

07,13

## Низкотемпературная теплоемкость семейства сплава Гейслера Ni—Mn—In

© Л.Н. Ханов<sup>1</sup>, А.Т. Кадырбардеев<sup>1</sup>, А.В. Маширов<sup>2</sup>, А.М. Алиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН,  
Махачкала, Россия

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Москва, Россия

E-mail: hanov82@mail.ru

Поступила в Редакцию 17 июля 2025 г.

В окончательной редакции 17 июля 2025 г.

Принята к публикации 19 июля 2025 г.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования намагниченности ( $M$ ) и теплоемкости ( $C_P$ ) поликристаллических образцов сплава Гейслера  $\text{Ni}_{49.3}\text{Mn}_{40.4}\text{In}_{10.3}$ ,  $\text{Ni}_{45.48}\text{Mn}_{40.52}\text{In}_{14}$ ,  $\text{Ni}_{46.78}\text{Mn}_{38.42}\text{In}_{14.8}$ ,  $\text{Ni}_{41}\text{Mn}_{40.5}\text{In}_{18.5}$  в интервале температур 4–350 К. На полученных кривых наблюдаются аномалии, соответствующие магнитоструктурным (при наличии) и магнитным фазовым переходам. Из анализа низкотемпературной зависимости теплоемкости были поучены электронные вклады в теплоемкость, температуры Дебая ( $\theta_D$ ) и плотности электронных состояний на уровне Ферми исследованных образцов. Обнаружено, что температура Дебая (301–384 К) является возрастающей функцией  $e/a$ .

**Ключевые слова:** сплавы Гейслера, гелиевые температуры, температура Дебая, фазовые переходы, намагниченность.

DOI: 10.61011/FTT.2025.08.61325.201-25

### 1. Введение

В последние годы в связи с глобальными проблемами энергопотребления и снижения выбросов вредных веществ при работе газовых холодильных машин, интенсивно изучаются магнитные соединения, в которых наблюдается гигантская величина магнитокалорического эффекта (МКЭ) вблизи комнатных температур [1]. Одним из таких соединений являются сплавы Гейслера семейств Ni—Mn—X (X=Ga, Sn, Sb, In). Сплавы на основе Ni-Mn демонстрируют гигантский МКЭ [2–5], эластокалорический эффект [6], эффект памяти формы[7], сверхэластичность [3,8] и гигантское магнитоопротивление [9,10]. Исследование сплавов на основе Ni-Mn имеет важное значение из-за наличия аномальных магнитных и структурных свойств, поскольку магнитоструктурный фазовый переход почти всегда сопровождается ярко выраженными изменениями физических свойств сплавов [11]. В области фазового перехода парамагнетик–ферромагнетик, вблизи  $T_C$ , наблюдается прямой МКЭ. При фазовом переходе ферромагнетик–антиферромагнетик наблюдается обратный МКЭ. Обратный МКЭ в объемных образцах сплавов Гейслера исследован в работах [4,5,12,13]. Вблизи магнитоструктурного фазового перехода (МСФП) наблюдается ряд интересных физических эффектов.

