

## АМОРФНОЕ И ЖИДКОЕ СОСТОЯНИЯ

PACS numbers: 61.05.cp, 61.43.Dq, 61.46.Bc, 81.10.Fq, 81.40.Ef, 81.70.Pg

### Особенности атомного строения металлических аморфных материалов в температурном интервале от $-193$ до $+598^{\circ}\text{C}$

А. Г. Ильинский, Ю. В. Лепеева, В. Л. Карбовский, Г. М. Зелинская, Т. М. Христенко, С. С. Луговский, А. Н. Бабенко

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

Методами рентгеновской дифракции изучалась структура аморфных лент сплава  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  и закономерности структурных изменений в широком температурном интервале: от  $-190^{\circ}\text{C}$  до  $+598^{\circ}\text{C}$ . Исследования проводились на дифрактометре XRD; для регистрации рассеянного рентгеновского излучения использовался двухкоординатный рентгеновский детектор, источник рентгеновского излучения — синхротрон. Съёмка рентгенограмм проводилась с шагом по температуре 4 К. Это, а также используемая геометрия рентгеновской съёмки (на просвет) и очень малая длина волны используемого излучения ( $0,1239 \text{ \AA}$ ), обеспечивали очень высокую интенсивность (статистическая ошибка счёта на «хвосте» дифрактограммы — не больше 1%). Полученные данные позволяют считать, что кристаллические кластеры даже в аморфных лентах вращаются с большими скоростями, хотя эти данные и следует рассматривать лишь как необходимые, но недостаточные для однозначного утверждения.

Методами Рентгенової дифракції вивчалася структура аморфних стрічок стопу  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  та закономірності структурних змін у широкому температурному інтервалі: від  $-190^{\circ}\text{C}$  до  $+598^{\circ}\text{C}$ . Дослідження виконувалися на дифрактометрі XRD, в якому для реєстрації розсіяного Рентгенового випромінювання використовувався двокоординатний Рентгенівський детектор, джерело Рентгенового випромінювання — синхротрон. Знімання рентгенограм виконувалося з кроком по температурі у 4 К. Це, а також використовувана геометрія рентгенівського знімання (на просвіт) і дуже мала довжина хвилі використуваного випромінювання ( $0,1239 \text{ \AA}$ ) забезпечили дуже високу інтенсивність (статистична похибка розрахунку на «хвості» дифрактограми — не більше 1%). Одержані дані уможливають вважати, що кристалічні кластери навіть в аморфних стрічках обертаються з великими швидкостями, хоча ці дані й слід розглядати лише як необхідні, але недостатні для однозначного твердження.

The structure of amorphous  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  ribbons and features of structural changes in a wide temperature range from  $-190^\circ\text{C}$  to  $+598^\circ\text{C}$  are studied by X-ray diffraction. Investigations are carried out on XRD diffractometer with two-coordinate X-ray detector and synchrotron radiation with a temperature step of 4 K. Used geometry of X-ray mode (transmission diffraction pattern) as well as very short wavelength of used radiation ( $0.1239 \text{ \AA}$ ) provide very high intensity (statistical error of the calculation on 'tail' of diffraction pattern is less than 1%). The obtained data allow conceiving that crystal clusters have high rotation rate even in amorphous ribbon. Nevertheless, these data can be considered only as necessary, but insufficient for unambiguous statement.

**Ключевые слова:** аморфные ленты, нанокристаллы, температура кристаллизации.

*(Получено 5 ноября 2012 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Большое число исследователей до настоящего времени считает, что аморфные металлические материалы, представляют собой замороженную жидкость и атомы в них находятся в тех местах пространства, которые они занимали в расплавах перед охлаждением. На наш взгляд, это утверждение ошибочное. Ошибочное оно хотя бы потому, что при повышении температуры аморфных материалов (а аморфное состояние для некоторых сплавов сохраняется в довольно широком температурном интервале) внутренняя энергия увеличивается, но также увеличивается и ширина максимумов функций интенсивности (в дальнейшем ФИ) и функций радиального распределения атомов (в дальнейшем ФРРА). Это совсем не согласуется со строго фиксированным положением атомов в аморфных материалах.

Кроме того, вызывает сомнение реальность такого сильного расширения максимумов, как ФИ, так и ФРРА. Так, наиболее вероятное межатомное расстояние в кристаллических материалах, особенно, с плотной упаковкой (радиус первой координационной сферы), если и не полностью совпадает, то отличается незначительно от положения первого максимума ФРРА расплавов и аморфных материалов. Для того чтобы приблизить атомы друг к другу хотя бы на небольшую величину требуются громадные усилия всестороннего сжатия, поскольку сжимаемость, особенно, плотноупакованных материалов очень мала. Известно, что сжимаемость есть величиной примерно одинаковой для вещества в жидком, кристаллическом и аморфном состоянии [1].

Используя предложенную нами функцию  $f(r)$ , определяемую посредством выражений (1)–(4) (см. также рис. 1),

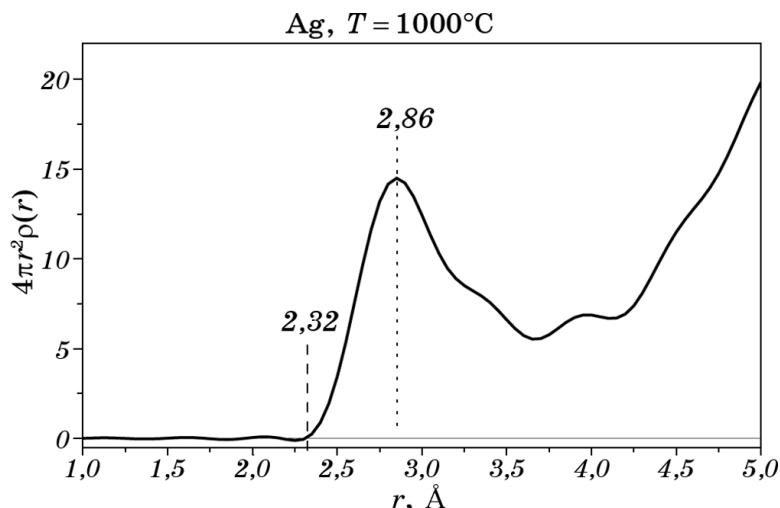


Рис. 1. Фрагмент полной функции радиального распределения атомов.

