

Никель в микро- и наноструктурах

Ю Цзиньян¹ Люй Цзиньяжэ¹ Лю Цан¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет (634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30), e-mail: youjingyang0309@gmail.com

Резюме: Статья посвящена сравнительному анализу свойств Ni в микро- и наноструктурах. Показано, что свойства Ni в микро- и наноструктурах существенно различаются. При рассматриваемом размере наноструктуры Ni (70 нм) основное влияние на изменение свойств Ni оказывает классический размерный эффект. Приведены методы получения и применение наноникеля.

Ключевые слова: прямая и обратная решетка, поверхность Ферми, классический размерный эффект, Нанопорошок, зона Бриллюэна.

Nickel in micro- and nano-structure

You Jingyang¹ Lv Jinzhe¹ Liu Gang¹

¹Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: youjingyang0309@gmail.com

Summary: The article is devoted to comparative analysis of the properties of Ni in the micro- and nanostructures. The paper studied the mechanical properties of Ni in the micro- and nanostructures. It is shown that Ni is close to ordinary metals largest Fermi energy and properties of Ni in the micro- and nanostructures are substantially different. When you consider the size of the nanostructure of Ni (70 nm), the main influence on the change of properties of Ni has the classic size effect. These results were confirmed by comparing the size of the Ni powder and the de Broglie wavelength of an electron in a nanostructure Ni. The physical reasons for the changes in the properties of the nanostructure of nickel. The methods of preparation and use of nanonikelya.

Keywords: direct and reciprocal lattice, the Fermi surface, the classic size effect, nanopowder, Brillouin zone.

Никель – элемент десятой группы четвёртого периода периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева, с атомным номером 28. Обозначается символом **Ni**. Простое вещество никель – это пластичный, ковкий, переходный металл серебристо-белого цвета, при обычных температурах на воздухе покрывается тонкой плёнкой оксида. Имеет гранцентрированную кубическую решетку с периодом $a = 0,35238$ нм [a].

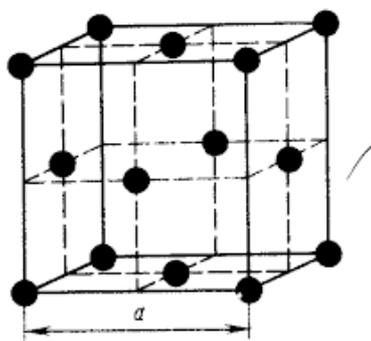


Рис. 1. Прямая решетка никеля (ГЦК)

Обратная решетка никеля(ОЦК) с параметром $a^* = \frac{2\pi}{a} = 17.831 \text{ нм}^{-1}$:

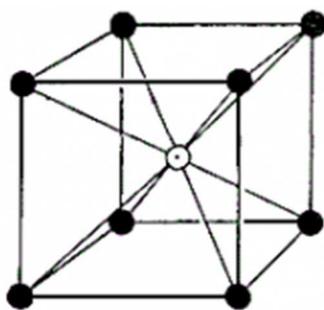


Рис. 2. Обратная решетка никеля(ОЦК)

Поверхность Ферми и зона Бриллюэна. Краткая характеристика

Кристалл никеля имеет поверхность Ферми как показано на рис. 3. В большинстве случаев находясь внутри представляющей собой многогранник зоны Бриллюэна, реальная поверхность Ферми имеет не сферическую форму, которую имеет идеальная поверхность Ферми [b].

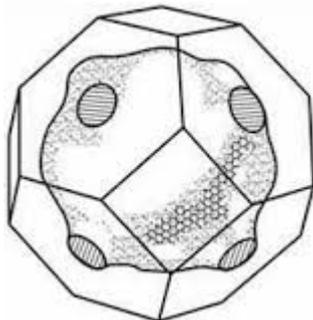


Рис. 3. Поверхность Ферми никеля внутри зоны Бриллюэна

В теории твердого тела энергия Ферми является одним из нескольких важных параметров кристалла, с учетом этого сравнение энергии Ферми никеля с обыкновенным металлом получает существенное значение для исследования свойств никеля.

