

УДК 538.9

**А.В. Демидчик**

канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. общей и теоретической физики  
Брестского государственного университета имени А.С. Пушкина  
e-mail: [otf@brsu.brest.by](mailto:otf@brsu.brest.by)

## **ВЛИЯНИЕ СВЕРХБЫСТРОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ В ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ ПЕРМАЛЛОЕВОГО СОСТАВА**

*С помощью растровой электронной микроскопии проведено исследование распределения железа и никеля в фольгах быстрозатвердевших сплавов пермаллового состава, полученных двухсторонним охлаждением. Установлено однородное распределение компонентов как по обеим поверхностям фольги, так и внутри её. Термическая обработка фольг при температурах 50 °С и 100 °С не оказывает заметного влияния на распределение компонент.*

### **Введение**

Тонкие железоникелевые сплавы широко распространены в электронике [1; 2]. Высокие температуры плавления (свыше 1 000 °С) способствуют «неуязвимости» сплавов по отношению к температурному воздействию в достаточно широком интервале. Потребности в материалах с заранее заданными физико-техническими свойствами увеличиваются. Устанавливаются пути повышения характеристик сплавов путём целенаправленного формирования их структуры. Исследования проводятся как над сплавами, полученными традиционными способами (малые скорости охлаждения жидкой фазы), так и путем сверхбыстрой закалки (скорость охлаждения жидкой фазы порядка  $10^6$  К/с). Высокоскоростное затвердевание расплава позволяет получать высокопрочные материалы с хорошей антикоррозионной стойкостью [3–6]. Одно из требований, предъявляемых к современным материалам, – однородность распределения компонентов в сплаве. Сверхбыстрое охлаждение по-разному влияет на указанное распределение [7].

Цель настоящей работы – исследовать распределение компонентов в железоникелевой фольге, ограничившись рассмотрением сплавов с повышенным содержанием никеля (70...80 ат. %), что было предпринято ранее в работах [7–8] для узкого интервала (65...68 ат. % Ni).

### **Методика получения и измерения**

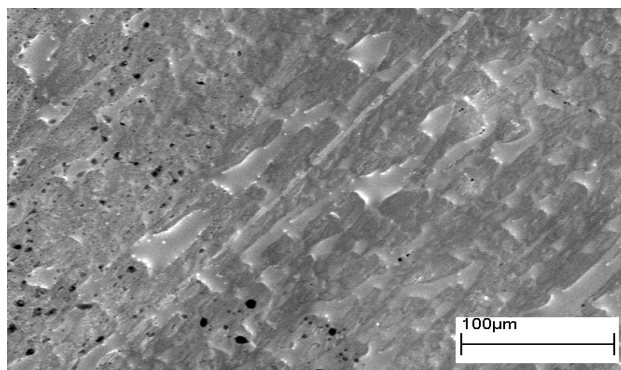
Объекты исследования – фольги железоникелевых сплавов с содержанием никеля 70...80 ат. %, полученные двухсторонним охлаждением – двухвалковым методом. Достоинства данного метода – непрерывность технологического процесса и получение материала с зеркальными (гладкими) обеими поверхностями, что в будущем позволяет сделать предположение об одинаковости на них физико-механических параметров и характеристик. Толщина фольг 10...30 мкм.

Исследование структуры фольг проводилось на растровом электронном микроскопе, микроанализ – при помощи рентгеновского микроанализатора. Исследование морфологии поверхности сплавов осуществлялось с обеих сторон фольги. Компонентный анализ по глубине осуществлялся на изломе фольги.

