

**КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ  
НА ОСНОВЕ СПЛАВА  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$**

**Говор Г.А., Вечер А.К., Галяс А.И., Гончаров В.С., Василевский С.С.**  
ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск, Беларусь

В последние годы проблеме разработки и исследованию теплоносителей для магнитных холодильников, позволяющих существенно снизить потребление электроэнергии, уделяется большое внимание. В этой связи в работе проведено исследование физических свойств, в том числе магнетокалорического эффекта (МСЕ), гейслеровского сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  и композитов на его основе.

Известно, что одним из претендентов на роль теплоносителя в магнитном холодильнике является эквивалентный арсенид марганца –  $MnAs$ , при нормальных условиях ферромагнетик с намагниченностью насыщения  $3,4 \mu_B$  на атом марганца [1-2]. При температуре  $T_0=315 K$  в относительно небольших магнитных полях наблюдается фазовый переход 1-го рода с разрушением упорядоченного ферромагнитного состояния. Отличительной особенностью этого перехода является то, что, наряду с разрушением упорядоченного ферромагнитного состояния, имеет место структурный переход с изменением удельного объема элементарной ячейки на величину  $-\Delta V/V_0=-0,02$  [2]. Значения магнетокалорического эффекта для  $MnAs$  в сравнении с другими хладоносителями приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Температура Кюри, эффективный момент, наблюдаемая и ожидаемая  $-\Delta S_M^{max}$  для материалов, проявляющих гигантский МСЕ, в полях до 5 Тл вблизи или ниже комнатной температуры

Материал	Температура Кюри, К	J или S	Наблюдаемая $\Delta S_M^{max}$ , J/(kg·K)	Ожидаемая $\Delta S_M^{max}$ , J/(kg·K)
$Gd_5Si_2Ge_2$	272	3,5	36,4	88,9
$MnAs$	318	2	40	103
$FeMnAsP$	305	1	18	117
$MnAs_{0,9}Sb_{0,1}$	283	2	30	103
$La(Fe_{0,88}Si_{0,12})_{13}H_1$	274	1	23	127

В [4] по результатам исследования магнитных свойств в закаленном сплаве  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  показано, что МСЕ для данного сплава примерно такой же, как и в  $MnAs$ .

Сплав  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  в сравнении с арсенидом марганца, поскольку не содержит мышьяка, с экологической точки зрения предпочтителен для использования. В этой связи предпринято настоящее исследование физических свойств сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  и композитов на его основе с тем, чтобы выяснить возможность его использования в качестве теплоносителя для магнитного холодильника.

Сплав  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  был получен методом твердофазного синтеза с последующим длительным нормализующим отжигом при плавном снижении температуры. Кроме того, для сравнения свойств нормализованного сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  с закаленным, проведена плавка сплава при температуре 1200 °С с последующей закалкой. Проведены комплексные исследования свойств нормализованного и закаленного сплавов: исследование кристаллической структуры сплавов, температурных зависимостей удельной намагниченности и измерение МСЕ.

В результате рентгеноструктурных исследований показано, что кристаллическая структура сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  в закаленном состоянии – гексагональная типа  $B8_2$ , для нормализованного состояния сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$

характерна деформированная гексагональная структура орторомбического типа В31.

На рисунке 1 приведены температурные зависимости удельной намагниченности сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  в нормализованном (а) и закаленном состояниях (б). Из приведенных результатов видно, что изменение удельной намагниченности в закаленном состоянии приближается по характеру к фазовому магнитному переходу 1-го рода в отличие от температурной зависимости удельной намагниченности для нормализованного состояния. Кроме того, температура фазового перехода для закаленного состояния близка к  $T_c=300$  К в отличие от нормализованного состояния, для которого  $T_c=400$  К.

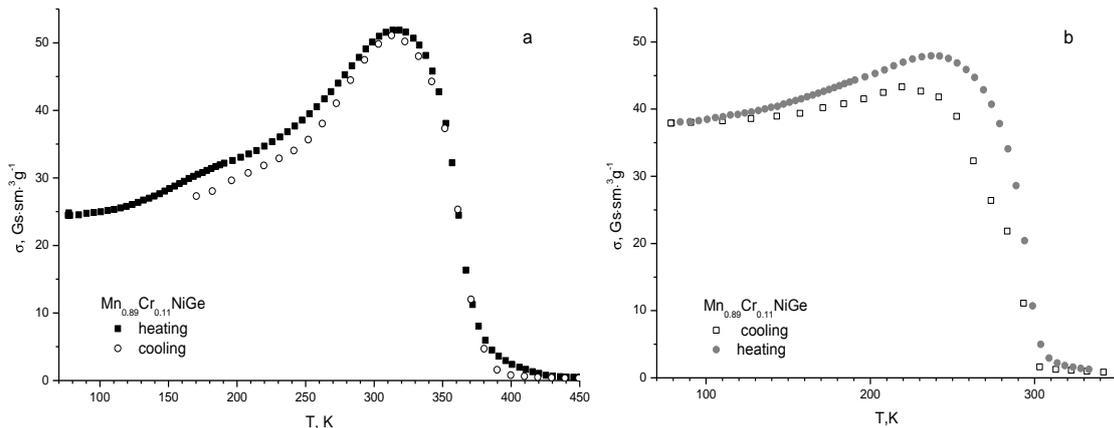


Рисунок 1 – Температурные зависимости удельной намагниченности мелкодисперсного сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  в нормализованном (а) и закаленном состояниях (б)

На рисунке 2 приведены температурные зависимости удельной намагниченности сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  в виде закаленного поликристаллического массивного образца (а) и композиционного сплава с добавкой 2% ПВА.