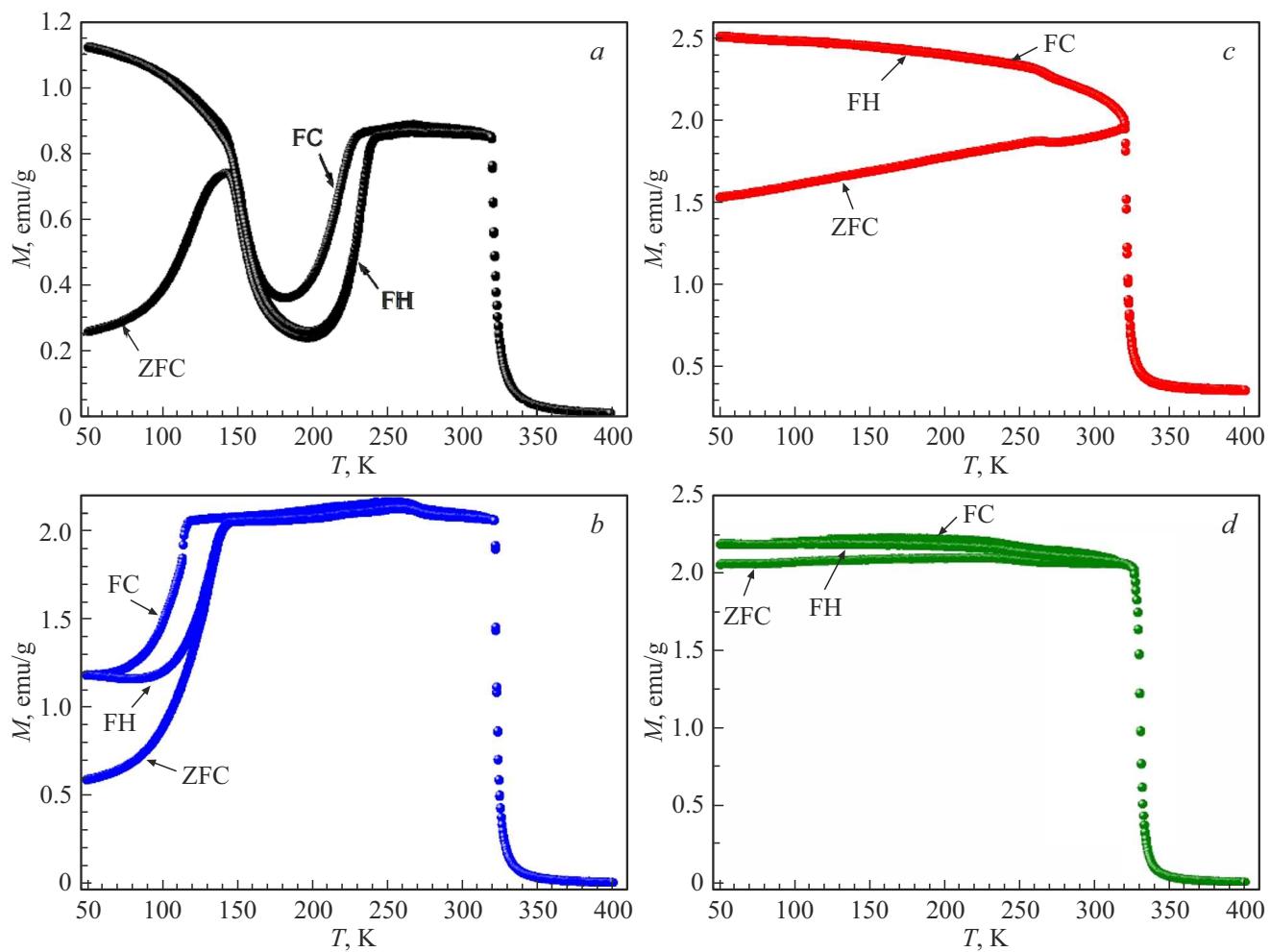
Для практического применения магнитокалорических материалов в технологии магнитного охлаждения необходимо учитывать не только магнитокалорические свойства, но и другие физические параметры. Теплоемкость,

например, играет ключевую роль, так как она определяет количество поглощаемой или выделяемой теплоты материалом при изменении температуры. Исследование теплоемкости может дать информацию о природе и особенностях фазовых переходов, электронном и магнитном вкладах в общую теплоемкость. По данным измерений теплоемкости косвенным методом вычисляется МКЭ. Для оценки вкладов различных подсистем в общую теплоемкость, определения температуры Дебая и т.д. необходимы измерения теплоемкости в широкой области температур, включая область гелиевых температур. Низкотемпературная теплоемкость сплавов Гейслера может быть изучена для понимания их термодинамических свойств и поведения при различных температурных режимах.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования намагниченности ( $M$ ) и теплоемкости ( $C_P$ ) поликристаллических образцов сплава Гейслера  $\text{Ni}_{49.3}\text{Mn}_{40.4}\text{In}_{10.3}$ ,  $\text{Ni}_{45.4}\text{Mn}_{40.52}\text{In}_{14}$ ,  $\text{Ni}_{46.78}\text{Mn}_{38.42}\text{In}_{14.8}$ ,  $\text{Ni}_{41}\text{Mn}_{40.5}\text{In}_{18.5}$  в широкой области температур, включая гелиевые (4.2 К).

