

МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ В СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ СОСТАВОВ Fe-Ni В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Цель работы. Установить причины аномально большого смещения мартенситной точки в некоторых сталях и сплавах железа в сильных импульсных магнитных полях при низких температурах.

Методы исследований. Обобщение экспериментальных и теоретических исследований по влиянию сильных магнитных полей на мартенситное превращение в сталях и сплавах железа с учетом магнитного состояния аустенита и мартенсита.

Полученные результаты. Получены распределения смещений мартенситной точки ΔM_s в различных экспериментах от содержания основного компонента – железа и температуры начала мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения (мартенситной точки M_s). Показано, что полученная зависимость $\Delta M_s(M_s)$ в сильном магнитном поле при низких температурах распадается на две составляющие, одна из которых коррелирует с обобщенными уравнениями Клапейрона-Клаузиуса, а другая противоположна ей. Кроме того, установлено, что стали и сплавы с интенсивным $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением в магнитном поле имеют в своем составе не менее 72,5% железа (масс.), которое при низких температурах в ГЦК-структуре является антиферромагнетиком.

Научная новизна. Аномальная температурная зависимость распределения в сильном магнитном поле объяснена на основе квантовых представлений о магнитном взаимодействии атомов в системе Fe-Ni. Этот эффект связан с рядом других инвариных эффектов, в частности, с аномально большими спонтанной и вынужденной магнитострикциями, сильной зависимостью результирующего обменного интеграла от межатомного расстояния. Обосновывается точка зрения, согласно которой в этих сталях и сплавах в магнитном поле $\gamma \rightarrow \alpha$ -переход происходит по типу «магнитного фазового перехода первого рода». Предполагается, что зарождение мартенситной фазы в магнитном поле происходит в локальных областях γ -фазы с дезориентированными атомными магнитными моментами (высокой сжимаемостью и повышенной вынужденной магнитострикцией).

Практическая ценность. Полученные в работе сведения дают основания для объяснения кинетических особенностей преобразования аустенита в мартенсит в сталях и сплавах железа.

Ключевые слова: инвариные сплавы, магнитные неоднородности, гистерезис $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -перехода, магнитные переходы первого и второго рода, сильное магнитное поле, отрицательное давление.

Введение

В настоящей работе обсуждается влияние сильных импульсных магнитных полей и магнитного состояния γ -фазы на мартенситное превращение (МП) в инвариных сплавах Fe-Ni и сплавах Fe-Ni, легированных переходными элементами, с целью выяснения причин существования различных кинетических вариантов возникновения мартенсита [1–4].

Ранее предполагалось [5, 6], что зарождение атермического мартенсита может быть связано с концентрационными неоднородностями состава, в которых содержание атомов железа превышает среднее по всему сплаву. Неоднородности состава одновременно могут быть магнитными неоднородностями в ферромагнитной γ -фазе. Последние экспериментально под-

тверждены и теоретически обоснованы во многих работах в связи с инвариным вопросом [7]. Чистое железо в ГЦК-решетке при низких температурах антиферромагнитно с точкой Нееля $T_N \approx 67$ К. Присутствие в антиферромагнитном кластере - Fe атомов никеля должно приводить к дезориентации спиновых магнитных моментов атомов. Но, как при низких, так и при более высоких температурах (в области парамагнетизма - Fe) состояние таких участков должно сильно зависеть от внешнего магнитного поля, которое стремится перевести такую систему спинов в коллинеарную магнитную структуру с увеличением удельного объема.

Влияние магнитного поля на МП

Впервые действие сильного импульсного магнитного поля на МП в стали было экспериментально обна-

ружено в роботі [8]. Теоретическе пояснення підвищенню температури МП в магнітному полі (як структурно-фазового переходу), було дано в роботі [9]. Сміщення мартенситної точки було пояснено при допомозі обобщеної формули Клапейрона-Клаузиуса, ухитваючя, що змінення удельного термодинамічного потенціала в сильному зовнішньому полі напруженістю H опрделяється різницею намагніченностей претвращаючихся фаз

$$\Delta M_{S1} = M_S (I_\alpha - I_\gamma) H / q, \quad (1)$$

где I_α и I_γ – намагніченности α - и γ -фаз, q – удельная теплота претвращения, M_S – температура начала мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода при $H=0$.

Позже, в работі [10] было показано, что относительное изменение объема γ -фазы $\Delta V/V$ некоторых сплавов и сталей, испытывающих МП в магнітнм поле напруженістю 26–30 МА/м, достигаєт величин $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} . Такая деформация тела соответствует отрицательному давлению порядка 100–1000 МПа. Детальный анализ влияния магнитострикции парапроцесса на мартенситное претвращение, выполненный в [11], привел к следующему соотношению:

$$\Delta M_{S2} = M_S \cdot \bar{\lambda}_2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_H / q; \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{(c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})}{c_{11} + c_{12}}; \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{2}a_\alpha - a_\gamma}{a_\gamma};$$

$$\varepsilon_H = \frac{1}{3V} \left(\frac{\partial V_2}{\partial H} - \frac{\partial V_1}{\partial H} \right) H,$$

где $\bar{\lambda}_2$ – эффективный модуль упругости второй фазы, c_{11}, c_{12} – модули упругости кубического кристалла, ε – несоответствие решеток α - и γ -фаз в отсутствие магнитного поля, a_α и a_γ – параметры решеток α - и γ -фаз, ε_H – разность стрикционных деформаций фаз. Численный расчет, полученный для наиболее изученного сплава Fe-30Ni (масс. %), показал, что смещение мартенситной точки в результате деформации γ -фазы по порядку величины сопоставимо со смещением M_S за счет намагніченности и равно нескольким десяткам кельвинов (в магнітнм поле напруженістю 28 МА/м, рассчитанное ΔM_S по формулам (1) и (2), соответственно равно 40–50 и 30–40 К).

