

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$

В. Е. Антонов, Т. Е. Антонова, И. Т. Белаш, В. Г. Тиссен

Изучены фазовые превращения в системе $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ при давлениях до 6,7 ГПа и температурах до 350°С. Построена изотерма растворимости водорода в сплаве $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$ при 300°С. Исследовано $T\text{—}c$ сечение фазовой диаграммы твердых растворов $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ при атмосферном давлении и $T \lesssim -20^\circ\text{C}$. Проведены измерения намагниченности этих растворов при $4,2 \leq T \leq 200\text{ K}$ в полях до 4,5 Тл. Показано, что поведение магнитных свойств системы $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ согласуется с предсказаниями модели жесткой d -зоны.

Ранее нами были изучены твердые растворы водорода в никеле и его сплавах с медью, кобальтом, железом и марганцем. Было показано, что магнитные свойства этих растворов хорошо описываются в предположении, что основным эффектом гидрирования является увеличение степени заполнения электронами d -зоны металла-растворителя (модель жесткой d -зоны) [1]. Обосновать эту модель удалось благодаря большому разнообразию магнитных свойств гидрируемых сплавов, что позволило исследовать различные аспекты влияния на них водорода. Однако у всех изученных сплавов Ni—Me была одна общая черта — зависимости их магнитных свойств в широких интервалах концентраций хорошо описывались моделью жесткой зоны.

К совершенно иному классу магнетиков относятся сплавы Ni—Cr . К ним модель жесткой зоны полностью не применима даже в области малых концентраций хрома: ввиду того, что заряд ядра хрома много меньше, чем ядра никеля ($\Delta Z = 4$), виртуальные d -уровни хрома, растворенного в никелевой матрице, оказываются сдвинутыми выше уровня Ферми [2]. Изменение магнитных свойств сплавов Ni—Cr , содержащих 2, 4 и 7 ат. % Cr, при электролитическом насыщении водородом изучалось в работе [3]. Растворы Ni—Cr—H являются пока единственными изучавшимися растворами водорода на базе сплавов, для которых концентрационные зависимости магнитных свойств не подчиняются модели жесткой зоны. Поэтому представлялось интересным дополнительно исследовать поведение их магнитных свойств на массивных гомогенных образцах, полученных при условиях, близких к термодинамически равновесным, что позволяла сделать техника высоких давлений водорода. Было также интересно посмотреть, как легирование никеля хромом, столь резко изменяющее его зонную структуру, будет изменять фазовые равновесия в системе Ni—H , тем более, что знание этих равновесий необходимо для корректной трактовки данных магнитных измерений.

Легирование никеля хромом приводит к быстрому понижению спонтанной намагниченности σ_0 при $T = 0\text{ K}$ и точки Кюри T_c . Чтобы изучить влияние водорода на T_c сплава Ni—Cr непосредственно при высоком давлении водорода, мы выбрали для исследования сплав, содержащий 5 ат. % Cr, который обладает еще достаточно высокой точкой Кюри (у наших образцов $T_c = 146^\circ\text{C}$), чтобы при $T \sim T_c$ и высоком давлении водорода кинетика гидрирования оставалась достаточно быстрой для достижения раствором Ni—Cr—H равновесной концентрации за разумный промежуток времени.

Слиток $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$ выплавляли из электролитических Ni и Cr в индукционной печи в атмосфере аргона. После гомогенизации в вакууме при 1000°С в течение 6 ч и заковки в воде слиток прокатан в полосу толщиной 0,1 мм. Затем полоса отожжена в вакууме при 1000°С в течение 5 мин для снятия механических напряжений и вновь закалена в воде. Образцы изготовляли из этой полосы.