$$f(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \left[ \rho(r') - \left( \sum_i c_i K_i \right)^2 \rho_0 \right] dr' = \int_0^r \frac{2r'}{\pi} \int_0^\infty [i(s) - 1] s \sin(sr') ds dr', \quad (1)$$

$$\int_0^\infty H(r') dr' = -1 = \int_0^{R_1} H(r') dr' + \int_{R_1}^{R_2} H(r') dr' + \dots + \int_{R_{i-1}}^{R_i} H(r') dr', \quad (2)$$

$$f(r) = \int_0^r H(r') dr', \quad \int_{R_{i-1}}^{R_i} H(r') dr' = \int_{R_{i-1}}^{R_i} 4\pi r'^2 [\rho(r') - \rho_0] dr' = 0, \quad (3)$$

$$\int_{R_{i-1}}^{R_i} 4\pi r'^2 \rho(r') dr' = \int_{R_{i-1}}^{R_i} 4\pi r'^2 \rho_0 dr', \quad (4)$$

уже доказали [2], что максимумы и минимумы делят все окружение атома, расположенного в начале системы координат, на сферические слои с одинаковой средней атомной плотностью (см. рис. 2).

Рассмотрев большое количество различных вариантов, мы пришли к выводу о том, что атомы, ни в жидких, ни тем более, в аморфных материалах, не могут сблизиться друг с другом на такие короткие расстояния. Наблюдаемое сближение является кажущимся и, обусловлено какими-то иными факторами [3].

Для лучшего понимания интерпретации результатов наших исследований, повторим в следующем разделе некоторые наиболее важные моменты статьи [3], также посвященной рентгеноструктурному анализу жидких и аморфных материалов.

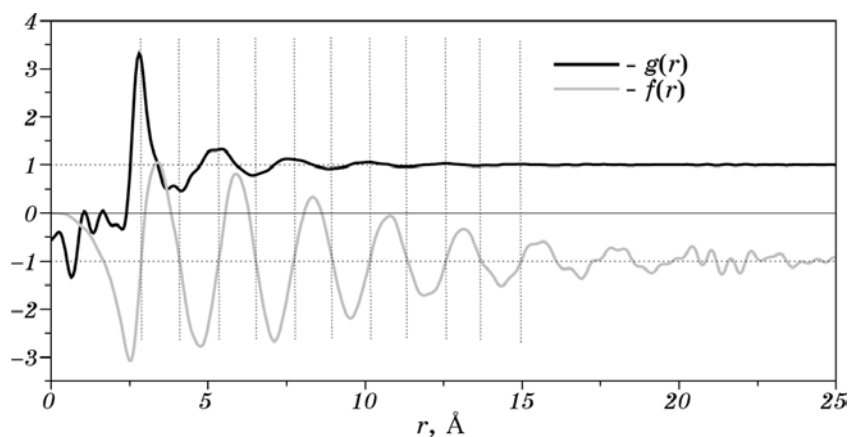


Рис. 2. Графики относительной функции атомного распределения  $g(r) = \rho(r)/\rho_0$  (черная линия) и функции  $f(r)$  (серая линия) чистого серебра.

## 2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СИЛЬНОЕ УШИРЕНИЕ МАКСИМУМОВ ФИ И ФРРА АМОРФНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В монографии Р. Джеймса «Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей» (опубликованной на русском языке в 1950 г.) впервые появился раздел с названием «Рассеяние рентгеновских лучей на кристаллах малого размера». В этом разделе теоретически доказывается, что диффузное рассеяние можно наблюдать и в случае кристаллических материалов при небольшом размере кристаллических зерен. К сожалению, эта теория не дает точного ответа — какого порядка должны быть размеры кристаллических зерен в этом случае.

Но этим, очевидно, не ограничивается наблюдаемый феномен. Действительно, всем хорошо известно, что при плавлении объемных кристаллических материалов температура жидкой фазы не изменяется до полного завершения процесса. Помимо этого в работе [4] мы показали, что основной структурной составляющей расплавов являются кристаллические кластеры небольшого размера (3–5 нм). Помимо кластеров в расплавах содержится и небольшое количество свободных атомов с высокой кинетической энергией — «квазигазовая» составляющая. Вблизи температуры плавления объемная доля второй составляющей мала и температура расплава в основном определяется суммарной энергией атомов кристаллических кластеров. Поскольку теплота плавления идет на образование в расплавах именно этой составляющей [4], такой же вывод можно сделать, сравнив удельные теплоты плавления и сублимации. Для большинства объектов первый параметр составляет всего лишь 2–6% от второго.

Как следует из рис. 2, кристаллические кластеры в жидком, и тем более в аморфном состоянии, хотя и не очень велики, их размеры все же намного больше диаметра атомов каждого компонента сплава. Поэтому в обоих состояниях прямолинейное движение кристаллических кластеров, да еще и с необходимой скоростью, практически невозможно, возможно только их вращение, а учитывая не очень большой радиус кластеров и малую массу атомов, вращаться они должны с очень большой скоростью. Поскольку время съемки дифрактограмм велико, а графики всех функций строятся в неподвижной системе координат, атомы каждой координационной сферы кристаллических кластеров как бы «размазываются» в определенных сферических слоях, расположенных вокруг начала координат. Это и создает эффект такого сильного сближения атомов.

