



ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СПЛАВА $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ НА НАНОМЕТРОВОМ И МОРФОЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЯХ

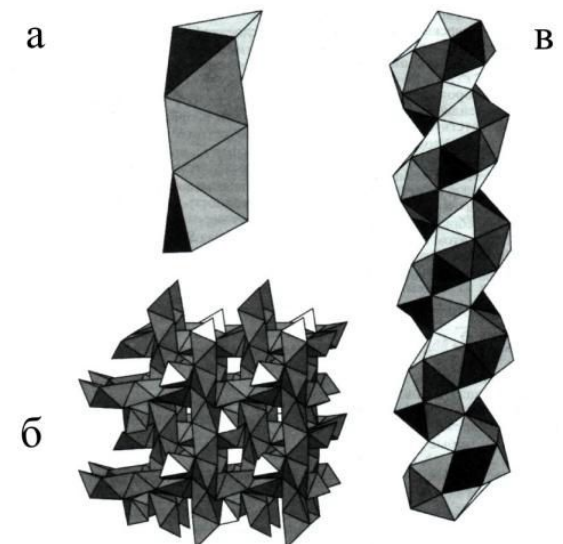
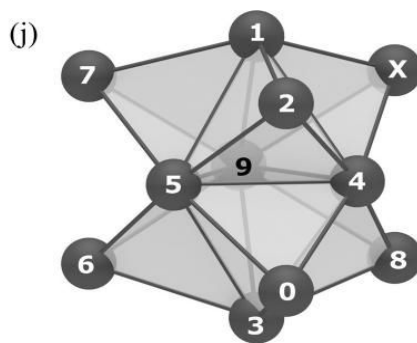
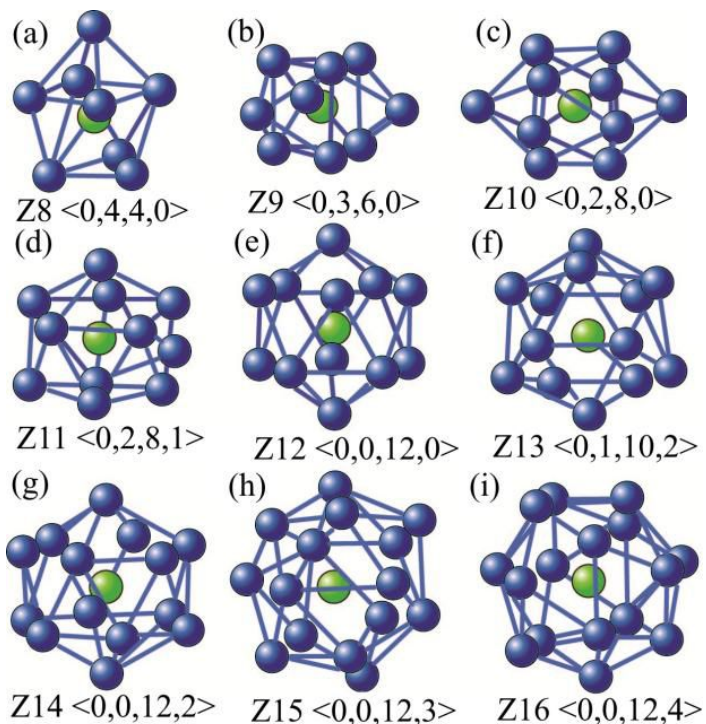
Выполнила:
студентка группы Б – 8415 Ансович А. В
Руководитель:
профессор, к. ф. – м. н. Крайнова Г. С



Введение

Аморфные сплавы на основе металлов группы железа (Fe, Ni, Co), полученные закалкой из расплава на вращающийся с большой скоростью холодильник, обладают превосходными магнитными свойствами, низкими потерями на перемагничивание, высокой прочностью, что обеспечивает их применение в магнитных записывающих головках, трансформаторах и электронных устройствах. Спиннингованные ленты типа Finemet являются примером аморфно-нанокристаллического состояния, необычность которого состоит в том, что кристаллическая фаза обладает упорядоченной атомной структурой, атомная структура аморфной фазы лишена трансляционной симметрии, обладая лишь ярко выраженным топологическим и композиционным ближним порядком. Уникальные физико-механические свойства таких двухфазных систем сочетают особенности как нанокристаллических, так и аморфных материалов. Поэтому важными в этой связи являются вопросы характера и организации структуры таких сложных объектов.

Актуальность исследования



Z – кластеры, как разновидности искаженных икосаэдрических координаций (а)-(j), 11-вершинный универсальный тетраблок (j), ¹

Спиральные структуры Бернала-Госсета, иллюстрирующие формирование некристаллического ближнего порядка в расплавах, нано- и аморфных металлах:

- а – спираль из тетраэдров Бернала, как частный случай;
- б – объемная регулярно-тетраэдрическая структура;
- в – спиральная икосаэдрическая структура, формируемая слегка искаженными икосаэдрами, ^{1,2}

1) “Формирование среднего порядка в стеклах и дальнего в нанокристаллических сплавах с учетом характера связи и трансформации ближнего порядка” В.А Полухин, Э.Д. Курбанов, Р.М. Белякова, 2016г;
 2) “Образование самоподобных пространственных структур в модуляционно – неустойчивых средах” В.М. Ку克林, “Электромагнитные явления”, Т. 4, № 1 (13), 2004г;

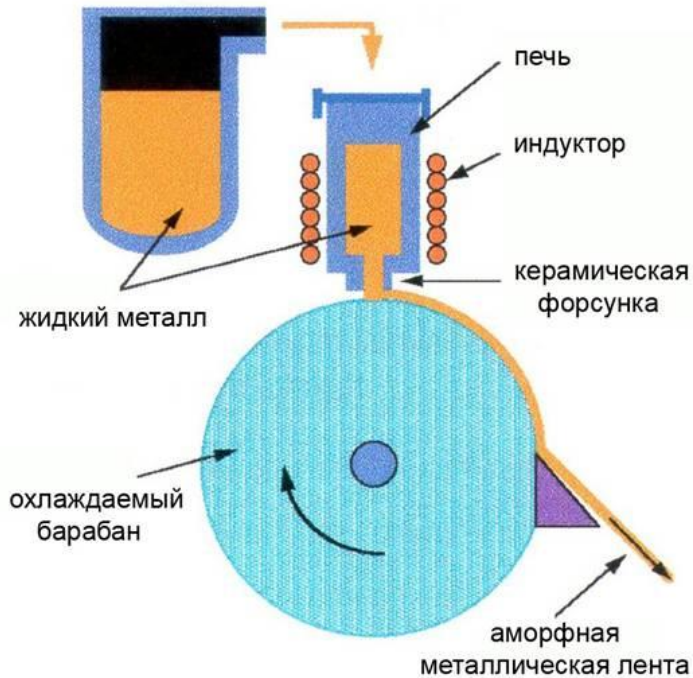


Цели и задачи :

Целью данной работы является изучение характера структуры и анизотропии сплава $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$, полученного методом спиннингования. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- 1) отработать методику фурье-анализа с использованием программ QAVIS, KsaImage, GatanDigitalMicrograph;
- 2) провести спектральный анализ структуры быстрозакаленного сплава $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ в нанометровом диапазоне и на морфоуровне с использованием электронно-микроскопических изображений;
- 3) изучить характер неоднородностей структуры спиннингованной ленты $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ и анизотропию их распределения.

Аморфно – нанокристаллический сплав типа “Finemet” $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$



Скорость охлаждения: $V = 10^6$ К/с

Зазор между соплом тигля и барабаном: 0,15 мм

Давление газа в камере: 400 мбар

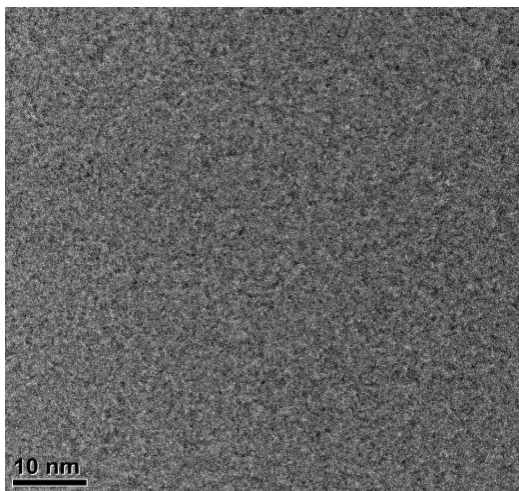
Давление в тигле: 600 мбар

Толщина ленты: 20– 35 мкм

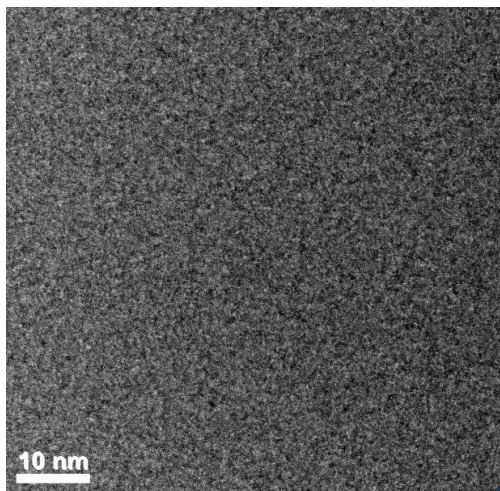
Просвечивающий
электронный
микроскоп:
FEI TITAN 300



