

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ ВОДОРОДА В СПЛАВАХ НИКЕЛЬ—ЖЕЛЕЗО

*В. Е. Антонов, И. Т. Белаш, В. Ф. Дегтярева, Б. К. Пономарев,
Е. Г. Понятовский, В. Г. Тиссен*

У растворов водорода с атомным отношением $H/Me \geq 1$ на базе ряда ГЦК сплавов Ni—Fe изучено поведение спонтанной намагниченности ϵ_0 при ОК и параметра ГЦК подрешетки металла при 83 К. У инвара с 67.5 ат. % Fe исследована зависимость точки Кюри $T_c = T_c(P_{H_2})$ при $P_{H_2} \leq 50$ кбар. Образцы Me—H получали закалкой после выдержки фольги изучаемых сплавов при давлении водорода до 70 кбар.

При высоком давлении водорода в никеле происходит изоморфное превращение $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2$, где γ_1 и γ_2 — обедненный и обогащенный водородом растворы внедрения на базе ГЦК кристаллической решетки никеля [1]. Линия этого превращения на $T-P_{H_2}$ фазовой диаграмме системы Ni—H оканчивается в критической точке. Легирование никеля железом приводит к понижению критической температуры [2, 3]. При содержании железа более 20–40 ат. % растворимость водорода при $P_{H_2} \leq 50$ –70 кбар и температура выше комнатной становится непрерывной функцией давления [2, 4, 5].

Ранее нами было изучено влияние давления водорода до 20 кбар на точки Кюри T_c никеля [6, 7], сплавов Ni—Fe, содержащих 5, 10, 15 ат. % Fe [2], и двух инварных сплавов Ni—Fe с 64 и 67.5 ат. % Fe [4]. В работе [5] исследовано влияние растворенного водорода на спонтанную намагниченность при атмосферном давлении у сплавов системы $Fe_{65}(Ni_{1-x}Mn_x)_{35}$.

В данной работе изучено поведение намагниченности растворов водорода в неупорядоченных ГЦК сплавах Ni—Fe, содержащих 10, 20, 40, 60, 66.1 и 67.5 ат. % Fe. Образцы Ni—Fe—H получали закалкой до $T < 273$ К после насыщения водородом путем выдержки в течение нескольких часов при $T = 523$ К и давлениях водорода до 70 кбар. Для сплава с 67.5 ат. % Fe построена зависимость точки Кюри от давления водорода при $P_{H_2} \leq 50$ кбар. Кроме того, для растворов водорода в сплавах с 20 и 67.5 ат. % Fe при $P = 1$ атм и $T = 83$ К определена зависимость параметра ГЦК подрешетки металла от содержания водорода.

1. Приготовление образцов и методика экспериментов

Сплавы выплавлены в индукционной печи в атмосфере аргона из никеля NO и карбонильного железа. Слитки подвергли гомогенизационному отжигу при $T = 1400$ К в течение 10 час с последующей закалкой в воде. После прокатки в холодном состоянии в фольгу ~ 0.2 мм образцы отожгли для снятия механических напряжений при $T = 1400$ К в течение 15 мин и вновь закалили в воде. Для изготовления образцов, содержащих 66.1 и 67.5 ат. % Fe, использовалась та же фольга, что и в работах [4, 5].

Образцы для измерения намагниченности массой 20–30 мг набирали

из полосок фольги размерами 10×1.5 мм. Намагниченность измеряли в импульсном магнитном поле длительностью ~ 0.01 с индукционным методом [8] при температурах от 80 до 220 К. Проведению измерений при более высоких температурах препятствует разложение образцов Ni—Fe—H на металл и молекулярный водород, скорость которого становится заметной начиная с ~ 240 К [4, 5].

Точки Кюри T_c сплава с 67.5 ат.% Fe измеряли методом дифференциального трансформатора по аномалиям на изобарах температурной зависимости начальной магнитной проницаемости μ_0 [9]. Сердечником трансформатора служило колечко с внешним диаметром ~ 4 мм, вырубленное из фольги этого сплава. Температуру измеряли термопарой хромель-алюмель, изолированной от воздействия водорода. Точность определения давления составляла ± 4 кбар, температуры ± 15 К. Поправки к показаниям термопары из-за воздействия высокого давления мы не учитывали.

