

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-222

P14-98-222

В.В.Сумин, Г.Чимид, А.Ю.Музычка, Ц.Рашев¹,
Л.Саръиванов¹, Л.Е.Фыкин²

НЕЙТРОНСПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ
ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СИЛЬНОГО
Cr-N-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В АЗОТИСТЫХ СТАЛЯХ

Направлено в журнал «Физика металлов и металловедение»

¹Институт металловедения БАН, София, Болгария

²Филиал НИФХИ им. Л.Я.Карпова, Обнинск, Россия

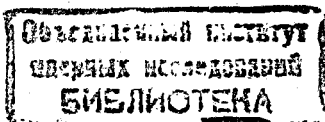
1998

1. Введение

Легирование сталей азотом вместо углерода приводит к улучшению механических и коррозионных свойств сталей, а также большей стабильности азотистого аустенита и других фаз [1]. Однако, несмотря на большой интерес к азотистым сталям, в настоящее время все еще нет общепризнанного объяснения этих преимуществ.

Ранее в [2] было высказано предположение о существовании сильной химической связи Cr-N в азотистых сталях, что, по мнению авторов [2], должно приводить к образованию кластеров из этих атомов, сильно тормозящих, в частности, планарное скольжение дислокаций. Это предположение основывалось только на модельных расчетах термодинамических величин [1]. Термодинамические данные, как правило, относятся к высоким температурам, и, являясь макроскопическими характеристиками системы, не могут дать однозначной информации на атомном уровне. Таким образом, термодинамика предоставляет лишь косвенные методы исследования микроскопических взаимодействий.

В отличие от термодинамических методов, неупругое рассеяние нейтронов (НРН) является уникальным инструментом прямого микроскопического исследования вещества, дающим надежную информацию о межатомных взаимодействиях. В частности, в системах с точечными дефектами, где энергии локальных колебаний атомов внедрения и замещения определяются силовыми взаимодействиями с ближайшими атомами решетки, метод НРН незаменим. Этим методом с 1988 года начато изучение сталей с углеродом [3-5] и азотом [6-10]. В последнем случае изучались четырех- и выше компонентные стали, что сильно затрудняло интерпретацию результатов. В настоящей работе были изучены НРН спектры тройных систем Fe-Cr-N и Fe-Mn-N , а также бинарных соединений: нитридов хрома Cr_2N и марганца Mn_4N , что позволило сделать выводы об отличии поведения азота от углерода в сталях на атомном уровне.



2. Подготовка образцов и проведение экспериментов

Химический и фазовый состав сталей и нитридов, изученный в настоящей работе, приведен в Табл. 1. Они были приготовлены в Институте металловедения Болгарской АН под давлением азота до 50 атм в виде слитков до 10 кг. Из слитков на токарном станке нарезаются шайбы толщиной 3 мм и диаметром 50 мм для нейтронографических измерений. Образцы аустенизировались при температуре 1250⁰С в течение 45 минут и закаливались в воде. Фазовый состав сплавов определялся нейтронографически на порошковом дифрактометре реактора ВВР-Ц (г.Обнинск). Практически все образцы представляли собой однофазные аустениты. Исключение составила сталь X24A2 с очень высоким содержанием азота (2.35% вес.), в которой, однако, примерно одна треть выпадает в виде Cr₂N, и сплав Г17А с малым содержанием азота, который состоял из аустенита и нитрида. В последнем интенсивности линий нейтронограмм нитрида не совпадали с интенсивностями бинарного нитрида Mn₄N, хотя имели кубическую сингонию. Поэтому мы приписали этой фазе состав (FeMn)₄N. Сплав X18A1.3 после аустенизации однофазен. После отжига при 800⁰С в течение 1 часа аустенит полностью распадался на феррит с параметром решетки 2.872 Å⁰ и преципитат Cr₂N с параметрами решетки, не отличающимися от бинарного нитрида хрома (Табл.1). Сплав 100Н25, измеренный в этой работе, представлял собой однофазный аустенит с параметром решетки 3.62 Å⁰.

Спектры неупругого рассеяния нейтронов (НРН) были измерены на времяпролетном спектрометре с обратной геометрией КДСОГ-М, установленном на реакторе ИБР-2 (г.Дубна, Россия), энергетическое разрешение которого в области передач энергии 70 мэВ составляет 5 мэВ. Данные НРН по энергиям локальных мод (ЛМ) азота и их ширинам собраны в Табл.2. Для удобства в этой таблице приведены и литературные данные по ЛМ для углерода в тройных системах.