Для получения веских аргументов, подтверждающих вращение кластеров, особенно, в аморфных материалах, надо найти способ визуализации самих кристаллических кластеров. В принципе, на первый взгляд, может показаться, что решить эту задачу можно легко с помощью электронного микроскопа высокого разрешения, но это только на первый взгляд. Получить изображение кристаллических кластеров в расплавах в принципе невозможно, поскольку в них скорость вращения кластеров очень высокая, что приводит к сильному размытию границ.

Кроме того, как мы уже упоминали, в расплавах помимо кластеров существует еще одна структурная составляющая, которая не влияет на формирование дифракционной картины, а только повышает интенсивность во всем диапазоне изменения вектора дифракции  $s$  ( $s = |s|$ ) [4]. Такое возможно лишь тогда, когда все межатомные расстояния в скоплениях таких атомов равновероятны, что свойственно только газам («квазигаз»). В расплавах «квазигаз» (или паровая фаза) заполняет все межкластерные пустоты. Между кластерами и «квазигазом» происходит постоянный обмен атомами, что еще больше размывает границы кластеров. Поэтому для визуализации кластеров больше подходят аморфные ленты. Во-первых, скорость вращения кластеров в них при комнатной температуре гораздо меньше, во-вторых, размеры кластеров больше, в-третьих, в них отсутствует «квазигаз» и, наконец, имеется возможность уменьшения скорости вращения кластеров без изменения их размеров. Последнее можно осуществить, охлаждая ленты до отрицательных температур по шкале Цельсия. Полностью они останавливаются при нуле по шкале Кельвина, но мы рассчитывали, что и при температуре жидкого азота (порядка 90–100 К) скорость их вращения значительно уменьшится. Скорость вращения будет уменьшаться и при увеличении температуры аморфных материалов, что приводит к началу кристаллизации и увеличению размеров кристаллических кластеров.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АМОРФНЫХ ЛЕНТ $\text{Fe}_{77}\text{Si}_8\text{B}_{15}$ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

#### 3.1. Объект и методы исследования

Для проверки высказанных предположений проведены высокоточные измерения нанорельефа поверхности образцов аморфной ленты  $\text{Fe}_{77}\text{Si}_8\text{B}_{15}$  на сверхвысоковакуумном сканирующем зондовом микроскопе JSPM-4610 (JEOL, Япония) в центре коллективного пользования в Институте металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины.

В микроскопе, в качестве сканирующего туннельного зонда использовалось вольфрамовое острие с радиусом порядка 5 нм, закрепленное в трехкоординатном пьезоприводе и располагающееся перпендикулярно исследуемой поверхности. С помощью пьезопривода зонд подводился к поверхности образца до возникновения туннельного тока, который определяется, величиной зазора между зондом и поверхностью, а также напряжением между электродами. Туннельный ток и напряжение поддерживались постоянными и при сканировании. С помощью зонда получали непосредственную информацию о рельефе поверхности. Параметры сканирования: туннельный ток 0,2 нА, время экспозиции в точке 83,33 мкс, напряжение смещения в пределах 1 В, рабочий вакуум не хуже  $10^{-7}$  Па.

Получены снимки поверхности исходной (свежеполученной) аморфной ленты состава  $\text{Fe}_{77}\text{Si}_8\text{B}_{15}$  и отожженной при температурах 350, 400, 500, 550 и 600°C в течение 1 мин, а также для начала и при температуре -190°C [3].

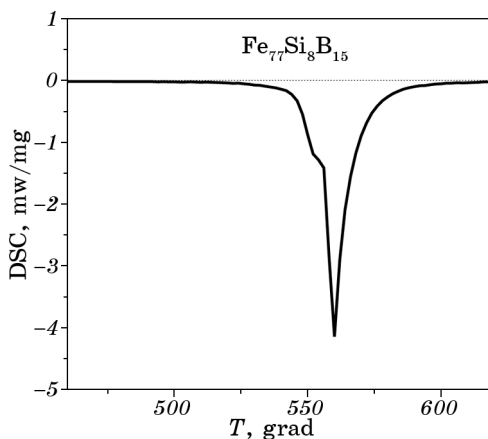
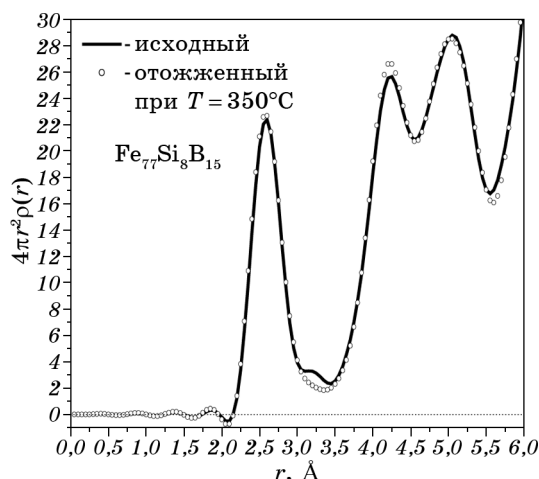


Рис. 3. Фрагмент калориметрической кривой сплава.



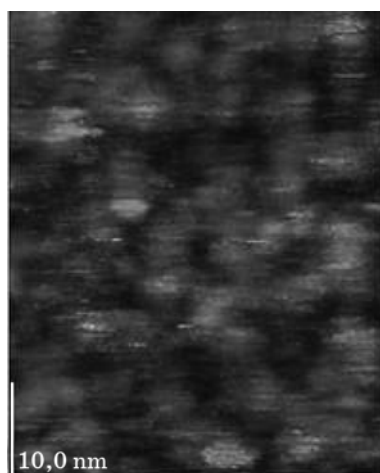
**Рис. 4.** Фрагмент полных функций распределения атомов исходной аморфной ленты (черная линия) и отожженной в течение одного часа при температуре 350°C (маркеры).

