

Малоугловое рассеяние нейтронов и эффект Мессбауэра в азотистом аустените

© В.М. Надутов, В.М. Гарамус*, А.Х. Исламов**

Институт металлофизики Национальной академии наук Украины,
Киев, Украина

* GKSS исследовательский центр, Геештахт (Geesthacht), Германия

** Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Россия

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 15 июня 2001 г.)

Исследовано малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) в высокоазотистом Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N и Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N аустените. Проведены измерения и анализ дифракции нейтронов и мессбауэровских спектров. Аппроксимацию кривых МУРН проводили с использованием моделей Гинье и Порода. Природа МУРН в азотистом аустените связывается с существованием микронеоднородностей, структура которых зависит от легирования никелем. Оценен средний размер и форма неоднородностей. Изучено влияние низкотемпературного отжига образцов Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустенита на МУРН и параметры спектров ядерного гамма-резонанса.

Измерения МУРН были проведены в рамках гранта № IV.1.31 в лаборатории нейтронной физики (г. Дубна). Финансовая поддержка была частично оказана Лильским университетом (Франция) и научно-исследовательским центром GKSS (Германия).

Многочисленные исследования показали, что механические свойства аустенитных нержавеющей сталей существенно улучшаются при легировании азотом. Азотистые аустенитные стали обладают высокой ударной вязкостью и стойкостью к разным видам коррозии [1]. Эти материалы представляют интерес для практического применения.

Важным фактором, влияющим на их коррозионные и механические свойства, является микроструктура и распределение атомов в твердом растворе. Мессбауэровские исследования Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N аустенита обнаружили сложную сверхтонкую структуру спектров, возникающую из-за неоднородного ближнего атомного порядка [2]. Однако изучение неупругого рассеяния нейтронов (НРН) в Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–(0–0.5%)N аустените показало, что локальная мода колебаний атомов азота имеет симметричную форму, интенсивность которой линейно растет при увеличении концентрации азота, что указывает на его гомогенное распределение в решетке [3].

Метод малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) широко используется для обнаружения и исследования неоднородностей и предвыделений фаз [4,5]. Малоугловое рассеяние нейтронов наблюдалось в Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N аустените и объяснялось существованием неоднородностей, которые харак-

теризуются фрактальной структурой и негладкой поверхностью границ, однако не являются нитридами [6]. Мы предполагаем, что такие свойства структуры неоднородностей в аустенитной фазе обусловлены наличием азота и никеля. Сильное Ni–N [7] и N–N отталкивание [8] может привести к неоднородному атомному порядку в никель-азотсодержащем аустените и соответственно к неоднородному магнитному порядку, что может обеспечить необходимый контраст для наблюдения МУРН.

Для исключения влияния одного из элементов на микроструктуру гамма фазы в данной работе исследовали МУРН в аустените Fe–Cr–Mn–N, не содержащем никель, и сравнивали с содержащей никель композицией Fe–Cr–Mn–Ni–N. С использованием дифракции нейтронов и методом мессбауэровской спектроскопии изучен фазовый состав и изменения ближнего атомного порядка под воздействием низкотемпературного отжига стали Fe–Cr–Mn–N.

1. Эксперимент

Для исследований были взяты аустенитные стали Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N и Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N, составы которых приведены в табл. 1. Образцы в виде пластин отжигали при температуре 1125°C (Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N) и 1100°C

Таблица 1. Составы аустенитных сталей

N	C	Mn	Cr	Mo	Ni	S	Ti	Si	B	Al	Cu	P	Fe
0.9	0.04	19.1	18.68	0.06	0.45	< 0.01	< 0.01	0.45	< 0.0004	0.011	0.06	0.016	Остальное [9]
0.5	–	10.0	18.0	–	16.0	–	–	–	–	–	–	–	Остальное

(Fe-18%Cr-10%Mn-16%Ni-0.5%N) и затем закаливали в воде. Часть образцов Fe-19%Cr-19%Mn-0.9%N аустенита повторно нагревали при температурах 250°C в течение 150 h, 300°C — 180 h и 350°C — 250 h.