3. Экспериментальные результаты НРН

1. *Фононные спектры металлических матриц.* Для всех изучаемых сплавов были получены фононные спектры металлических матриц в некогерентном приближении. Они характеризуют металлическую связь в данном сплаве и влияние на нее легирования. В системе Fe-Cr-N при увеличении содержания хрома от 15 до 24% при примерно одинаковом содержании азота около 1%, при увеличении содержания азота в полтора раза при фиксированном содержании хрома - 24%, не приводят к заметному изменению фононного спектра металлической матрицы. На Рис.1,2 приведены фононные спектры марганцовистых Г17А, Г22А, Г35А (Рис.1), хромистых X35A1, X15A1, X24A2, X18A1.3 (Рис.2) аустенитов с высоким содержанием азота и обычной нержавеющей стали X18H9T без азота. Из-за растворенного азота параметры решеток аустенитов с азотом и без него сильно различаются (3.640 Å⁰ и 3.587 Å⁰), однако в сплавах, легированных азотом, по-видимому, происходят такие изменения в электронной подсистеме, которые компенсируют ее ослабление за счет атомов внедрения, что наблюдалось и ранее [9].

2. *Локальные колебания азота в различных тройных аустенитах и сравнение их с ЛМ углерода.* ЛМ азота всех изученных сплавов и нитридов хорошо описывались одиночными гауссианами, энергии и полные ширины которых приведены в Табл.2. На Рис.3 приведены типичные ЛМ азота для хромистого и марганцовистого аустенитов. Отдельно приведена ЛМ сплава X24A2 с очень высоким содержанием азота (Рис.4). Из-за выделения нитридов и высокой концентрации азота в этом сплаве его ЛМ имеет более сложную структуру, природа которой не вполне понятна, однако азоту в решетке аустенита, по-видимому, принадлежит пик с энергией 78.0 мэВ и шириной 11-15 мэВ.

Энергии колебаний и их ширины (Рис.3, Табл.2) сильно различаются в зависимости от атома внедрения и легирующего металлического компонента:

а) Энергия ЛМ азота в хромистых аустенитах слабо зависит от концентраций Cr и N, но существенно выше, чем в марганцовистом (на 9 мэВ).

б) Энергия ЛМ углерода практически не зависит от легирующего металла Cr, Mn, Ni в железе. Если учесть, что углерод легче азота, то в пересчете на атомный вес азота в изотопическом приближении средняя энергия 77.0 мэВ для углерода соответствует 71.3 мэВ для азота, то есть приближается к энергии ЛМ азота в марганцовистом аустените. Таким образом, энергии ЛМ азота в системе Fe-Cr-N существенно выше, чем в остальных изученных системах с азотом и углеродом. Силовая константа связи Cr-N на 30% выше остальных связей металл-примесь внедрения. Эти экспериментальные факты и позволили прийти к выводу об особой сильной связи Cr-N.

в) Ширина ЛМ для сплавов Fe-Cr-N системы, 14-30 мэВ, существенно больше, чем для ЛМ азота в сплавах Fe-Mn-N и углерода во всех изученных тройных аустенитах, в которых она составляет 5-7 мэВ, что находится на уровне разрешения спектрометра (Рис.3, Табл.2).

г) Энергия ЛМ азота в аустенитах с хромом (78-80.5 мэВ) заметно выше энергии колебания азота в Cr₂N (73.4 мэВ). Для остальных систем, наоборот, энергия колебания азота в Mn₄N выше, чем в марганцовистых аустенитах на 4 мэВ (Табл.2), а колебание углерода в сплаве 100Г75, богатом марганцем, равно или несколько выше (78 мэВ), чем для марганцовых и других аустенитов на основе железа ([5], Табл.2).

Все эти особенности силового взаимодействия в тройных аустенитах с углеродом и азотом можно объяснить с единой точки зрения, а именно: связь хром-азот в сталях существенно выше связи хром-углерод и связей азота и углерода с Mn, Fe, и Ni. Особая роль этой связи приводит к целому ряду последствий, которые мы обсудим ниже.

4. Обсуждение результатов

1. *Существование Cr-N кластеров.* На основании экспериментальных данных НРН по пикридам можно оценить энергию ЛМ азота в октапоре аустенита, состоящей целиком из шести атомов хрома, то есть в микрокластере. Из эмпирической зависимости энергии ЛМ азота ϵ_i от расстояния металл-атом внедрения [11] в различных переходных металлах известно, что она обратно пропорциональна $r_{Me-N}^{3/2}$, где r_{Me-N} - расстояние металл-азот. Отсюда следует:

$$\epsilon_i = \epsilon_{Cr_2N} * \left(\frac{r_{Cr_2N}}{r_i} \right)^{3/2} \quad (1)$$