Отжиг при температуре 350°C был необходим для очистки поверхности лент от окислов, наличие которых сильно влияет на качество снимков. Учитывая, что в камерах создавался высокий вакуум ( $\leq 10^{-7}$  Па) ожидалось, что поверхность лент будет полностью очищена от окислов; была также уверенность, что атомная структура лент при таких параметрах отжига не изменится. Во-первых, температура 350°C намного ниже температуры начала кристаллизации при скорости нагрева 10 К/мин (см. рис. 3), а во-вторых, нами предварительно методом рентгеноструктурного анализа была исследована структура отожженной ленты при такой же температуре, но в течение одного часа. Полная функция атомного распределения отожженной ленты полностью совпала с аналогичной функцией исходной ленты (см. рис. 4).

### 3.2. Результаты и их обсуждение

На рисунке 5 представлен снимок поверхности исходной аморфной ленты  $\text{Fe}_{77}\text{Si}_8\text{B}_{15}$  и отожженной при температуре 350°C в течение 1 мин, а на рис. 6 — снимок этой же ленты при температуре -189°C. На рисунке 7 — снимки поверхности ленты, отожженной при температуре 600°C (полностью закристаллизованная лента).

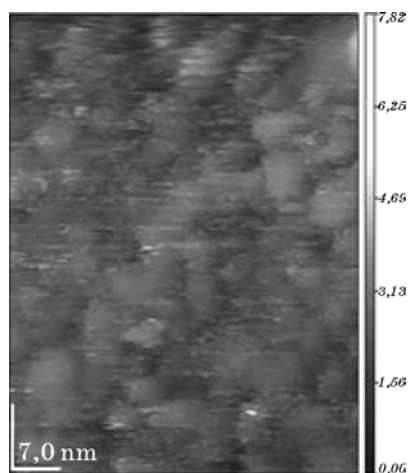
Прогноз полностью подтвердился. На снимках поверхности исходной аморфной ленты границы кластеров оказались сильно размытыми при температуре 350°C, а на той же ленте при температуре -189°C они стали гораздо более четкими. Еще более контрастными



**Рис. 5.** Снимок поверхности аморфной ленты  $\text{Fe}_{77}\text{Si}_8\text{B}_{15}$  при комнатной температуре.

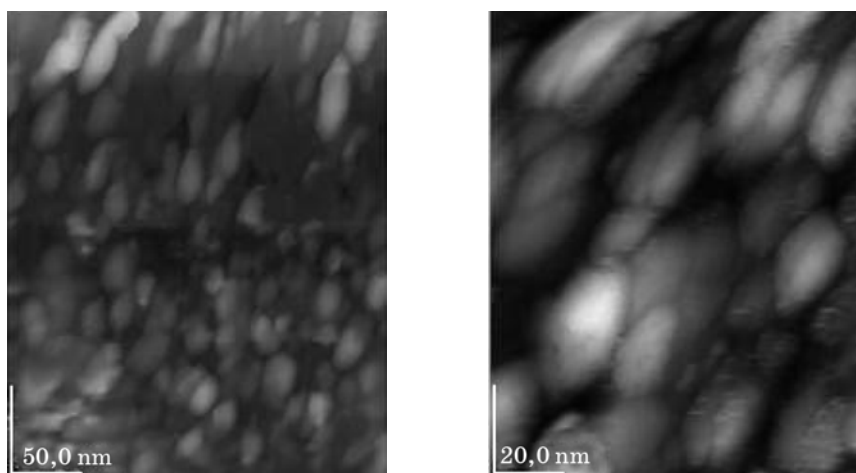
границы стали на ленте, отожженной при температуре  $600^\circ\text{C}$ . Но эти ленты уже полностью закристаллизовались, и размер кристаллических зерен в них вырос до 20 нм и даже более. Иными словами, мы получили полностью прогнозируемые результаты.

Эти снимки не только однозначно доказывают кластерное строение аморфных лент, но и расплавов. Они также доказывают и то, что кластеры даже в аморфных материалах вращаются с большой скоростью.



**Рис. 6.** Снимок поверхности аморфной ленты  $\text{Fe}_{77}\text{Si}_8\text{B}_{15}$  при температуре  $-189^\circ\text{C}$ .





**Рис. 7.** Снимок поверхности ленты  $\text{Fe}_{77}\text{Si}_8\text{B}_{15}$ , отожженной при температуре  $600^\circ\text{C}$ .

Однако и эти снимки не убедили наших оппонентов. В связи с этим, вновь проанализировав все полученные данные, у нас появилась еще одна гипотеза, суть которой в следующем. Как мы уже отмечали, по нашим данным, размытие максимумов ФИ и ФРРА кажущееся и обусловлено малым размером кристаллических кластеров и их вращением с большой скоростью в расплавах, и в аморфных лентах. Поэтому, если существенно изменять скорость вращения кластеров, то размытие максимумов ФИ и ФРРА будет уменьшаться, и также будет уменьшаться интенсивность диффузного рассеяния. Но при этом на дифрактограммах должны появляться рефлексы, свойственные кристаллическому состоянию. Это следует из нашей гипотезы. А из закона сохранения энергии следует, что величина уменьшения интегральной интенсивности диффузной составляющей полностью должна компенсироваться интегральной интенсивностью кристаллической составляющей.

Изменять скорость вращения можно двумя способами: увеличивая размеры кластеров, повышая температуру аморфных лент и наоборот, понижая температуру аморфных лент ниже нуля по шкале Цельсия.

