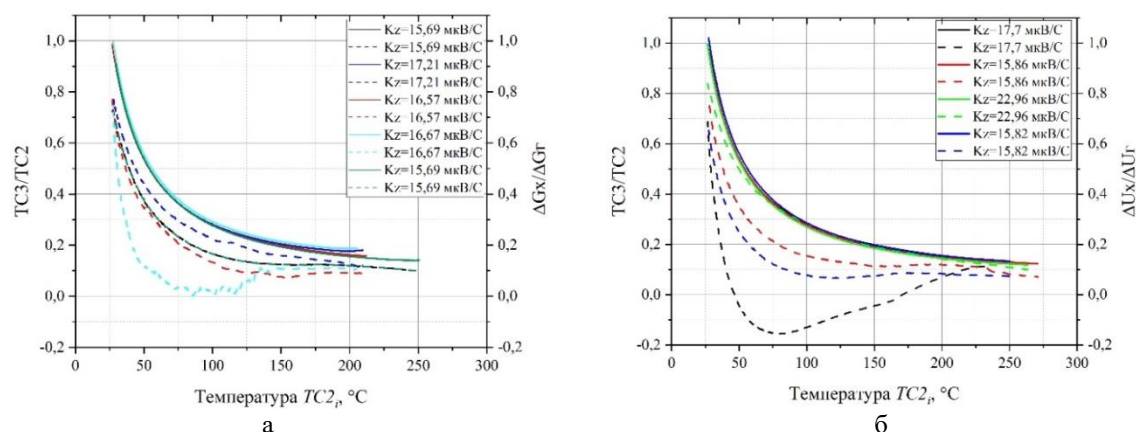


Рис. 2. Изменение отношений температур $\frac{TC3_i}{TC2_i}$ (сплошные линии) и внутренних энергий холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ (пунктирные линии) в зависимости от температуры $TC2_i$ для свободной (а) и контактной (б) поверхностей аморфной ленты при разных значениях коэффициента Зеебека

Fig. 2. Changes in the ratios of temperature $\frac{TC3_i}{TC2_i}$ (solid lines) and the internal energies of the cold and hot ends of the amorphous ribbon specimens $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ (dashed lines) depending on the temperature $TC2_i$ for the free (a) and contact (б) surfaces of the amorphous ribbon at different Seebeck coefficient values

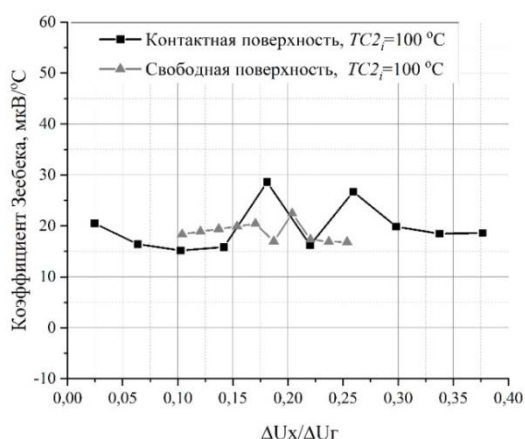


Рис. 3. Изменение усредненных значений коэффициентов Зеебека в зависимости от отношения изменений внутренних энергий холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ для свободной и контактной поверхностей при температуре $TC2_i = 100^\circ\text{C}$

Fig. 3. Changes in the average Seebeck coefficient values depending on the ratio of changes in the internal energies of the cold and hot ends of the amorphous ribbon specimens $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ for the free and contact surfaces at a temperature of $TC2_i = 100^\circ\text{C}$

Как следует из рис. 3, при одинаковых температурах $TC2_i$ для контактной поверхности наблюдаются пи-

ковые значения коэффициентов Зеебека, равные 28,6 и 26,7 мкВ/°С, соответствующие значениям $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g} = 0,18$ и 0,26. Среднее значение K_z для этой поверхности (без учета пиковых значений) составляет 17,84 мкВ/°С. Для свободной поверхности наблюдается один пик значения коэффициента Зеебека (22,4 мкВ/°С), приходящийся на отношение изменений внутренних энергий холодных и горячих концов образцов, равных 0,204. Это означает, что при условии одинакового термического воздействия на образцы значения K_z зависят исключительно от энергетического состояния аморфной ленты, которое можно характеризовать отношением $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$.

Однако прямой зависимости между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии, как и следовало ожидать, не наблюдается, что и отмечается в научной литературе.

Закключение

1. Теоретически обосновано, что коэффициент Зеебека прямо пропорционален ТЭДС и обратно пропорционален единице без отношения изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца, а также температуре горячего конца образца.
2. Показано, что коэффициент Зеебека характеризует отношение изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца при термическом воздействии и может быть использован в качестве структурно-зависимого параметра, характеризующего

ющего начальное внутреннее энергетическое состояние аморфной ленты.