Сжатие водорода осуществлялось методом, предложенным в [4] (подробное описание метода см. в работе [5]). Для создания давлений до 2 ГПа использовались камеры типа «поршень — цилиндр», до 6,7 ГПа — типа «Торонд». Давление определяли с точностью соответственно $\pm 0,05$ и $\pm 0,2$ ГПа, температуру ± 5 и $\pm 15^\circ\text{C}$. Точки Кюри определяли методом дифференциального трансформатора [6]. Образцы $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{-H}$, предназначенные для исследования при атмосферном давлении, получали выдержкой в течение 6 ч при высоком давлении водорода и $T=300^\circ\text{C}$ с последующей закалкой до $T=-20^\circ\text{C}$. При атмосферном давлении заметное выделение водорода из образцов начиналось при $T \gtrsim -10 \dots 0^\circ\text{C}$. При комнатной температуре водород практически полностью выделяется из образцов менее чем за сутки. Концентрацию водорода в образцах $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{-H}$ вычисляли с погрешностью 2% по объему водорода, выделившегося в процессе их распада при нормальных условиях. Магнитность образцов измеряли с погрешностью 8% в импульсном магнитном поле до 4,5 Тл индукционным методом [7] в интервале температур 4,2...200 К; длительность импульса составляла $\approx 0,01$ с. Рентгеновские измерения проводили при $T=-190^\circ\text{C}$ фотометодом на дифрактометре ДРОН-2,0 с использованием $\text{FeK}\alpha$ -излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При высоком давлении водорода в никеле происходит изоморфный переход $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$, сопровождающийся скачкообразным увеличением растворимости водорода и параметра ГЦК решетки никеля [8]. Как видно из сравнения приведенных на рис. 1 изотерм электросопротивления никеля и сплава $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$ в атмосфере водорода при 300°C , легирование никеля хромом приводит к изменению формы аномалии на кривой $R(p_{\text{H}_2})$ при $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ переходе (характер этого изменения аналогичен происходящему при леги-

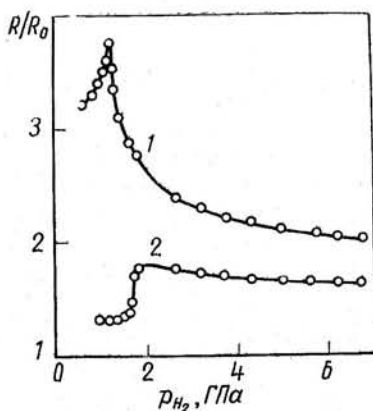


Рис. 1. Изотермы электросопротивления никеля (1) и сплава $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$ (2) в атмосфере водорода, полученные при ступенчатом повышении давления. R_0 — сопротивление образцов при атмосферном давлении и комнатной температуре.

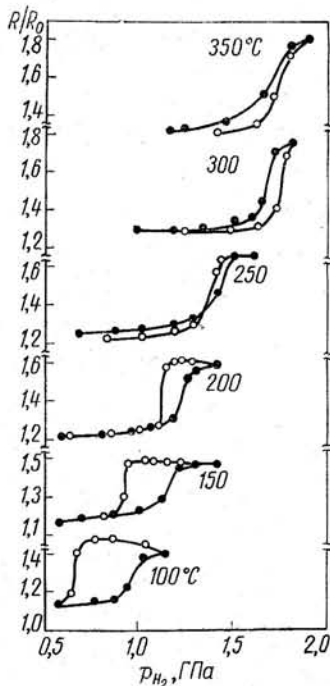


Рис. 2. Изотермы электросопротивления сплава Ni-Cr с 5 ат.% Cr в атмосфере водорода:

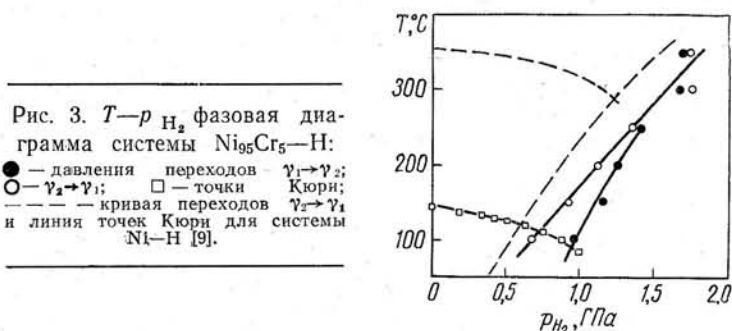
● — при повышении давления;
○ — при понижении; R_0 — сопротивление образцов при нормальных условиях.

рованием никеля марганцем, железом и кобальтом; ссылки на соответствующие работы см. в [1]). При более высоких давлениях сопротивление образцов $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{-H}$, как и образцов Ni-H , монотонно понижается вследствие увеличения растворимости водорода в их γ_2 -фазах.

На рис. 2 приведены изотермы электросопротивления для сплава $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$ в окрестностях переходов $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ и $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$ при температурах от 100 до 350°C . Кривые получены в процессе ступенчатого повышения и

понижения давления с выдержкой в каждой точке до прекращения временного дрейфа сопротивления, обусловленного диффузионным характером образования твердых растворов $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$. На график нанесены конечные значения R (кривые $R(p_{\text{H}_2})$ на рис. 1 получены тем же путем). При $T \geq 250^\circ\text{C}$ дрейф сопротивления после изменения давления в областях $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ и $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$ переходов продолжается в течение $\Delta t \sim 1$ ч, в однофазных областях $\Delta t \sim 15$ мин. При более низких температурах значения Δt быстро возрастали. Отметим, что кинетика достижения растворами $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ равновесных (при данных T и p_{H_2}) составов, характеризующаяся значениями Δt , оказалась более вялой, чем у растворов Ni—H [9].