### 2. Образцы и методика эксперимента

Образцы для исследований были получены методом дуговой плавки в атмосфере аргона с тремя переворотами и четырьмя переплавками. Затем проводился гомогенизирующий отжиг при  $T = 900$  °C в течение 48 h в вакууме. Элементный химический состав отожженных образцов проводился при помощи энергодиспер-



**Рис. 1.** Температурная зависимость намагниченности семейства сплава Ni–Mn–In в магнитном поле 50 Ое. *a)* Ni<sub>49.3</sub>Mn<sub>40.4</sub>In<sub>10.3</sub>; *b)* Ni<sub>45.48</sub>Mn<sub>40.52</sub>In<sub>14</sub>; *c)* Ni<sub>46.78</sub>Mn<sub>38.42</sub>In<sub>14.8</sub>; *d)* Ni<sub>41</sub>Mn<sub>40.5</sub>In<sub>18.5</sub>.

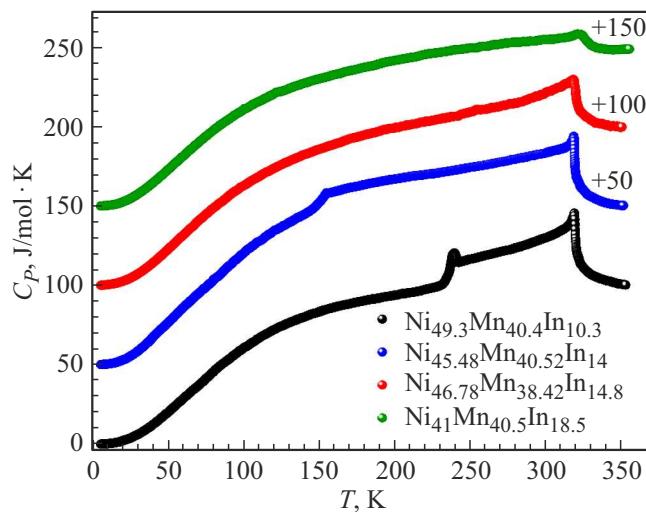
сионной рентгеновской спектроскопии (energy-dispersive X-ray spectroscopy — EDX).

Измерения намагниченности проводились в автоматическом режиме в температурном диапазоне 50–400 К в магнитных полях 50 Ое на установке Quantum Design PPMS-9T. Размеры исследуемых образцов составляли 2 × 2 × 1 mm, вес каждого около 50 mg. Измерения проводились в трех режимах: охлаждение в нулевом поле с последующими измерениями в определенном магнитном поле в режиме нагрева (ZFC), охлаждение в магнитном поле (FC) и нагрев в магнитном поле (FH). Скорость нагрева и охлаждения составляла 2 K/min. Теплоемкость ( $C_P$ ) измерялись методом модуляционной калориметрии (AC-калориметрии). Исследования проводились в области температур 4.2–350 К. Гелиевые температуры (4.2 K) достигались с помощью криостата замкнутого цикла с образцом в обменном газе CFSG-310. Скорость изменения температуры составляла 0.3 K/min в области фазовых переходов и в области гелиевых температур, и 1 K/min в остальной области температур.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены кривые температурной зависимости намагниченности поликристаллических сплавов Гейслера Ni<sub>49.3</sub>Mn<sub>40.4</sub>In<sub>10.3</sub>, Ni<sub>45.48</sub>Mn<sub>40.52</sub>In<sub>14</sub>, Ni<sub>46.78</sub>Mn<sub>38.42</sub>In<sub>14.8</sub>, Ni<sub>41</sub>Mn<sub>40.5</sub>In<sub>18.5</sub>, полученных в магнитном поле 50 Ое. Термомагнитные измерения  $M(T)$  проводились по протоколу: нагрев после охлаждения без поля (ZFC), охлаждения в поле (FC) и нагрев в поле (FH). У всех четырех сплавов в области  $T = 310$ –330 К в режиме охлаждения, присутствуют магнитные аномалии в виде резкого роста намагниченности, что связано с переходом аустенита из парамагнитного состояния в ферромагнитное.