Способы получения метастабильных при $P=1$ атм растворов Ni—Fe—H, путем закалки образцов после насыщения водородом при высоком давлении (до 70 кбар), их химического анализа (с точностью $\sim 3\%$ при $n \geq 0.02$) и рентгеновских съемок при атмосферном давлении (использовалось CoK_α излучение) описаны в [4].

2. Экспериментальные результаты

Зависимость объема от содержания водорода для сплавов с 20 и 67.5 ат.% Fe. На рис. 1 приведены результаты измерения при атмосферном давлении и $T=83$ К зависимости $\Delta V_0 = V(n) - V(0)$, где $V(n)$ и $V(0)$ — объемы элементарных ячеек сплавов Ni—Fe с содержанием водорода n и без водорода. Штрихпунктиром изображена зависимость $\Delta V_0(n)$ при $T=293$ К, хорошо выполняющаяся для целого ряда растворов Me—H с ГЦК подрешеткой переходного ме-

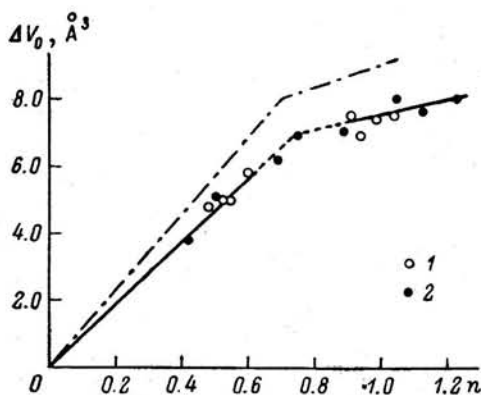


Рис. 1. Зависимости $\Delta V_0 = V(n) - V(0)$ при $T=83$ К для сплавов.

Ат.% Fe: 1 — 20, 2 — 67.5.

талла палладия и его сплавов с Ir, Au, Ag, Pt, Cu, сплавов Ni—Cu [10]. Видно, что зависимость $\Delta V_0(n)$ для сплавов Ni—Fe заметно отклоняется от изображенной штрихпунктиром, но характернее остается

прежним: при $n < 0.8$ наклон $\beta = \frac{\partial}{\partial n} \Delta V_0(n)$ почти постоянен (и составляет $\beta \approx 9.5 \text{ \AA}^3$), а при $n > 0.8$ сильно уменьшается (до $\beta \sim 2.5 \text{ \AA}^3$). Отметим, что отклонение полученной в данной работе зависимости $\Delta V_0(n)$ от полученной в [10] не связано с различием температур (83 и 293 К), при кото-

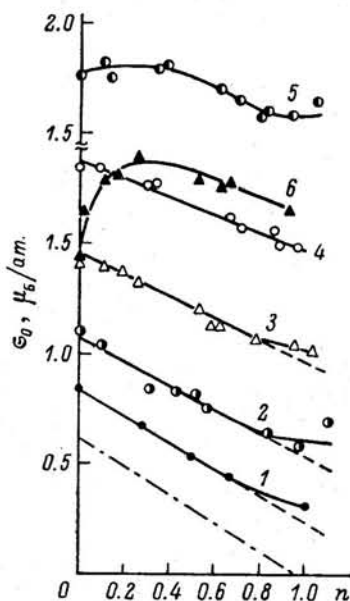


Рис. 2. Зависимость спонтанной намагниченности c_0 при ОК и атмосферном давлении от содержания водорода в сплавах Ni—Fe с различной концентрацией железа.

Ат.% Fe: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 40, 4 — 60, 5 — 66.1, 6 — 67.5. Штрихпунктир — та же зависимость для Ni (расчет).