Полученный результат может быть дополнен учетом зависимости упругих модулей фаз от сильного магнитного поля:

$$\Delta M'_S = M_S \cdot \Delta \bar{\lambda}_2 \cdot \varepsilon^2 / 2q; \quad (3)$$

$$\Delta M''_S = M_S \cdot \Delta e' \cdot D / Lq, \quad (4)$$

где $\Delta \bar{\lambda}_2$ – изменение эффективного упругого модуля второй фазы в магнітнм поле, $\Delta e'$ – изменение поправочного слагаемого e' в выражении для принятой в [11] упругой энергии критического зародыша мартенсита в форме плоской пластины $eV = (e_0 + e'D/L)V$, e_0 – главное слагаемое удельной упругой энергии, D – толщина пластины протяженностью L , $V = DL^2$ – объем зародыша мартенсита. Магнитоупругий сдвиг $\Delta M'_S$ в рассматриваемых сплавах Fe-Ni трудно оценить, поскольку неизвестна зависимость модулей упругости α -фазы от магнитного поля, а именно они определяют упругую энергию. В γ -фазе $\partial \lambda / \partial H$ весьма велико [12]. Но в α -фазе $\partial \lambda / \partial H$ как и $\partial V / \partial H$ должно быть значительно меньше, чем в γ -фазе. Поэтому можно думать, что $\Delta M'_S$ во много раз меньше, чем ΔM_S в формулах (1) и (2). Большая величина $\partial \lambda / \partial H$ в γ -фазе (матрице) должна приводить к большому $\Delta e'$, определяющему сдвиг $\Delta M''_S$. Однако, поскольку выражение (4) содержит малый множитель D/L , для тонких пластин этот сдвиг все же невелик [11].

На МП может влиять также непосредственное повышение температуры образцов вследствие парапроцесса, которое имеет обратимый характер, положительное значение и большую величину вблизи точки Кюри:

$$\Delta M_S^T = -\Delta T_{MK}. \quad (5)$$

Точка Кюри в α -фазе расположена высоко. Но в γ -фазе она сопоставима с мартенситной точкой. Оценка такого влияния магнетокалорического эффекта при парапроцессе на положение мартенситной точки в магнітнм поле в сплавах Fe-Ni, проводилась в [13]. Измеренные зависимости $\Delta T_{MK}(H)$ до 1,5 МА/м в γ -фазе в окрестности точки Кюри T_C аустенита сплавов Fe-29,8Ni ($T < T_C$) и Fe-28,7Ni ($T > T_C$) приведены на рис. 1. В магнитных полях от 0,5 до 1,5 МА/м температура образцов растет практически линейно напруженности магнитного поля. Предполагая, что линейная зависимость сохраняется и при более сильных напруженностях H , можно оценить ΔT_{MK} в реально достигаемых импульсных магнитных полях. Например, в поле $H = 28$ МА/м (≈ 350 кЭ) температура образцов может повыситься максимально на 7–8 К, что составляет $\approx 10\%$ от величины смещения мартенситной точки в этих сплавах в эксперименте (70–80 К).

В работах [14, 15] указывалось на необходимость учета поправки к выражению (1) вследствие изменения намагніченности γ -фазы за счет парапроцесса в ней:

$$\Delta M_S^z = -M_S \cdot \chi_\gamma \cdot H^2 / 2q, \quad (6)$$

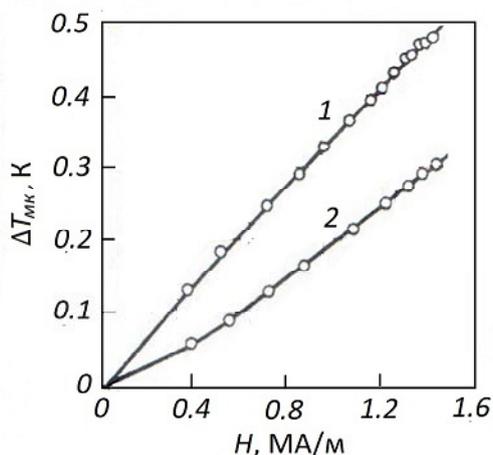


Рис. 1. Обратимое изменение температуры аустенита инварных сплавов в области парапроцесса: 1 – Fe-29,8Ni ($T < T_C$); 2 – Fe-28,3Ni ($T > T_C$) [13]

где χ_γ – магнитная восприимчивость парапроцесса γ -фазы. Однако, по нашему мнению, авторы [14,15] преувеличивают роль этого фактора. Магнитная восприимчивость при парапроцессе, как и магнитокалорический эффект, в инварных сплавах в сильных магнитных полях, в отличие от магнитострикции, не является аномально большой величиной [16, 17]. В частности, в магнитном поле $H = 0,1404$ МА/м (1,755 кЭ) при температуре на 15 К ниже точки Кюри, в классическом инваре Fe-35Ni и чистом никеле χ_γ имеет один и тот же порядок величины, соответственно ≈ 2 и $\approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ [16]. Можно полагать, что и в α -фазе χ_α имеет близкое значение.