Измерения МУРН были проведены на времяпролетном спектрометре "МУРН", установленном на импульсном реакторе ИБР-2 в лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Условия проведения эксперимента и функции разрешения МУРН описаны в работе [10]. Использовалась аксиально-симметричная геометрия МУРН (форма коллиматоров, образцов, регистрирующей системы). Система детектирования состояла из восьми тороидальных детекторов. Интенсивность нейтронов на образце составляла $10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Спектр падающих тепловых нейтронов описывали максвелловским распределением со средней длиной волны $\langle \lambda \rangle = 1.1 \text{ \AA}$. Измерения были проведены в диапазоне длин волн нейтронов 1.1–3.1 Å (для аустенита Fe-19%Cr-19%Mn-0.9%N) и 1.1–8.5 Å (для Fe-18%Cr-10%Mn-16%Ni-0.5%N), в котором брэгговские дифракционные рефлексы не наблюдались. Калибровка интенсивности пучка нейтронов проводилась по ванадиевому стандарту. Параметры и инвариант картины рассеяния вычислялся с учетом функции разрешения спектрометра. Статистическая ошибка для измеренных кривых не превышала 6%.

Измерение дифракции нейтронов проведено на времяпролетном дифрактометре ДН-2, установленном на том же реакторе. Условия проведения эксперимента, накопления данных и коррекции на интегральную интенсивность описаны в работе [11]. Дифракционные данные обрабатывали с помощью автоматической программы, описанной в [12], методом Ритвельда с помощью программы МРИЯ [13].

Мессбауэровские спектры пропускания были получены при комнатной температуре на экспрессном спектрометре МС-1101Э в режиме постоянных ускорений в Институте металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины (Киев). В качестве источника гамма-квантов использовали изотоп $^{57}\text{Co}/\text{Cr}$. Спектры аппроксимировали с помощью стандартной программы, основанной на методе наименьших квадратов, с использованием комбинаций линий Лоренца и Гаусса. Калибровка скоростей осуществлялась по α -Fe и нитропруссиду натрия. Ширина линии нитропруссид натрия не превышала 0.19–0.20 mm/s.

2. Результаты

Малоугловое рассеяние нейтронов обнаружено в аустените обоих составов. Наблюдается существенное различие между наклоном кривых МУРН в аустените, содержащем и не содержащем никель (рис. 1). Низкотемпературный отжиг принципиально не изменил картину рассеяния (рис. 2).

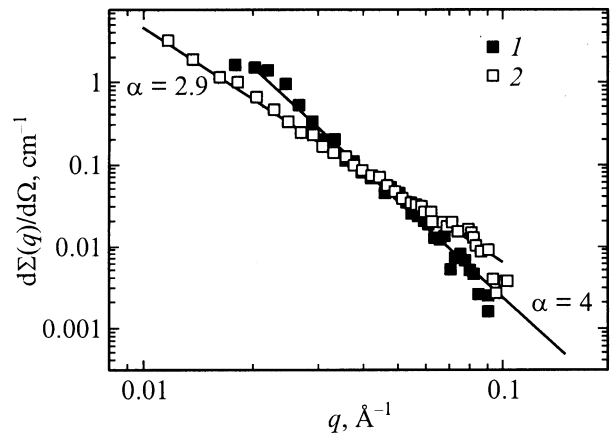


Рис. 1. Дифференциальное поперечное сечение малоуглового рассеяния нейтронов в Fe-19%Cr-19%Mn-0.9%N (1) и Fe-18%Cr-10%Mn-16%Ni-0.5%N (2) аустенитах (% по массе) после гомогенизации и последующей закалки. Экспериментальные значения представлены с учетом вычитания фона. Аппроксимирующие кривые показаны сплошными линиями. Осцилляция экспериментальных данных, по-видимому, связана со статистической погрешностью и свойствами выбранных приближений; α — показатель степени.