Область около
контактной
поверхности



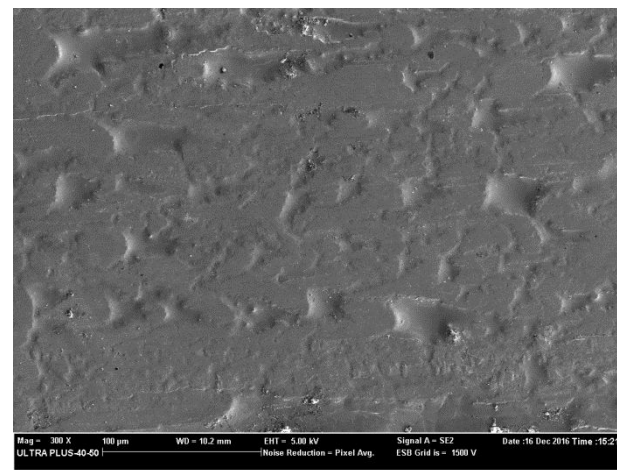
Область около
свободной
поверхности



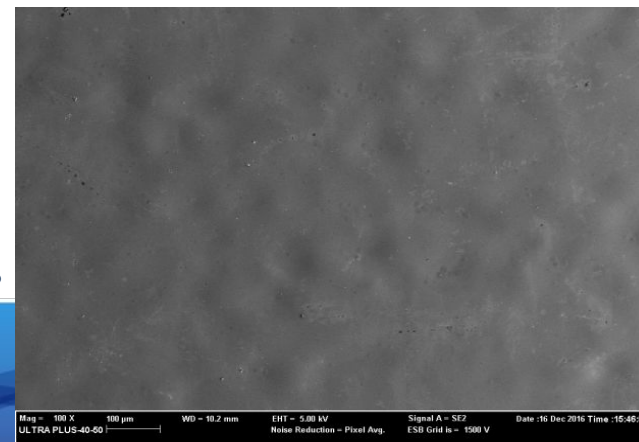
Сканирующий
электронный
микроскоп:
**Carl Zeiss
Crossbeam 1540XB**



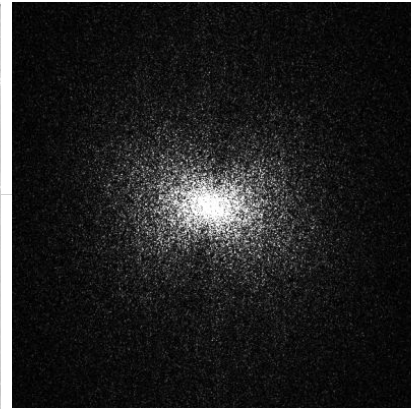
Контактная
поверхность



Свободная
поверхность



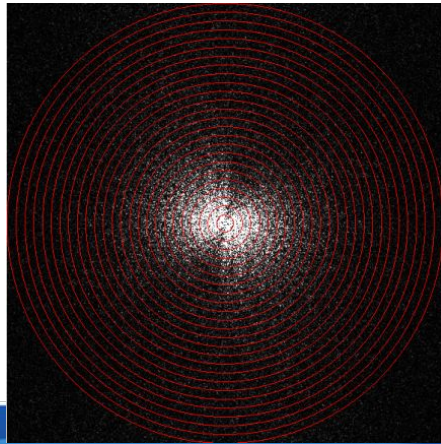
Метод исследования: Спектральный Фурье – анализ.



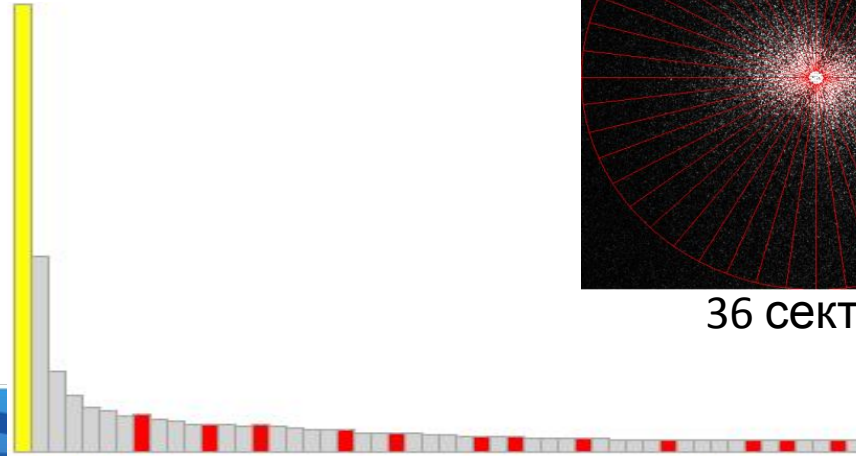
Дифракционная картина Франтгофера (спектр Фурье)

ИЧХ

(распределение спектральной энергии в системе кольцевых зон)

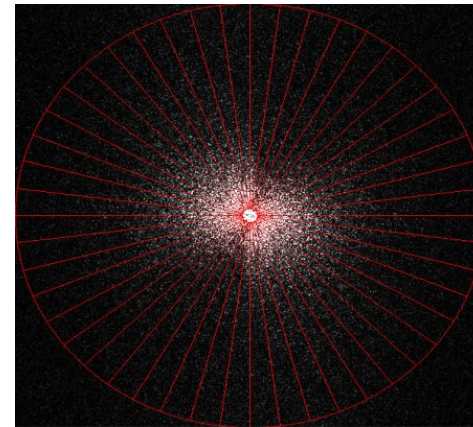


50 колец

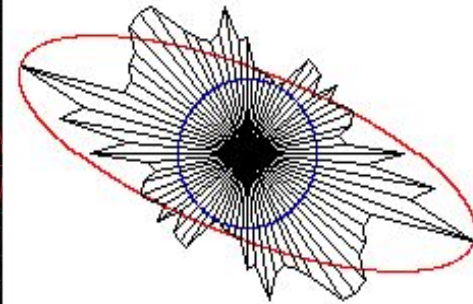


ИУХ

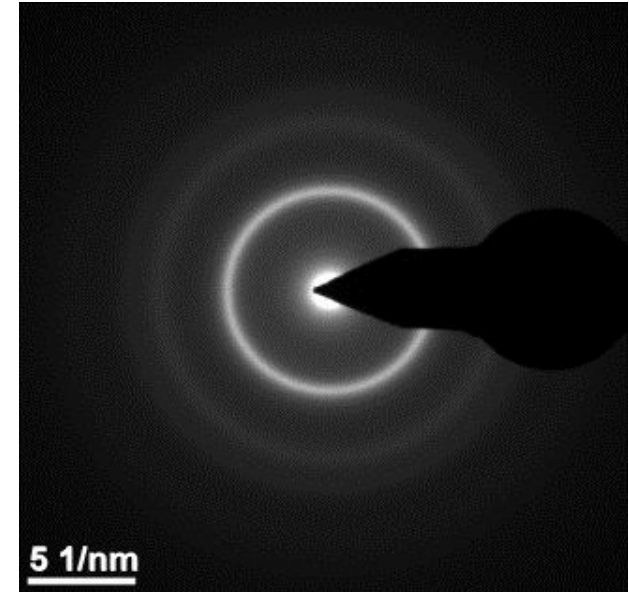
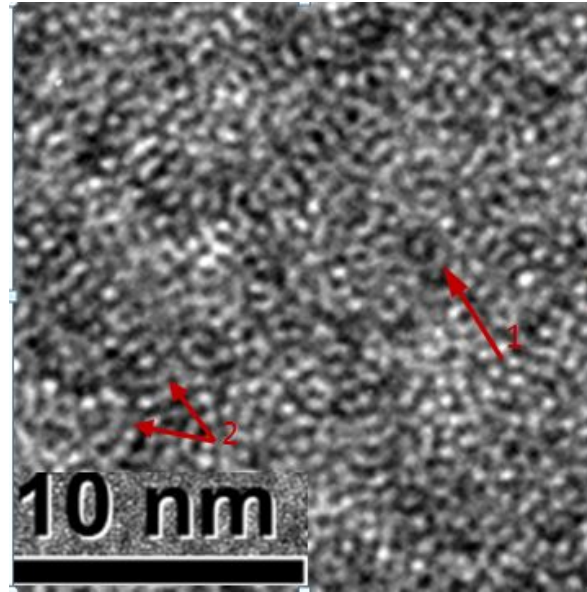
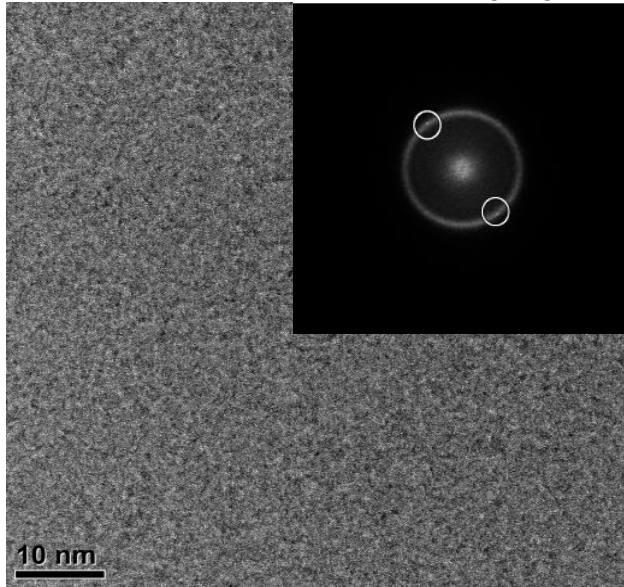
(распределение спектральной энергии в системе угловых секторов)