Таким образом, среди возможных факторов влияния сильного магнитного поля на смещение мартенситной точки M_S , только два реально соответствуют наблюдаемому эксперименту: магнитострикционный фактор (2) и фактор намагниченности (1). Разность намагниченностей в некоторых границах можно считать постоянной величиной, несущественно изменяющуюся в магнитном поле. Магнитострикция парапроцесса в полях выше технического намагничивания растет практически линейно H (рис. 2) [18]. То есть, результирующая зависимость $\Delta M_S(H)$ в достаточно сильных магнитных полях согласно выражениям (1) и (2) должна быть линейной и это наблюдается в многочисленных экспериментах [19]. Факторы, соответствующие формулам (3), (4), (5) и (6), имея незначительную величину и разные знаки, по-видимому, нивелируют друг друга и не могут существенно повлиять на характер превращения.

Магнитострикция парапроцесса в инварных сплавах, как и в обычных металлах, имеет максимальную величину вблизи точки Кюри. Однако в отличие от последних, в инварных сплавах Fe-Ni она на 1–2 порядка больше и занимает широкий температурный интервал

как выше, так и ниже точки Кюри, вплоть до абсолютного нуля [7]. Практически все сплавы на основе Fe-Ni вблизи точки Кюри и ниже ее должны обладать большой магнитострикцией парапроцесса. В частности, полевая зависимость $\Delta V_\gamma/V_\gamma$ аустенитного сплава Fe-24Ni-3,5Mn при температуре 77 К (точка Кюри $T_C < 77$ К), по характеру и величине близка к инварным сплавам Fe-Ni, полевая зависимость которых вблизи точки Кюри изображена на рис. 2 [18]. Большая магнитострикция парапроцесса при $T = 77$ К $> T_C$, наблюдается также и в суперпарамагнитной стали Fe-20Ni-2Cr-0,4C [10].

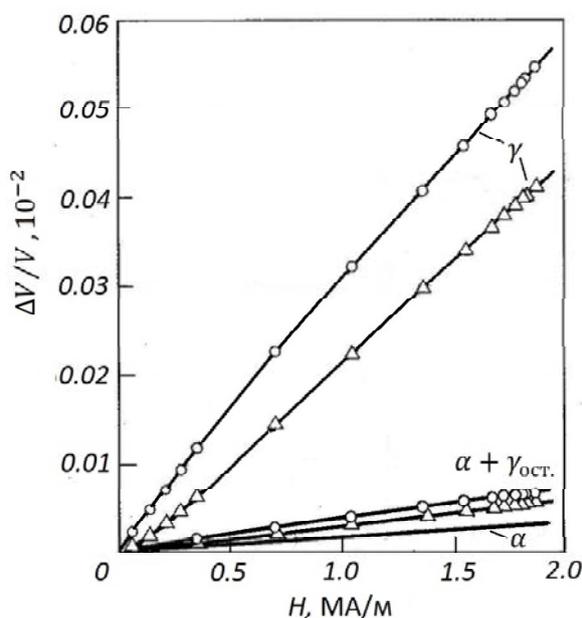


Рис. 2 Изменение объема $\Delta V/V$ γ -фазы сплавов Fe-29,8Ni (○, точка Кюри $T_C = 324$ К) и Fe-28,7Ni (Δ, $T_C = 283$ К) при 295 К в магнитном поле напряженностью до 1,9 МА/м; $\alpha + \gamma_{ост}$ – после охлаждения образцов до 77 К и отогрева до 295 К; α – предполагаемая зависимость $\Delta V/V(H)$ в чистой α -фазе (без остаточного аустенита) [18]

Влияние магнитного поля на обратное МП

Анализ выражений (1) и (2) проведенный в [20] показал, то обнаруженный в [10, 11] магнитострикционный механизм влияния магнитного поля на МП, не является дополнением к формуле (1), как это предполагается в [3], а должен рассматриваться как независимый эффект. Рассмотрим как влияет магнитострикция парапроцесса аустенитной фазы на обратное $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение в сплавах Fe-Ni, которое при достаточно большом содержании никеля и сравнительно быстрых скоростях нагрева также является мартенситным [21].

Согласно формуле (1) в сильном магнитном поле интервал МП сплавов железа смещается в область более высоких температур если низкотемпературная фаза ферромагнитна, а высокотемпературная – парамагнитна.

$\Delta M_S = M_S(I_\alpha - I_\gamma)H/2(+q) > 0$. И при обратном $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходе имеем $\Delta A_S = A_S(I_\gamma - I_\alpha)H/2(-q) > 0$.

То есть, в магнитном поле смещается весь интервал $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -превращения, включая температуру термодинамического равновесия фаз T_0 .