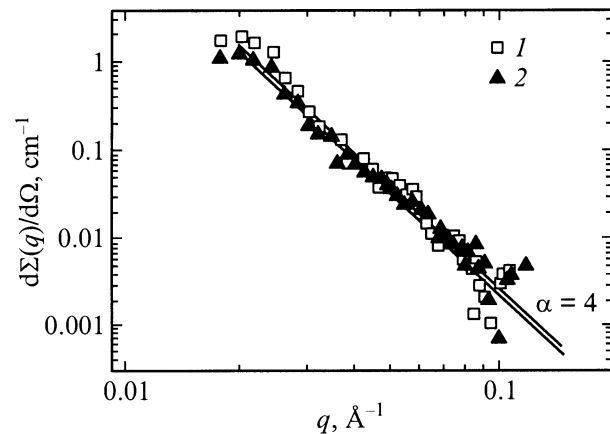


Рис. 2. Дифференциальное поперечное сечение малоуглового рассеяния нейтронов в Fe-19%Cr-19%Mn-0.9%N аустените (% по массе) после отжига 250°C, 150 h (1) и 350°C, 250 h (2). Экспериментальные значения представлены с учетом вычитания фона. Аппроксимирующие кривые показаны сплошными линиями; α — показатель степени.

Измерения дифракции нейтронов и мессбауэровских спектров показали, что исследуемые объекты представляют собой однофазную аустенитную структуру (рис. 3). Были найдены периоды ГЦК решетки Fe-Cr-Mn-N аустенита — 0.35893 nm и Fe-Cr-Mn-Ni-N — 0.3604 nm. Низкотемпературный отжиг образцов Fe-Cr-Mn-N не изменил форму и положение дифракционных линий и не привел к появлению новой фазы.

Анализ показал, что мессбауэровские спектры поглощения состоят из трех подспектров: монолинии θ ,

Таблица 2. Параметры мессбаэровских спектров Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустенита¹ mm/s

Обработка	δ_0 , mm/s	Γ_0 , mm/s	δ_{0r} , mm/s	Δ_{0r} , mm/s	Γ_{0r} , mm/s	δ_1 , mm/s	Δ_1 , mm/s	Γ_1 , mm/s	$S_1/\Sigma S_i$, %
1125°C, 0.5 h	-0.193	0.201	-0.193	0.197	0.224	-0.154	0.418	0.228	14.3–16.7
250°C, 150 h	-0.193	0.230	-0.193	0.212	0.253	-0.153	0.431	0.227	12.8–15.4
300°C, 180 h	-0.192	0.229	-0.190	0.205	0.241	-0.147	0.436	0.216	13.2–14.2

¹ δ_i — изомерный сдвиг относительно α -Fe, Δ_1 — квадрупольное расщепление, Γ_i — ширина резонансной линии (± 0.01 mm/s), $S_1/\Sigma S_i$ — максимальное и минимальное значение относительной площади дублета I , полученное в рамках шести разных вариантов описания.

дублета O' и дублета I (рис. 4), которые принадлежат разным атомным окружениям в γ -фазе. Компонента O соответствует атомам Fe, не содержащим легирующие элементы в первой координационной сфере. Дублет I с положительным изомерным сдвигом относительно монолинии (табл. 2) относится к атомам Fe, в ближайшем окружении которых имеется по крайней мере один атом азота и другие легирующие эле-

менты **q** по сравнению с никелевым Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N аустенитом (рис. 1). Это означает, что никель увеличивает объемную долю неоднородностей в аустенитной фазе и соответственно рассеяние нейтронов в аустените.