36 секторов

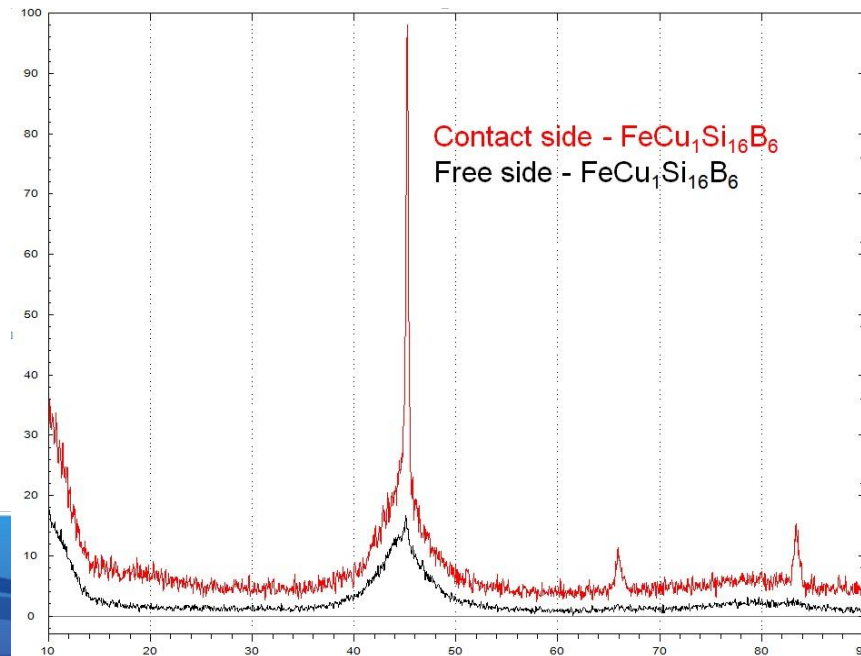


Электронно-микроскопическое изображение структуры аморфного сплава состава $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ с области, близкой к контактной поверхности

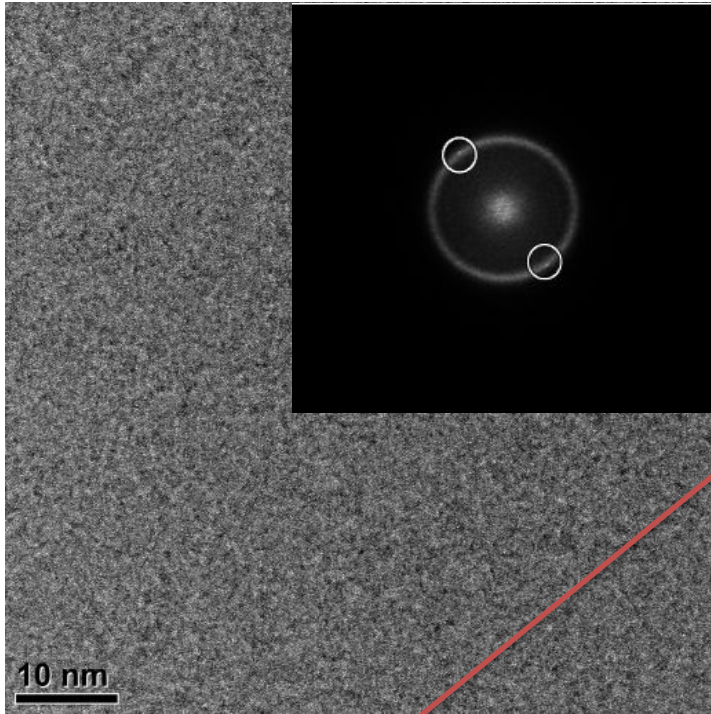


картина электронной дифракции

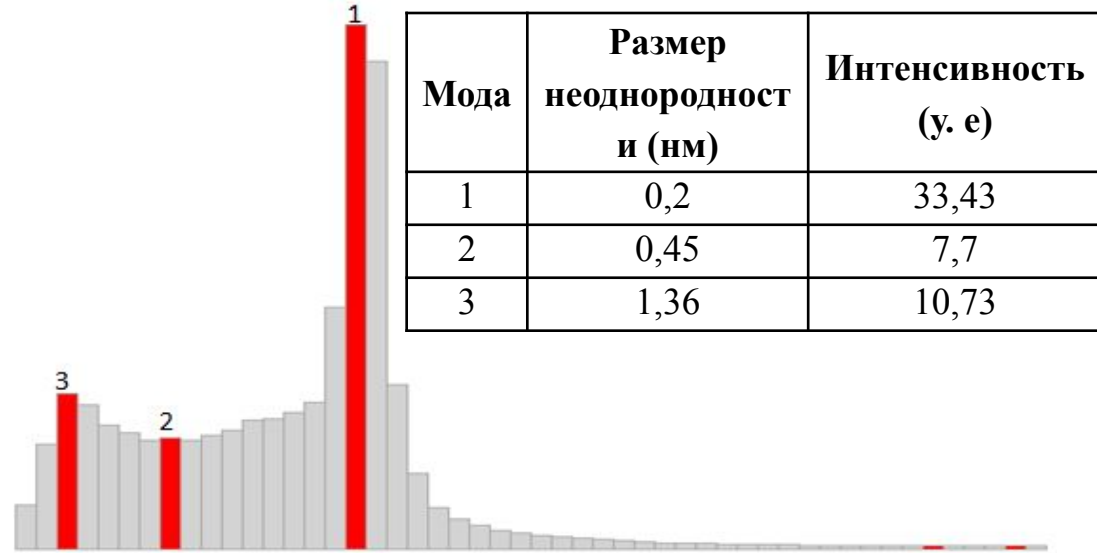
Рентгенограмма спиннингованной ленты $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$



Интегрально частотная характеристика

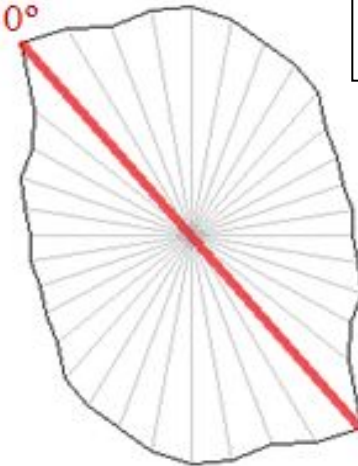


Направление
анизотропии



Интегрально пространственная характеристика

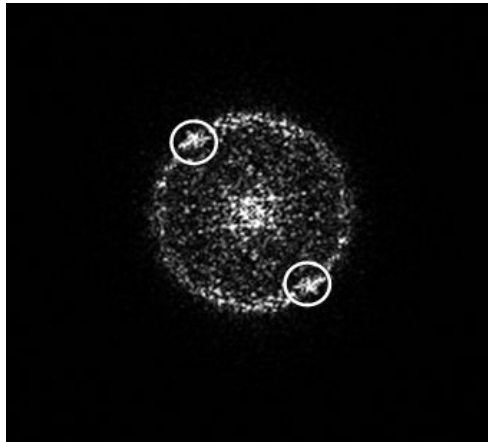
130°



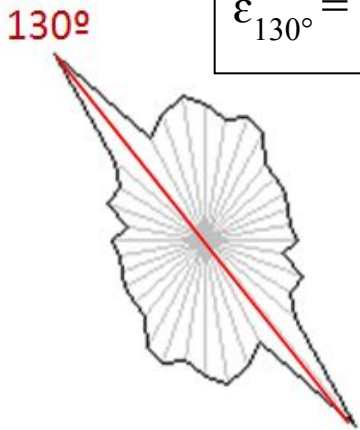
$$\epsilon_{130^\circ} = 1,8$$

Детальный анализ электронно-микроскопическое изображение структуры аморфного сплава с области, близкой к контактной поверхности