Зная эти расстояния в Cr₂N и хромистом аустените ($a=3.620 \text{ \AA}$), а также энергию колебания азота в Cr₂N, равную 74 мэВ, получаем значение энергии ЛМ в микрокластере хрома ϵ_i в аустените, равное 82.9 мэВ. Аналогичные расчеты для ЛМ азота в кластере марганца в марганцовистом аустените дают значение 80.4 мэВ. Экспериментальные значения ЛМ азота в хромистом аустените ниже рассчитанных на 3 мэВ, что можно понять, учитывая, что при хаотическом распределении атомов хрома в растворе железа количество кластеров с шестью атомами хрома мало, а кластеры с 5, 4 и т.д. атомами должны иметь меньшие энергии ЛМ азота.

Для того чтобы провести количественное сравнение экспериментальных и расчетных данных, мы провели детальный расчет энергий колебаний азота в октаэдрах с различным содержанием атомов хрома, оценили их долю при хаотическом распределении атомов металлов и нашли среднюю энергию ЛМ азота для сравнения ее с экспериментальной.

Эти расчеты были проведены по специально разработанным программам "Relax", "Value" и "Densy", рассчитывающим вначале геометрию комплексов дефектов типа атом замещения - атом внедрения после релаксации внутри микрокристаллита 10×10×10 элементарных ячеек, а затем энергии колебаний атомов, в том числе и дефектов, в кристаллите. Парный потенциал Cr-N был получен

подгонкой под оптическое колебание в Cr_2N . Он представляет собой кубический полином:

$$V(r) = -4.3497r^3 + 31.6872r^2 - 68.6488r + 48.1377, \quad 1.4 < r < 2.5, \quad (2)$$

где $V(r)$ измеряется в мэВ, r в Å . Потенциал Fe-N, как показано в [12], близок к потенциалу Fe-C [12] и был взят равным ему в качестве первого приближения. Эти потенциалы приведены на Рис.5. Потенциал Fe-Fe, взятый из [12], был положен равным потенциалам Cr-Cr и Fe-Cr из-за нулевой теплоты растворения раствора Fe-Cr [13] и малого влияния хрома на фонный спектр аустенита (см. выше). Рассчитанные таким образом энергии ЛМ азота в октаэдрах, содержащих от 6 до 0 атомов Cr, приведены в Табл.3. В этой же таблице приведены процентные распределения октаэдров с различным количеством атомов Cr, вычисленных по биномиальному распределению для трех концентраций Cr, измеренных в этой работе. Исходя из данных Табл.3. были вычислены средние значения энергий ЛМ азота по двум моделям.

По модели I предполагалось, что атомы азота заполняют сначала октапоры с шестью атомами Cr, как наиболее энергетически выгодные, затем с пятью и т.д. пока все количество азота, заданное его концентрацией, не будет размещено. Модель II предполагала хаотическое заполнение всех пор, пропорциональное их количеству в биномиальном распределении. Средние значения энергий, рассчитанные по обеим моделям, приведены в Табл.2. Модель I явно лучше описывает экспериментальные данные для системы Fe-Cr-N. Это означает, что азоту энергетически выгодно заполнить октапоры с максимальным количеством хрома, но при этом азот, в отличие от расчетов [2], основанных только на термодинамических данных, не собирает вокруг себя большую часть атомов хрома, который остается хаотически распределенным. В противном случае энергия ЛМ азота была бы близка к 82.9 мэВ.

Важно отметить, что в системе Fe-Mn-N рассчитанные по модели I значения энергий колебаний азота существенно выше наблюдаемых экспериментально (Табл.2). И, наоборот, хаотическое распределение азота по Fe-Mn сплаву гораздо лучше соответствует эксперименту.

Для углерода такие расчеты не имеют особого смысла, так как независимо от легирования энергии ЛМ углерода практически все одинаковы. Поэтому ясно, что углерод, в отличие от азота, примерно одинаково связан со всеми легирующими элементами и железом, причем эта связь, как уже говорилось выше, значительно слабее связи Cr-N.

Таким образом, только в системе Fe-Cr-N из всех рассмотренных тройных систем с азотом или углеродом существует захват атома внедрения на атомах замещения. Поскольку типов таких мест, где есть флуктуации концентрации атомов хрома, много и для каждого места характерны свои энергии ЛМ захваченного азота, то становится ясным, почему ширины ЛМ азота в Fe-Cr-N существенно выше, чем в системах с углеродом или в системе Fe-Mn-N, где захват, по-видимому, отсутствует. Только рассмотрение простейших типов октапор с различным числом атомов Cr дает вклад в ширину порядка 13 мэВ (см. Табл.3). Эта величина порядка экспериментально наблюдаемой для сталей системы Fe-Cr-N с меньшей концентрацией. Увеличение концентрации азота приводит к дополнительным вкладом в ширину ЛМ.