Такую ситуацию нетрудно было предвидеть, поскольку железо-никелевый аустенит характеризуется негетерогенным атомным порядком. Изменяющееся от узла к узлу ближайшее окружение данного атома ведет к неоднородной магнитной структуре (см. [14], и ссылки в ней), обусловленной существованием двух электронных состояний атомов Fe [15]. Согласно [15] эти состояния

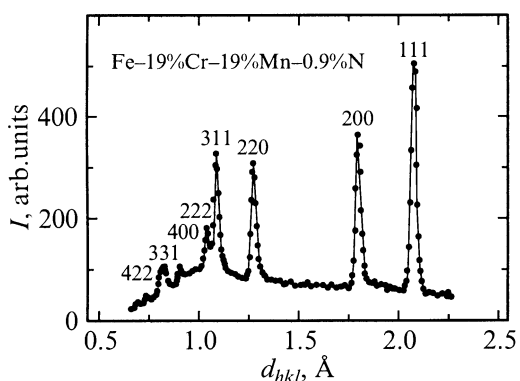


Рис. 3. Нейтронограмма Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустенита (% по массе) после гомогенизации при 1125°C, 0.5 h и последующей закалки.

менты. Дублет O' с меньшей величиной квадрупольного расщепления, чем дублет I (табл. 2), обусловлен атомами Fe, имеющими атомы замещения в качестве ближайших соседей и не содержащими в ближайших междоузлиях атомы азота. Детально изомерные сдвиги и квадрупольное расщепление компонент мессбаэровских спектров легированного аустенита были проанализированы в работе [2].

3. Обсуждение

Обнаруженное малоугловое рассеяние нейтронов свидетельствует о существовании неопределенностей или предвыделений в аустенитной фазе исследуемых составов. Дифференциальное поперечное сечение МУРН в аустените, не содержащем никель Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N, меньше в области больших векторов рассея-

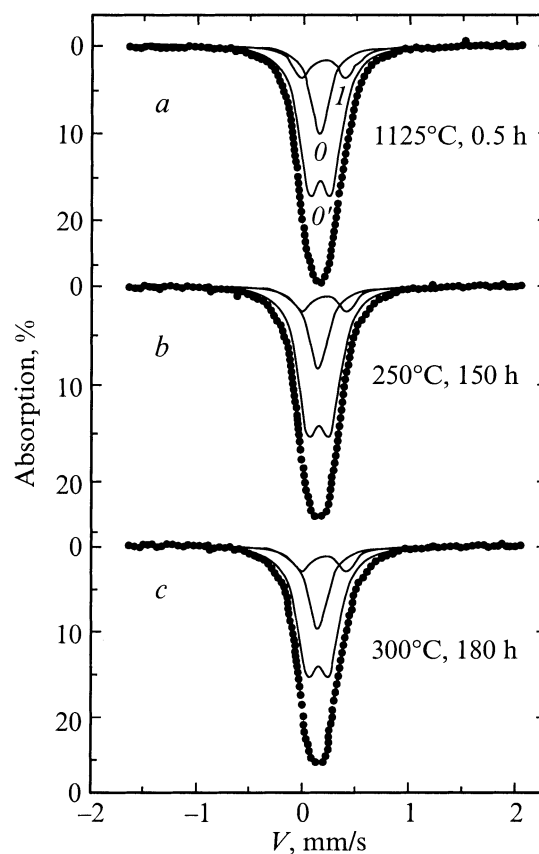


Рис. 4. Мессбаэровские спектры Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустенита (% по массе) после гомогенизации при 1125°C 0.5 h и последующей закалки (a), после отжига 250°C, 150 h (b) и 300°C, 180 h (c).

соответствуют ферромагнитному и антиферромагнитному обменным взаимодействиям, для которых вторые моменты обменного интеграла имеют разные знаки и равны $J_{\text{Fe-Fe}}^{(2)} = -9$, $J_{\text{Fe-Ni}}^{(2)} = 39$, $J_{\text{Ni-Ni}}^{(2)} = 59$ meV.

Магнитные неоднородности в содержащем никель аустените сильно зависят от концентрации элементов внедрения углерода или азота (см., например, [2,14] и ссылки в них). Поскольку нейтроны рассеиваются не только ядрами, но и их магнитными моментами, магнитные неоднородности в содержащем никель аустените вносят дополнительный вклад в МУРН, а в безникелевом Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените этот вклад существенно ослаблен.