рых производились измерения: величины ΔV_0 для сплава с 20 ат.% Fe и $n=0.89$, измеренные при температурах 83 и 220 К, совпадают в пределах ошибки эксперимента $\delta(\Delta V_0) \sim 0.5 \text{ \AA}^3$, которая определяется в основном шириной дифракционных линий сплавов Ni—Fe и растворов водорода на их основе.

З а в и с и м о с т ь $\sigma_0(n)$. Температурная зависимость спонтанной намагниченности никеля содержит как спи-волновой, так и стонеровский члены [11]. Можно предположить, что это имеет место и для исследованных нами образцов Ni—Fe—H. Значения спонтанной намагниченности σ_0 при $T=0$ К, полученные экстраполяцией экспериментальных значений спонтанной намагниченности по законам T^2 и $T^{3/2}$, совпадают в пределах погрешности, которая составляет 5%.

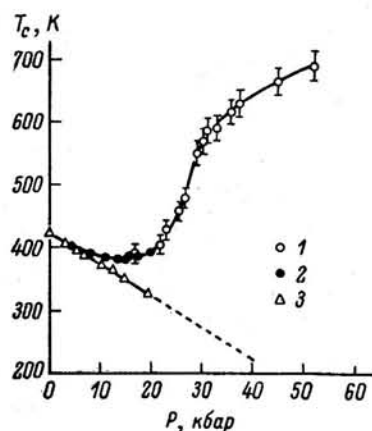


Рис. 3. Зависимости точек Кюри сплава с 67.5 ат.% Fe от давления в атмосфере водорода (1 — данные настоящей работы, 2 — данные [4]) и в инертной среде (3 — данные [4]).

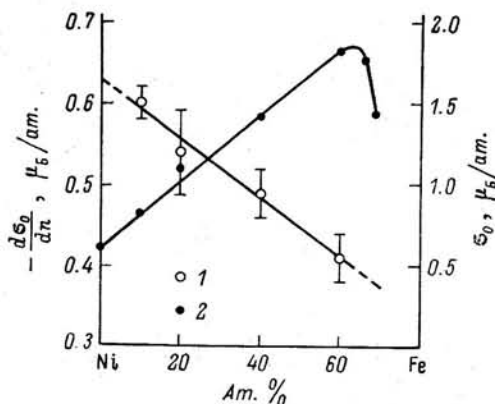


Рис. 4.

1 — наклоны $d\sigma_0/dn$ при $n < 0.8$ для сплавов, содержащих ≤ 60 ат.% Fe (см. рис. 2); 2 — зависимость σ_0 сплавов Ni—Fe от содержания железа. Размерность величин $d\sigma_0/dn$ и σ_0 : $\mu_B/\text{ат.}$ сплава Ni—Fe, n — величина безразмерная.

Как видно из рис. 2, у сплавов с 10, 20 и 40 ат.% Fe σ_0 уменьшается с увеличением n , причем при $n \leq 0.8$ зависимость $\sigma_0(n)$ близка к линейной, а при $n > 0.8$ начинается небольшое, но систематическое отклонение σ_0 в сторону более высоких значений. Зависимость $\sigma_0(n)$ для сплава с 60 ат.% Fe близка к линейной вплоть до $n=1$. Поведение σ_0 сплавов с 66.1 и 67.5 ат.% Fe более сложное. У сплава с 66.1 ат.% Fe σ_0 слабо зависит от концентрации водорода до $n \sim 0.5$, а затем начинает уменьшаться. У сплава с 67.5 ат.% Fe σ_0 при малых n растет с концентрацией водорода, достигает максимального значения $\sim 1.85 \mu_B/\text{ат.}$ при $n \sim 0.3$, а затем монотонно уменьшается.

З а в и с и м о с т ь $T_c(P_{H_2})$ сплава с 67.5 ат.%. Результаты по определению зависимости точки Кюри этого сплава от давления в инертной среде и в водороде приведены на рис. 3. Видно, что в инертной среде T_c сплава при давлениях до 20 кбар понижается по линейному закону с наклоном $(dT_c/dP)_{\text{ин}} = -5.05 \pm 0.1 \text{ К} \cdot \text{кбар}^{-1}$ [4]. В ряде работ (см., например, [12]) показано, что для инваров Ni—Fe зависимость $T_c(P)$ в инертной среде близка к линейной (штриховая линия на рис. 3) и при более высоких давлениях.