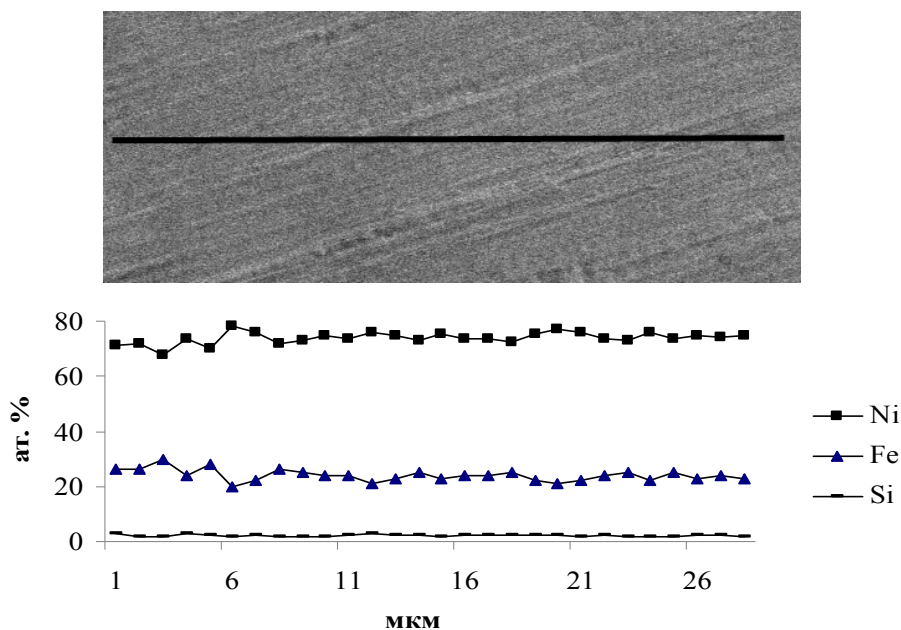
Термическая обработка проводилась при температурах 50 °С и 100 °С следующим образом: образцы помещались в печь, нагревались вместе с ней до необходимой температуры, отжигались 15 мин. при этой температуре. Затем печь выключалась, и образцы охлаждались вместе с ней до комнатной температуры. После этого проводилось исследование сплавов.

**Результаты. Морфология поверхности исходных образцов**

Быстрозатвердевшие фольги исследуемых сплавов имеют с обеих сторон гладкую поверхность. На ней могут присутствовать впадины (рисунок 1), образование которых объясняется наличием воздуха, попавшего между диском-кристаллизатором и расплавом, что, несомненно, приводит к нежелательному уменьшению скорости затвердевания жидкой фазы, а также локализованные черные скопления в виде грязи из-за недостаточно качественной полировки (обработки) вращающегося кристаллизатора, которые также могут оказать существенное влияние на обработку экспериментальных данных. Образцы с подобного рода дефектами исключались из рассмотрения, и исследования с ними не проводились.



**Рисунок 1. – Поверхность фольги сплава Fe<sub>28</sub>Ni<sub>70</sub>Si<sub>2</sub>**



**Рисунок 2. – Линия сканирования по поверхности фольги Fe<sub>24</sub>Ni<sub>74</sub>Si<sub>2</sub> и распределение компонентов вдоль этой линии**

**Результаты. Химический состав и распределение компонентов исходных образцов**

На рисунке 2 представлены результаты сканирования покомпонентного химического состава по линии на поверхности образца. Линия сканирования выбиралась произвольным образом: как по ходу течения расплава и последующего его охлаждения, так и поперек или под произвольным углом. Анализ показал, что все подвергнутые исследу-

дованию составы имеют однородное распределение компонентов. При этом указанный вывод справедлив для обеих поверхностей фольги.

Помимо поверхностного распределения компонентов ставился вопрос о распределении компонентов по глубине фольги. Для этого производился излом образца и изучалось его поперечное сечение. Важно отметить, что если поперечное сечение фольги получено срезом, то результаты могут быть недостоверными, так как в процессе среза режущий предмет (например, лезвие) может загнуть верхние слои фольги и прикрыть ими внутренние, как показано на рисунке 3.