Обнаружено различие между наклоном кривых МУРН в содержащем никель и безникелевом аустените (рис. 1), что свидетельствует о разной микроструктуре неоднородностей. Для анализа наклона кривых рассеяния и описания микронеоднородностей использовали общепринятые двухфазные модели. При этом предполагалось, что микроструктура исследуемой системы может быть описана набором частиц коллоидного размера с длиной рассеивающей плотности ρ , находящихся в матрице, описываемой длиной рассеивающей плотности ρ_s .

Рассмотрено приближение Гинье, характеризующее дифференциальное сечение рассеяния нейтронов $d\Sigma(q)/d\Omega$ в области малых величин векторов рассеяния $q = 4\pi \sin \Theta/\lambda$, где 2Θ — угол рассеяния [16]. Для выполнения приближения Гинье при заданном q должно выполняться условие $qR_g < 1$, где R_g — радиус инерции рассеивающей плотности рассматриваемой неоднородности. Было установлено, что модель Гинье не описывает соответствующие участки кривых МУРН в области малых q в обоих аустенитах. Это означает, что выполняется неравенство $qR_g > 1$, из которого следует, что средний размер негомогенностей превышает 100 \AA .

Для аппроксимации кривых МУРН в области больших векторов рассеяния рассматривалось приближение Порода, описывающее неоднородности или предвыделения с гладкими поверхностями [17,18],

$$d\Sigma(q)/d\Omega = 4q^{-\alpha} + B, \quad (1)$$

где $\alpha = 4$, $A = 2\pi \Delta\rho^2 S$ — константа Порода, характеризующая полную площадь поверхности неоднородностей, S — удельная площадь поверхности между неоднородностью и матрицей, B — остаточный некогерентный фон, $\Delta\rho^2 = (\rho - \rho_s)^2$ — контраст.

В никельсодержащем Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N аустените породовский участок на кривой рассеяния нейтронов не был обнаружен. Спектр рассеяния данного аустенита описывается степенным законом с показателем степени $\alpha < 4$, свидетельствующим о существовании фрактальных структур [19]. Фрактально-подобные неоднородности обладают негладкой и нечеткой границей с матрицей.

Для используемого диапазона векторов рассеяния $q = 0.01\text{--}0.1$ (рис. 1) получено значение параметра

фрактальной размерности $D = 2.9 \pm 0.2$, который детально проанализирован в работе [6]. Величина $D < 3$ указывает на объемный фрактал, для которого связь массы M с линейным размером неоднородности l описывается формулой $M = M_0 l^D$, где M_0 — постоянная величина. Не исключена также возможность существования поверхностного фрактала, поскольку в пределах ошибки может выполняться неравенство $3 \leq D < 4$. Исходя из используемого интервала векторов рассеяния, оценен размер данных объектов $10\text{--}350 \text{ \AA}$.

Существование фрактально-подобных структур в азотистом никельсодержащем аустените свидетельствует о неоднородности массовой и магнитной плотности. Поскольку нитриды в данном аустените не обнаружены дифракционным методом, фрактальные свойства могут быть обусловлены кластерами вакансий или микропорами, а также магнитными неоднородностями, возникающими при легировании сплавов железа никелем и элементами внедрения [2,14,20]. Разделить вклады, связанные со структурными и магнитными неоднородностями, представляется возможным при использовании поляризованных нейтронов. Критическим экспериментом для разделения структурного и магнитного вкладов, могло бы быть также измерение малоуглового рассеяния рентгеновских лучей.

Наклон кривых МУРН в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените соответствует $\alpha = 4$, что означает существование неоднородностей другой природы и свидетельствует об отсутствии объектов с фрактальными свойствами. Эти данные подтверждают предположение о том, что фрактальность связана с легированием аустенита никелем.