Для сплавов Ni<sub>49.3</sub>Mn<sub>40.4</sub>In<sub>10.3</sub>, Ni<sub>45.48</sub>Mn<sub>40.52</sub>In<sub>14</sub> в области  $T = 100$ –250 К наблюдается магнитоструктурный фазовый переход (мартенсит–аустенит) с температурным гистерезисом, характерный для фазового перехода I-го рода (рис. 1, *a*, *b*). Хорошо выраженный гистерезис может указывать на структурные изменения, сопровождающие данный переход [14–16]. Для сплавов



**Рис. 2.** Температурная зависимость теплоемкости семейства сплавов Гейслера в нулевом магнитном поле в режиме нагрева. Для наглядности кривые смещены на 50 J/mol · K, 100 J/mol · K и 150 J/mol · K относительно самой низкой (черные круги).

вов Ni<sub>46.78</sub>Mn<sub>38.42</sub>In<sub>14.8</sub>, Ni<sub>41</sub>Mn<sub>40.5</sub>In<sub>18.5</sub> данный переход не наблюдается. То есть, вплоть до низких температур (50 K) основным состоянием является ферромагнитный аустенит. Аналогичная картина наблюдается в сплавах Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50-x</sub>In<sub>x</sub> ( $x < 10$ ) [17] и Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50-x</sub>Sb<sub>x</sub> ( $x \geq 17$ ) [18].

На рис. 2 представлены экспериментальные кривые температурной зависимости теплоемкости поликристаллических сплавов Гейслера Ni<sub>49.3</sub>Mn<sub>40.4</sub>In<sub>10.3</sub>, Ni<sub>45.48</sub>Mn<sub>40.52</sub>In<sub>14</sub>, Ni<sub>46.78</sub>Mn<sub>38.42</sub>In<sub>14.8</sub>, Ni<sub>41</sub>Mn<sub>40.5</sub>In<sub>18.5</sub> в нулевом магнитном поле в режиме нагрева. Для наглядности кривые  $C_P(T)$  смещены на 50 J/mol · K, 100 J/mol · K и 150 J/mol · K относительно самой низкой (черные круги).

На полученных кривых, в высокотемпературной области ( $T = 310\text{--}330$  K) наблюдаются характерные для данных сплавов четко выраженные аномалии в виде  $\lambda$ -пика, соответствующие фазовому переходу ферромагнетик–парамагнетик (магнитный переход), который происходит в аустенитной фазе. Наличие пика теплоемкости обусловлено затратами энергии во время фазового перехода, которое тратится на ориентационное разупорядочение магнитных моментов в окрестности  $T_C$ . Более подробно, природа магнитного перехода в сплавах Гейслера описана нами ранее в работах [16, 19]. Для сплавов Ni<sub>49.3</sub>Mn<sub>40.4</sub>In<sub>10.3</sub>, Ni<sub>45.48</sub>Mn<sub>40.52</sub>In<sub>14</sub> при температурах 239 K и 155 K наблюдается вторая аномалия, соответствующая МСФП (антиферромагнетик–ферромагнетик). Как видно из рис. 2 кривые теплоемкости коррелируют с поведением намагниченности (рис. 1).

Особый интерес на кривой теплоемкости вызывает низкотемпературная область (4–20 K). Измерение низкотемпературной теплоемкости является важным ин-

струментом, который обычно используется для эмпирической оценки электронного коэффициента теплоемкости  $\gamma$  и температуры Дебая  $\theta_D$ .

Удельная теплоемкость магнитного твердого тела формируется электронами, колебаниями решетки (фононами) и спиновыми возбуждениями (магнонами). В области низких температур вклад фононов в молярную удельную теплоемкость приблизительно равен дебаевскому члену

$$C_D(T) \approx \beta T^3, \quad (1)$$

который связан с температурой Дебая ( $\theta_D$ ) выражением

$$\theta_D = \left( \frac{12\pi^4 R}{5\beta} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\beta$  — коэффициент фононной составляющей теплоемкости.

Вклад магнонов (магнитный) в теплоемкость твердого тела равен

$$C_M(T) = \alpha T^{3/2}. \quad (3)$$

Температурно-независимый коэффициент  $\alpha$  обратно пропорционален третьей степени температуры Кюри и не связан с температурой Дебая [20, 21].