Рост концентрации водорода в сплаве по мере увеличения давления приводит к отклонению зависимости $T_c(P_{H_2})$ от таковой в инертной среде в сторону более высоких T_c . При $P_{H_2} > 15$ кбар точки Кюри растворов $\text{Ni}_{0.325}\text{Fe}_{0.675}\text{—H}$ начинают повышаться, достигая ~ 700 К при $P_{H_2} = 50$ кбар. Во втором столбце таблицы приведены значения концентрации водорода n на линии точек Кюри в сплаве с 67.5 ат.% Fe при $P_{H_2} = 20, 35$ и 51 кбар. Состав по водороду определялся на образцах, полученных закалкой после выдержки при $T = T_c(P_{H_2})$ в течение 2 час, что

Параметры исследованного материала

| x_{Fe} | n | P , кбар | $-\xi n$ | T_c^n , К | T_c^P , К | $T_c^n + T_c^P$, К | $T_c^{ЭКСП}$, К | T_c^V , К |
|----------|-------|------------|----------|-------------|-------------|---------------------|------------------|-------------|
| 0.675 | 0.041 | 20 | 0.018 | 58 | 2 | 60 | 71 | 55 |
| 0.675 | 0.735 | 35 | 0.136 | 285 | 90 | 375 | 365 | — |
| 0.675 | 0.99 | 51 | 0.183 | 365 | 160 | 525 | 520 | — |
| 0.1 | 0.395 | 21.5 | 0.1 | -115 | -5 | -120 | -145 | -75 |

Примечание. Во втором столбце указаны значения n при $P_{H_2} = P$ из третьего столбца $T = T_c(P_{H_2})$.

значительно превышает время насыщения сплава водородом до равновесной концентрации, которое мы оценивали по прекращению временного дрейфа точки Кюри сплава после создания нужного давления [4]. Отметим, что в интервале давлений, где растворимость водорода в сплаве растет наиболее быстро (~ 25 – 35 кбар), наблюдается и самая крутая зависимость $T_c(P_{H_2})$ раствора $Ni_{0.325}Fe_{0.675}-H$.

3. Обсуждение

Спонтанная намагниченность $\sigma_0(n)$. Как видно из рис. 2, σ_0 сплавов, содержащих ≤ 60 ат. % Fe, приблизительно линейно уменьшается с n при $n < 0.8$. Напомним, что состав $n \sim 0.8$ является особым для всех изученных к настоящему моменту растворов внедрения водорода на базе ГЦК подрешетки переходного металла: при $n > 0.8$ изменяется характер зависимости $\Delta V_0(n)$. Природа этого эффекта пока не ясна. Например, существует предположение, что при $n > 0.8$ водород начинает занимать в этих металлах не только окта-, но и тетраэдрические междоузлия [7].

На рис. 4 приведены наклоны $\partial\sigma_0/\partial n$, полученные методом наименьших квадратов при линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей $\sigma_0(n)$ при $n < 0.8$ для сплавов, содержащих ≤ 60 ат. % Fe. Из рисунка видно, что величины $|\partial\sigma_0/\partial n|$ монотонно и приблизительно линейно возрастают при уменьшении содержания железа в сплавах. Экстраполяция на никель дает $\partial\sigma_0/\partial n = -0.63 \mu_B/\text{ат.}$ Зависимость $\sigma_0(n)$ с этим наклоном изображена для никеля штрихпунктиром на рис. 2. Согласно нейтронографическим данным работы [13], состав гидрида никеля γ_2 , сосуществующего с фазой γ_1 при атмосферном давлении и комнатной температуре, $n_2^{min} = 0.6 \pm 0.1$. Как видно из рис. 2, этот состав близок к предельному, при котором еще может существовать ферромагнитное упорядочение. Изученные нами γ_2 -образцы $Ni-H$ при $n \geq 0.8$ и $T \geq 83$ К являются парамагнетиками. Таким образом, для решения вопроса, может ли гидрид никеля быть ферромагнетиком, необходимы измерения при более низких температурах.