Результаты анализа распределения компонентов по глубине для сплава  $\text{Fe}_{26}\text{Ni}_{72}\text{Si}_2$  представлены в таблице 1 (вместе с рисунком 4), для сплавов  $\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{77}\text{Si}_1$ ,  $\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{74}\text{Si}_2$ ,  $\text{Fe}_{28}\text{Ni}_{71}\text{Si}_1$  – в таблице 2 (для пяти разных точек на изломе).

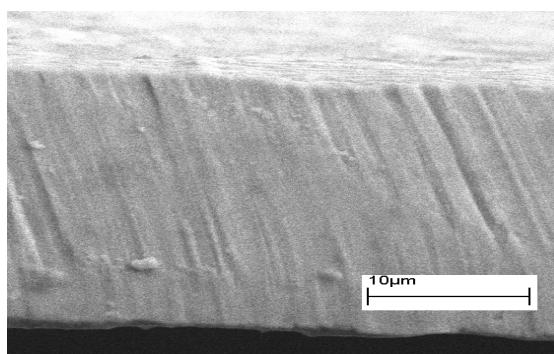
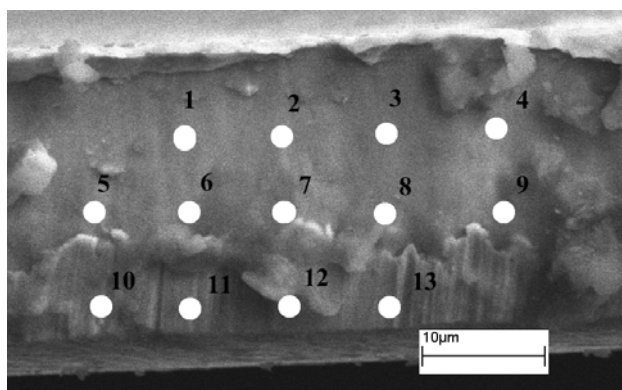


Рисунок 3. – Поперечное сечение (срез) фольги сплава  $\text{Fe}_{26}\text{Ni}_{72}\text{Si}_2$

Таблица 1. – Распределение компонентов по глубине фольги сплава  $\text{Fe}_{26}\text{Ni}_{72}\text{Si}_2$  (нумерация точек внутри фольги соответствует рисунку 4)

Точка	Процентное содержание элемента, ат. %	
	Fe	Ni
1	27,4	72,4
2	23,9	74,2
3	27,3	71,9
4	26,2	71,8
5	27,3	71,1
6	29,1	70,4
7	27,7	70,3
8	26,3	71,9
9	29,4	70,5
10	25,8	72,9
11	24,2	73,8
12	22,8	75,3
13	27,2	71,8



**Рисунок 4. – Поперечное сечение (излом) фольги сплава Fe<sub>26</sub>Ni<sub>72</sub>Si<sub>2</sub> (на фотографии отмечены исследуемые точки)**

**Таблица 2. – Распределение компонентов по глубине исходных фольг**

Сплав	Процентное содержание Fe/Ni на изломе, ат. %				
Fe <sub>22</sub> Ni <sub>77</sub> Si <sub>1</sub>	21,4/77,4	21,9/77,2	22,3/76,9	21,2/78,6	24,5/75,1
Fe <sub>24</sub> Ni <sub>74</sub> Si <sub>2</sub>	25,4/74,4	23,9/75,3	24,3/75,1	23,2/75,6	23,5/76,1
Fe <sub>28</sub> Ni <sub>71</sub> Si <sub>1</sub>	28,3/71,4	26,8/72,3	27,2/72,1	27,8/71,8	29,1/70,6

Наличие на поверхности фольги однородно распределённого кремния, возможно, объясняется тем, что диски-кристаллизаторы перед осуществлением процесса закалки расплава обрабатывались абразивным материалом, который и внес свой «вклад» в итоговое распределение компонентов.

На изломе фольги концентрация кремния была зафиксирована в пределах статистической погрешности (в таблице 1 не указывалась).