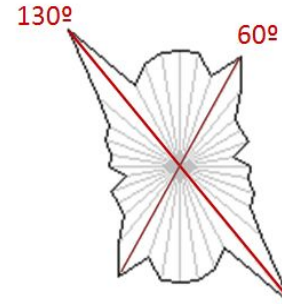
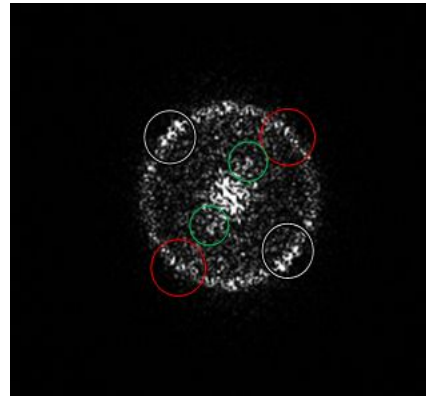
Коротковолновый диапазон ($\lambda_1 \rightarrow 0,2\text{нм}$)



$$\epsilon_{130^\circ} = 2,04$$

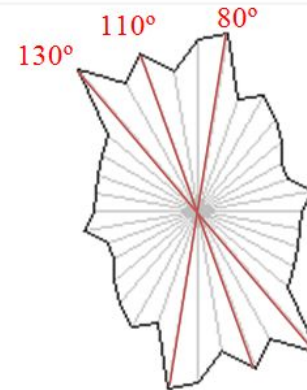
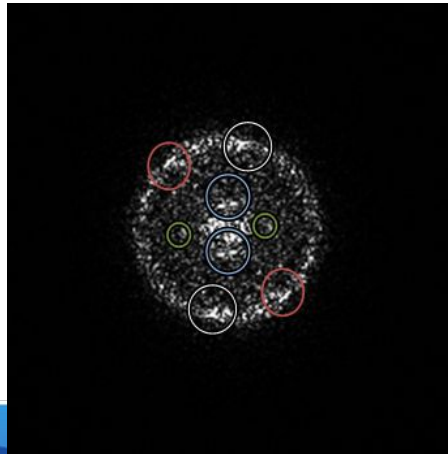


Средневолновый ($\lambda_2 \rightarrow (0,4\text{ нм} - 0,7\text{ нм})$)

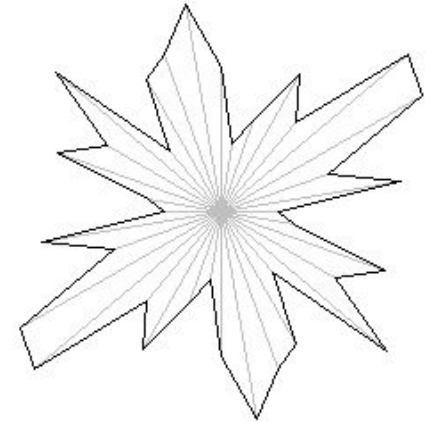


$$\epsilon_{130^\circ} = 1,9$$

$$\epsilon_{60^\circ} = 1,34$$



Длинноволновый ($\lambda_3 \rightarrow (1,36\text{ нм} - 2,27\text{ нм})$).



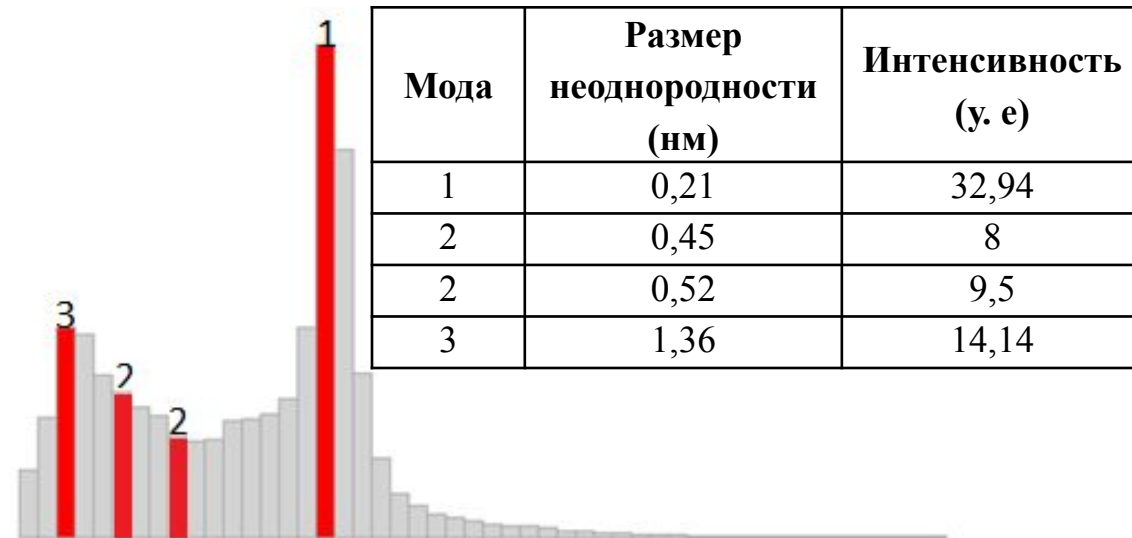
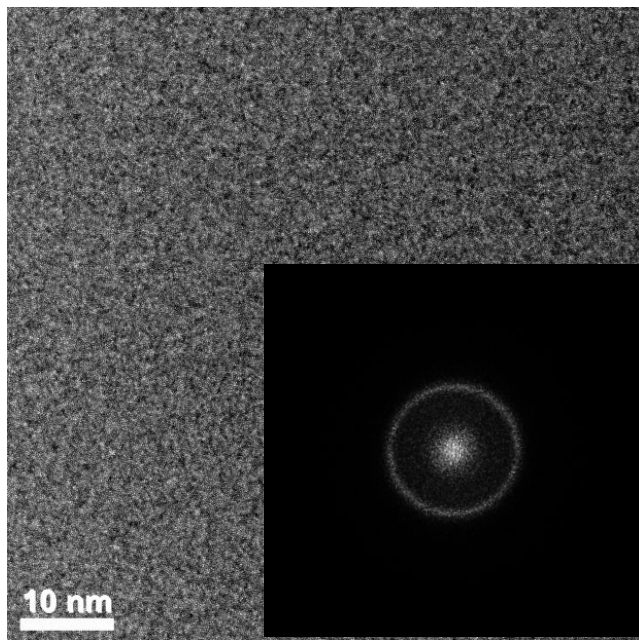
$$\epsilon_{130^\circ} = 1,3$$

$$\epsilon_{110^\circ} = 1,1$$

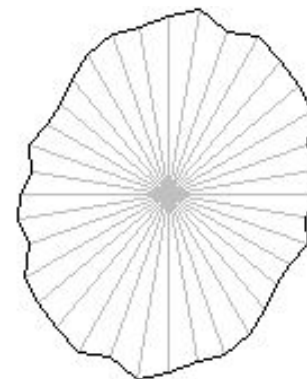
$$\epsilon_{80^\circ} = 1,3$$

Электронно-микроскопическое изображение структуры аморфного сплава состава $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ с области, близкой к свободной поверхности

Интегрально частотная характеристика

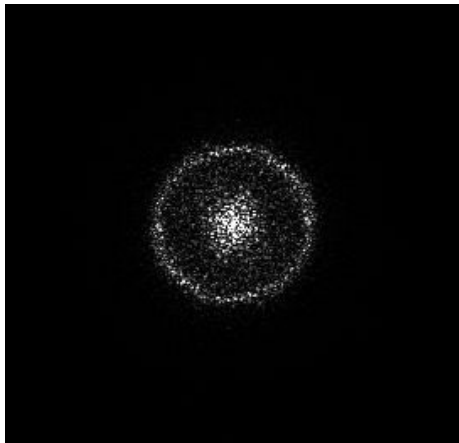


Интегрально пространственная характеристика

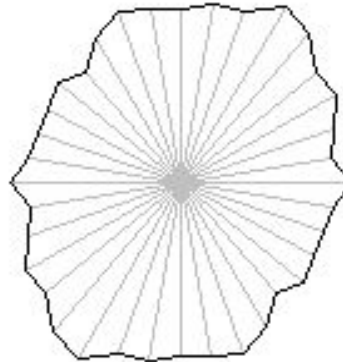


Детальный анализ электронно-микроскопическое изображение структуры аморфного сплава с области, близкой к свободной поверхности

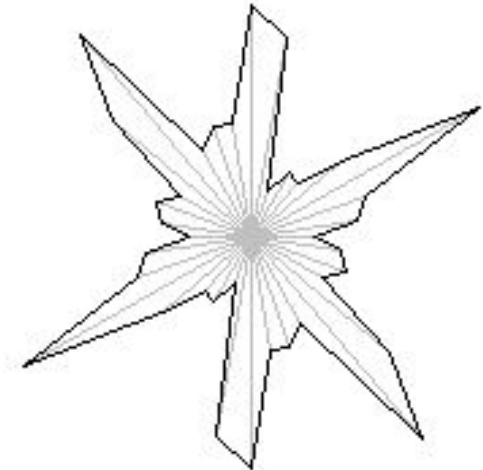
Коротковолновый
диапазон ($\lambda_1 \rightarrow 0,2\text{нм}$)



