

# РАДИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЛИ ФАЗ ДЛЯ СПЛАВА Ti–2 вес.% Fe ПОСЛЕ КВД ОБРАБОТКИ



Г.С. Давдян<sup>1,2</sup>, А.С. Горнакова<sup>2</sup>, С.И. Прокофьев<sup>2</sup>, Н.С. Афоникова<sup>2</sup>, Б.Б. Страумал<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСИС», Москва, Россия

<sup>2</sup> ИФТТ РАН, Черноголовка, Россия

Email: alenahas@issp.ac.ru u faberest@yandex.ru

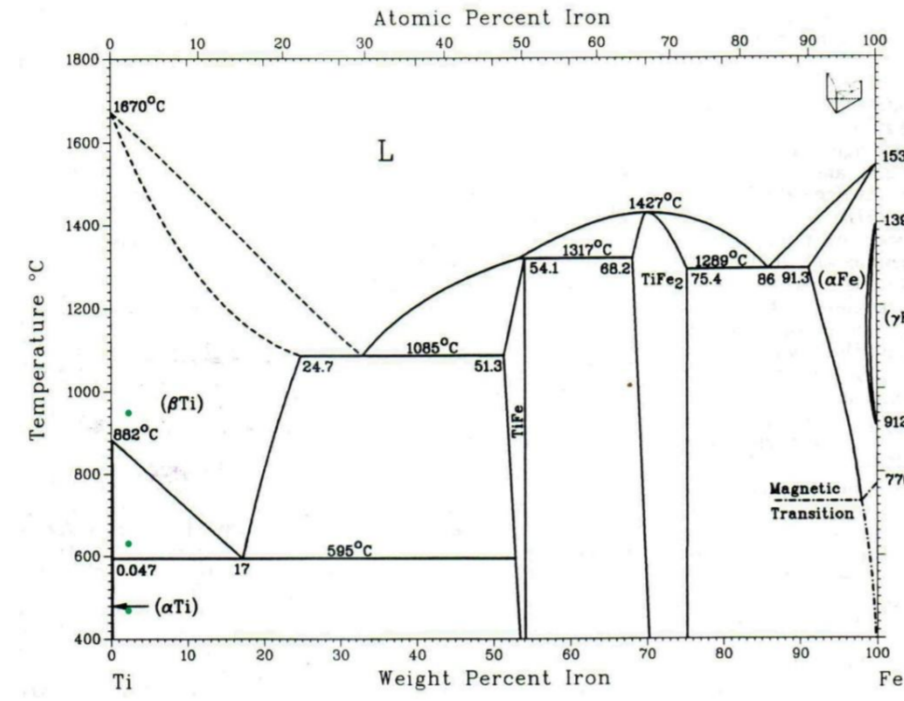
Легирование титана различными добавками позволяет получать сравнительно легкие сплавы, обладающие разнообразными наборами характеристик, которые позволяют использовать их в широком диапазоне условий эксплуатации. Обработка двухкомпонентных титановых сплавов с помощью кручения под высоким давлением (КВД) в сочетании с предварительной термообработкой влияет на их фазовый состав, морфологию микроструктуры и позволяет получать широкий спектр механических свойств. Целью данной работы является исследование влияния предварительного отжига, проведенного в разных областях фазовой диаграммы Ti–Fe на фазовый состав, содержание железа в фазах, размер зерен фаз, а также на твердость и модуль Юнга сплава Ti–2 вес.% Fe после КВД.