Никель хорошо описывается моделью зонного ферромагнетизма [14]. Вблизи $T=0$ К его можно рассматривать как сильный зонный ферромагнетик. Концентрационная зависимость σ_0 сплавов $Ni-Fe$, содержащих до 60 ат. % Fe, близка к линейной, согласуется с кривой Слэтера—Полинга и имеет наклон $\partial\sigma_0/\partial x_{Fe} \approx 2.1 \mu_B/\text{ат.} = 1.05 \mu_B/\text{электрон}$ [15]; см. также наши данные на рис. 4; x_{Fe} — атомная доля железа в сплаве $Ni-Fe$), т. е. хорошо описывается моделью жесткой зоны для сильных ферромагнетиков.

Водород, внедряясь в металлы конца d -периодов таблицы Менделеева, и в частности в сплавы $Ni-Fe$, не должен образовывать связанных состояний ниже уровня Ферми и отдает свой s -электрон в зону проводимости металла [16]. Поскольку, как указывалось выше, сплавы $Ni-Fe$, содержащие ≤ 60 ат. % Fe, можно считать сильными зонными ферромагнетиками, при внедрении в них водорода в приближении жесткой зоны

будем иметь $\partial\sigma_0^*/\partial n = -1$ μ_B /ат. Как видно из рис. 4, экспериментальные величины $\partial\sigma_0/\partial n$ лежат в пределах от -0.6 для сплава с 10 ат. % Fe до -0.4 μ_B /ат. для сплава с 60 ат. % Fe.

Следовательно, водород существенным образом деформирует зонную структуру сплавов Ni—Fe, что и следовало ожидать исходя из расчетов зонных структур гидридов ряда переходных металлов, в частности никеля и его ближайшего аналога — палладия [17, 18]. Согласно этим расчетам, увеличение числа протонов в междоузлиях данных металлов деформирует энергетический спектр таким образом, что возрастает число состояний ниже уровня Ферми и, следовательно, лишь часть электронов ($\sim 0.4 \div 0.1$ электрона/протон для Pd и Ni [17]), поставляемых атомами водорода в зону проводимости, заполняет состояния выше уровня Ферми, а часть уходит на эти дополнительные уровни ниже него. Как видно, знак и порядок величин $\partial\sigma_0/\partial n$ в изученных нами сплавах согласуется с этими расчетами.

Растворяясь в металлах, водород сильно растягивает их кристаллическую решетку. Поскольку σ_0 сплавов Ni—Fe, особенно инварного диапазона концентраций, заметно зависит от объема [19], представляет интерес оценить роль объемных эффектов в изменении σ_0 при внедрении в сплавы водорода. Напомним также, что при $P \leq 20$ кбар отклонение зависимости точек Кюри инваров Ni—Fe с 64 и 67.5 ат. % Fe в атмосфере водорода от зависимости в инертной среде оказалось обусловленным в основном именно объемными эффектами [4]. Итак, допустим, что по крайней мере при $n \ll 1$ из общего эффекта изменения σ_0 с концентрацией водорода можно выделить слагаемое, связанное с объемом. Тогда вклад объемных изменений в начальный наклон зависимостей $\sigma_0(n)$ составит

$$\left. \frac{\partial\sigma_0^V}{\partial n} \right|_{n=0} \approx \left(\frac{\partial\sigma_0}{\partial V} \right)_{ин} \beta \approx - \left(\frac{\partial\sigma_0}{\partial P} \right)_{ин} \frac{\beta}{kV},$$

где k — сжимаемость, V — объем элементарной ячейки сплава Ni—Fe при $T=0$ К; ин — инертная среда.