Анализ данных показал, что на кривых МУРН в аустените Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N в исходном состоянии и после отжига есть породовские области. Минимальное значение вектора рассеяния, при котором становится справедливым приближение Порода, $q_p = 0.03 \text{ \AA}^{-1}$ (рис. 1). Наклон кривых рассеяния $\alpha = 4$ означает, что в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените неоднородности имеют гладкую и четкую границу.

Гладкая и четкая граница между неопределенностями и матрицей в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените может быть связана с существованием предвыделений нитридной фазы. Поскольку они не обнаружены с помощью дифракционных методов (рис. 2), можно предполагать их высокую дисперсность и малую объемную долю.

Мессбауэровские измерения также не выявили следов иной фазы, кроме аустенитной. Три составляющие спектра (рис. 4) отражают разное ближайшее окружение атомов Fe атомами N и/или атомами замещения Mn, Cr в γ -фазе. Отсутствие дополнительных компонент в спектре от выделений нитридных фаз указывает на то, что микрообъекты в аустените содержат малую долю железа и являются парамагнитными. Поэтому мы предполагаем, что предвыделения в безникелевом аустените, дающие МУРН (рис. 1 и 2), обогащены хромом, марганцем и азотом и являются зародышами нитридов этих элементов.

Таблица 3. Параметры МУРН в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените

Обработка	$A, 10^{-7}$ $\text{cm}^{-1} \cdot \text{Å}^{-4}$	$Q, 10^{-6}$ $\text{cm}^{-1} \cdot \text{Å}^3$	$K, 10^{-4}$ $\text{cm}^{-1} \cdot \text{Å}^2$
1. 1125°C, 0.5 h	2.26 ± 0.08	17.4 ± 0.8	10.4 ± 0.7
2. 250°C, 150 h	2.38 ± 0.1	19.0 ± 0.9	11.5 ± 0.8
3. 350°C, 250 h	1.77 ± 0.07	13.3 ± 0.8	8.0 ± 0.7

Таблица 4. Характерные размеры неоднородностей в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените

Обработка	$R', \text{Å}$	$\langle R \rangle, \text{Å}$	$R_p, \text{Å}$
1. 1125°C, 0.5 h	200	190 ± 30	74 ± 5
2. 250°C, 150 h	200	190 ± 30	76 ± 5
3. 350°C, 250 h	200	190 ± 30	75 ± 5

Следует отметить, что в области векторов рассеяния $q \sim 0.02$ на кривых МУРН в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените независимо от термообработки наблюдается отклонение от линейности (рис. 1 и 2). Предполагаем, что данная особенность может быть обусловлена существованием структурных неоднородностей размером меньшим 100Å . Использование нейтронов с большими длинами волн могло бы дать более выразительную картину и позволило бы успешно применить приближение Гинье в данной области векторов q .

Интегрирование поперечного сечения рассеяния нейтронов провели по трем интервалам векторов рассеяния: $[q_p, \infty]$ — для приближения Порода (1), $[q_{\min}, q_p]$ — для численного и аналитического интегрирования, в интервале $[0, q_{\min}]$ было взято постоянное значение сечения рассеяния $d\Sigma(q)/d\Omega = d\Sigma(q_{\min})/d\Omega$.

Были определены: суммарная площадь поверхности неоднородностей A (1) [17], инвариант Порода $Q = \int_0^\infty q^2(d\Sigma(q)/d\Omega)dq$, характеризующий суммарный объем неоднородностей $N \cdot v$ (N — число неоднородностей и v — удельный объем неоднородности), параметр распределения хорд $K = q(d\Sigma(q)/d\Omega)dq$, связанный со средней хордой неоднородности [18].

Результаты вычислений представлены в табл. 3. Различия в параметрах A , Q и K для образцов исходной закаленной и отожженной при 250°C стали не выявлены. Отжиг при температуре 350°C привел к уменьшению интегральных параметров A , Q и K в сравнении с исходным состоянием. Такое изменение может быть связано со снижением контраста $\Delta\rho^2$ или уменьшением геометрических размеров неоднородностей: суммарной площади поверхности, суммарного объема и средней хорды выделений соответственно.