Как видно из рис. 2, гистерезис превращения $\gamma_1 \rightleftharpoons \gamma_2$ в системе $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ уменьшается с повышением температуры и при $T \gtrsim 250^\circ\text{C}$ становится меньше погрешности измерения. Положения середин скач-



ков сопротивления, соответствующих фазовым переходам $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ и $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$, нанесены на фазовую T — p_{H_2} диаграмму (рис. 3). Штриховой линией на том же рисунке изображена кривая перехода $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$ в системе Ni—H [9]. Как видно из сравнения кривых перехода $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$, легирование никеля хромом приводит к смещению линии фазового превращения $\gamma_1 \rightleftharpoons \gamma_2$ в область более высоких давлений (сравнивать следует именно кривые $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$ переходов, так как в системах Me—H они всегда ближе к кривым термодинамического равновесия фаз γ_1 и γ_2 , чем кривые переходов $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ [10]).

На T — p_{H_2} диаграмме системы Ni—H кривая превращения $\gamma_1 \rightleftharpoons \gamma_2$ заканчивается в критической точке с координатами $T_{\text{кр}} = 390 \pm 40^\circ\text{C}$, $(p_{\text{H}_2})_{\text{кр}} = 1,75 \pm 0,15$ ГПа [9]. T — c проекция купола расслоения на фазы γ_1 и γ_2 в этой системе весьма несимметрична: при повышении температуры от 200 до 350°C минимальная растворимость водорода в γ_2 -фазе $n_{\gamma_2}^{\text{min}}$ уменьшается от ≈ 1 до $\approx 0,7$, а максимальная растворимость водорода в γ_1 -фазе не поднимается выше $n_{\gamma_1}^{\text{max}} \approx 0,02$ [9]. T — c проекция T — p_{H_2} — c фазовой диаграммы системы $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ оказалась более симметричной. При $T \leq 200^\circ\text{C}$ значения $n_{\gamma_2}^{\text{min}}$ и $n_{\gamma_1}^{\text{max}}$ в этой системе имели приблизительно ту же величину, что и в системе Ni—H , а при $T = 300^\circ\text{C}$, как видно из приведенной на рис. 4 изотермы растворимости водорода в сплаве $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$, $n_{\gamma_2}^{\text{min}}$ уменьшалась до $\approx 0,6 \dots 0,8$, а $n_{\gamma_1}^{\text{max}}$ возрастала до $0,1 \dots 0,2$. Возможно, такое поведение растворимости водорода в γ_1 - и γ_2 -фазах раствора $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ обусловлено понижением $T_{\text{кр}}$ в системе Ni—Cr—H по мере увеличения содержания хрома.

Кроме кривых $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ и $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$ переходов, на рис. 3 нанесена также линия точек Кюри T_c γ_1 -фазы растворов $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ (γ_2 -фаза оказалась парамагнитной в изученном интервале значений T и p_{H_2}). Дрейф точек Кюри после изменения давления водорода продолжался ~ 40 мин. На рис. 3 приведены конечные значения T_c . Значительное понижение T_c сплава $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$ в атмосфере водорода обусловлено увеличением содержания водорода в этом сплаве по мере повышения давления, так как

измерения в инертной среде (силикон) показали, что при $p \leq 2$ ГПа точка Кюри сплава $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$ слабо и приблизительно линейно понижается с давлением, наклон $(dT_c/dp) = -1 \pm 0,5$ град·ГПа⁻¹. Как видно из рис. 3, поведение точек Кюри раствора $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ аналогично таковому у раствора Ni—H . Отметим, что одинаковое по порядку величины изменение T_c обоих растворов происходит при увеличении содержания в них водорода до приблизительно одинаковых значений (γ_1 -фазы растворов Ni—H и $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ имеют составы $n \sim 0,02$ и $n = 0,03 \pm 0,02$ соответственно при $p_{\text{H}_2} = 1,25$ ГПа, $T = 270^\circ\text{C}$ и $p_{\text{H}_2} = 1$ ГПа, $T = 100^\circ\text{C}$).