Второй путь представляется наиболее интересным, так как в этом случае размеры кластеров не меняются, а изменяется только скорость их вращения. Хорошо известно, что при повышении температуры аморфных материалов до определенной величины начинается их кристаллизация, что уже достаточно хорошо исследовано. Исследований для отрицательных температур не проводилось и ничего подобного не ожидается.

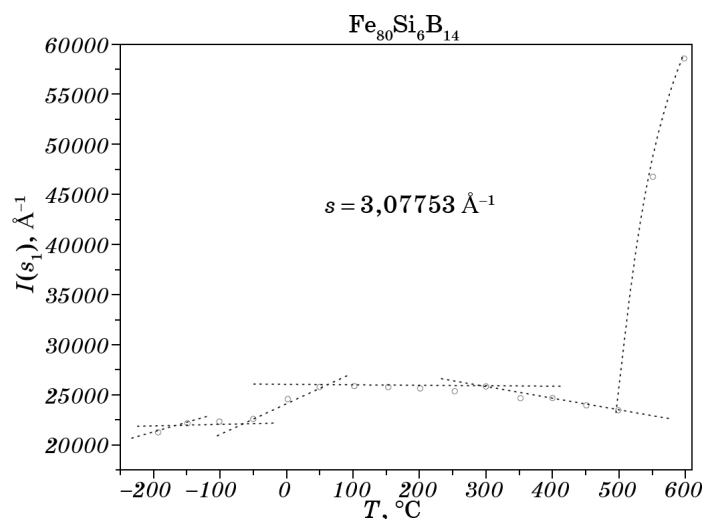
Поскольку, при увеличении температуры аморфных лент (в интервале положительных температур), уменьшается скорость вращения кластеров и увеличивается их размер, то на начальном этапе их роста также должна уменьшаться интенсивность диффузного рассеяния, как и в случае понижения температуры. Но падение интенсивности диффузного рассеяния не может быть быстрым из-за того, что работают одновременно оба фактора, приводящие к размытию максимумов ФИ — увеличивается размер кластеров и уменьшается скорость их вращения. Исходя из этого, необходимо провести исследования в широком температурном интервале (от  $-190$  до  $+600^\circ\text{C}$ ).

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АМОРФНЫХ ЛЕНТ $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ ОТ $-193$ ДО $+598^\circ\text{C}$ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

##### 4.1. Объект и методы исследования

Эксперименты проведены в Institute of Physics, Chemnitz University of Technology на рентгеновском дифрактометре типа XRD, в интервале температур от  $-193$  до  $+598^\circ\text{C}$ , с шагом по температуре  $4\text{ K}$ .

Рассеянное образцом рентгеновское излучение регистрировалось двухкоординатным позиционно-чувствительным детектором Perkin Elmer 1621. В качестве источника рентгеновского излучения использовалось синхротронное излучение, поэтому интенсивность первич-



**Рис. 8.** Зависимость высоты первого максимума функций интенсивности от температуры аморфной ленты.

ного пучка была очень высокая и статистическая погрешность на «хвосте» дифрактограммы не превышала 1%. Для монохроматизации первичного пучка применялся монокристалл кремния. Длина волны рентгеновского излучения  $\lambda = 0,1239 \text{ \AA}$ . Съемка проводилась на просвет, детектор был удален от образца на 42 см.

Кусочек аморфной ленты помещался в кварцевый капилляр (диаметр капилляра 1,2 мм, толщина стенки — 2 мкм), скорость нагрева  $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ . При каждой температуре снимали 12 дифрактограмм (длительность съемки одной дифрактограммы 1 с), складывая их, получали одну усредненную. Таким способом получено порядка 200 усредненных дифрактограмм.

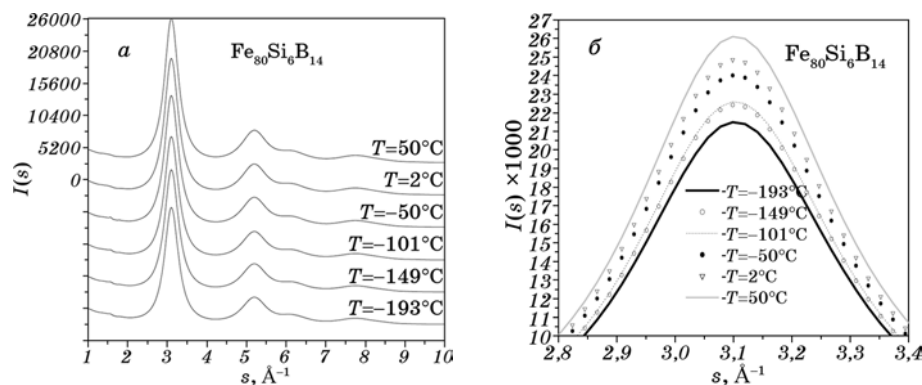
#### 4.2. Результаты и их обсуждение

На рисунке 8 представлена температурная зависимость высоты первого максимума ФИ. На ней можно выделить четыре температурных интервала. Первый — от  $-193$  до  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ , второй — от  $50$  до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , третий — от  $300$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , четвертый — от  $500$  до  $598 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Как и ожидалась, интенсивность диффузного рассеяния по мере понижения температуры (первый интервал) уменьшалась и при температуре жидкого азота ( $\cong 80 \text{ K}$ ) уменьшилась приблизительно на 17,5% (см. рис. 9, а и б). Это — большое изменение, значительно превышающее ошибку эксперимента.

Все дифрактограммы второго температурного интервала (от  $50$  до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) практически полностью совпадают (см. рис. 10), изменения в пределах ошибки эксперимента, что дает основание считать его интервалом термической стабильности.

Аналогично первому температурному интервалу интенсивность



**Рис. 9.** Дифрактограммы первого температурного интервала: от  $-193$  до  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  (а); фрагменты первого максимума тех же дифрактограмм, построенные в одинаковом по обеим осям масштабе (б).