Для обыкновенных металлов:

Концентрация атомов $n = 10^{22} \div 10^{23} \text{ см}^{-3} = 10^{29} \text{ м}^{-3}$

1) При температуре $T = 0 \text{ К}$, энергия Ферми:

$$\begin{aligned} E_F(0) &= \frac{h^2}{2m} \times \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2}{2 \times 9.1 \times 10^{-31}} \times \left(\frac{3 \times 10^{29}}{8 \times 3.14}\right)^{\frac{2}{3}} \\ &= 1.26 \times 10^{-18} \text{ Дж} \end{aligned}$$

2) При температуре $T > 0 \text{ К}$ ($T = 300 \text{ К}$), энергия Ферми:

$$\begin{aligned} E_F &\approx E_F(0) \times \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \times \left(\frac{kT}{E_F(0)}\right)^2\right] \\ &= 1.26 \times 10^{-18} \times \left[1 - \frac{3.14^2}{12} \times \left(\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{5.46 \times 10^{-18}}\right)^2\right] \\ &= 1.26 \times 10^{-18} \text{ Дж} \end{aligned}$$

Для металла никеля:

Концентрация электронов проводимости $n = \frac{Z \cdot \rho \cdot N_A}{M}$, где Z – число валентных электронов одного атома никеля, ρ – плотность металла никеля, M – молярная масса никеля.

1) При температуре $T = 0 \text{ К}$, энергия Ферми:

$$\begin{aligned} E_F(0) &= \frac{h^2}{2m} \times \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2}{2 \times 9.1 \times 10^{-31}} \times \left(\frac{3}{8 \times 3.14} \times \frac{2 \times 8900 \times 6.02 \times 10^{23}}{58.69 \times 10^{-3}}\right)^{\frac{2}{3}} \\ &= 1.88 \times 10^{-18} \text{ Дж} \end{aligned}$$

2) При температуре $T > 0 \text{ К}$ ($T = 300 \text{ К}$), энергия Ферми:

$$\begin{aligned} E_F &\approx E_F(0) \times \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \times \left(\frac{kT}{E_F(0)}\right)^2\right] \\ &= 1.88 \times 10^{-18} \times \left[1 - \frac{3.14^2}{12} \times \left(\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.88 \times 10^{-18}}\right)^2\right] \\ &= 1.88 \times 10^{-18} \text{ Дж} \end{aligned}$$

Энергия Ферми E_F при температурах 0 К и 300 К не различается в связи с тем, что величина в квадратных скобках, которая вычитается из единицы очень мала.

Исходя из полученных данных наглядно видно, что Ni близок к обыкновенным металлам по величине энергии Ферми.

На возможность создания новых материалов путем сборки малоразмерных объектов (атомов, молекул или их групп) указал нобелевский лауреат Р. Фейнман в 1959 г. Термин «нанотехнология» впервые предложил японец Н. Танигучи в 1974 г. На возможность создания материалов с размерами зерен менее 100 нм , которые должны обладать многими интересными и полезными дополнительными

свойствами по сравнению с традиционными микроструктурными материалами, указал немецкий ученый Г. Глейтер в 1981 г. С учетом этого для получения материала никеля с новыми свойствами надо уделить особое внимание на исследование наноструктуры никеля [с].

В таблице 1 представлено сравнение свойства никеля в микро- и наноструктурах [d].

Таблица 1

Свойства	Микроструктура	Наноструктура
Удельное электрическое сопротивление, кОм·м	68.4	25
Плотность, г/см ³	8.902	0.66
Температура плавления, К	1726	1725[6]
Температура кипения, К	3005	3125

Исходя из таблицы, очевидно, что удельное электрическое сопротивление и плотность никеля в наноструктурах существенно уменьшились по сравнению с микроструктурой, температура кипения в первом случае меньше чем во втором, а температура плавления никеля в микро- и наноструктурах почти одинакова.

Из литературных данных следует [e], что появления необычных свойств наносистем вызывают либо классический, либо квантовый размерный эффект.

Когда геометрический размер наноструктуры соизмерим с длиной свободного пробега носителей заряда проявляется классический размерный эффект; если геометрический размер наноструктуры соизмерим с длиной волны де Бройля электрона проявляется квантовый размерный эффект.

В наноструктуре никеля принимают скорость движения электрона $v = 10^6$ м/с, масса электрона $m = 9.1 \times 10^{-31}$ кг, то длина волны Дебройля $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 10^6}$ м = 0.7 нм. В данном случае рассматривается порошок никеля размером D порядка 70 нм, очевидно, что $\lambda \ll D$. Поскольку длина волны де Бройля значительно меньше размеров наночастиц никеля, то основное влияние на изменение свойств нанопорошка никеля по сравнению с микроструктурой оказывает классический размерный эффект.

Физические причины изменений свойств в наноструктуре никеля связаны с большой долей приповерхностных атомов:

- 1) Ненасыщенность атомных связей у поверхности.
- 2) Искажение решетки у поверхности.
- 3) Поверхностные эффекты механических свойств.

- 4) Тонкие физические эффекты взаимодействия электронов со свободной поверхностью.
- 5) Из-за малых размеров эффективный сток кристаллических дефектов.