Вклад электронной составляющей в общую теплоемкость имеет линейный характер и может быть описан формулой:

$$C_{El}(T) = \gamma T. \quad (4)$$

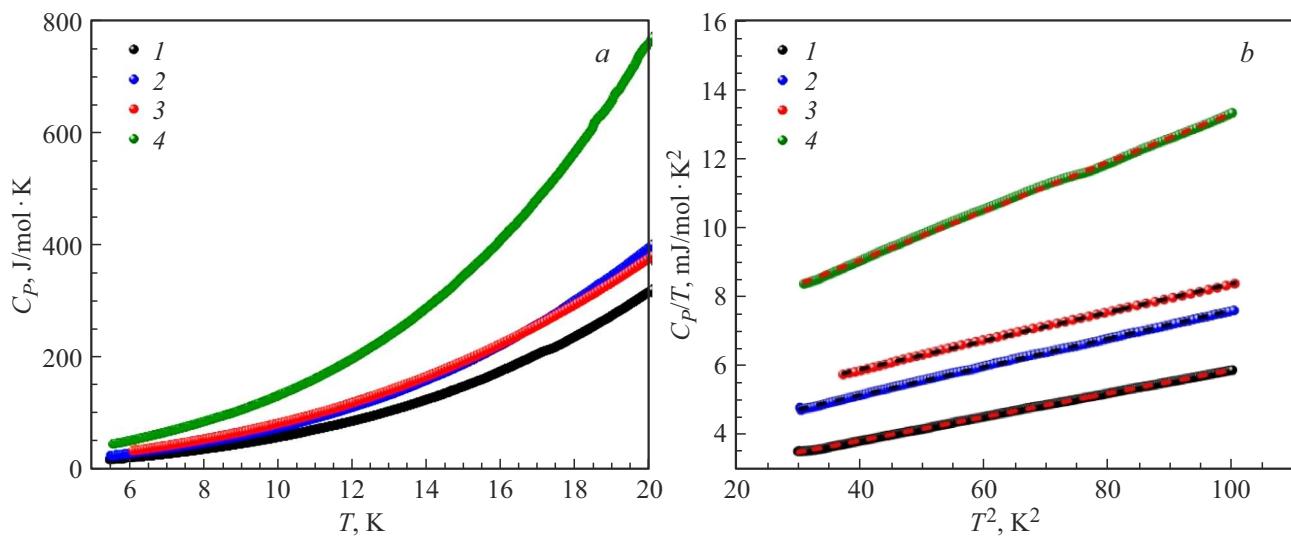
Следовательно, общая теплоемкость твердого тела удовлетворяет уравнению

$$C = \gamma T + \alpha T^{3/2} + \beta T^3. \quad (5)$$

На рис. 3, *a* представлены экспериментально полученные кривые теплоемкости для четырех сплавов семейства Ni–Mn–In в области низких температур (4–20 K) в нулевом магнитном поле в режиме нагрева. Авторы работы [22] проводили исследования по определению магнитной части теплоемкости нестехиометрического сплава Ni<sub>50</sub>Mn<sub>50-x</sub>In<sub>x</sub> ( $x = 13, 16.2$ ) и показали, что если начальный фрагмент кривой теплоемкости в низкотемпературной области линеен, то магнитный вклад пре-небрежимо мал и его можно не учитывать в формуле (5). В противном случае магнитная часть теплоемкости может быть сопоставима по величине с немагнитной частью. Так как для наших исследуемых сплавов низкотемпературная часть теплоемкости носит линейный характер (рис. 3, *b*) то магнитный вклад не учитывается и выражение (5) приобретает следующий вид

$$C = \gamma T + \beta T^3. \quad (6)$$

Используя выражения (6) были получены низкотемпературные данные по теплоемкости (пунктирные линии на рис. 3, *b*). Коэффициенты  $\gamma, \beta$  для исследуемых материалов подбирались таким образом, чтобы кривая аппроксимации совпадала с измеренными данными



**Рис. 3.** а) Низкотемпературная теплоемкость для составов: 1 —  $Ni_{49.3}Mn_{40.4}In_{10.3}$ , 2 —  $Ni_{45.48}Mn_{40.52}In_{14}$ , 3 —  $Ni_{46.78}Mn_{38.42}In_{14.8}$ , 4 —  $Ni_{41}Mn_{40.5}In_{18.5}$ ; б) зависимость  $C_p/T$  от  $T^2$  для тех же образцов сплошными линиями и пунктирами — аппроксимация по формуле (6).