Используя величины σ_0 и β , полученные в данной работе, $\frac{1}{\sigma_0} \left(\frac{\partial\sigma_0}{\partial P} \right)_{ин}$ из работ [20, 21], k — при $T=288$ К — из [22], V — также при 288 К — из [23] (пересчитанные на $T=0$ К с учетом коэффициентов теплового расширения, взятых из работы [24]), для образцов, содержащих 0, 40 и 60 ат. % Fe, получим соответственно $\partial\sigma_0^V/\partial n|_{n=0} \approx 0.1, 0.3$ и 2 μ_B /ат. Как видим, вклад объемных изменений в $\partial\sigma_0/\partial n|_{n=0}$ заметен и для никеля, а у сплава с 40 ат. % Fe способен даже по порядку величины обусловить отклонение наблюдаемого значения $\partial\sigma_0/\partial n$ от $\partial\sigma_0^*/\partial n = -1$ μ_B /ат. Однако уже для сплава с 60 ат. % Fe величина $\partial\sigma_0^V/\partial n$ оказывается столь велика, что разность между нею и экспериментальным значением $\partial\sigma_0/\partial n$ в принципе невозможно скомпенсировать, даже полагая, что увеличение электронной концентрации приводит к изменению намагниченности, как в модели жесткой зоны

$$\Delta \left. \frac{\partial\sigma_0}{\partial n} \right|_{n=0} = \frac{\partial\sigma_0^*}{\partial n} + \left. \frac{\partial\sigma_0^V}{\partial n} \right|_{n=0} - \frac{\partial\sigma_0}{\partial n} \approx -1 + 2 + 0.4 = 1.4 \mu_B /ат.$$

Более того, нет никаких оснований предполагать, что по мере легирования образца водородом величина $\partial\sigma_0^V/\partial n$ будет сохранять постоянное значение, а между тем зависимость $\sigma_0(n)$ для сплава с 60 ат. % Fe близка к линейной (рис. 2).

Таким образом, следует, по-видимому, констатировать, что даже при $n \ll 1$ эффект влияния водорода на σ_0 железо-никелевых сплавов нельзя описать как сумму двух слагаемых, связанных с изменением электронной концентрации и объема.

Тем не менее оказывается возможным внести некоторые элементы порядка и даже полуколичественного описания в порождаемый таким заключением хаос экспериментальных данных.

Концентрационные зависимости спонтанной намагниченности сплавов с 66.1 и 67.5 ат. % Fe при замещении железа никелем (рис. 4) и введении в сплавы водорода (рис. 2) качественно подобны: при некоторой концентрации σ_0 достигает максимального значения $\sigma_0^{\max} \approx 1.86 \div 1.9 \mu_B/\text{ат.}$, а затем начинает убывать. У сплавов с $x_{\text{Fe}} \leq 0.6$ намагниченность линейно убывает как при замене Fe на Ni, так и при увеличении n . Введем коэффициент «пересчета» ξ , связывающий для каждого конкретного сплава Ni—Fe с $x_{\text{Fe}} \leq 0.6$ величины n и Δx_{Fe} ,

$$\Delta x_{\text{Fe}} = \frac{\left(\frac{\partial \sigma_0}{\partial n}\right)}{\left(\frac{\partial \sigma_0}{\partial x_{\text{Fe}}}\right)} n = -\xi n. \quad (1)$$

Формула (1) просто отражает тот экспериментальный факт, что зависимость $\sigma_0(n)$ для этих сплавов можно приближенно получить из $\sigma_0(x_{\text{Fe}})$ путем соответствующего изменения масштаба на оси концентраций. Экстраполяция зависимости (1) на сплавы с $x_{\text{Fe}} = 0.661$ и 0.675 дает $\xi \approx 0.185$ (рис. 4). Используя это значение ξ и принимая, что кривая $\sigma_0(x_{\text{Fe}})$ достигает максимума в точке $x_{\text{Fe}}^{\max} = 0.62$ (рис. 4), для положения максимумов на зависимостях $\sigma_0(n)$ сплавов с $x_{\text{Fe}} = 0.661$ и 0.675 получаем соответственно $n_{0.661}^{\max} \sim 0.1$ и $n_{0.675}^{\max} \sim 0.3$, что удовлетворительно согласуется с экспериментом (рис. 2).