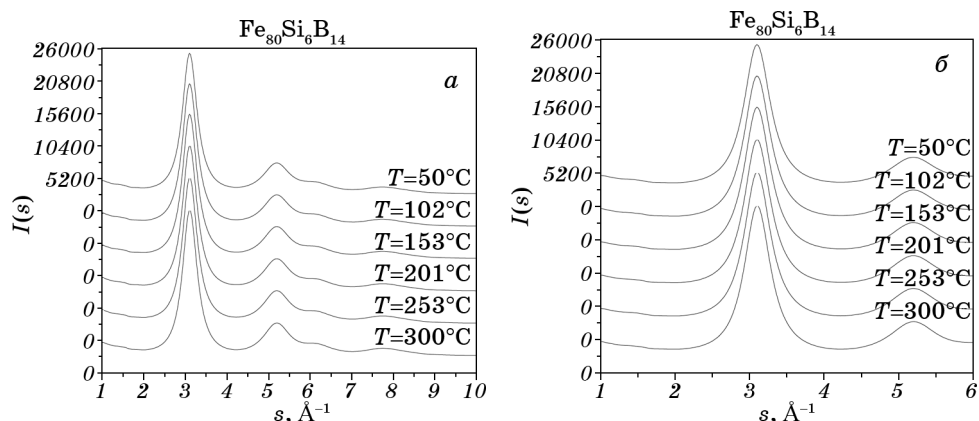


Рис. 10. Дифрактограммы второго температурного интервала (от 50 до +300°C) (а); те же дифрактограммы в ином масштабе по оси абсцисс (б).

диффузного рассеяния (как и ожидалось) на дифрактограммах третьего температурного интервала также уменьшается, но не столь сильно как в первом интервале (см. рис. 11, а и б).

Это объясняется тем, что в данном случае работают два фактора расширения максимумов ФИ и ФРРА, — увеличиваются размеры кластеров и уменьшается скорость их вращения.

В четвертом температурном интервале интенсивность диффузной составляющей практически полностью отсутствует, и на дифрактограммах наблюдаются рефлексy, свойственные кристаллическим материалам, интенсивность которых существенно возрастает с повышением температуры.

При объяснении результатов второго и четвертого температур-

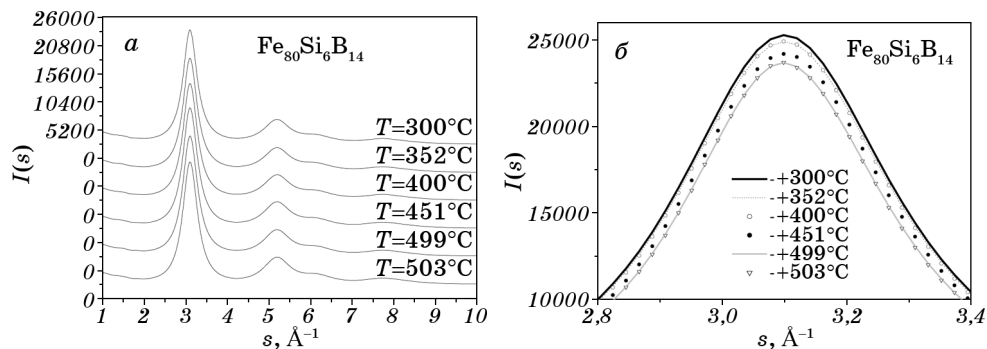
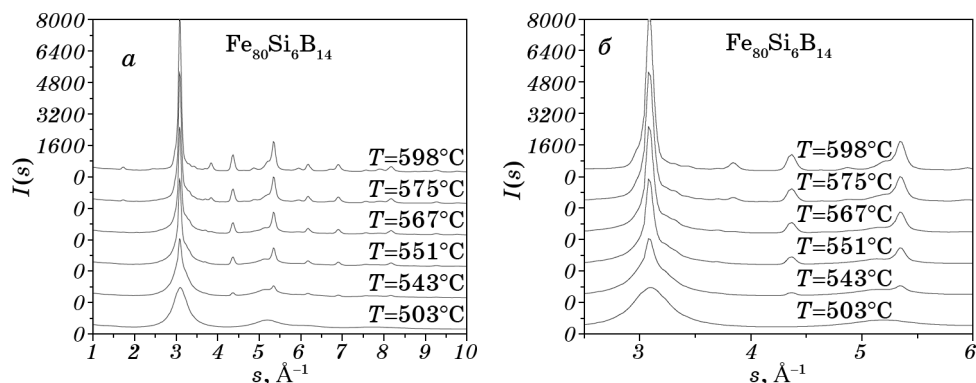


Рис. 11. Дифрактограммы третьего температурного интервала от 300 до +503°C (а); фрагмент первого максимума тех же дифрактограмм в одинаковом масштабе по обеим осям (б).

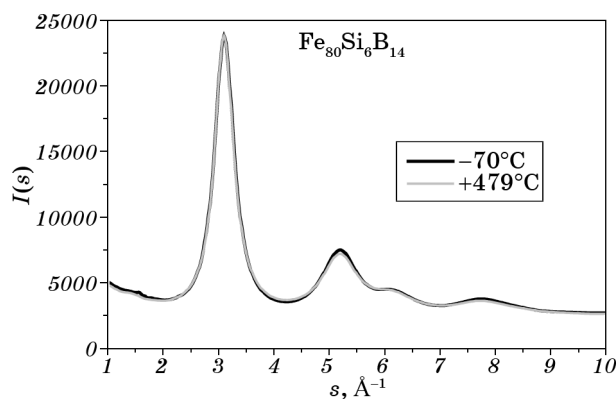


**Рис. 12.** Дифрактограммы четвертого температурного интервала (а); те же самые дифрактограммы, но масштаб по шкале абсцисс несколько изменен (б).