Значения коэффициентов низкотемпературной теплоемкости и некоторые характеристики сплавов Гейслера

	$Ni_{49.3}Mn_{40.4}In_{10.3}$	$Ni_{45.48}Mn_{40.52}In_{14}$	$Ni_{46.78}Mn_{38.42}In_{14.8}$	$Ni_{41}Mn_{40.5}In_{18.5}$
$\gamma$ (mJ/mol · K <sup>2</sup> )	2.51	3.55	4.28	6.28
$\beta$ (mJ/mol · K <sup>4</sup> )	0.034	0.041	0.0414	0.071
$N(E_F)$ (1/eV · mol)	$6.43 \cdot 10^{23}$	$9.1 \cdot 10^{23}$	$1.1 \cdot 10^{24}$	$1.61 \cdot 10^{24}$
$\theta_D$ (К)	384	361	360	301
$e/a$	8.07	7.8	7.81	7.49

на графике  $C_p/T$  от  $T^2$  (рис. 3, б). Экстраполируя к  $T = 0$  прямолинейные части зависимостей  $C_p/T$  от  $T^2$ , представленного на рис. 3, б, были оценены значения электронной удельной теплоемкости  $\gamma$  для четырех исследуемых сплавов семейства  $Ni-Mn-In$ . Используя кубический член из формулы (6), который обусловлен фононными вкладами и выражение (2) можно определить температуру Дебая ( $\theta_D$ ) для каждого состава.

Линейный член ( $\gamma$ ) пропорционален плотности состояний на уровне Ферми соотношением:

$$N(E_F) = \frac{3\gamma}{\pi^2 k_B^2}, \quad (7)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана.

Используя данное выражение, были определены плотности состояний на уровне Ферми исследуемых материалов.

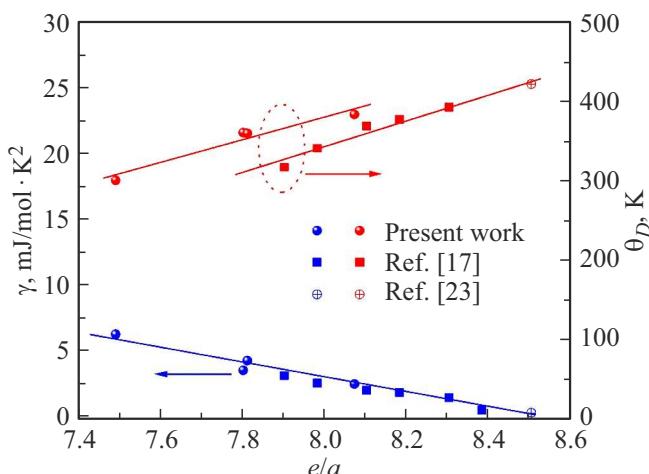
При анализе низкотемпературной области теплоемкости поликристаллических сплавов  $Ni_{49.3}Mn_{40.4}In_{10.3}$ ,  $Ni_{45.48}Mn_{40.52}In_{14}$ ,  $Ni_{46.78}Mn_{38.42}In_{14.8}$ ,  $Ni_{41}Mn_{40.5}In_{18.5}$  определены характеристические параметры  $\gamma$ ,  $\beta$ , характеристические температуры Дебая ( $\theta_D$ ), плотности состояний

на уровне Ферми ( $N(E_F)$ ), которые представлены в виде таблицы.

Поскольку в исследуемых сплавах одновременно изменяются концентрации трех элементов (Ni, Mn и In), для сравнения характеристических параметров и температуры Дебая были вычислены отношения электронов на атом ( $e/a$ ) по формуле (8). Результаты вычислений представлены в таблице. Здесь число валентных электронов на атом для Ni, Mn и In составляет соответственно 10, 7 и 3. Доля атомного веса записывается в виде at.%.

$$e/a = (10 \cdot (Ni \text{ at.\%}) + 7 \cdot (Mn \text{ at.\%}) + 3 \cdot (In \text{ at.\%})) / 100. \quad (8)$$

На рис. 4 представлены зависимости электронного коэффициента теплоемкости и температуры Дебая от количества электронов на атом для исследуемых сплавов  $Ni_{49.3}Mn_{40.4}In_{10.3}$ ,  $Ni_{45.48}Mn_{40.52}In_{14}$ ,  $Ni_{46.78}Mn_{38.42}In_{14.8}$ ,  $Ni_{41}Mn_{40.5}In_{18.5}$  (заполненные синие и красные кружки), а также для  $Ni_{50}Mn_{50-x}In_x$  ( $x = 3, 5, 8, 10, 13, 15$ ) (заполненные синие и красные квадратики) и  $Ni_{50}Mn_{50}$



**Рис. 4.** Зависимости электронного коэффициента теплоемкости ( $\gamma$ ) и температуры Дебая ( $\theta_D$ ) от электрона на атом ( $e/a$ ). Заполненные синие и красные кружки — для исследуемых сплавов. Синие и красные, заполненные квадратики — для  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{In}_x$  ( $x = 3, 5, 8, 10, 13, 15$ ). Открытые кружки — для  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ . Линии являются ориентирами для глаз.