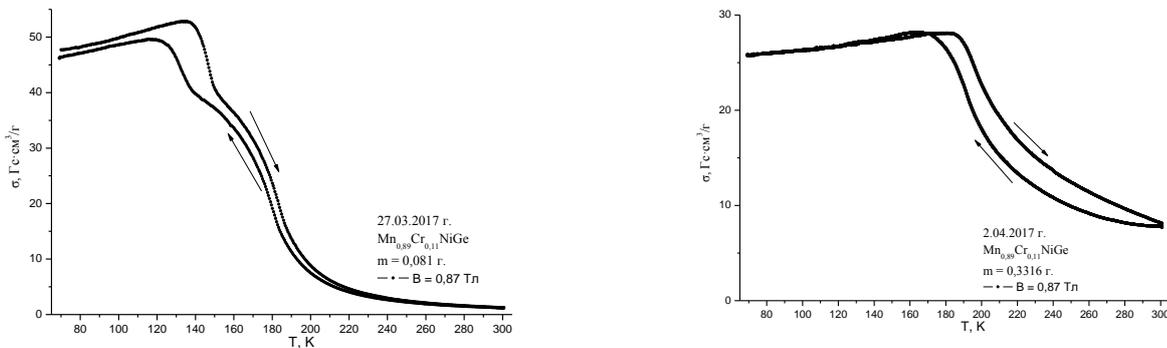


Рисунок 2 – Температурные зависимости удельной намагниченности сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  в виде закаленного поликристаллического массивного образца (а) и композиционного сплава с добавкой 2% ПВА

Видно существенное влияние характера обработки образца на температуру магнитного перехода. На рисунке 3 приведены результаты измерения МСЕ в магнитных полях до 14 Тесла для нормализованного и закаленного образца  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$

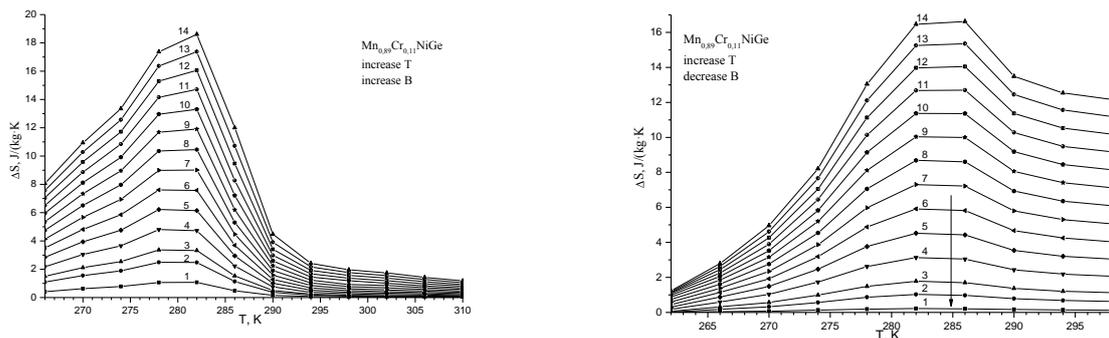


Рисунок 3 – МСЕ в магнитных полях до 14 Тесла для нормализованного и закаленного образца  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$

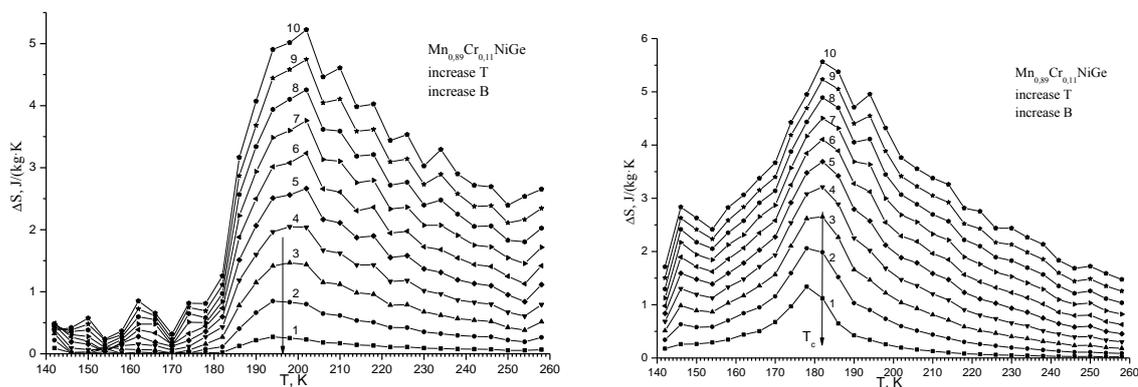


Рисунок 4 – МСЕ в магнитных полях до 10Тесла для поликристаллического массивного образца  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  (а) и композиционного сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  с добавкой 2% ПВА

### Выводы

Проведенное исследование нормализованного и закаленного сплава  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  показало подверженность его свойств режиму обработки. Величина МСЕ  $Mn_{0,89}Cr_{0,11}NiGe$  в сравнении с МСЕ для  $MnAs$  меньше чем на порядок, что исключает его применение в качестве теплоносителя для магнитного холодильника

### Список литературы:

1. Говор Г.А. // ФТТ. – 1981. - Т. 23. - С. 841.
2. Govor G.A. et al // Phys.Stat.Sol.(a). – 1989. - Vol.118. - P.403.
3. M.-H.Phan, S.-C.Yu. JMMM. 2016.v.308. .P.325
4. Sivachenko A.P., et.al. Low Temperature Physics. -2016. -Vol. 39. - P. 1081-1084.