ных интервалов никаких затруднений не возникает.

В то время как отсутствие рефлексов, свойственных кристаллическим материалам на дифрактограммах первого и третьего температурного интервала, которые должны были бы появиться согласно нашему предположению, делает полученные результаты совершенно необъяснимыми.

Во-первых, уменьшение высоты дифракционных максимумов приводит к уменьшению интегральной интенсивности во всем диапазоне значений вектора дифракции, что противоречит закону сохранения энергии. Во-вторых, некоторые дифрактограммы первого температурного интервала (где размеры кристаллических кластеров не меняются) и третьего температурного интервала (где разме-



**Рис. 13.** Дифрактограммы, снятые при температуре  $-70^{\circ}\text{C}$  (черная линия) и  $+479^{\circ}\text{C}$  (серая линия).

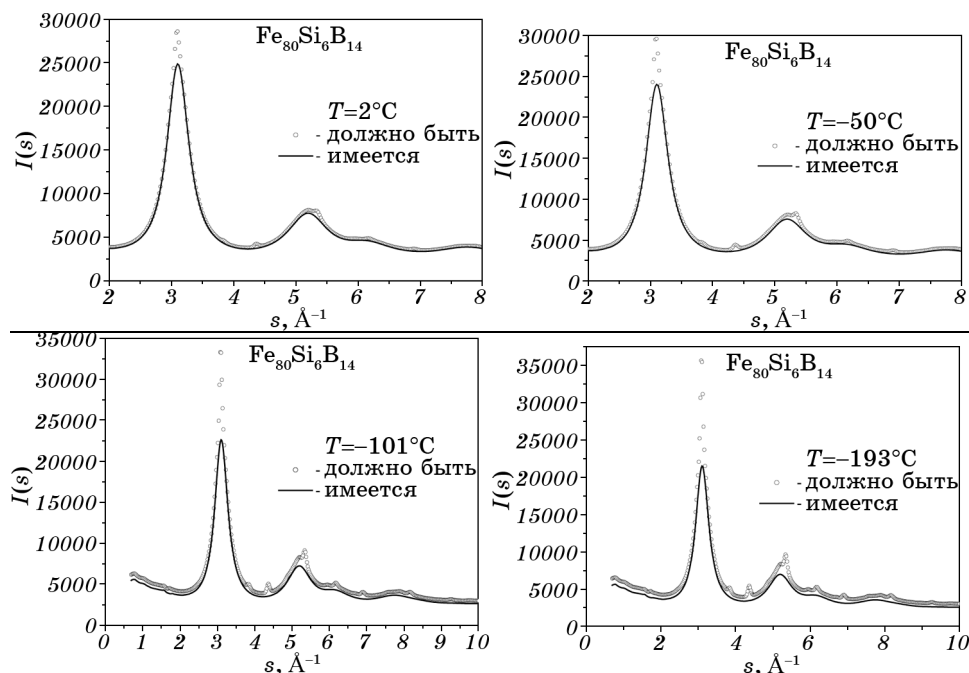


Рис. 14. Дифрактограммы первого температурного интервала.

ры кристаллических кластеров увеличиваются) полностью совпадают (см. рис. 13). Возникает вопрос, какие процессы протекают в лентах при понижении температуры без изменения размеров кластеров или при повышении температуры, приводящей к увеличению размеров кластеров (на начальном этапе кристаллизации), приводя к одинаковому изменению дифрактограмм? Найти иной ответ, кроме нашего, практически невозможно.

Из трех прогнозируемых эффектов два полностью подтвердились, не подтвердился лишь один — не появились на дифрактограммах рефлексы, свойственные кристаллическим материалам. В этой связи мы провели моделирование, чтобы проверить какого порядка должны были быть эти рефлексы в каждом конкретном случае. На рисунке 14 представлены сравнения модельной и экспериментальной ФИ в первом температурном интервале, а на рис. 15 — в третьем.

Как видно из рисунков, на всех дифрактограммах третьего интервала и при не очень сильном охлаждении лент ( $\cong -70^\circ\text{C}$ ) первого интервала, рефлексы, свойственные кристаллическим материалам должны были быть невелики. Они практически незаметны, особенно при съемке на просвет и длине волны рентгеновского излучения  $0,1239 \text{\AA}$ . Но, при охлаждении лент до  $-100^\circ\text{C}$  и ниже, эффекты бы-