Выводы, к которым мы приходим в результате анализа спектроскопических данных, вообще говоря, не противоречат модельным расчетам, основанным на термодинамических данных [2], и самим этим данным. Многочисленные измерения коэффициентов активности азота и углерода в аустените и жидком железе [14] показывают, что добавки хрома и марганца делают логарифмы коэффициентов активности азота и углерода отрицательными. Это значит, что взаимодействие их с хромом и марганцем сильнее, чем с железом. В случае добавок никеля, наоборот, логарифмы коэффициентов активности азота и углерода положительны, то есть

они сильнее взаимодействуют с железом, чем с никелем. Для количественных оценок удобно ввести парциальную энергию взаимодействия W_{iu} [15]:

$$W_{iu} = RT \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial x_{iu}}, \text{ где} \quad (3)$$

γ_i - коэффициент активности, x_{iu} - атомная доля легирующего металла. Литературные данные W_{iu} некоторых авторов [13-17] приведены в Табл.4. Так же, как и для логарифма коэффициента активности, отрицательное значение W_{iu} означает более сильное взаимодействие атома внедрения с легирующим компонентом по сравнению с железом. Эти данные мы пересчитали в единицах эВ/связь, учитывая октаэдрическую координацию атомов внедрения.

Полученную таким образом из термодинамических данных величину можно попытаться сравнить с глубиной потенциалов, использованных в вышеприведенных расчетах. Надо сразу оговориться, что энергия ЛМ зависит от второй производной потенциала металл-примесь внедрения, которая, естественно, не зависит прямо от глубины потенциальной ямы. Однако при определенных допущениях формы потенциала можно оценить и его глубину. Эти допущения были следующие: положения минимумов потенциалов Fe-N и Cr-N не сильно отличаются друг от друга, так как атомные размеры Fe и Cr близки; параметры обрезаний потенциалов были приняты равными; и, наконец, паулинговское отталкивание на близких расстояниях $r < 1.4 \text{ \AA}$ атомов внедрения и металла тоже одинаково (Рис.5). При этих, вполне логичных, допущениях видно, что для увеличения энергии ЛМ азота в окружении атомов Cr на, примерно, 10 мЭВ необходимо увеличить ее глубину с 0.38 эВ до 0.64 эВ, т.е. почти в два раза. Разность этих величин можно сравнить с термодинамическими данными (Табл.4), что показывает определенную корреляцию термодинамических и спектроскопических данных. Именно это увеличение глубины ямы, которое для спектроскопических данных наблюдалось только для связи Cr-N, и способствует

захвату азота на атомах хрома. А этот захват, как следствие, наиболее эффективно замедляет диффузию азота в хромистых сталях [14], так как последняя пропорциональна энергии взаимодействия W_{iu} . Это стабилизирует аустенит [1], эффективно тормозя движение дислокаций на кластерах Cr-N [2].

Однако есть определенные различия между выводами, которые можно сделать из термодинамических и спектроскопических данных. Для описания ЛМ мы использовали короткодействующие потенциалы, учитывающие взаимодействия с первыми и вторыми соседями. Термодинамические модели, как известно [13], тоже могут непротиворечиво описывать термодинамические данные металлических растворов в рамках короткодействующих потенциалов. Однако из Табл.4 видно, что парциальная энергия взаимодействия W_{iu} более плавно меняется от Cr к Ni, чем энергия ЛМ или ΔE , полученные из спектроскопических измерений. По-видимому, ЛМ определяются, в основном, взаимодействием азота или углерода с ближайшими соседями, и эта особенность взаимодействия на месте внедрения делает на микроскопическом уровне еще большим отличие взаимодействие Cr-N от остальных.

5. Выводы

1. Нейтронная спектроскопия - мощный метод изучения межатомного взаимодействия в кристаллах с различными добавками.
2. Спектроскопические данные подтверждают на атомном уровне наличие сильного взаимодействия Cr-N в азотистых сталях и дают его силовые и энергетические оценки. Наличие этого взаимодействия обуславливает захват атомов азота на атомах хрома, уменьшение диффузии азота, усиление стабильности твердого раствора, более эффективное торможение дислокаций.
3. По данным спектроскопии взаимодействие Cr-N, по-видимому, все-таки не меняет хаотическое распределение атомов Cr в металлической подрешетке.