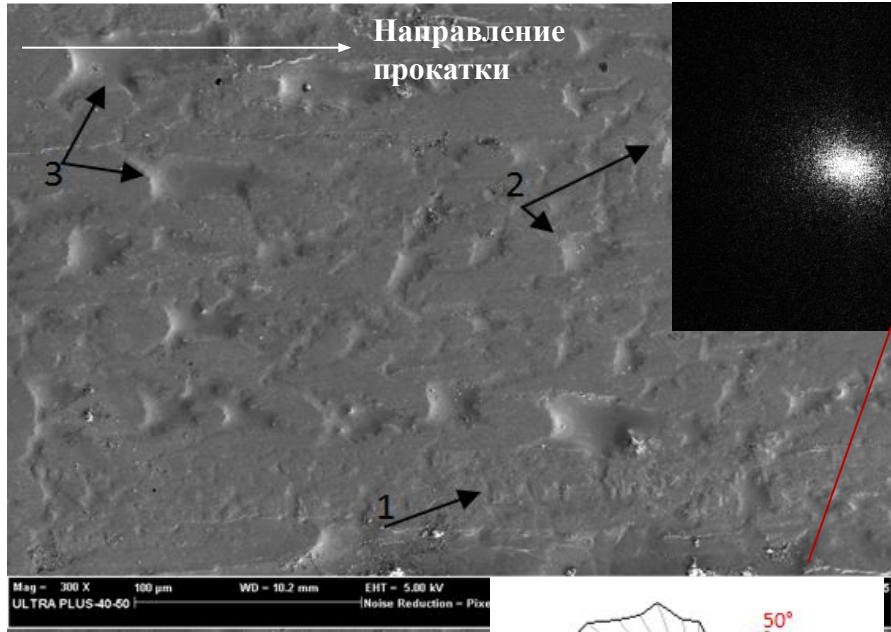
Средневолновый ($\lambda_2 \rightarrow$
($0,4\text{ нм} - 0,7\text{ нм}$))



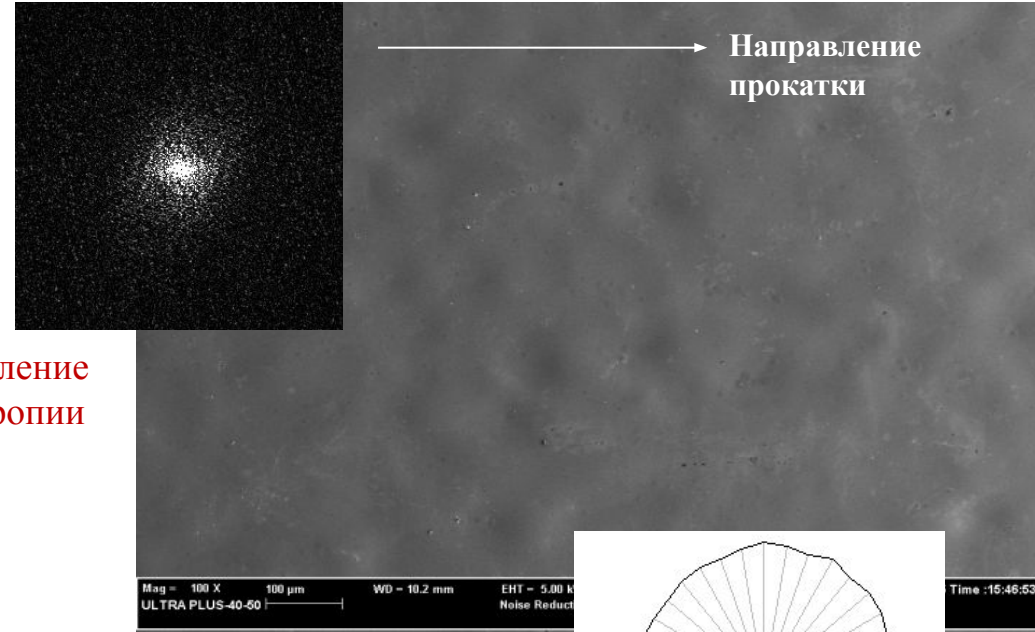
Длинноволновый ($\lambda_3 \rightarrow$
($0,97\text{ нм} - 2,27\text{ нм}$)).



Спектральный анализ морфоструктуры поверхностей раздела спиннингованной ленты FeCu₁Si₁₆B₆

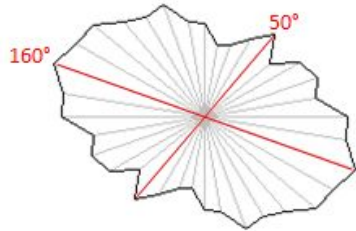


Направление анизотропии

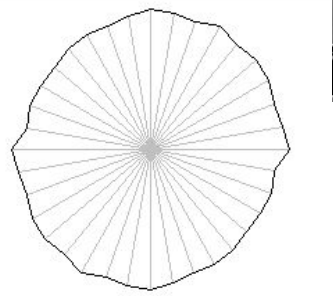


$$\epsilon_{160^\circ} = 1,75$$

$$\epsilon_{50^\circ} = 1$$



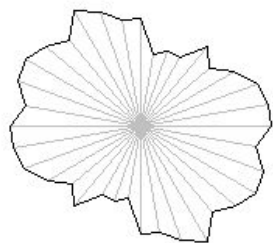
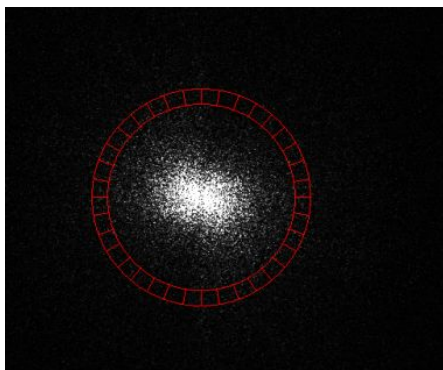
№ кольца	Размер неоднородности (мкм)	Интенсивность (y. e)
2	25,3	3,93
3	15,2	2,86
4	10,86	1,8
9	4,47	0,54
10	4	0,44
26	1,55	0,24



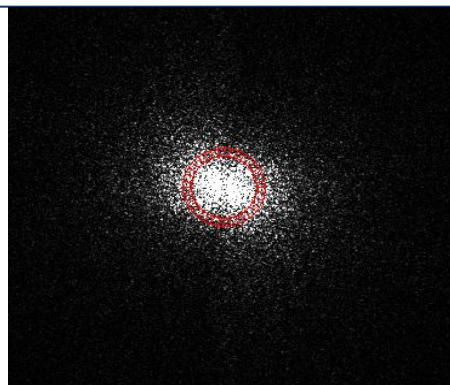
№ кольца	Размер неоднородности (мкм)	Интенсивность (y. e)
2	25,33	1,21
4	10,86	0,06
5	8,44	0,05
7	6,91	0,06
8	5,85	0,06
29	1,33	0,06

Детальный анализ электронно-микроскопическое изображение контактной поверхности аморфного сплава

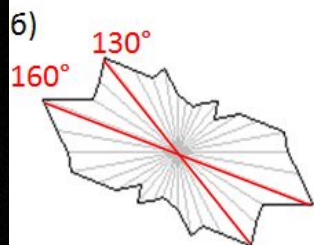
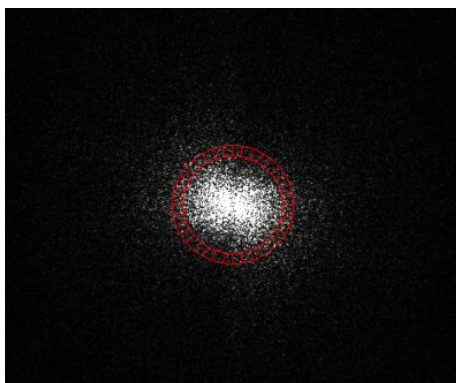
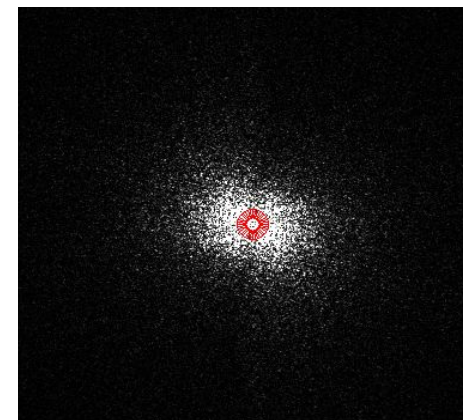
Коротковолновый диапазон
($\Lambda_1 \rightarrow 4 \text{ мкм} - 1,55 \text{ мкм}$)



Средневолновый ($\Lambda_2 \rightarrow 10 \text{ мкм} - 4,7 \text{ мкм}$)

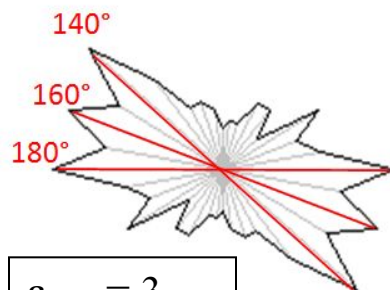


Длинноволновый ($\Lambda_3 \rightarrow (25,3 \text{ мкм} - 15,2 \text{ мкм})$).