Рассмотрим результаты исследования образцов $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ при атмосферном давлении. В процессе извлечения из камеры высокого давления эти образцы находились при атмосферном давлении и $T \approx -20^\circ\text{C}$ в течение нескольких минут. Для всех изученных нами ранее растворов Ni—Me—H ($\text{Me} = \text{Cu}, \text{Co}, \text{Fe}, \text{Mn}$, см. [1]) этого было достаточно, чтобы их фазовый состав пришел в соответствие с метастабильной $T\text{—}c$

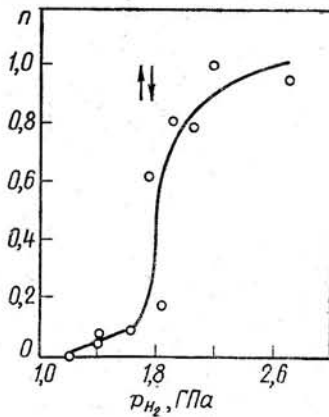


Рис. 4. Содержание водорода в образцах $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$, полученных выдержкой в течение 6 ч при $T = 300^\circ\text{C}$ и давлениях водорода, указанных на оси абсцисс. При повышении давления до 6,7 ГПа растворимость водорода в сплаве возрастает до $n = 1,14$. Стрелками указаны давления переходов (\uparrow) $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$ и (\downarrow) $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1$ по данным резистометрии.

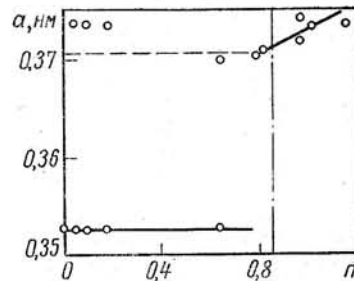
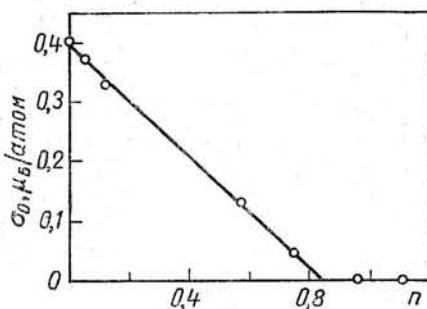


Рис. 5. Значения параметров ГЦК подрешетки металла для γ_1 - и γ_2 -фаз растворов $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ при $T = -190^\circ\text{C}$. Штриховая линия — наиболее вероятное равновесное значение параметра a_{γ_2} для двухфазных образцов; штрих-пунктирная линия разделяет области, в которых образцы должны состоять лишь из γ_2 -фазы и из смеси γ_1 - и γ_2 -фаз.

диаграммой при атмосферном давлении. Данные рентгеновского исследования образцов $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, образцы с $n \leq 0,63$ состоят из смеси фаз γ_1 и γ_2 , причем параметр a_{γ_1} фазы γ_1 в пределах ошибки измерения не отличается от параметра a_0 исходного сплава $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5$, что указывает на малую растворимость водорода в γ_1 -фазе раствора $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$. В случае образцов с $n \geq 0,8$ на дифрактограммах имеются лишь линии γ_2 -фазы. Обращает на себя внимание значительный разброс значений a_{γ_2} для γ_2 -фазы в двухфазных ($\gamma_1 + \gamma_2$) образцах. Вероятно, этот разброс обусловлен тем, что кинетика расслоения на фазы γ_1 и γ_2 в растворах $\text{Ni}_{95}\text{Cr}_5\text{—H}$ более вялая, чем в ранее изученных растворах Ni—Me—H , и выдержка в течение нескольких минут при $T \approx -20^\circ\text{C}$ оказывается недостаточной для того, чтобы их фазовый состав пришел в полное соответствие с $T\text{—}c$ диаграммой при атмосферном давлении (отметим, что к заметному изменению параметров γ_2 -фаз двухфазных образцов не привела и их выдержка при $T \approx -20^\circ\text{C}$ в течение 1 ч; отжиг при более высокой температуре невозможен ввиду распада образцов на металл и молекулярный водород, начинающегося при $T \approx -10^\circ\text{C}$).