3. Экспериментально подтверждено, что прямой зависимости между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии не наблюдается.

4. Доказана возможность использования метода определения и анализа коэффициентов Зеебека, характеризующего начальное внутреннее энергетическое состояние поверхностей аморфной ленты.

Список источников

1. Гиннэ С.В. Аморфные металлические материалы: закономерности и условия аморфизации // Эпоха науки. 2025. №41. С. 25-32.
2. Saturated magnetization and glass forming ability of soft magnetic Fe-based metallic glasses / B. Huang, Y. Yang, A. D. Wang et. al. // Intermetallics. 2017, vol. 84, pp. 74-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.intermet.2017.01.003>
3. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 366 с.
4. Дилатометрический анализ процесса нанокристаллизации магнитомягкого сплава Fe_{72.5}Cu₁Nb₂Mo_{1.5}Si₁₄B₉ / С. Цепелев, Ю. Н. Стародубцев, В. А. Зеленин и др. // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 6. С. 584-588.
5. Optimization of crystallization, microstructure and soft magnetic properties of Fe-B-Cu alloys by rapid cyclic annealing / X. B. Zhai, L. Zhu, H. Zheng et. al. // Journal of Alloys and Compounds. 2018, vol. 768, is. 5, pp. 591-597. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.272.
6. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // Materials Transactions. 1990, vol. 31, pp. 307-314. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.31.307>
7. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic alloys // Handbook of magnetic materials. 1997, vol. 10, pp. 415-462. DOI: 10.1016/S1567-2719(97)10007-5.
8. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure / Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi // Journal of applied Physics. 1988, vol. 64, pp. 6044-6046. DOI: 10.1063/1.342149
9. Zhu L. Modulating the crystallization process of Fe₈₂B₁₂C₆ amorphous alloy via rapid annealing // Journal of alloys and compounds. 2019, vol. 785, is. 5, pp. 328-334. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.209
10. Хоник В.А. Структурная релаксация и обусловленное ей пластическое течение металлических стекол ниже температуры стеклования: от феноменологического к микроскопическому пониманию // Вестник ТГУ. 2010. Т. 15. Вып. 3. С. 789.
11. Чен Х.С. Структурная релаксация в металлических стеклах // Аморфные металлические сплавы / под ред. Ф.Е. Любурского. М.: Металлургия, 1987. 584 с.
12. Крахмалев П.В. Структура и свойства магнитомягких аморфных сплавов на основе железа и кобальта при термической, механотермической и термомагнитной обработке: специальность 05.16.01. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1999. 142 с.
13. Hodge I.M. Structural Relaxation. In: Classical Relaxation Phenomenology. Springer, Cham. 2019. P. 197-222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02459-8_11.

14. Structural Relaxation Made Simple/ E. Bitzek, P. Koskinen, F. Gähler, M. Moseler, P. Gumbsch // Physical review letters. 2006. 97. 170201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.170201
15. Барышева Т.Б. Второе начало термодинамики и энтропия: методическое пособие / под ред. А.И. Черноуцана. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. 32 с.
16. Новиков С.В. Термоэлектрические свойства нанокристаллических силицидов хрома и марганца: специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2014. 168 с.
17. Петров А.Л., Гаврилюк А.А., Зубрицкий С.М. Структура и свойства неупорядоченных твердых тел: учебное пособие. Изд-во Иркутского государственного университета, 2004. 70 с.
18. ТермоЭДС в аморфных ферромагнитных сплавах / А.Д. Арсеньева, А.В. Ведяев, Р.П. Васильева и др. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1991. № 3. С. 71-75.
19. Плотность электронных состояний и термоЭДС в углеродных нанотрубках с примесями и структурным беспорядком / Н.В. Мельникова, В.Е. Егоровский, Н.Г. Бобенко и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 24-34.
20. Чукин М.В., Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В. Определение неоднородности свойств холоднокатаной ленты по термоЭДС. Сообщение 1. Разработка методики исследования // Черные металлы. 2026. Февраль. С. 60-66.
21. Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю. Определение неоднородности свойств холоднокатаной ленты по термоЭДС. Сообщение 2. Исследование связи между твердостью и термоЭДС // Черные металлы. 2026. № 3. С. 22-29.
22. Термоэлектрическая неразрушающая оценка остаточных напряжений в холоднокатаной стальной ленте / М.В. Чукин, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.Н. Шеметов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. № 1. С. 88-99.