Технология получения

В настоящее время порошок никеля определенного размера получают испарением техногенных и природных исходных материалов на ускорителе электронов в атмосфере различных газов при атмосферном давлении с последующим охлаждением высокотемпературного пара и улавливанием наночастиц в виде порошка [f].

Для получения порошка никеля размером 70 нм используется схема, представленная на рис. 4.

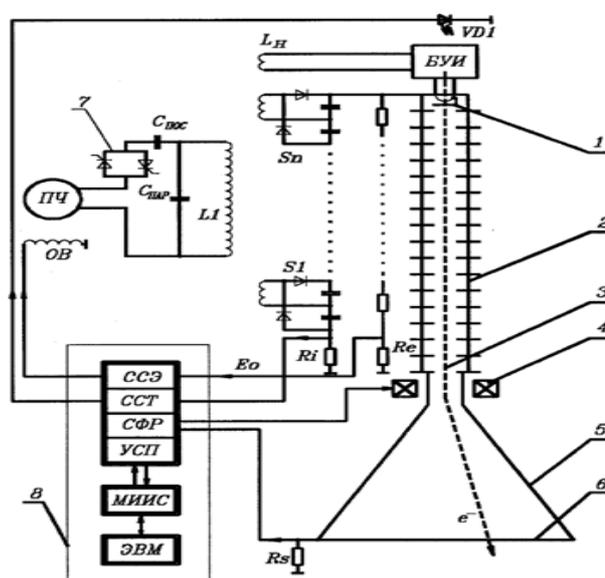


Рис. 4. Упрощенная электрическая схема ускорителя ЭЛВ [7]

1 – катод электронной пушки, 2 – ускорительная трубка, 3 – электронный пучок, 4 – катушки системы формирования раstra, 5 – выпускное устройство, 6 – титановая фольга, 7 – тиристорный ключ, 8 – система управления (ССЭ – система стабилизации энергии, ССТ – система стабилизации тока, СФР – система формирования раstra, МИИС – модульная информационно-измерительная система, ЭВМ – управляющий компьютер, УСП – система управления силовым питанием). ПЧ – преобразователь частоты, БУИ – блок управления инжектором.

Применение нанопорошка никеля

Уже сейчас нанопорошки никеля нашли широкое применение в качестве многофункциональных присадок к различного рода маслам, смазкам, доводочно-притирочным пастам и суспензиям. Также использование нанопорошков никеля в качестве активаторов позволяет ускорить процесс спекания промышленных порошков. Введение всего 0.5 ÷ 5 wt% наноникеля в промышленные смеси

снижает температуру спекания на $400 \div 800$ °С и сокращает его время в несколько раз. При этом повышаются твердость и ударная вязкость конечной продукции. Весьма перспективно использование нанопорошков никеля в композиционных материалах, содержащих пластмассы и полимеры. В этом случае возможно изготовление пластиковых магнитов, электропроводящей резины, красок и клеев [g].

Порошок никеля находит применение в катализе и материаловедении; в получении эластичного слоистого электропроводящего материала; получении мелкодисперсных покрытий на керамических, кварцевых, металлических, пластмассовых, композиционных изделиях любой сложности формы; в изготовлении конденсаторов; в электронной промышленности [d].

Пристатейные списки литературы

- a) URL:<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B8%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D1%8C> (дата обращения: 01.01.2010).
- b) ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: Учебник для вузов: В 6 т. / Под общей ред. Б. А. Калина. – М.: МИФИ, 2007.
- c) ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ / П.А. Витязя [и др.] ; под общ. Ред. П. А. Витязя и К. А. Солнцева. – Минск : Белорус. наука, 2011. – 283с. – ISBN 978-985-08-1292-6/
- d) URL: <http://www.rusnanonet.ru/goods/32001/> (дата обращения: 10.2013 г).
- e) Н.А. Азаренков, А.А. Веревкин, Г.П. Ковтун. ОСОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ, - 2009. – 69с.
- f) С.П. Бардаханов, Ю.Я. Гафнер, С.Л. Гафнер, А.И. Корчагин, В.И. Лысенко, А.В. Номоев. Получение нанопорошка никеля испарением исходного крупнодисперсного вещества на ускорителе электронов // Физика твердого тела. 2011. № 4. С.797-802
- g) С.П. Бардаханов, Ю.Я. Гафнер, С.Л. Гафнер, А.И. Корчагин, В.И. Лысенко, А.В. Номоев. ДВУХПИКОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРУ НАНОКЛАСТЕРОВ НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИСПАРЕНИИ КРУПНОДИСПЕРСНОГО ВЕЩЕСТВА // Вестник ТвГУ. Серия физика. 2001. № 6. С.76-86