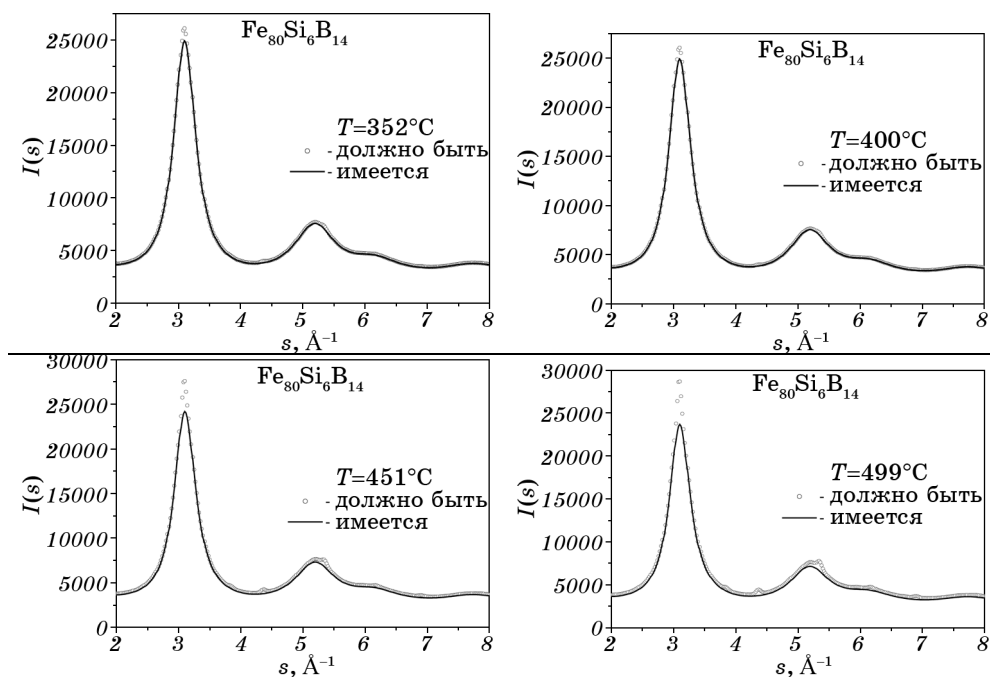
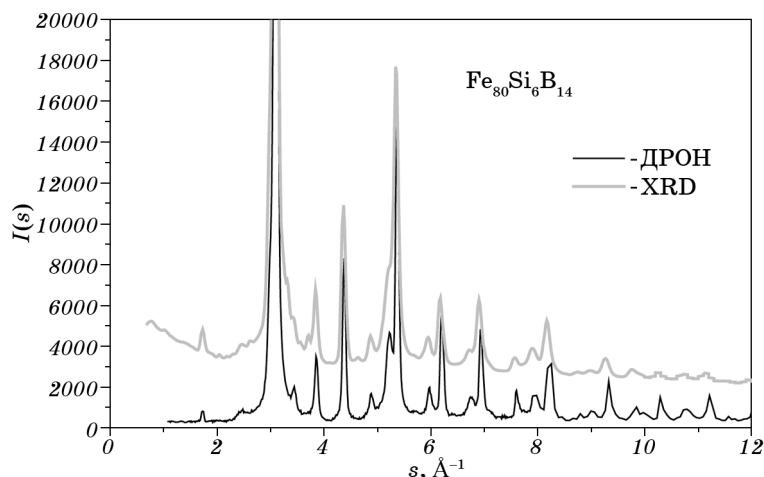


Рис. 15. Дифрактограммы третьего температурного интервала.

ли достаточно велики, и их трудно было не заметить. В этом легко убедиться, сравнив дифрактограммы полностью закристаллизованных лент, снятые нами на дифрактометре ДРОН-3 и нашими коллегами на XRD (см. рис. 16). Все рефлексы, даже очень слабые,  $\alpha$ -Fe и стабильного борида  $\text{Fe}_2\text{B}$  наблюдаются на обеих дифрактограммах. Это убедило нас в том, что наши коллеги не ожидали появления при отрицательных температурах рефлексов, свойственных кристаллическим материалам. Видимо, они посчитали, что эти данные являются случайными выбросами и при обработке кривые были сглажены. При длине волны рентгеновского излучения  $0,1239 \text{ \AA}$  даже диффузные максимумы будут очень узкими, а что тогда говорить о ширине кристаллических отражений.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении хочется отметить, несмотря на то, что наш прогноз полностью не подтвердился, мы решили все же опубликовать полученные данные. Наше решение обусловлено тем, что, во-первых, из трех предсказанных закономерностей подтвердилось две, т.е. большинство. Во-вторых, объяснить полученные данные иным образом не представляется возможным. В-третьих, полученные дан-



**Рис. 16.** Дифрактограммы полностью закристаллизованных аморфных лент, снятые на дифрактометре марки ДРОН (черная линия) и XRD (серая линия).

ные противоречат закону сохранения энергии. И наконец, самое главное, что полученные результаты даже в таком виде позволяют утверждать, что кристаллические кластеры вращаются даже в аморфных материалах с большой скоростью. К сожалению, однозначно утверждать это не возможно, поскольку их можно рассматривать лишь как необходимые, но недостаточные. В этой связи работы в этом направлении должны быть продолжены.

Поэтому мы ищем возможность проведения дополнительных подобных исследований. Возможно, другие исследователи, в распоряжении которых имеется необходимое оборудование, прочитав нашу статью, также проведут исследования подобного рода.

Установление же справедливости нашей гипотезы будет иметь очень важное значение, так как в случае ее подтверждения будет установлен ряд интересных закономерностей физической природы жидкостей и аморфных материалов, а именно:

- можно будет доказать, что аморфные материалы и расплавы по своей сущности можно отнести к нанокристаллическим материалам, которые различаются только размером нанокристаллов;

- можно будет однозначно доказать, что нанокристаллы в «расплавах» и «аморфных» материалах вращаются с большой скоростью;

- можно будет также однозначно доказать, что процесс кристаллизации сводится к увеличению размеров нанокристаллов, а плавление — к разрушению массивных кристаллов на маленькие кристаллики размерами порядка 3–6 нм;



– можно будет доказать, что наиболее фундаментальными свойствами нанокристаллических материалов («жидких» и «аморфных») являются размеры кластеров и их вращение с большими скоростями.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотруднику Institute of Physics, Chemnitz University of Technology, д-ру физ.-мат. наук И. Г. Кабану за содействие в проведении экспериментов и предоставленные данные.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Таблицы физических величин. Справочник* (Ред. И. К. Кикоин) (Москва: Атомиздат: 1976).
2. A. P'inskii, I. Kaban, W. Hoyer et al., *J. Non-Crystalline Solids*, **347**, No. 1–3: 39 (2004).
3. А. Г. Ильинский, В. Л. Карбовский, А. П. Шпак и др., *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, **8**, вып. 3: 483 (2010).
4. A. P'inskii, I. Kaban, Yu. Koval et al., *J. Non-Crystalline Solids*, **345–346**: 251 (2004).