Согласно формуле (2) при прямом $\gamma \rightarrow \alpha$ -переходе имеем

$$\Delta M_S = \frac{M_S}{+q} \frac{1}{\lambda_\alpha} \cdot \frac{\sqrt{2}a_\alpha - a_\gamma}{a_\gamma} \cdot \frac{1}{3V} \left(\frac{\partial V_\gamma}{\partial H} - \frac{\partial V_\alpha}{\partial H} \right) H > 0,$$

а при обратном $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходе

$$\Delta A_S = \frac{A_S}{-q} \frac{1}{\lambda_\gamma} \left(-\frac{\sqrt{2}a_\alpha - a_\gamma}{a_\gamma} \right) \cdot \frac{1}{3V} \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial H} - \frac{\partial V_\gamma}{\partial H} \right) H < 0.$$

Таким образом, при обратном $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходе в магнитном поле, магнитная энергия в низкотемпературной α -фазе стремится ее удержать, а зарождающаяся высокотемпературная γ -фаза, имея повышенный объем (в магнитном поле) и положительный термодинамический стимул, стремится изменить кристаллическую решетку. В результате такой конкуренции двух основных механизмов влияния поля на МП при обратном $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходе и совместного их действия при прямом $\gamma \rightarrow \alpha$ -переходе, гистерезис перехода $\gamma \leftrightarrow \alpha$ должен уменьшиться. Этот результат был подтвержден экспериментально в работе [22]. Было показано, что в отличие от сплавов с точкой Кюри аустенита вблизи M_S , в сплаве Fe-33Ni, с точкой Кюри вблизи A_S , результирующее действие постоянного магнитного поля напряженностью 1,6 МА/м на $\alpha \rightarrow \gamma$ переход практически равно нулю. Отсутствие влияния магнитного поля на обратный $\alpha \rightarrow \gamma$ -переход, свидетельствует о том, что магнитострикционный эффект по величине, при определенных условиях, не уступает эффекту разности намагниченностей фаз.

Необходимо отметить, что приведенные в [22] и [6] фазовые H-T-диаграммы напоминают некоторые P-T-диаграммы, характеризующие индуцирование давлением «магнитных фазовых переходов первого рода» типа антиферромагнетизм (ферромагнетизм) \leftrightarrow ферромагнетизм. В [23, 24] анализируются возможные P-T-диаграммы таких переходов. При этом учитываются как положительные, так и отрицательные давления (рис. 3).

Реально получить ощутимое всестороннее отрицательное давление в теле сложно. Но соответствующую

отрицательному давлению деформацию в ряде тел, в том числе в сплавах железа, можно получить при помощи магнитного поля [24]. В сильном магнитном поле объемная магнитострикция изотропна, а в инварных сплавах она, к тому же, имеет аномально большую и положительную величину.

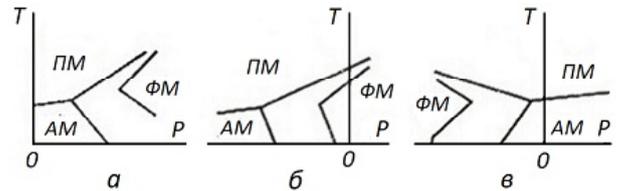


Рис. 3. Некоторые возможные фазовые P-T-диаграммы двухподрешеточных магнетиков в области положительных и отрицательных давлений [23]

Выше отмечалось, что в сплавах Fe-Ni в ферромагнитной ГЦК-фазе предполагается наличие антиферромагнитной составляющей. Но в твердом растворе Fe-Ni не содержится отдельных магнитных подрешеток, а существует неколлинеарная, неоднородная магнитная структура, предположительно, основанная на неоднородностях состава. В магнитном поле, при истинном намагничивании, и объем и намагниченность аустенита приближаются к соответствующим величинам мартенсита. Тем самым подготавливается переход ГЦК-структуры в ОЦК [6].

Таким образом, если принять во внимание сосуществование в решетке γ -фазы инварных сплавов Fe-Ni двух противоположных обменных взаимодействий (положительного и отрицательного) и наличие аномально большой объемной стрикции в магнитном поле, то сходство фазовых диаграмм, приведенных в [6, 20, 22] и [23] (рис. 3б) становится очевидным.

При наложении высокого давления и низких температур инварные сплавы полностью переходят в антиферромагнитное состояние [25]. Наоборот, при достаточно большом «отрицательном» давлении и низких температурах (см. рис. 3в) в сплаве должно реализоваться ферромагнитное состояние.

Такое поведение сплавов Fe-Ni легко объяснить при помощи модели Зинера. Согласно этой модели [7], магнитные свойства переходных металлов группы железа определяются конкуренцией двух механизмов обмена. Ферромагнитного взаимодействия 3d электронов, локализованных в разных узлах кристаллической решетки (косвенный обмен через электроны проводимости) и прямого антиферромагнитного взаимодействия между 3d электронами, находящимися в соседних узлах кристаллической решетки. Каждый атом в решетке ОЦК содержит меньшее число ближайших соседей (8), чем в решетке ГЦК (12). Инварные сплавы Fe-Ni при высоком гидростатическом давлении сжаты, расстояние между атомами небольшое и прямое антиферромаг-

нитное взаимодействие превосходит косвенный ферромагнитный обмен электронами. При всесторонне растягивающих деформациях в сильном магнитном поле, прямое короткодействующее антиферромагнитное взаимодействие становится слабым, но, по видимому, полностью не исчезает. Очевидно, по этой причине, более выгодной становится решетка ОЦК, в которой неколлинеарный (ГЦК) ферромагнетизм преобразуется в коллинеарный (в системе взаимодействующих спинов электронов есть два устойчивых состояния: параллельное и антипараллельное).