На рис. 6 приведены значения спонтанной намагниченности σ_0 при $T=0$ К для образцов $Ni_{95}Cr_5-H$, полученных в данной работе. Обработка данных магнитных измерений проводилась с помощью уравнений теории очень слабо коллективизированного ферромагнетизма [11], которые, как было показано в работе [12], хорошо описывают поведение магнитных свойств сплавов $Ni-Cr$. В полной аналогии с тем, как это было сделано в случае растворов $Ni-H$ [13], анализ совокупности данных о температурных зависимостях спонтанной намагниченности и рентгеновских данных для образцов $Ni_{95}Cr_5-H$ показал, что γ_2 -фаза растворов $Ni_{95}Cr_5-H$ парамагнитна при составах вплоть до $n_{\gamma_2}^{min}$. Намагниченность двухфазных образцов пропорциональна содержанию в них фазы γ_1 (обладающей значением σ_0 , близким к таковому для исходного сплава $Ni_{95}Cr_5$), и, следовательно, состав $n_0 \approx 0,85$, для котором приблизительно линейная зависимость $\sigma_0(n)$ для двухфазных образцов

Рис. 6. Зависимость спонтанной намагниченности σ_0 при $T=0$ К от содержания водорода n в образцах $Ni_{95}Cr_5-H$. Размерность σ_0 : магнетон Бора на атом сплава $Ni_{95}Cr_5$.



пересекает ось $\sigma_0=0$, есть $n_{\gamma_2}^{min}$. Отметим, однако, что ввиду возможных существенных отклонений состава γ_2 -фазы в двухфазных образцах $Ni_{95}Cr_5-H$ от равновесных значений, на что указывает большой разброс значений параметра a_{γ_2} этой фазы (см. рис. 5), данное значение $n_{\gamma_2}^{min} \approx 0,85$ можно рассматривать лишь как грубую оценку.

Посмотрим теперь, как наши результаты согласуются с данными [3]. В этой работе было показано, что электролитическое насыщение водородом приводит к исчезновению намагниченности при $T=4$ К у сплавов $Ni_{98}Cr_2$ и $Ni_{96}Cr_4$. В случае насыщения водородом сплава $Ni_{93}Cr_7$ его точка Кюри понижается на ~ 70 К, а намагниченность при $T=4$ К — на $\approx 0,12 \mu_B/\text{атом}$. Авторы [3] объяснили это образованием γ_2 -фазы раствора $Ni_{93}Cr_7-H$, обладающей меньшими, чем исходный сплав, значениями T_c и σ_0 . Нам представляется более вероятным другое объяснение. Фаза γ_2 образца $Ni_{93}Cr_7-H$ (содержание которой в образце, кстати, составляло лишь $\approx 10\%$, согласно [3]) была парамагнитной при $T \geq 4$ К, а наблюдавшееся понижение T_c (и частично σ_0) было обусловлено растворением водорода в γ_1 -фазе. Действительно, ввиду отмечавшейся выше довольно вялой кинетики перераспределения водорода в образцах $Ni-Cr-H$, при насыщении водородом сплавов $Ni-Cr$ в [3] происходило пересыщение их γ_1 -фаз водородом, на что указывает значительное увеличение параметров a_{γ_1} этих фаз по сравнению с параметрами a_0 сплавов без водорода (см. [3], рис. 2). Для сплава $Ni_{93}Cr_7$, например, были получены $a_0=0,3520$ нм, $a_{\gamma_1}=0,3531$ нм.

У всех изученных к настоящему времени растворов $Ni-Me-H$ при $n \leq 0,8$ увеличение концентрации водорода приводило к приблизительно линейному повышению объема элементарной ячейки ГЦК подрешетки металла с наклоном $\beta = (8 \dots 10) \cdot 10^{-3}$ нм³/атом H [1]. Полагая, что эта закономерность справедлива и для растворов $Ni_{93}Cr_7-H$, для концентрации водорода в γ_1 -фазе образцов, синтезированных в работе [3], получим $n_{\gamma_1} \sim (a_{\gamma_1}^3 - a_0^3)/\beta \approx 0,07$. Как видно из сравнения с приведен-

ными в настоящей работе данными для растворов Ni—H и Ni₉₅Cr₅—H, растворения такого количества водорода в сплаве Ni₉₃Cr₇ вполне достаточно для понижения его точки Кюри на ≈ 70 К, что и наблюдалось в эксперименте [3]. Что касается намагниченности, то насыщение водородом сплавов Ni—Me с почти заполненной *d*-зоной, к числу которых относится и Ni₉₃Cr₇, должно приводить к понижению σ_0 с наклоном $d\sigma_0/dn \lesssim -1 \mu_B/\text{атом H}$ [1]. Даже если бы полученный в [3] образец Ni₉₃Cr₇—H состоял целиком из γ_1 -фазы с $n_{\gamma_1} \sim 0,07$ (а в нем содержалось также и некоторое количество парамагнитной γ_2 -фазы), он должен был обладать намагниченностью на $\approx |\partial\sigma_0/\partial n| \cdot n_{\gamma_1} \gtrsim 0,07 \mu_B/\text{атом}$ меньшей, чем сплав без водорода, что по порядку величины согласуется с наблюдавшимся уменьшением σ на $\sim 0,12 \mu_B/\text{атом}$.