References

1. Ginne S.V. Amorphous metallic materials: regularities and conditions of amorphization. *Epokha nauki* [Era of science]. 2025;(41):25-32. (In Russ.)
2. Huang B., Yang Y., Wang A.D. et al. Saturated magnetization and glass forming ability of soft magnetic Fe-based metallic glasses. *Intermetallics*. 2017;84:74-81. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.01.003.
3. Starodubtsev Yu.N., Belozеров V.Ya. *Magnitnye svoystva amorfnykh i nanokristallicheskiy spлавov* [Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys]. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2002, 366 p. (In Russ.)
4. Tsepelev S., Starodubtsev Yu.N., Zelenin V.A. et al. Dilatometric analysis of the nanocrystallization process of the Fe_{72.5}Cu₁Nb₂Mo_{1.5}Si₁₄B₉ soft magnetic alloy. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metallography]. 2017;118(6):584-588. (In Russ.)
5. Zhai X.B., Zhu L., Zheng H. et al. Optimization of crystallization, microstructure and soft magnetic properties of Fe-B-Cu alloys by rapid cyclic annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;768(5):591-597. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.272.

6. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *Materials Transactions*. 1990;31:307-314. DOI: 10.2320/matertrans1989.31.307.
7. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic alloys. *Handbook of Magnetic Materials*. 1997;10:415-462. DOI: 10.1016/S1567-2719(97)10007-5.
8. Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *Journal of Applied Physics*. 1988;64:6044-6046. DOI: 10.1063/1.342149.
9. Zhu L. Modulating the crystallization process of Fe82B12C6 amorphous alloy via rapid annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;785(5):328-334. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.209.
10. Khonik V.A. Structural relaxation and the resulting plastic flow of metallic glasses below the glass transition temperature: from phenomenological to microscopic understanding. *Vestnik TGU* [Vestnik of Tomsk State University]. 2010;15(3):789. (In Russ.)
11. Chen H.S. Structural relaxation in metallic glasses. *Amorfnye metallicheskie splavy* [Amorphous metallic alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 584 p. (In Russ.)
12. Krakhmalev P.V. *Struktura i svoystva magnitomyagkikh amorfnykh splavov na osnove zheleza i kobalta pri termicheskoi, mekhanotermicheskoi i termomagnitnoi obrabotke: dis. kand. tekhnich. nauk* [Structure and properties of soft magnetic amorphous iron- and cobalt-based alloys under thermal, thermomechanical and thermomagnetic treatment. Ph.D. dissertation]. Saint Petersburg, 1999. 142 p.
13. Hodge I.M. Structural Relaxation. In: *Classical Relaxation Phenomenology*. Springer, Cham, 2019, pp. 197–222. DOI: 10.1007/978-3-030-02459-8_11.
14. Bitzek E., Koskinen P., Gähler F., Moseler M., Gumbsch P. Structural Relaxation Made Simple. *Physical Review Letters*. 2006;97:170201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.170201.
15. Barysheva T.B. *Vtoroe nachalo termodinamiki i entropiya: Metodicheskoe posobie* [The second law of thermodynamics and entropy: a methodological guide]. Ed. by Chernoutsan A.I. Moscow: Publishing Center of Gubkin University of Oil and Gas, 2017, 32 p. (In Russ.)
16. Novikov S.V. *Termoelektricheskie svoystva nanokristallicheskikh silitsidov khroma i margantsa: dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Thermoelectric properties of nanocrystalline chromium and manganese silicides. Ph.D. dissertation]. Saint Petersburg, 2014, 168 p.
17. Petrov A.L., Gavriluk A.A., Zubritsky S.M. *Struktura i svoystva neuporyadochennykh tverdykh tel: uchebnoe posobie* [Structure and properties of disordered solids: textbook]. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House, 2004, 70 p. (In Russ.)
18. Arseneva A.D., Vedyayev A.V., Vasilyeva R.P. et al. *Termoeds v amorfnykh ferromagnitnykh splavakh* [Thermoelectric power in amorphous ferromagnetic alloys]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya* [Vestnik of Moscow University. Series 3: Physics. Astronomy]. 1991;(3):71-75. (In Russ.)
19. Melnikova N.V., Egorushkin V.E., Bobenko N.G. et al. Density of electronic states and thermoelectric power in carbon nanotubes with impurities and structural disorder. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika* [Russian Physics Journal]. 2012;55(11):24-34. (In Russ.)
20. Chukin M.V., Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V. Determination of the heterogeneity of cold-rolled strip properties by thermoelectric power. Part 1. Development of a research methodology. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2026;60-66. (In Russ.)
21. Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu. Determination of the heterogeneity of cold-rolled strip properties by thermoelectric power. Part 2. Investigation of the relationship between hardness and thermoelectric power. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2026;(3):22-29. (In Russ.)
22. Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu. et al. Thermoelectric nondestructive assessment of residual stresses in cold-rolled steel strip. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026; 24(1):88-99. (In Russ.)

Поступила 31.08.2026; принята к публикации 07.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 31/08/2026; revised 07/09/2026; published 30/09/2026

Чукин Михаил Витальевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Концева Наталья Васильевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Ефимова Юлия Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156

Mikhail V. Chukin – DrSc (Eng.), Chief Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Natalia V. Koptseva – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Yuliya Yu. Efimova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156