Увеличение размеров γ -фазы приводит к достижению критического межатомного расстояния, при котором слабое антиферромагнитное взаимодействие теряет устойчивость. Усиливающееся ферромагнитное обменное взаимодействие электронов увеличивает межатомное расстояние и уменьшает число соседних атомов с 12 до 8 путем самопроизвольной перестройки кристаллической решетки с ГЦК в ОЦК. Так достигается необратимость восстановления антиферромагнитного взаимодействия.

Указанные выше процессы возможны и энергетически обоснованы, так как энергия обменного взаимодействия, ответственная за существование ферромагнетизма в 10^3 – 10^5 раз больше энергии кристаллической магнитной анизотропии [26].

Сопоставление теории и эксперимента

Ранее в [5, 6] нами было высказано предположение о том, что влияние магнитного поля на МП связано с содержанием основного компонента в сплаве – железа, которое при низких температурах представляет собою антиферромагнетик. В связи с этим, представляет интерес сопоставить и обобщить полученные ранее в многочисленных работах результаты исследований влияния сильного импульсного магнитного поля на $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. Такое обобщение приведено ниже на рис. 4 и 5 в виде распределения смещения мартенситной точки в магнитном поле ΔM_s от содержания железа (масс.%) и от температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода в нулевом магнитном поле M_s (мартенситной точки). В случае отсутствия непосредственного измерения M_s (при охлаждении без поля) использовано его экстраполяционное значение. Все результаты величины ΔM_s приведены к величине напряженности магнитного поля $H = 28 \text{ MA/m}$ ($\approx 350 \text{ кЭ}$).

Как видно из рис. 4, с увеличением процентного содержания железа в сплавах, эффективность магнитного поля возрастает. Это особенно заметно при содержании железа более 72,5%. При этом сильно увеличивается разброс в величине ΔM_s . Для некоторых составов повышение мартенситной точки имеет аномально большую величину. Эти сплавы содержат некоторое количество атомов марганца (до 4%) или хрома (2%), которые вместе с железом в γ -фазе (ГЦК) могут взаимодействовать антиферромагнитно [7].

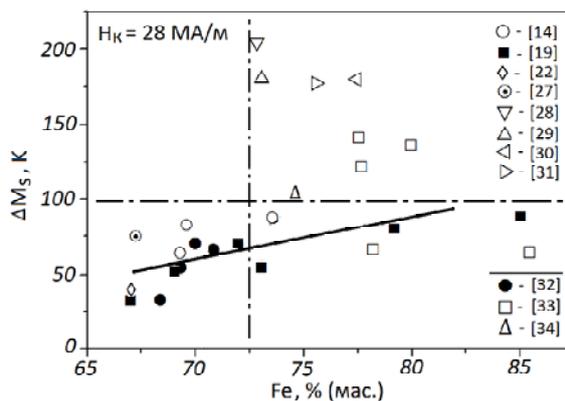


Рис. 4. Зависимость смещения мартенситных точек ΔM_s в критическом магнитном поле напряженностью 28 MA/m (350 кЭ) от процентного содержания железа в сплавах и сталях на основе инварных составов Fe-Ni (по данным разных авторов)

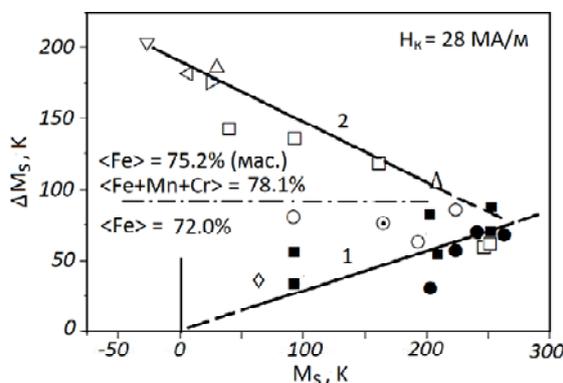


Рис. 5. Распределение смещений мартенситных точек ΔM_s в критическом магнитном поле напряженностью 28 MA/m в зависимости от температуры начала $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода в нулевом магнитном поле (M_s) в сплавах и сталях на основе инварных составов Fe-Ni (по данным разных авторов): 1 – теория и эксперимент; 2 – эксперимент

На рис. 5 приведено распределение величины смещения мартенситных точек ΔM_s этих же сплавов в магнитном поле в зависимости от M_s . Прямая 1 показывает расчетное значение $\Delta M_s(M_s)$, оцененное по формулам (1) и (2), соответствующим структурному фазовому переходу. Обращает на себя внимание тот факт, что зависимость $\Delta M_s(M_s)$ разделена на две ветви. Одна ветвь коррелирует с расчетной прямой 1. Другая ветвь (прямая 2) имеет обратную зависимость, не соответствующую теоретической прямой 1; чем ниже температура M_s , тем большее смещение ΔM_s в магнитном поле. Оценки показывают, что сплавы в группе 2 содержат средний процент железа $\langle \text{Fe} \rangle = 75,2$, тогда как в группе 1 $\langle \text{Fe} \rangle = 72$ %. Кроме того, общий процент 3d металлов в группе 2, исключая никель, который на кривой Бете-Слетера [7, 16, 17] находится в области чистого ферромагнетизма, составляет $\langle \text{Fe}+\text{Mn}+\text{Cr} \rangle = 78,1$ %.