**Результаты. Химический состав и распределение компонентов образцов, подвергнутых термической обработке**

Исследуемые сплавы в виде тонких лент (фольг) находят применение, в частности в акустомагнитных датчиках или иных технических устройствах (индикаторах, детекторах и т.п.). Работа этих устройств может быть связана с перепадом температур. В данной работе температуры отжига были выбраны «бытовые», для создания которых не требуется специальных условий или высокотемпературных термошкафов.

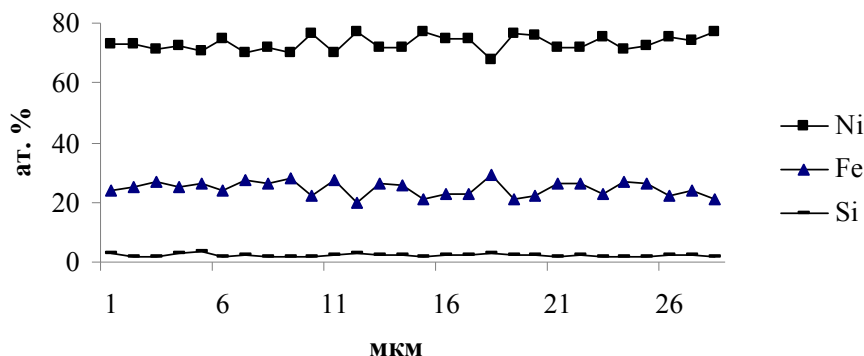
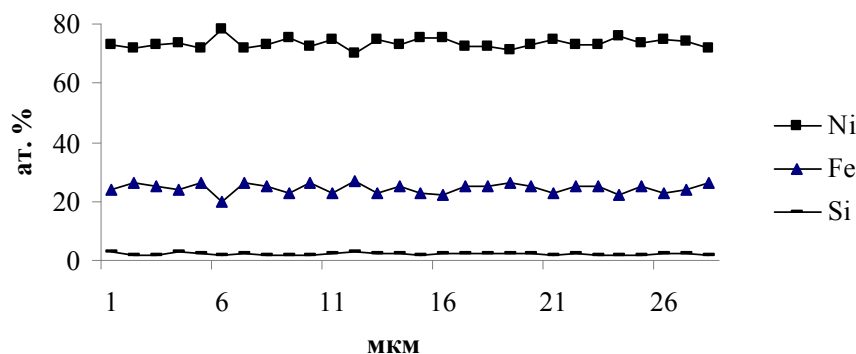
Результаты анализа распределения компонентов по глубине для сплавов Fe<sub>22</sub>Ni<sub>77</sub>Si<sub>1</sub>, Fe<sub>24</sub>Ni<sub>74</sub>Si<sub>2</sub>, Fe<sub>28</sub>Ni<sub>71</sub>Si<sub>1</sub> представлены в таблицах 3 и 4 (для пяти разных точек на изломе). Различие в концентрациях элементов между таблицами вызвано тем, что сканированию каждый раз подвергались разные точки излома фольги, так как зафиксировать одну точку на изломе и проводить исследования в ней не представляется возможным.

**Таблица 3. – Распределение компонентов по глубине фольг, подвергнутых термообработке при 50 °С**

Сплав	Процентное содержание Fe/Ni на изломе, ат. %				
Fe <sub>22</sub> Ni <sub>77</sub> Si <sub>1</sub>	21,6/77,5	21,8/77,4	22,4/77,0	21,9/77,3	22,6/76,6
Fe <sub>24</sub> Ni <sub>74</sub> Si <sub>2</sub>	23,2/75,9	23,0/76,3	24,4/74,7	24,1/74,6	24,5/74,9
Fe <sub>28</sub> Ni <sub>71</sub> Si <sub>1</sub>	28,2/70,6	27,6/71,2	28,8/69,7	27,2/71,5	28,5/70,3