(открытые кружки), значения которых взяты из работ [17,23].

Umetsu в своих работах [17,23] исследовал сплав  $\text{Ni}-\text{Mn}-\text{In}$  при низких температурах (2–80 K) в диапазоне концентраций валентных электронов ( $e/a$ ) от 7.9 до 8.5. В нашем исследовании мы рассматривали эти сплавы в диапазоне  $e/a$  от 7.49 до 8.07. Наши исследования электронного коэффициента теплоемкости и температур Дебая являются продолжением работ Umetsu. На рис. 4 видно, что полученные нами значения  $\gamma$  совпадают с линейной кривой: с увеличением количества электронов на атом электронный вклад в теплоемкость уменьшается. Полученные нами значения по  $\theta_D$  хорошо коррелируют с данными авторов работ [17,23]. Значения температуры Дебая линейно увеличиваются с ростом количества электронов на атом. Небольшие различия в абсолютных значениях  $\theta_D$ , скорее всего, связаны с особенностями технологий получения сплавов.

В работе [24] сообщалось, что для сплава  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{In}_x$  кристаллическая структура меняется от тетрагонального типа  $L1_0$  для  $x = 0$  до моноклинной многослойной структуры с увеличением содержания In. Магнитные свойства являются коллинеарным антиферромагнитным с высокой температурой Нееля для  $x = 0$  [25]. Это свойство меняется на сложные магнитные свойства, в которых отсутствует дальний магнитный порядок и наблюдается блокирующее поведение [24,26]. Поскольку при изменении содержания In не наблюдается резких изменений ни кристаллической структуры, ни магнитных свойств, увеличение температуры Дебая может быть вызвано эффектом замещения тяжелого элемента индия. Уменьшение  $\gamma$  с

увеличением количества электронов на атом может быть связано с потерей антиферромагнитной стабильности.

## 4. Заключение

Таким образом, исследована намагниченность и теплоемкость поликристаллических образцов сплавов Гейслера  $\text{Ni}_{49.3}\text{Mn}_{40.4}\text{In}_{10.3}$ ,  $\text{Ni}_{45.48}\text{Mn}_{40.52}\text{In}_{14}$ ,  $\text{Ni}_{46.78}\text{Mn}_{38.42}\text{In}_{14.8}$ ,  $\text{Ni}_{41}\text{Mn}_{40.5}\text{In}_{18.5}$  в широком диапазоне температур от 4 до 350 K. На полученных кривых наблюдаются аномалии, соответствующие магнитоструктурным (при наличии) и магнитным фазовым переходам. Кривые теплоемкости коррелируют с поведением намагниченности. Основной целью данного исследования было анализ низкотемпературной области теплоемкости семейства сплавов Гейслера  $\text{Ni}-\text{Mn}-\text{In}$  и определение по кривой  $C_P/T$  от  $T^2$  характеристических параметров ( $\gamma, \beta$ ), характерной температуры Дебая ( $\theta_D$ ) и плотности состояний на уровне Ферми ( $N(E_F)$ ). Полученные значения электронного вклада и температура Дебая согласуются с литературными данными.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзадания № FMSW-2025-0043.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] K.A. Gschneidner Jr., V.K. Pecharsky, A.O. Tsokol. Rep. Prog. Phys. **68**, 1479 (2005).
- [2] R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito, Y. Sutou, H. Morito, S. Okamoto, K. Ishida. Nature **439**, 957 (2006).
- [3] T. Krenke, E. Duman, M. Acet, E.F. Wassermann, X. Moya, L. Manosa, B. Ouladdiaf. Phys. Rev. B **75**, 104414 (2007).
- [4] A. Planes, L. Manosa, M. Acet, J. Phys.: Condens. Matter **21**, 233201 (2009).
- [5] A.K. Pathak, I. Dubenko, J.C. Mabon, Sh. Stadler, N. Ali, J. Phys. D **42**, 045004 (2009).
- [6] Y.J. Huang, Q.D. Hu, N.M. Bruno, J.H. Chen, I. Karaman, J.H. Ross Jr, J.G. Li. Scr. Mater. **105**, 42 (2015).
- [7] R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito, H. Morito, Y. Sutou, K. Oikawa, T. Kanomata. Appl. Phys. Lett. **88**, 192513 (2006).
- [8] V.A. Chernenko, V. L'vov, J. Pons, E. Cesari. J. Appl. Phys. **93**, 2394 (2003).
- [9] K. Koyama, H. Okada, K. Watanabe, T. Kanomata, R. Kainuma, W. Ito, K. Ishida. Appl. Phys. Lett. **89**, 182510 (2006).
- [10] S.Y. Yu, L. Ma, G.D. Liu, Z.H. Liu, J.L. Chen, Z.X. Cao, X.X. Zhang. Appl. Phys. Lett. **90**, 242501 (2007).
- [11] T. Graf, C. Felser, S. Parkin. Progress in solid state chemistry **39**, 1–50 (2011).