Таблица 1

Химический и фазовый состав изученных сталей и нитридов

Сплав	Химический состав, % вес							Фазовый состав	
	N	C	Cr	Mn	Si	P	S	ГЦК,А	Нитрид
X15A1	0.964	0.03	14.93	0.77	0.29	0.01	0.01	3.616	-
X18A1.3	1.30	0.035	18.4	0.1	0.31	0.01	0.01	3.625	
X24A1	1.178	0.03	23.85	0.22	0.45	0.01	0.01	3.625	
X24A2	2.35	0.045	23.92	0.44	0.30	0.02	0.01	3.64	Cr ₂ N
Г17А	0.213	0.07	0.25	17.66	0.09	0.01	0.01	3.60	(FeMn) ₄ N
Г22А	0.698	0.047	0.24	22.36	0.13			3.615	
Г35А	0.713	0.12	0.32	35.33	0.21			3.63	
Mn ₄ N	4.34			95.3				3.83	Mn ₄ N
Cr ₂ N	11.7		88.0						Cr ₂ N

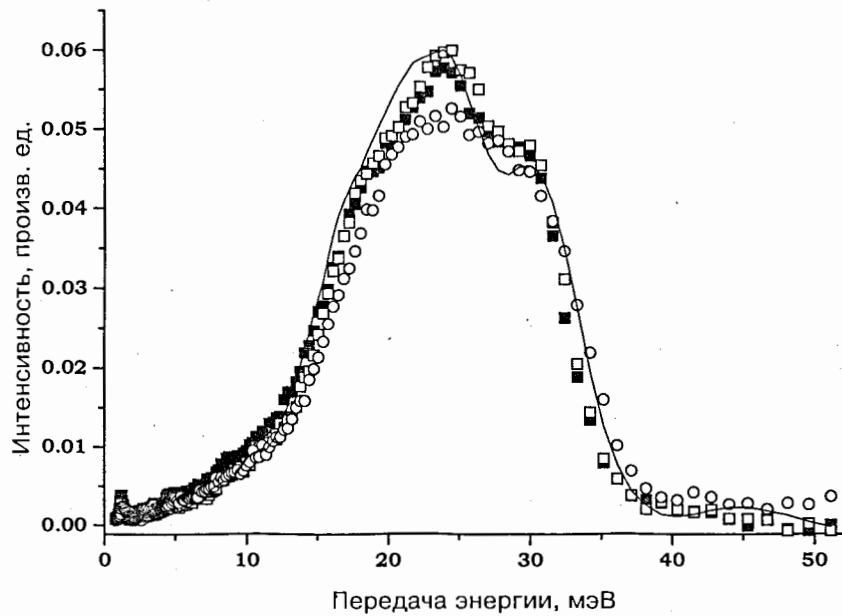


Рис.1. Фононные спектры марганцевых аустенитов: ○ - Г17А; ■ - Г22А; □ - Г35А; сплошная линия - сталь X18N9Т для сравнения.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные по энергиям ЛМ азота и углерода и их ширинам (в мэВ) в тройных аустенитах и нитридах.

Система	Сплав	Эксперимент		Расчеты			Ссылка
		ε	Δε	Форм(1)	Модель I	Модель II	
Fe-Cr-N	X15A	80.5±1	16.0±2	82.9	77.2	73.2	наст.р
	X18A1.3	78.1±1	30.0±2	82.9	77.4	73.0	наст.р
	X24A1	78.7±1	14.4±2	82.9	79.0	74.0	наст.р
	X24A2	78.0±1	широк.	82.9	77.7	74.0	наст.р
	Cr ₂ N*	74.0±1	13.4±2				наст.р
	Cr ₂ N	73.4±1	11.0±1				наст.р
	Fe-Mn-N	Г22А	69.6±1	5.0±2	80.4	76.8	72.0
Г35А		69.9±1	7.0±2	80.4	79.2	73.1	наст.р
Mn ₄ N		73.8±1	11.8±2				наст.р
Fe-Cr-C	80X12	76.1±0.5	10.7±1				[3]
Fe-Mn-C	110Г6	78.4±0.5	4.7±1	79.0			[4]
	160Г2	76.0±1	5.0 ±1	78.5			[4]
	110Г4	76.0±1	6.5±1	79.0			[4]
	110Г13	78.0±1	6.5±1	79.0			[4]
	100Г75	78.0±1	11.0±1	78.0			[4]
Fe-Ni-C	110Н10	75.8±1					[5]
	60Н19	76.0±2	5.3±1				[6]
	100Н19	78.0±2					[6]
	100Н25	75.0±1	8.0±2				наст.р

Cr₂N* - в виде преципитатов сплава X18A1.3 после отжига при 800° С

Таблица 3

Процентное содержание октаэдров, содержащих различное количество атомов Cr или Mn (от 6 до 0) для полностью неупорядоченного бинарного сплава $Fe_{100-x}Cr(Mn)_x$ а также рассчитанные ЛМ азота в этих октаэдрах (в мэВ)