З а в и с и м о с т ь $T_c(P_{\text{H}_2})$. Допустив, что соответствие, устанавливаемое формулой (1) между σ_0 сплавов с водородом и без него, справедливо также для T_c и $(dT_c/dP)_{\text{ин}}$, можно описать зависимость $\Delta T_c^{\text{экс}}$ — разности между значениями T_c в водороде и в инертной среде при одном и том же давлении (рис. 3). При таком подходе $\Delta T_c(P)$ будет складываться из

$$\Delta T_c^n = T_c(x_{\text{Fe}} - \xi n) - T_c(x_{\text{Fe}}),$$

связанного с изменением T_c без давления вследствие введения водорода в сплав, и

$$\Delta T_c^P = \left\{ \left(\frac{dT_c(x_{\text{Fe}} - \xi n)}{dP} \right)_{\text{ин}} - \left(\frac{dT_c(x_{\text{Fe}})}{dP} \right)_{\text{ин}} \right\} P,$$

обусловленного различной зависимостью от давления точек Кюри сплавов с водородом и без него. Результаты этого расчета приведены в таблице. Величины T_c сплавов Ni—Fe взяты из работы [25], $(dT_c/dP)_{\text{ин}}$ — из [26].

Как видно из таблицы, расчетные значения $\Delta T_c^n + \Delta T_c^P$ удовлетворительно согласуются с $\Delta T_c^{\text{экс}}$. Отметим, что при больших давлениях вклад ΔT_c^P в $\Delta T_c^n + \Delta T_c^P$ немал, и таким образом, согласие последней величины с $\Delta T_c^{\text{экс}}$ указывает на справедливость (1) для описания зависимостей как T_c , так и $(dT_c/dP)_{\text{ин}}$ инваров Ni—Fe от содержания в них водорода. Следовательно, наличие соответствия (1) позволяет оценить тенденцию изменения $(dT_c(n)/dP)_{\text{ин}}$, что было бы весьма сложно сделать экспериментально.

В последней строке таблицы приведены результаты аналогичного расчета для инварного сплава с 10 ат. % Fe, зависимость $T_c(P_{\text{H}_2})$ которого была определена в [2]. При вычислении ΔT_c^P и $\Delta T_c^{\text{экс}}$ использованы величины $(dT_c/dP)_{\text{ин}}$, взятые из [12]. Из таблицы видно, что формула (1) удовлетворительно описывает поведение $T_c(P_{\text{H}_2})$ и у этого сплава.

В заключение еще раз отметим интересный факт, что при $n \ll 1$ поведение зависимости $T_c(n)$ для инваров оказывается возможным описать в предположении, что основным эффектом при внедрении водорода является растяжение кристаллической решетки [4]. В этом случае вклад объемных изменений в ΔT_c составит [4]

$$\Delta T_c^V \approx - \frac{\left(\frac{dT_c}{dP}\right)_{\text{ин}} \frac{\beta n}{kV}}{1 + (dT_c/dP)_{\text{ин}} \frac{3\alpha}{k}}, \quad (2)$$

где α — коэффициент линейного расширения сплава при $T \sim T_c$. Как видно из таблицы, рассчитанная по этой формуле величина ΔT_c^V хорошо согласуется с ΔT_c^n у сплава с 67.5 ат. % Fe. По знаку и порядку величины ΔT_c^V согласуется с ΔT_c^n и у сплава с 10 ат. % Fe (в этом случае n не мало, но, поскольку величины, входящие в правую часть (2), у данного сплава слабо изменяются в интервале $\xi n \sim 0.1$, мы сочли возможным привести эту оценку, используя при вычислениях $(dT_c/dP)_{\text{ин}}$ и k для сплава с 5 ат. % Fe).