- [12] T. Krenke, E. Duman, M. Acet, E.F. Wassermann, X. Moya, L. Mañosa, A. Planes. *Nature Mater.* **4**, 450 (2005).
- [13] V.V. Khovaylo, K.P. Skokov, O. Gutfleisch, H. Miki, T. Takagi, T. Kanomata, V.V. Koledov, V.G. Shavrov, G. Wang, E. Palacios, J. Bartolomé, R. Burriel. *Phys. Rev. B* **81**, 214406 (2010).
- [14] V. Recarte, J.I. Perez-Landazabal, V. Sanchez-Alarcos, J.A. Rodríguez-Velamazan. *Acta Materialia* **60**, 1937 (2012).
- [15] Л.Н. Ханов, А.Б. Батдалов, А.В. Маширов, А.П. Каманцев, А.М. Алиев. *Физика твердого тела* **60**, 1099 (2018).
- [16] А.Б. Батдалов, А.М. Алиев, Л.Н. Ханов, В.Д. Бучельников, В.В. Соколовский, В.В. Коледов, В.Г. Шавров, А.В. Маширов, Э.Т. Дильтюсова. *ЖЭТФ* **149**, 1011 (2016).
- [17] R.Y. Umetsu, X. Xu, W. Ito, R. Kainuma. *Metals* **7**, 414 (2017)
- [18] A. Kosogor, R.Y. Umetsu, V. Golub, X. Xu, R. Kainuma. *Journal of Alloys and Compounds* **988**, 174130 (2024)
- [19] A.B. Batdalov, L.N. Khanov, A.V. Mashirov, V.V. Koledov, A.M. Aliev. *Journal of Applied Physics* **129**, 123901 (2021).
- [20] А.Б. Батдалов, Л.Н. Ханов, А.А. Мухучев, А.В. Маширов, А.М. Алиев. *Физика твердого тела* **66** (10), 1805 (2024).
- [21] A.I. Akhiezer, V.G. Bar'yakhtar, S.V. Peletminskii. *Spin waves*. Translated [from the Russian] by S. Chomet. Amsterdam, North-Holland Pub. Co., 1968. North-Holland series in low temperature physics, v. 1.
- [22] S.V. Vonsovskij, *Magnetism* (Vol. 22053) Wiley (1974).
- [23] R.Y. Umetsu, A. Sakuma, K. Fukamichi. *Met. Mater. Process.* **15**, 67–94 (2003).
- [24] T. Krenke, M. Acet, E.F. Wassermann, X. Moya, L. Mañosa, A. Planes. *Phys. Rev. B* **73**, 174413 (2006).
- [25] L. Pal, E. Kren, G. Kadar, P. Szabo, T. Tarnoczi. *J. Appl. Phys.* **39**, 538–544 (1968).
- [26] V.V. Khovaylo, T. Kanomata, T. Tanaka, M. Nakashima, Y. Amako, R. Kainuma, R.Y. Umetsu, H. Morito, H. Miki. *Phys. Rev. B* **80**, 144409 (2009).

Редактор Т.Н. Василевская