$$\epsilon_{160^\circ} = 3,4$$

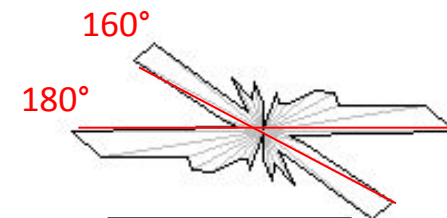
$$\epsilon_{130^\circ} = 2,6$$



$$\epsilon_{180^\circ} = 3$$

$$\epsilon_{160^\circ} = 3$$

$$\epsilon_{140^\circ} = 3$$

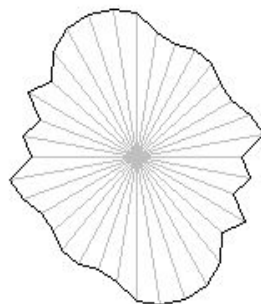
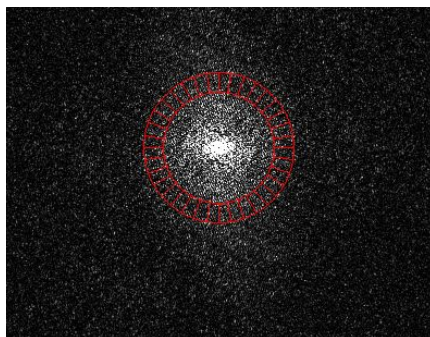


$$\epsilon_{180^\circ} = 3,6$$

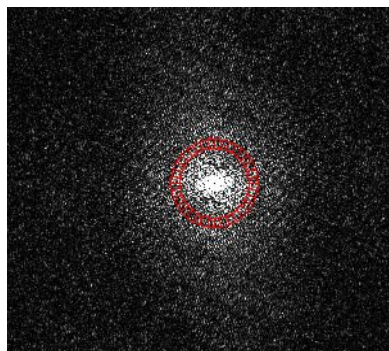
$$\epsilon_{160^\circ} = 3,6$$

Детальный анализ электронно-микроскопическое изображение свободной поверхности аморфного сплава

Коротковолновый диапазон
($\Lambda_1 \rightarrow 5 \text{ мкм} - 1,33 \text{ мкм}$)

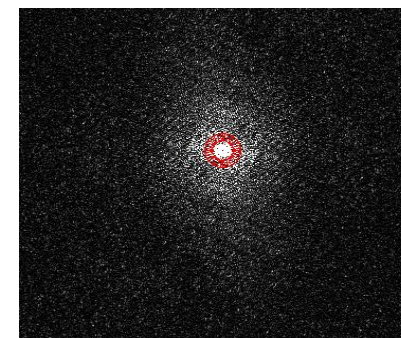


Средневолновый ($\Lambda_2 \rightarrow (8,44 \text{ мкм} - 6,91 \text{ мкм})$)

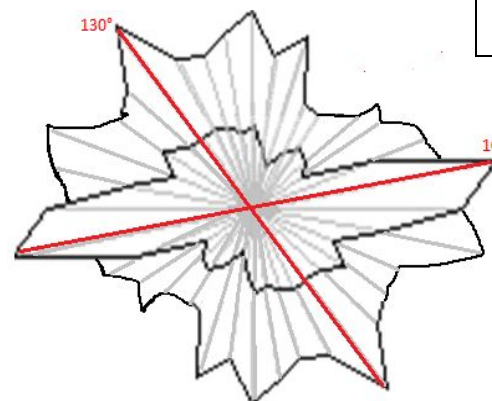


$$\epsilon_{130^\circ} = 2$$

Длинноволновый ($\Lambda_3 \rightarrow (25,3 \text{ мкм} - 10,86 \text{ мкм})$).

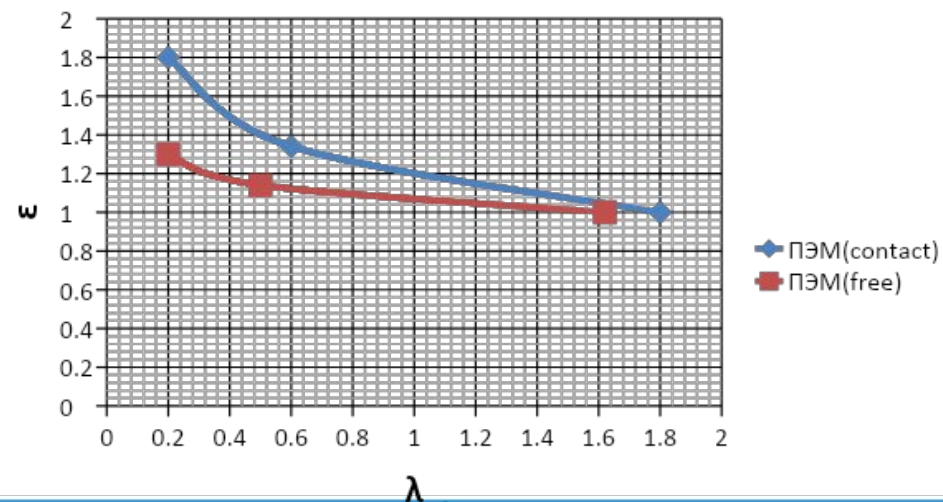
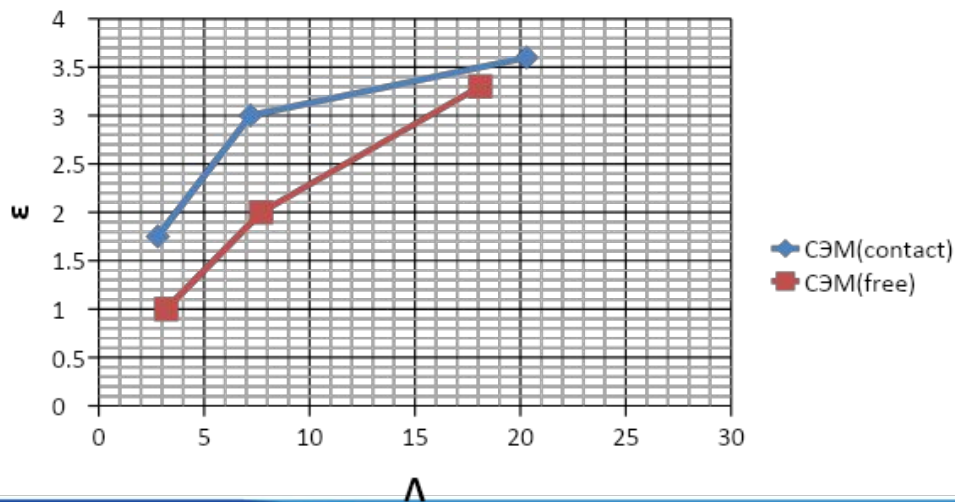


$$\epsilon_{10^\circ} = 3,3$$



Характеристики структурных и морфологических неоднородностей спиннинговой ленты $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$

	СЭМ				ПЭМ			
	Контактная поверхность (contact)		Свободная поверхность (free)		Область близкая к контактной поверхности (contact)		Область близкая к свободной поверхности (free)	
	ε	Λ , мкм	ε	Λ , мкм	ε	λ , нм	ε	λ , нм
1	1,75	2,8	1	3,2	1,8	0,2	1,3	0,2
2	3	7,2	2	7,7	1,34	0,6	1,14	0,5
3	3,6	20,3	3,3	18,1	1	1,8	1	1,62



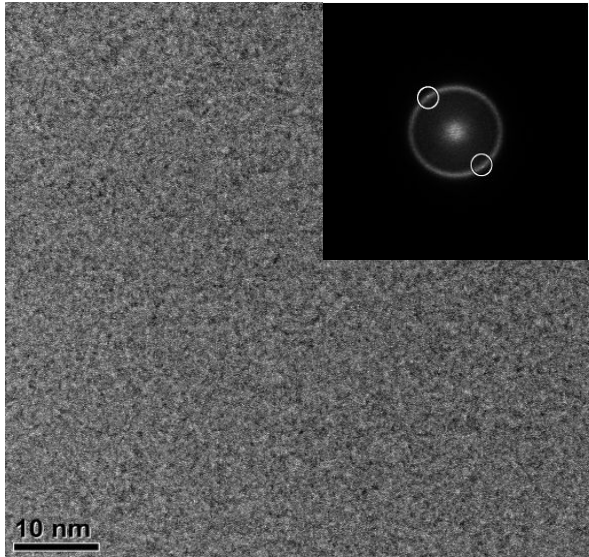
Средние значения длин волн неоднородностей нанометрового диапазона и морфоуровня

Диапазон размеров периодичностей	СЭМ(contact), Λ	СЭМ(free), Λ	ПЭМ (contact), λ	ПЭМ(free), λ
1	2,8	3,2	0,2	0,2
2	7,2	7,7	0,6	0,5
3	20,3	18,1	1,8	1,62

Отношения значений длин волн неоднородностей нанометрового диапазона и морфоуровня