Итак, при малых n определяющую роль в поведении точек Кюри γ -растворов Ni—Fe—H, содержащих ≥ 10 ат. % Fe, играют, по-видимому, объемные эффекты. Поведение точек Кюри этих сплавов при большом содержании водорода, как и поведение $|\sigma_0|$, оказывается более сложным. Однако зависимости $\sigma_0(n)$, $T_c(n)$ и $dT_c(n)/dP$ удастся полуквантитативно описать, используя соотношение (1) и соответствующие зависимости этих величин от состава в сплавах Ni—Fe. Причины возможности такого описания пока не ясны. Для внесения большей ясности в этот вопрос представляет интерес изучение магнитных свойств растворов водорода в иных сплавах на основе никеля.

Авторы благодарят И. А. Потапову и А. И. Амелина за помощь в подготовке экспериментов.

Л и т е р а т у р а

- [1] В. Вагановски, R. Wiśniewski. Bull. Acad. Polon. Sci., 14, 273, 1966.
- [2] Е. Г. Понятовский, В. Е. Антонов, И. Т. Белаш. ДАН СССР, 230, 649, 1976.
- [3] В. Вагановски, S. Filipek. Roczniki Chem., 47, 2165, 1973.
- [4] Е. Г. Понятовский, В. Е. Антонов, И. Т. Белаш. ФТТ, 18, 3661, 1976.
- [5] В. Е. Антонов, И. Т. Белаш, Б. К. Пономарев, Е. Г. Понятовский, В. Г. Тиссен. ФТТ, 20, 418, 1978.
- [6] Е. Г. Понятовский, В. Е. Антонов, И. Т. Белаш. ДАН СССР, 229, 391, 1976.
- [7] В. Е. Антонов, И. Т. Белаш, Е. Г. Понятовский. ДАН СССР, 233, 1114, 1977.
- [8] L. Jacobs, P. Lawrence. Rev. Sci. Instr., 28, 713, 1958.
- [9] Г. Т. Дубовка, Е. Г. Понятовский. ФММ, 33, 540, 1972.
- [10] В. Вагановски, S. Majchrzak, T. B. Flanagan. J. Phys. 1.: Metal Phys., 1, 259, 1971.
- [11] М. С. Легкоступов. ЖЭТФ, 61, 262, 1971.
- [12] J. M. Leger, C. Loriers-Susse, B. Vodar. Phys. Rev. B., 6, 4250, 1972.
- [13] J. W. Cable, E. O. Wollan, W. C. Koehler. J. de Phys., 25, 460, 1964.
- [14] Б. К. Пономарев, В. Г. Тиссен. ЖЭТФ, 73, 332, 1977.
- [15] С. В. Вонсовский. Магнетизм, с. 622. «Наука», М., 1971.
- [16] J. Friedel. Ber. Bunsenges. Physik. Chem., 76, 838, 1972.
- [17] A. C. Switendick. Ber. Bunsenges. Physik. Chem., 76, 536, 1972.
- [18] N. Kulikov, A. Zvonkov, O. Malychkov. Proc. Second Intern. Congress on Hydrogen in Metals, 6—11 June 1977, Paris.
- [19] Е. И. Кондорский, В. Л. Седов. ЖЭТФ, 37, 845, 1958.
- [20] D. Bloch. Ann. de Phys., 1, 93, 1966.
- [21] В. Е. Антонов, Г. Т. Дубовка. ФММ, 40, 645, 1975.
- [22] Y. Tanji, Y. Shirakawa, H. Moriya. J. Japan Inst. Metals, 34, 417, 1970.
- [23] E. A. Owen, A. H. Sully. Phil. Mag., 31, 314, 1941.
- [24] Y. Tanji, Y. Shirakawa. J. Japan Inst. Metals, 34, 228, 1970.
- [25] G. T. Dubovka. Phys. Stat. Sol. (a), 24, 375, 1974.
- [26] Г. Т. Дубовка, Е. Г. Понятовский. ДАН СССР, 206, 83, 1972.

Институт физики твердого тела
АН СССР
Черноголовка
Московская обл.

Поступило в Редакцию
14 апреля 1978 г.