X, %	Конфигурация атомов Cr или Mn						
	6	5	4	3	2	1	0
15	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	0.547	6.45	17.55	40	38
18	$3 \cdot 10^{-3}$	0.1	1.055	6.403	21.9	37	30
24	$2.5 \cdot 10^{-2}$	0.45	3.5	13.5	30	36	18
ϵ_f , Cr-N	83.5	83.5	83.5	83.5	77.5	77.5	70.5
	83.5	83.5	83.5	76.5	77.5	70.5	70.5
	83.5	75.5	70.5	70.5	70.5	70.5	70.5
ϵ_f , Mn-N	80	80	80	80	75.5	75.5	70.5
	80	80	80	75.5	75.5	70.5	70.5
	80	75.5	70.5	70.5	70.5	70.5	70.5

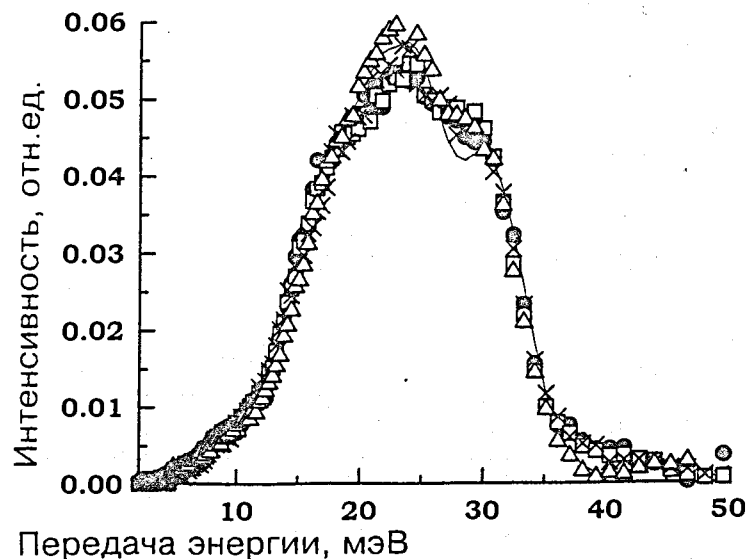


Рис.2. Фононные спектры хромистых аустенитов: ○ - X35A1; □ - X15A1; x - X24A2; Δ - X18A1.3; сплошная линия - сталь X18H9T для сравнения.

Таблица 4

Термодинамические и спектроскопические энергетические данные для азота и углерода в тройных аустенитах

Система	W_{iu} , [13]		W_{iu} , [15,16]		[17],	ϵ_f ,	ΔE ,
	kJmol^{-1}	эВ/св	kJmol^{-1}	эВ/св	эВ/св	мэВ	эВ/св
Fe-Cr-N	-128	-0.17	-332	-0.43	-0.24	78.7	-0.34
Fe-Mn-N	-56	-0.07	-104	-0.19	-0.076	69.7	
Fe-Ni-N	0	0	48	0.07	-	-	
Fe-Cr-C	-68	-0.09	-129	-0.23		70.4*	-0.06
Fe-Mn-C	-30	-0.04	-51	-0.08		71.3*	-0.06
Fe-Ni-C	30	0.04	44	0.06		70.4*	

* - энергии колебаний углерода приведены к энергиям колебаний азота в изотопическом приближении.

ΔE - разница между глубиной потенциальной ямы взаимодействия Cr-N и Fe-N (Fe-C).

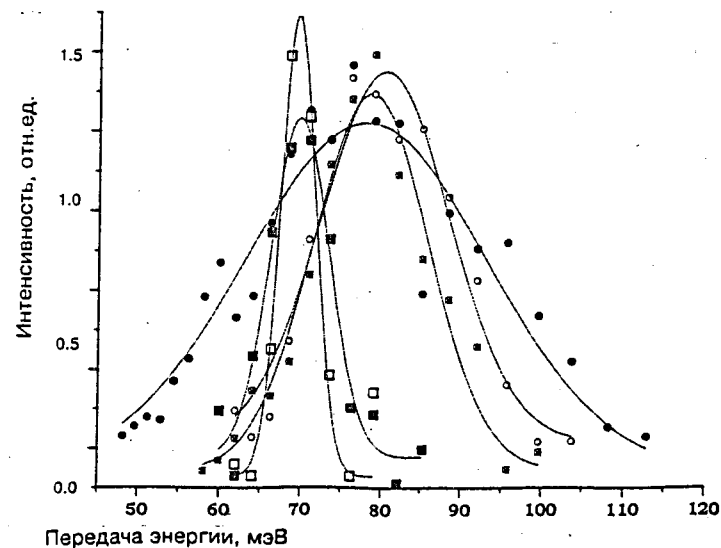


Рис.3. Локальные моды азота в тройных Fe-Me-N (Me=Cr, Mn) аустенитах:

□ - Г22А; ■ - Г35А; ⊗ - X24А1; ○ - X15А1; ● - X18А1.3

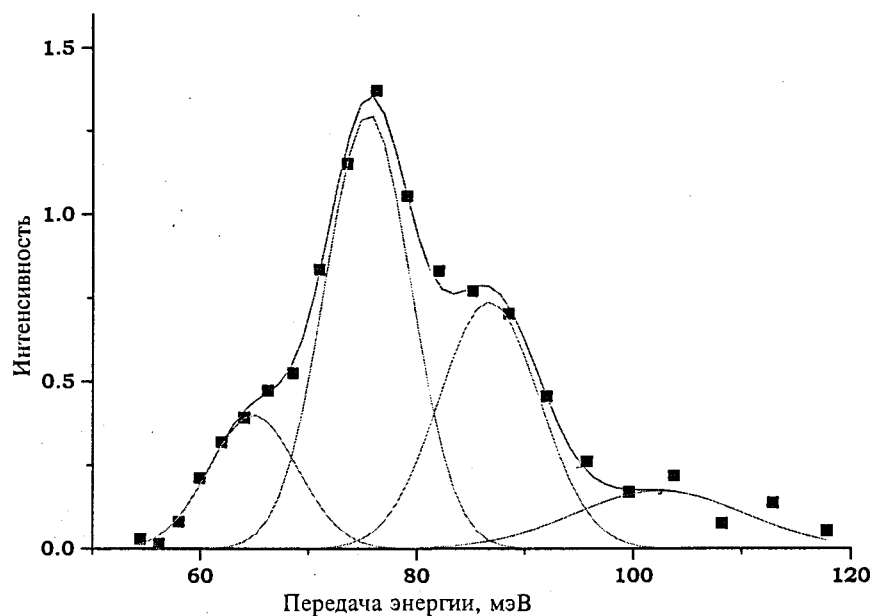


Рис.4. Локальная мода азота в аустените X24A2.

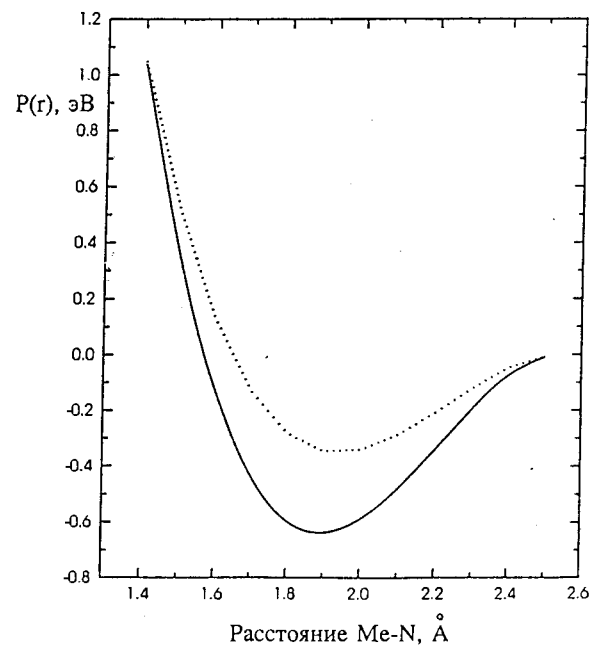


Рис.5. Потенциальные кривые для пары Cr-N (—) и Fe-N (.....).

Авторы благодарят Колина Н.Г. (Филлал НИФХИ им. Л.Я.Карпова) за помощь в нейтронографических исследованиях сталей и Программу "НИВ" за поддержку исследований.