Таким образом, можно считать, что результаты наших исследований и работы [3], полученные на образцах, синтезированных различными методами, согласуются между собой и показывают, что растворение водорода в сплавах Ni—Cr приводит к быстрому понижению их T_c и σ_0 . Именно такого поведения магнитных свойств растворов Ni—Cr—H и следовало ожидать в случае применимости к ним модели жесткой *d*-зоны [1]. Виртуальные *d*-уровни хрома в сплавах Ni—Cr лежат выше уровня Ферми и, следовательно, сильно размыты по энергии [2]. Электроны, поставляемые атомами водорода, вынуждены заполнять *d*-зону никеля, имеющую высокую плотность состояний на уровне Ферми, что и приводит к понижению σ_0 и T_c . Можно констатировать, что сейчас исследовано влияние водорода на свойства зонных магнетиков практически всех возможных типов, и во всех случаях это влияние непротиворечиво описывается моделью жесткой *d*-зоны.

Авторы признательны К. А. Пересаде и А. Н. Грачеву за помощь в подготовке и проведении экспериментов, а также В. Г. Глебовскому, в группе которого был выплавлен сплав Ni₉₅Cr₅.

Институт физики твердого тела
АН СССР

Поступила в редакцию
5 апреля 1983 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понятовский Е. Г., Антонов В. Е., Белаш И. Т. Свойства фаз высокого давления в системах металл—водород. — УФН, 1982, 137, № 4, с. 663—705.
2. Friedel J. Metallic alloys. — Nuovo Cimento Suppl. Ser. 10, 1958, 7, № 2, p. 287—311.
3. Zimmermann G. J., Bauer H. J. Einfluss interstitiellen Wasserstoff auf Magnetismus und Gitterkonstanten ferromagnetischer Ni—Cr—Legierungen. — Zs. Phys., 1969, 229, № 1, S. 154—162.
4. Белаш И. Т., Понятовский Е. Г. Способ создания высокого давления водорода. Авт. свид. № 741105. — Бюлл. изобр., 1980, № 22, с. 223.
5. Ponyatovsky E. G., Antonov V. E., Belash I. T. High pressure phases in the metal-hydrogen systems. — In: Proc. 8th AIRAPT/19th EHPRG Conf., 17—22 Aug. 1981, Uppsala, Sweden, 1, p. 80—94.
6. Дубовка Г. Т., Понятовский Е. Г. О смещении точек Кюри в сплавах Fe—Ni под действием давления. — ФММ, 1972, 33, вып. 3, с. 640—642.
7. Jacobs I. S., Lawrence P. E. Measurement of magnetization curves in high pulsed magnetic fields. — Rev. Sci. Instrum., 1958, 29, № 8, p. 713—714.
8. Baranowski B., Wiśniewski R. Formation of nickel hydride from nickel and gaseous hydrogen. — Bull. Acad. Polon. Sci. Sér. Sci. chim., 1966, 14, № 4, p. 273—276.
9. Антонов В. Е., Белаш И. Т., Понятовский Е. Г. Фазовые *T—P* диаграммы систем Ni—D и Ni—H при температурах до 375° С и давлениях до 20 кбар. — ДАН СССР, 1977, 233, № 6, с. 1114—1117.
10. Baranowski B., Bochenka K. The free energy and entropy of formation of nickel hydride. — Zs. Phys. Chem. N. F., 1965, 45, № 3/4, p. 140—152.
11. Edwards D. M., Wohlfarth E. P. Magnetic isotherms in the band model of ferromagnetism. — Proc. Roy. Soc., 1968, 303A, № 1472, p. 127—137.
12. Besnus M. J., Cottreger Y., Munsch G. Magnetic properties of Ni—Cr alloys. — Phys. stat. sol. (b), 1972, 49, № 2, p. 597—607.
13. Тиссен В. Г., Антонов В. Е., Белаш И. Т. и др. Намагниченность твердых растворов Ni—H. — ДАН СССР, 1978, 242, № 6, с. 1390—1392.