Таким образом, на основании выше приведенных результатов и анализа магнитной структуры инварных сплавов Fe-Ni и сплавов Fe-Ni, легированных переходными элементами, можно утверждать, что в рассмотренных сплавах Fe-Ni-Mn и сталях Fe-Ni-Cr-C при низких температурах в сильном магнитном поле наблюдается «магнитный фазовый переход первого рода» типа «антиферромагнетизм → ферромагнетизм» и/или «сложная неколлинеарная магнитная структура → ферромагнетизм».

Выводы

1. Влияние сильных импульсных магнитных полей на МП в инварных сплавах Fe-Ni и сплавах на их основе имеет двойственный характер. В части сплавов, смещение мартенситной точки в магнитном поле напряженностью 28 МА/м (≈ 350 кЭ) удовлетворительно согласуется с расчетами по обобщенным уравнениям Клапейрона-Клаузиуса. В другой части сплавов (с более высоким содержанием Fe и некоторым количеством Mn или Cr) экспериментальная величина смещения мартенситной точки во много раз превосходит теоретический расчет.

2. Экспериментальные данные и теоретические оценки свидетельствуют о том, что температурный гистерезис мартенситного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ - превращения в сильном постоянном магнитном поле напряженностью 28–30 МА/м для некоторых сплавов и сталей может быть снижен с 500 до 200–150 К.

3. Аномально большое смещение мартенситной точки в магнитном поле при низких температурах в системах на основе инварных сплавов Fe-Ni может быть объяснено потерей устойчивости короткодействующего отрицательного обменного взаимодействия 3d электронов в γ - фазе и резкое усиление положительного обменного взаимодействия 3d электронов, вследствие аномально большой вынужденной магнитострикции при парапроцессе и сильной зависимости обменного интеграла от межатомного расстояния.

4. Зарождение мартенситной фазы в магнитном поле очевидно происходит в локальных областях γ - фазы с дезориентированными атомными магнитными моментами, которые обладают высокой сжимаемостью под давлением и повышенной объемной стрикцией в сильном магнитном поле. Это могут быть участки, обогащенные атомами основного компонента – железа, в составе которых 9 атомов Fe [или 8Fe+1(Mn, Cr)] и 3 атома Ni на одну ближайшую координационную сферу каждого атома Fe.

Список литературы

1. Ошкарёв С. П. К вопросу о природе мартенситообразования в углеродистых сталях / Ошкарёв С. П. // Успехи физики металлов. – 2011. – Т. 12. С. – 269–293.
2. Ошкарёв С.П. К вопросу об атермическом и изотермическом мартенситах / Ошкарёв С. П. // Успехи физики металлов. – 2011. – Т. 12. – С. 471–479.

3. Фокина Е. А. Морфология мартенсита, образованного под действием магнитного поля в сплавах с атермической кинетикой превращения / Фокина Е. А., Счастливцев В. М., Калетина Ю. В. // ФММ – 2001. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 42–56.
4. Магнитострикция аустенита железо-никель-марганцевых сплавов, обладающих двойной кинетикой мартенситных превращений / [Золотаревский И. В., Снежной В. Л., Георгиева И.Я., Матюшенко Л. А.] // ФММ – 1981. – Т. 51. – Вып. 3. – С. 669–672.
5. Золотаревский И. В. Влияние объемной магнитострикции на мартенситное превращение в сплавах железа. Магнитный фазовый переход первого рода / Золотаревский И. В. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37. – № 5. – С. 625–636.
6. Золотаревский И. В. Влияние магнитного состояния аустенита на мартенситное превращение в сплавах Fe-Ni в сильном магнитном поле и без него / Золотаревский И. В., Лоскутов С.В., Щетинина М.О. // ФММ – 2018. – Т. 119. – № 8. – С. 794–801.
7. Седов В. Л. Антиферромагнетизм гамма-железа. Проблема инвара / Седов В. Л. – М. : Наука, 1987. – 288 с.
8. К вопросу о влиянии магнитного поля на мартенситное превращение в стали / Садовский В. Д., Родигин Н. М., Смирнов Л. В. и др. // ФММ – 1961. – Т. 12. – № 2. – С. 302–304.
9. Кривоглаз М. А. О влиянии сильных магнитных полей на фазовые переходы / Кривоглаз М. А., Садовский В. Д. // ФММ – 1964. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 502–505.
10. Золотаревский И. В. О магнитострикции парапроцесса аустенитных сплавов вблизи мартенситной точки / Золотаревский И. В., Снежной В. Л., Шейко Л. М. // ФММ – 1979. – Т. 47. Вып. 6. – С. 1312–1313.
11. Золотаревский И. В. Влияние магнитострикции на сдвиг точки мартенситного превращения в сильном магнитном поле / Золотаревский И. В., Косенко Н. С., Кривоглаз М. А. // Металлофизика. – 1979. – Т. 1. – № 2. – С. 17–22.
12. Alers G.A. Temperature dependent magnetic contribution to the high field elastic constants of Nickel and Fe-Ni alloy / Alers G.A., Neighbours J.R., Sato H. // J. Phys. And Chem. Solids, 1960, 13, N 1/2. – P. 40–55.
13. Золотаревский И. В. Исследование магнитострикции и магнетокалорического эффекта в сплавах Fe-Ni и Fe-Ni-Mn в связи с воздействием сильных магнитных полей на ГЦК-ОЦК переход / Золотаревский И. В., Снежной В. Л. // Тезисы докл. XVII всесоюзной конф. по физике магнитных явлений (Донецк, 24–27 июня 1985). – ДонФТИ. – 1985. – С. 52–53.
14. Magnetic field-induced martensitic transformations in Fe-Ni-C invar and non-invar alloys / Kakeshita T., Shimizu K., Kijima S. and etc. // Trans. Jpn. Inst. Met. 1985. – Vol. 26. – P. 630–637.
15. Kakeshita T. Effect of magnetic field on martensitic transformations /Kakeshita T., Fukuda T. // Internateonal Conference on Advanced Structuraland Functional Materials Design 2008. –J. Phys.: Conference Series 165. – 2009. – 012051. – P. 1–6.
16. Белов К. П. Магнитные превращения / Белов К. П. – М. : ГИФМЛ, 1959. – 260 с.
17. Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах / Белов К. П. – М.-Л. : ГИТТЛ, 1951. – 256 с.