Литература

1. Рашев Ц. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением.- София: Изд. "Проф. Марин Дринов". 1995. с.75.
2. Grujicic M., Owen W.S. Nitrogen induced ordering in face-centered cubic Fe-Ni-Cr-N solid-solution alloys. Proceeding of 3rd Intern.Conf. "High nitrogen steels HNS 93".- Kiev, 1993, p. 686-702.
3. Сумин В.В., Морозов С.И., Натканец И., Петру Д. Изучение локальных колебаний атомов углерода в сплавах Fe-Mn-C и Fe-Ni-C методом неупругого рассеяния нейтронов.- ФММ, 1988, 65, вып.1, с.168-172.
4. Сумин В.В., Минаев В.П., Чокло А.И. и др. Изучение железо-никелевого аустенита методом неупругого рассеяния нейтронов.- Металлофизика, 1990, 12, вып.1, с.100-103.
5. Сумин В.В., Землянов М.Г., Паршин П.П., Капуткина Л.М. и др. Изучение структуры и динамики сплавов Fe-Mn-C методами рассеяния нейтронов.- ФММ, 1990, вып.11, с.122-127.
6. Сумин В.В., Блинов В.М., Натканец И. и др. Изучение локальных колебаний ионов азота и углерода в аустенитных сталях.- Изв АН СССР, Металлы, 1988, вып.2, с. 160-164.
7. Сумин В.В., Гаврилюк В.Г., Минаев В.П. и др. Изучение азотосодержащих хромомарганцевых аустенитных сталей методом НРН.- Металлофизика, 1991, 13, вып.1, с.29-34.
8. Данилкин С.А., Минаев В.П., Сумин В.В. Исследование влияния азота и углерода на динамику решетки аустенита методом НРН.- Препринт ФЭИ, 1991, г.Обнинск, 20 с.

9. Gavriluk V.G., Efimenko S.P., Sumin V.V. et al. Study of the nitrogen or carbon and metal-component influence on interatomic interactions in austenitic steels by INS.-Materials Science & Engin.,1995, A203, p.300-304.
10. Андреев Ч., Рашев Ц., Сумин В.В., Чинид Г. Изучение межатомного взаимодействия в азотистом хромомарганцевом аустените методом НРН. ФММ, 1997, 84, вып.4, с.150-153.
11. Sumin V.V. Local modes of interstitial atoms in transition metals.- Materials Science & Engineering, 1997,A230, p.63-67.
12. Johnson R.A.,Dienes G.J., Damask A.C. Calculations of the energy and migration characteristics of carbon and nitrogen in α -Fe and V.-Acta Met.,1964,12, N 11, p. 1215-1224.
13. Люпис К. Химическая термодинамика материалов.-Москва: Металлургия, 1989, с. 404.
14. Фром Е., Гебхард Е. Газы и углерод в металлах.- Москва: Металлургия, 1980, с. 552.
15. Miura H., Omura K., Ogawa H. Preparation of amorphous high nitrogen iron alloys with ternary additions by mechanical alloying. Iron Steel Inst. Jap. Internat., 1996, 36, No 7, p. 951-957.
16. Omuro K., Miura H. Chemical effect of ternary additions on amorphization in Fe-C systems by mechanical alloying. Appl. Phys. Lett. 1994, 64, No 22, p. 2961-2963.
17. Ko C., McLellan R.B. Thermodynamics of ternary nitrogen austenites. Acta Met.,1983, No 11, p. 1821-1827.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июля 1998 года.

Сумин В.В. и др.

P14-98-222

Нейтроноспектроскопическое доказательство сильного Cr-N-взаимодействия в азотистых сталях

Методом нейтронной спектроскопии доказано существование сильной химической связи Cr-N в азотистых аустенитах. Силовая константа этой связи на 30 % выше, чем для связей (Mn, Fe)-N и (Cr, Mn, Fe, Ni)-C, а глубина потенциальной ямы примерно в два раза больше, чем для перечисленных выше связей.

Из-за этой сильной связи азот захватывается кластерами хрома внутри решетки аустенита, что имеет большие последствия: более эффективное торможение дислокаций этим комплексом, увеличение стабильности азотистого аустенита. По-существу, эта связь объясняет преимущества азотистых сталей перед углеродистыми.

Однако по спектроскопическим данным азот не собирает вокруг себя атомы хрома в сталях после аустенизации, т.е. не меняет хаотического распределения металлических атомов в Fe-Cr-матрице.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1998

Перевод авторов

Sumin V.V. et al.

P14-98-222

The Neutron Spectroscopy Proof of the Strong Cr-N Interactions in Nitrogen Stainless Steels

The existence of the strong Cr-N interaction in Fe-(Cr, Mn, Ni)-N was proved by the neutron spectroscopy.

The force constant of the Cr-N interaction is 30 % higher and the value of its potential depth is twice greater than that of metal-nitrogen or carbon pairs.

Due to this strong interaction nitrogen is trapped by Cr-clusters the austenite lattice. This has great consequences: a decrease of the dislocation flowing and diffusion both of N and Cr atoms, an increase of the austenite stability. Really, this interaction explains advantages of the nitrogen steels before carbon ones.

The spectroscopy data do not show the changing of the random distribution of the metal atoms in the Fe-Cr austenitic matrix just after austenisation treatment.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1998