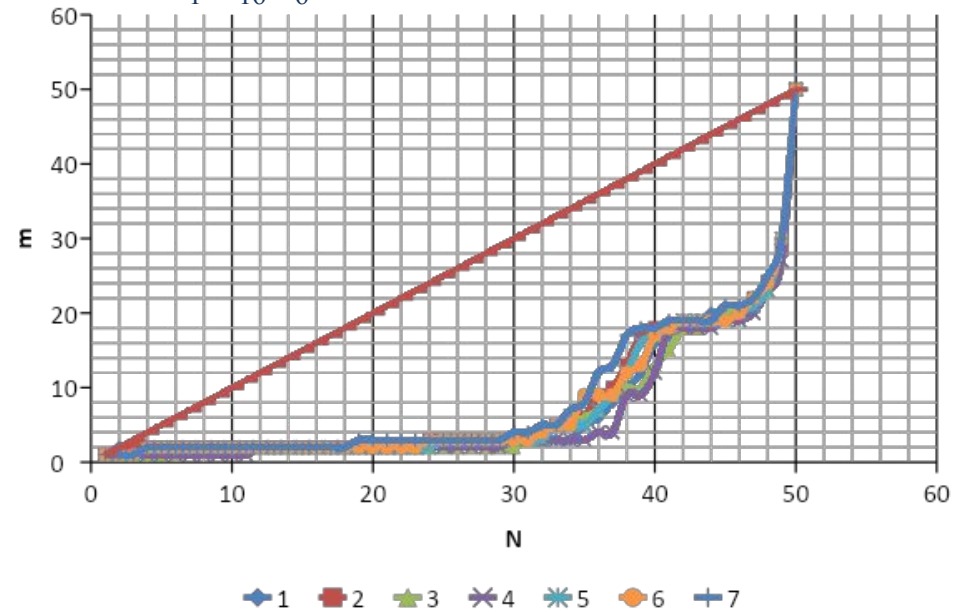
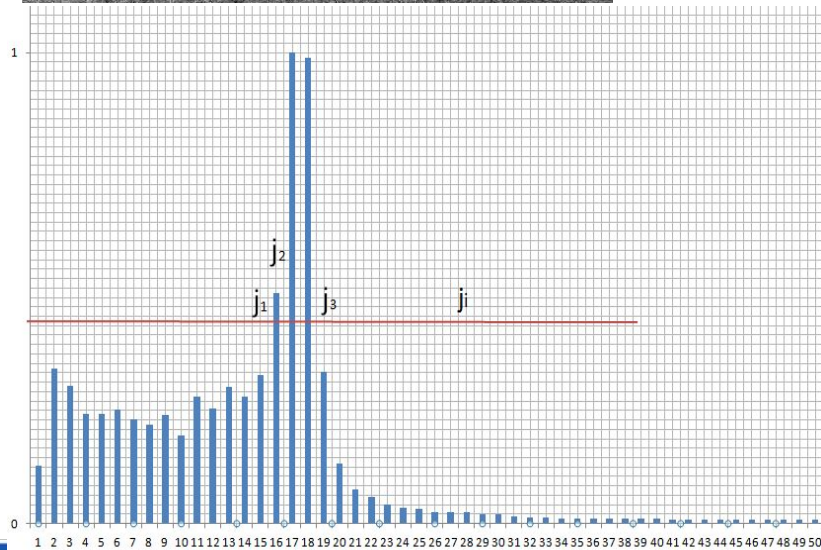
Отношения длин волн	СЭМ(contact), Λ	СЭМ(free), Λ	ПЭМ(contact), λ	ПЭМ(free), λ
$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	2,6	2,4	3	2,5
$\frac{\lambda_3}{\lambda_1}$	7,25	5,7	9	8,1

Статистический анализ упорядочения структуры сплава $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ с области близкой к контактной поверхности с использованием мер Лебега



$$\mu(I_j(k)) = \sum_{(i)} \Delta I(k(i_j))$$

Интегральные функции лебеговских мер для различных областей электронно-микроскопического изображения сплава $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ (красная линия ИФМЛ белого шума)

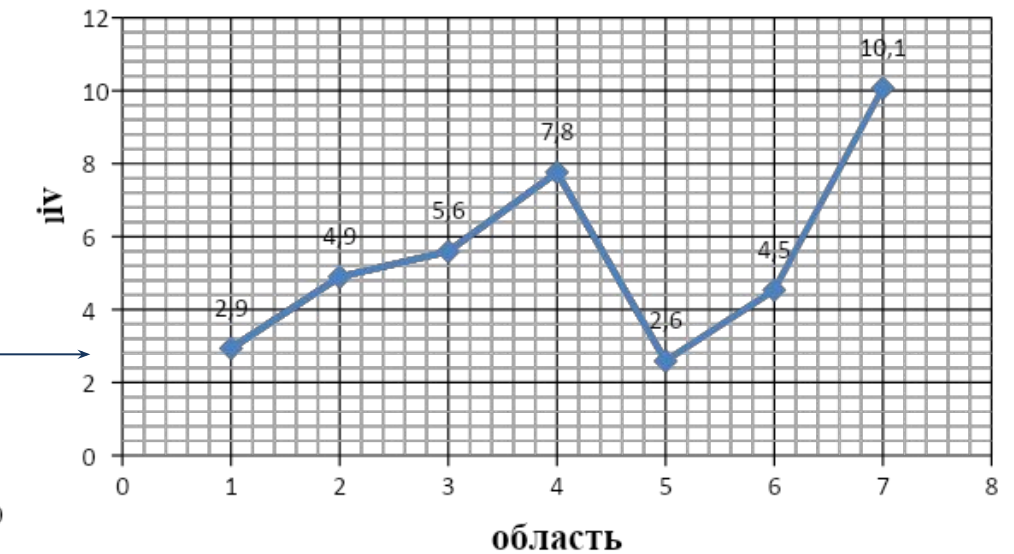
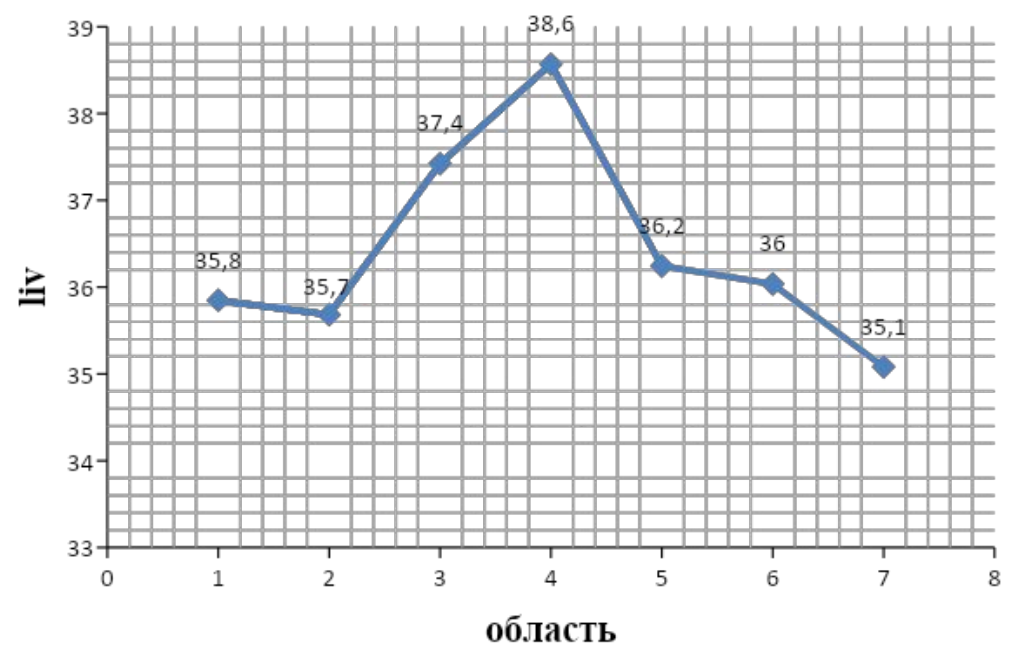
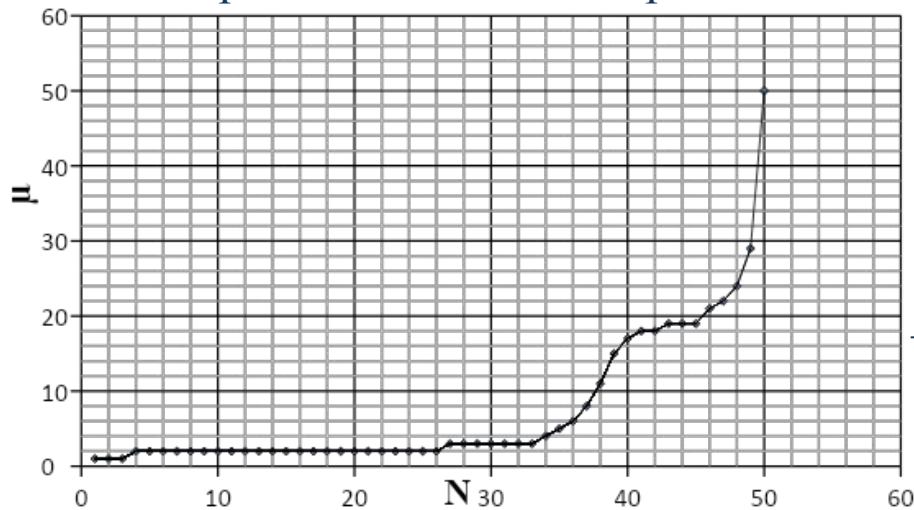