18. Золотаревский И. В. Магнитоотрицательная аустенитизация железо-никель-марганцевых сплавов и мартенситное превращение под действием сильного магнитного поля / Золотаревский И. В., Снежной В. Л., Шейко Л. М. // ФММ – 1983. – Т. 55. – Вып. 3. – С. 548–553.
19. Закалка стали в магнитном поле / [Кривоглаз М. А., Садовский В. Д., Смирнов Л. В., Фокина Е. А.]. – М. : Наука, 1977. – 120 с.
20. Золотаревский И. В. Объемная магнитоотрицательная аустенитизация и изотермическое мартенситное $\gamma \leftrightarrow \alpha$ - превращение в сталях и сплавах на основе железа / Золотаревский И. В., Косенко Н. С., Снежной В. Л. // Докл. Всесоюзной конференции по мартенситным превращениям в твердом теле (г.Косов, Украина, 1991 г.). – К. : 1992. – С. 62–65.
21. Курдюмов Г. В. Явления закалки и отпуска стали / Курдюмов Г. В. – М. : ГНТИЦЦМ, 1960. – 64 с.
22. Влияние магнитного поля на обратное и прямое мартенситное превращение в сплаве Fe-33% Ni / [Золотаревский И. В., Лоскутов С. В., Манько В. К., Сейдаметов С. В.] // ФММ – 2009. – Т. 108. – Вып. 2. – С. 147–154.
23. Завадский Э. А. Магнитные фазовые переходы / Завадский Э. А., Вальков В. И. – К. : Наукова думка, 1980. – 196 с.
24. Кузьмин Е. В. Физика магнитоупорядоченных веществ / Кузьмин Е. В., Петраковский Г. А., Завадский Э. А. Новосибирск : Наука, 1976. – 288 с.
25. Rhiger D. R. Evidence for Antiferromagnetism in Invar at High Pressures / Rhiger D. R., Ingalls R. // Physical Review Letters. 1972. – Vol. 28. – 12. – P. 749–753.
26. Боровик Е. С. Лекции по магнетизму / Боровик Е. С., Мильнер А. С. – Харьков : ХГУ, 1966. – 260 с.
27. Magnetic Field-Induced Martensitic Transformation in an Fe-31.7 at %Ni Alloy / Kakeshita T., Shimizu K., Sakakibara T. and etc. // Transactions of the Japan Institute of Metals. 1983. – Vol. 24. – N. 11. – P. 748–753.
28. Особенности влияния постоянного магнитного поля на изотермическое мартенситное превращение в сплаве Fe-24Ni-4Mn / Счастливцев В. М., Калетина Ю. В., Фокина Е. А. и др. // ФММ – 2001. – Т. 91. – С. 165–172.
29. Садовский В. Д. Влияние высокого давления и импульсного магнитного поля на мартенситное превращение в Fe-Ni и Fe-Ni-Mn сплавах / Садовский В. Д., Малинин П. А., Мельников Л. А. // МИТОМ – 1972. – № 9. – С. 30–37.
30. О характере изменения намагниченности аустенитной стали под действием сильного импульсного магнитного поля [Факидов И. Г., Ворончихин Л. Д., Завадский Э. А., Бурханов А. М.] // ФММ – 1965. – Т. 19. – С. 852–857.
31. Закалка стали в магнитном поле / [Садовский В. Д., Смирнов Л. В., Фокина Е. А. и др.] // ФММ – 1967. – Т. 24. – С. 918–939.
32. Поголовский В. Д. Мартенситное превращение в сплавах железо-никель в импульсном магнитном поле / Поголовский В. Д., Журавлев Л. Г., Штейнберг М. М. // ФММ – 1973. – Т. 35. – № 3. – С. 567–571.
33. Счастливцев В. М. Структура и кристаллометрия мартенсита, образующегося под действием магнитного поля / Счастливцев В. М., Ромашев Л. Н., Садовский В. Д. // ФММ – 1989. – Т. 67. – № 4. – С. 629–648.
34. Pulsed Magnetic Field-induced Martensitic Transformation in an Fe-21Ni-4Mn Alloy / Sun E. X., Yang D. Z., Hsu T. Y. and etc. // ISIJ International 1989. – Vol. 29. – № 2. – P. 154–157.