Таблица 4. – Распределение компонентов по глубине фольг, подвергнутых термообработке при 100 °С

Сплав	Процентное содержание Fe/Ni на изломе, ат. %				
Fe <sub>22</sub> Ni <sub>77</sub> Si <sub>1</sub>	21,3/77,9	21,7/77,4	22,4/76,3	22,8/76,4	22,6/76,1
Fe <sub>24</sub> Ni <sub>74</sub> Si <sub>2</sub>	23,9/74,9	24,9/74,3	24,6/73,7	24,7/73,9	23,5/74,9
Fe <sub>28</sub> Ni <sub>71</sub> Si <sub>1</sub>	28,6/70,1	28,5/70,0	26,9/71,5	27,6/71,2	27,2/70,8

Рисунок 5. – Распределение компонентов по поверхности фольги Fe<sub>24</sub>Ni<sub>74</sub>Si<sub>2</sub>, подвергнутой термообработке при 50 °СРисунок 6. – Распределение компонентов по поверхности фольги Fe<sub>24</sub>Ni<sub>74</sub>Si<sub>2</sub>, подвергнутой термообработке при 100 °С

Как видно из рисунков 5 и 6, на которых представлены результаты сканирования химического состава вдоль линии поверхности фольги Fe<sub>24</sub>Ni<sub>74</sub>Si<sub>2</sub>, подвергнутой термообработке, однородное распределение компонентов сохраняется в исследуемом интервале температур.

### Выводы

Таким образом, полученные сверхбыстрым двухсторонним охлаждением фольги железоникелевых сплавов с содержанием никеля 70...80 ат. % имеют химически однородное по всему объему распределение компонентов.

Отжиг фольг указанного состава при температурах 50 °С и 100 °С сохраняет однородное распределение.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов, Е. А. Высоколегированные сплавы на основе железа и никеля / Е. А. Ульянов, Т. В. Свистунова. – М. : Metallurgia, 1986. – 350 с.
2. Твердотельный синтез железоникелевых плёнок пермаллового и инварного составов / В. С. Жигалов [и др.] // Вестн. Краснояр. гос. ун-та. Сер. физ.-мат. наук. – 2005. – № 4. – С. 54–62.
3. Мирошниченко, И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М. : Metallurgia, 1982. – 168 с.
4. Герман, Г. Сверхбыстрая закалка жидких сплавов / Г. Герман. – М. : Metallurgia, 1986. – 375 с.
5. Высокоскоростное затвердевание расплава / В. А. Васильев [и др.] ; под науч. ред. Б. С. Митина. – М. : Интернет Инжиниринг, 1998. – 400 с.
6. Глазов, В. М. Получение полупроводниковых материалов методом сверхбыстрого охлаждения расплава / В. М. Глазов // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1984. – Т. 20, № 7. – С. 1238–1243.
7. Демидчик, А. В. Структура и микротвердость железоникелевых сплавов, полученных высокоскоростным затвердеванием / А. В. Демидчик // Вестн. Брэсц. ун-та. Сер. прыродазн. навук. – 2007. – № 1. – С. 46–50.
8. Демидчик, А. В. Термическая стабильность структуры и микротвердости тонких фольг железоникелевых сплавов / А. В. Демидчик // Вестн. Брэсц. ун-та. Сер. прыродазн. навук. – 2008. – № 1. – С. 42–49.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 02.05.2018

***Demidchik A.V. The Influence of Ultra-Fast Cooling on the Distribution of Components in Permalloy Iron-Nickel Alloys***

*With the help of scanning electron microscopy, a study was made of the distribution of iron and nickel in foils of fast-solid alloys of permalloy composition, obtained by double-sided cooling. A uniform distribution of components is established both on both foil surfaces and inside it. Thermal treatment of foils at temperatures of 50 °C and 100 °C does not have a significant effect on the distribution of components.*