На основании значений A , Q , K в рамках трех подходов был оценен размер и форма неоднородностей в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените.

1) Предполагая, что неоднородности не имеют сильно вытянутой или сплюснутой формы, авторы провели оценку среднего размера, воспользовавшись связью минимального значения вектора рассеяния, при котором начинает выполняться породовское приближение, и средним радиусом неоднородностей $q_p R' > 6$ [17]. Было найдено, что для всех образцов стали Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N характеристический средний радиус R' предвыделений равен порядка 200Å (табл. 4).

2) Для неоднородностей с постоянной длиной рассеяний средний радиус $\langle R \rangle$ вычислялся с использованием функции распределения хорд $\langle R \rangle = \pi K Q^{-1}$ [16]. Полученный размер неоднородностей $\langle R \rangle$ представлен в табл. 4. Его значение согласуется с предыдущей величиной R' .

3) Комбинация параметра A и инварианта Q дает отношение площади к объему неоднородности, так называемый породовский радиус $R_p = 3/\pi Q A^{-1}$. Установлено, что R_p меньше, чем полученные значения R' и $\langle R \rangle$ (табл. 4). Малое значение R_p подтверждает правильность объяснения особенности на кривых МУРН в безникелевом аустените в области векторов рассеяния $q \sim 0.02$. Исходя из полученного различия между R' , $\langle R \rangle$ и R_p , можно все-таки утверждать, что неоднородности имеют несферическую форму.

Из соотношений R'/R_p и $\langle R \rangle/R_p$ было получено некоторое усредненное отношение максимальных и минимальных размеров исследуемых неоднородностей $R_{\max}/R_{\min} \approx 2$. Оцененное значение $R_{\max}/R_{\min} \approx 2$ показывает, что форма неоднородностей может быть несколько вытянутой или сплюснутой.

Результаты вычислений в рамках различных подходов показывают, что соответствующие параметры R' , $\langle R \rangle$ и R_p , относящихся к закаленному и отожженным образцам, не различаются (табл. 4). Таким образом, причиной уменьшения величин A , Q , K (табл. 3) является уменьшение контраста $\Delta\rho^2$ между неоднородностями и растворяющей матрицей, что может быть обусловлено перераспределением атомов внедрения при нагреве.

Атомное перераспределение в аустените определяли на основании анализа мессбауэровских данных (рис. 4). Изомерный сдвиг δ , квадрупольное расщепление Δ_i , ширина линий Γ_1 , относительная площадь $S_i/\Sigma S_i$, компонент спектра поглощения парамагнитного аустенита сильно скоррелированы и слабо разрыхлены. Поэтому точное определение параметров сверхтонкого взаимодействия и их изменение при отжиге было затруднительным. Тем не менее параметры дублета I (рис. 4), связанного с атомами внедрения в ближайшем окружении атомов железа, изменяются за пределами ошибки (табл. 2), что указывает на процесс атомного перераспределения при нагреве аустенита.

В заключение отметим, что результаты проведенного анализа могут быть важной отправной точкой для понимания роли старения в изменении усталостных характеристик стали Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N [9] и указывать на направление дальнейших исследований.

Таким образом, дифракция нейтронов и мессбауэровские измерения показали, что легированный никелем аустенит Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N и безникелевый Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустенит находятся в однофазном состоянии. Отжиг Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустенита при температурах 250 и 350°C не привел к изменению ее фазового состава.

МУРН обнаружено в обеих композициях. Однако в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените дифференциальное сечение рассеяния меньше, чем в стали Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N. На кривой рассеяния в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените обнаружен породообразующий участок, соответствующий неоднородностям с четкой и резкой границей. Фрактально подобные неоднородности, характеризующиеся нечеткой и негладкой границей с матрицей, обнаружены только в никельсодержащем Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N аустените.