Одержано 29.12.2020

Золотаревський І. В. Мартенситне перетворення в системах на основі складів Fe-Ni в сильних імпульсних магнітних полях

Мета роботи. Встановити причини аномально великого зміщення мартенситної точки в деяких сталях і стопах заліза в сильних імпульсних магнітних полях при низьких температурах.

Методи досліджень. Узагальнення експериментальних і теоретичних досліджень впливу сильних магнітних полів на мартенситне перетворення в сталях і стопах заліза з врахуванням магнітного стану аустеніту.

Отримані результати. Отримано розподіли зміщення мартенситної точки ΔM_s в різних експериментах від вмісту основного компонента – заліза і температури початку мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ - перетворення (мартенситної точки M_s). Показано, що отримана залежність $\Delta M_s(M_s)$ в сильному магнітному полі при низьких температурах розпадається на дві складові, одна з яких корелює з узагальненими рівняннями Клапейрона-Клаузіуса, а інша протилежна до неї. Крім того, встановлено, що сталі і стопа з інтенсивним $\gamma \rightarrow \alpha$ - перетворенням у магнітному полі мають у своєму складі не менше 72,5 % заліза (мас.), яке при низьких температурах в ГЦК-структурі є антиферомагнетиком.

Наукова новизна. Аномальна температурна залежність розподілу $\Delta M_s(M_s)$ в сильному магнітному полі пояснена на основі квантових уявлень про магнітну взаємодію атомів в системі Fe-Ni. Цей ефект пов'язаний з рядом інших інварних ефектів, зокрема, з аномально великою спонтанною і вимушеною магнітоотрицательністю, сильною залежністю результуючого обмінного інтегралу від міжатомної відстані. Обґрунтовується точка зору, згідно якої в цих стопах в магнітному полі $\gamma \rightarrow \alpha$ - перетворення відбувається по типу «магнітного фазового переходу першого роду». Припускається, що зародження мартенситної фази в магнітному полі відбувається в (на) локальних ділянках γ - фази з дезорієнтованими атомними магнітними моментами (з високим стисненням і підвищеною вимушеною магнітоотрицательністю).

Практична цінність. Отримані в роботі результати дають підстави для пояснення кінетичних особливостей перетворення аустеніту в мартенсит в сталях та стопках заліза.

Ключові слова: інварні стопи, магнітні неоднорідності, гістерезис $\gamma \leftrightarrow \alpha$ - переходу, магнітні переходи першого і другого роду, сильні магнітні поля, відємний тиск.

Zolotarevskii I. Martensitic transformation in the systems based on Fe-Ni compositions in strong pulsed magnetic fields

Purpose of work. To ascertain the causes of the abnormally large displacement of the martensitic point in steels and iron alloys in strong pulsed magnetic fields at low temperatures.

Research methods. Generalization of experimental and theoretical investigations of the strong magnetic field influence on the martensitic transformation in steels and iron alloys, taking into account the magnetic state of austenite.

The obtained results. The distributions of the martensitic point displacement ΔM_s from the content of the main component - iron and the temperature of the martensitic $\gamma \rightarrow \alpha$ - transformation beginning (martensitic point M_s) in different experiments are obtained. It is shown that the obtained temperature dependence $\Delta M_s(M_s)$ in a strong magnetic field at low temperatures decomposes into two components, one of which correlates with the generalized Clapeyron-Clausius equations, and the other is opposite to it. In addition, it was found that steels and alloys with intense $\gamma \rightarrow \alpha$ - transformation in a magnetic field contain at least 72.5% iron (wt.), which at low temperatures in the fcc structure is antiferromagnetic.

Scientific novelty. The anomalous temperature dependence of the distribution $\Delta M_s(M_s)$ in a strong magnetic field is explained on the basis of quantum representations of the magnetic interaction of atoms in the Fe-Ni system. This effect is associated with a number of other invar effects, in particular, with an abnormally large spontaneous and forced magnetostriction, a strong dependence of the resulting exchange integral on the interatomic distance. The point of view according to which in these alloys in a magnetic field $\gamma \rightarrow \alpha$ - transformation occurs by the type of "magnetic first kind phase transformation" is substantiated. It is assumed that the nucleation of the martensitic phase in a magnetic field occurs in (at) local regions of γ - phase with disoriented atomic magnetic moments (with high compression and increased forced magnetostriction).

Practical value. The information obtained in this work provides grounds for explaining the kinetic features of the transformation of austenite into martensite in steels and iron alloys.

Key words: invar alloys, magnetic inhomogeneities, hysteresis of $\gamma \leftrightarrow \alpha$ - transition, magnetic first and second kind phase transformation, strong magnetic fields, negative pressure.