Квантование ИЧХ

Дивергенция Кульбака, полученная от ИФМЛ (база – белый шум)

$$Liv \left[\frac{\mu(x_i)}{\widetilde{\mu(x_i)}} \right] = \sum_{\{x_i\}} \frac{|\mu(x_i) - \tilde{\mu}(x_i)|}{\tilde{\mu}(x_i)}$$

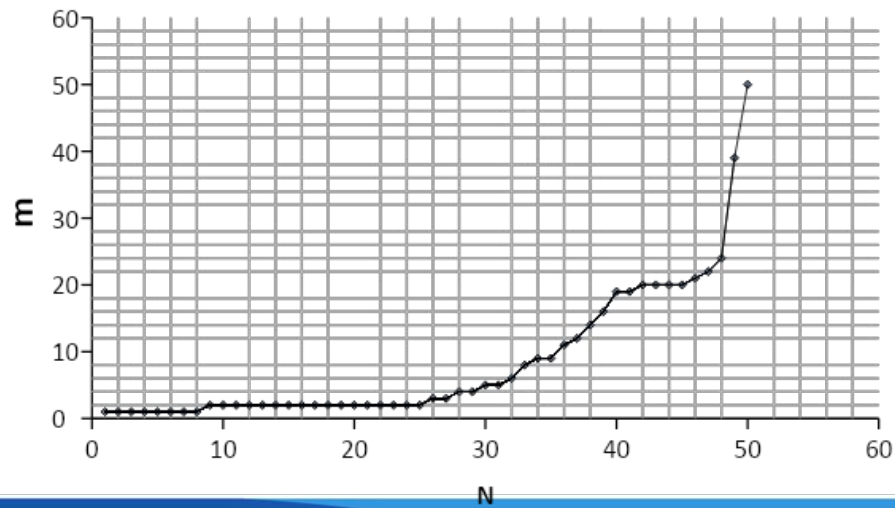
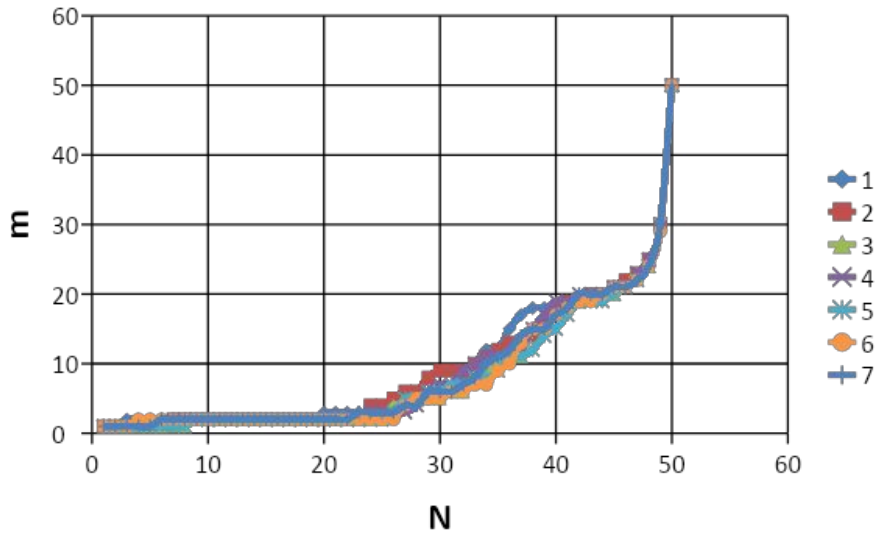
ИФЛМ, рассчитанная по изочастотной характеристики электронно-микроскопического изображения



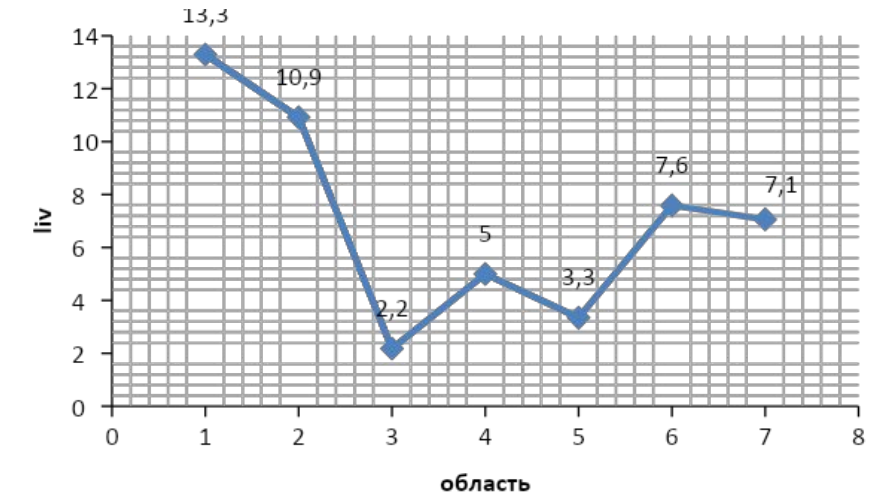
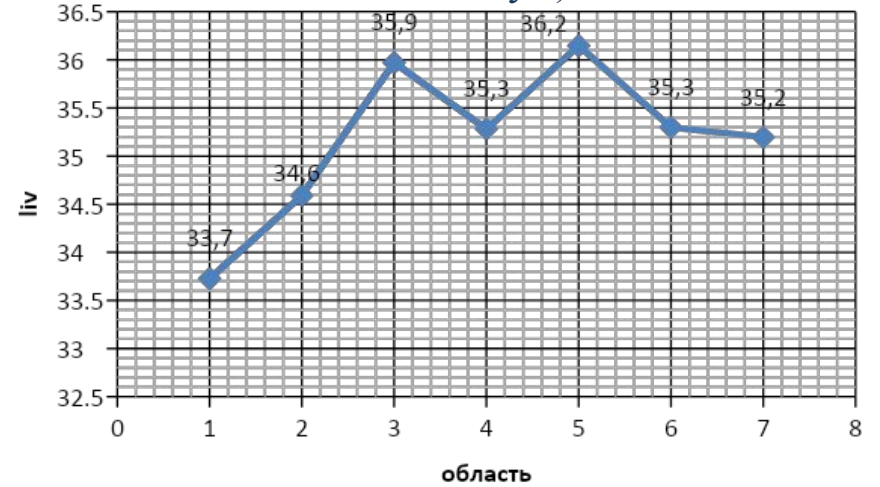
Дивергенция Кульбака (база – ИФМЛ)

Статистический анализ упорядочения структуры сплава $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{V}_6$ с области близкой к свободной поверхности с использованием интегральных функций мер Лебега

Интегральные функции лебеговских мер



Дивергенция Кульбака для ИФМЛ (база – белый шум)



Интегральные функции лебеговских мер

Дивергенция Кульбака для ансамбля ИФМЛ

Выводы:

1. Спектральный анализ электронно-микроскопических изображений структуры и характера морфологии спиннингованной ленты $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$ позволил выделить три диапазона размеров неоднородностей нано - и микрометрового: длинноволновый ($\lambda_3 = 0,2$ нм; $\Lambda_3 = 2,8$ мкм) средневолновый ($\lambda_2 = 0,6$ нм; $\Lambda_2 = 7,5$ мкм), коротковолновый ($\lambda_1 = 1,7$ нм; $\Lambda_1 = 19,2$ мкм). Таким образом, исследуемая структура является сложной, характеризуется широким спектром неоднородностей.
2. Анизотропия структуры в нанометровом диапазоне определяется коротковолновыми неоднородностями, $\lambda_1 = 0,2$ нм, которые обладают максимальным значением ε , как на контактной, так и на свободной поверхностях. Формирование структур мезоуровня и длинноволнового диапазона сопровождается уменьшением коэффициента анизотропии.
3. Показано: интегральная анизотропия морфоструктуры спиннингованной ленты определяется неоднородностями длинноволнового диапазона. Коротковолновые периодичности свободной поверхности характеризуются меньшим показателем анизотропии ($\varepsilon = 1$) по сравнению с контактной поверхностью ($\varepsilon = 1,75$). Переход к неоднородностям высоких размеров приводит к линейному росту коэффициента анизотропии. Формирование среднего и дальнего порядка неоднородностей свободной поверхности сопровождается резким возрастанием анизотропии в их распределении и по значению ε достигает значения коэффициента анизотропии контактной поверхности.
4. Сравнение спектральных характеристик локальных областей структуры быстрозакаленного сплава выявил разный уровень их упорядочения. Изменение характера анизотропии для обнаруженных диапазонов неоднородностей нано- и микроуровня отражено в инверсии коэффициента анизотропии ε . Получено: формирование среднего и дальнего порядка в аморфно-нанокристаллическом сплаве происходит по принципу самоподобных пространственных структур.



Спасибо за внимание!