Размер неоднородностей с фрактальной структурой в Fe–18%Cr–10%Mn–16%Ni–0.5%N аустените лежит в пределах 10–350 Å, а неоднородности в Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустените имеют несферическую форму и характерный размер 200 Å, неменяющийся при последующем отжиге. Обнаружено изменение контраста после отжига Fe–19%Cr–19%Mn–0.9%N аустенита при 350°C, что обусловлено перераспределением атомов.

Авторы выражают благодарность Н.Д. Афанасьеву (г. Ижевск) за выплавку азотистой аустенитной стали, содержащей никель. Авторы благодарят проф. Ж. Фокта и проф. Ж.-Б. Вогта (Лильский университет) за предоставленную для исследований аустенитную сталь и полезные дискуссии, А.И. Бескровного (Дубна) за полезное обсуждение дифракционных данных, Ш. Борбели (Будапешт) за возможность экспериментальной проверки некоторых точек на кривой МУРН в Будапештском нейтронном центре и обсуждение экспериментальных данных.

Список литературы

- [1] F.B. Pickering. Proc. II Int. Conf. High Nitrogen Steels, Lille (1988). P. 10.
- [2] V.M. Nadutov. Mater. Sci. Eng. **A254**, 234 (1998).
- [3] V.G. Gavriluk, V.M. Nadutov, S.A. Danilkin, et al. Mater. Sci. Eng. **A203**, 300 (1995).
- [4] G. Kostorz. J. Appl. Cryst. **24**, 444 (1991).
- [5] G. Kostorz. In: Modern Aspects of Small-Angle Scattering / Ed. by H. Brumberger. NATO ASI Series, Series C Kluwer. **451**, 255 (1995).
- [6] V.M. Nadutov, L.A. Bulavin, V.M. Garamus. Mater. Sci. Eng. **A264**, 286 (1999).
- [7] P. Rochegude, J. Foct. In: Proc. 1st Int. Conf. on High Nitrogen Steels / Ed. by J. Foct, A. Hendry. Lille, France, 18–20 May (1988) London, North American Publications Center, Brookfield, USA (1989). 444 p.
- [8] A.G. Balanyuk, V.N. Bugaev, V.M. Nadutov, A.L. Sosinov. Phys. Stat. Sol. (b), 207, 3 (1998).
- [9] J.B. Vogt, A. Messai, J. Foct. ISIJ **36**, 7, 862 (1996).
- [10] Yu.M. Ostanevich. Makromol. Chem., Macromol. Symp. **15**, 91 (1988); E.P. Kozlova, Yu.M. Ostanevich, L. Cher. Nucl. Instr. Meth. **169**, 597 (1980).
- [11] A.M. Balagurov, G.M. Mironova, V.G. Simkin. World Scientific **21**, 263 (1990).
- [12] V.B. Zlokazov. Comput. Phys. Com. **85**, 4151 (1995).
- [13] V.B. Zlokazov, V.V. Chernyshov. J. Appl. Crystall. **25**, 4471 (1992).
- [14] В.Г. Гаврилюк, В.М. Надутов. ФММ **56**, 3, 555 (1983).
- [15] M. Hatherly, Y. Hirokawa, R.D. Lawde, et al. Proc. Phys. Loc. **34**, 55 (1964).
- [16] A. Guinier, G.N. Fournet. Small-Angle Scattering of X-rays. John Wiley, N. Y. (1955). 290 p.
- [17] G. Porod. Kolloid Z. **125**, 51 (1952).
- [18] L.A. Feigin, D.I. Svergun. In: Structural Analysis by Small-Angle X-ray and Neutron Scattering. Plenum Press N.Y.–London (1987), 335 p.
- [19] P.W. Schmidt. In: The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry / Ed. by D. Avnir. Wiley, N. Y. (1989). P. 67.
- [20] J. Foct, P. Rochegude, C. Cordier-Robert. Hyperfine Interact. **45**, 359 (1989).