**Материал** сплав Ti–2 вес.% Fe

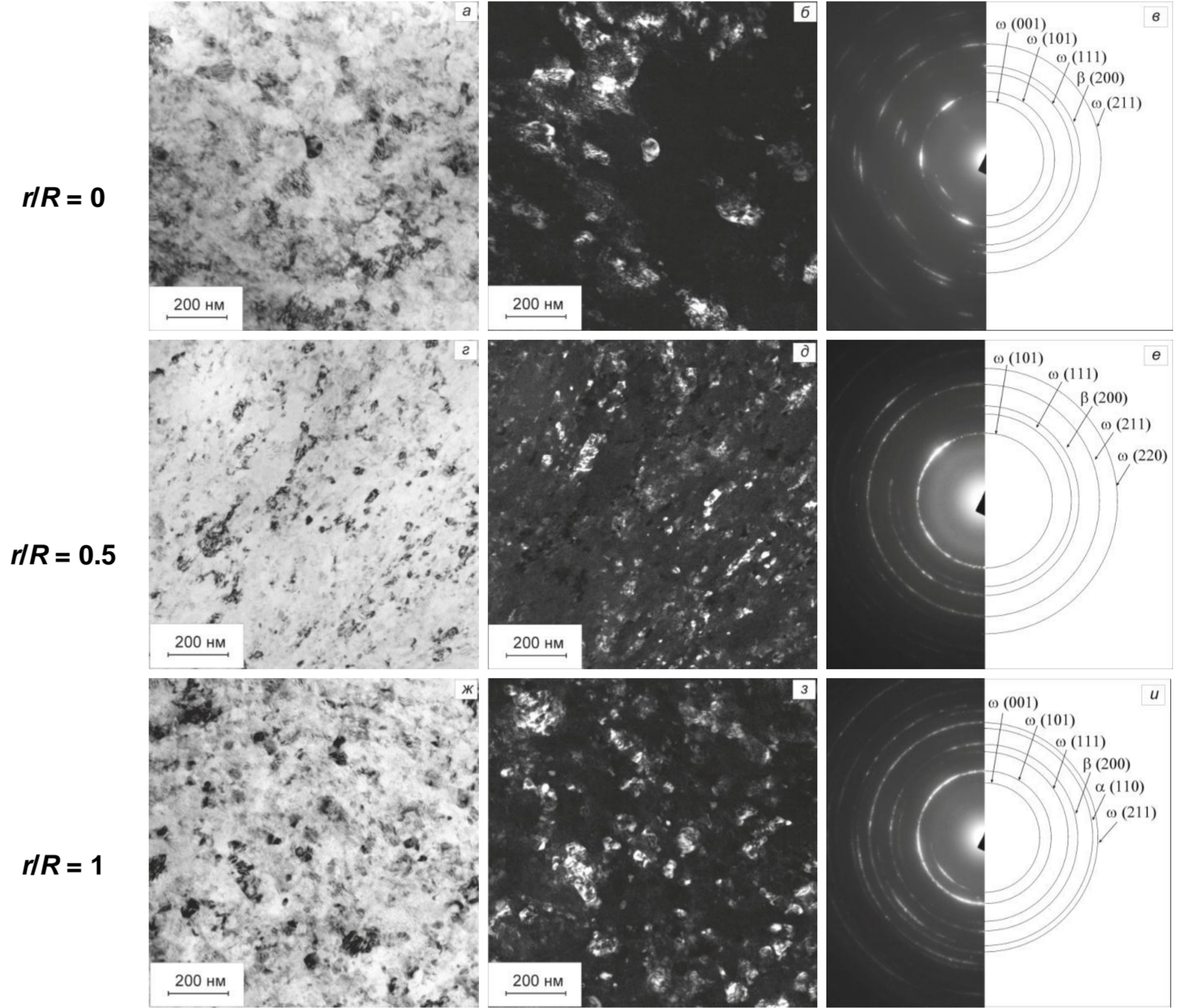
**Фазовая диаграмма**

**Методики**

- 1) Термообработка (отжиг в кварцевых ампулах, закалка в воде с ампулой)  
(αTi)+TiFe 470°C (673 ч.),  
(αTi)+ (βTi) 615°C (270 ч.),  
(βTi) 950°C (270 ч.)
- 2) Кручение под высоким давлением (7 ГПа, 5 оборотов, 1 об/мин)
- 3) Рентгенофазовый анализ
- 4) Наноиндентирование (10 мН)
- 5) Сканирующая электронная микроскопия
- 6) Просвечивающая электронная микроскопия

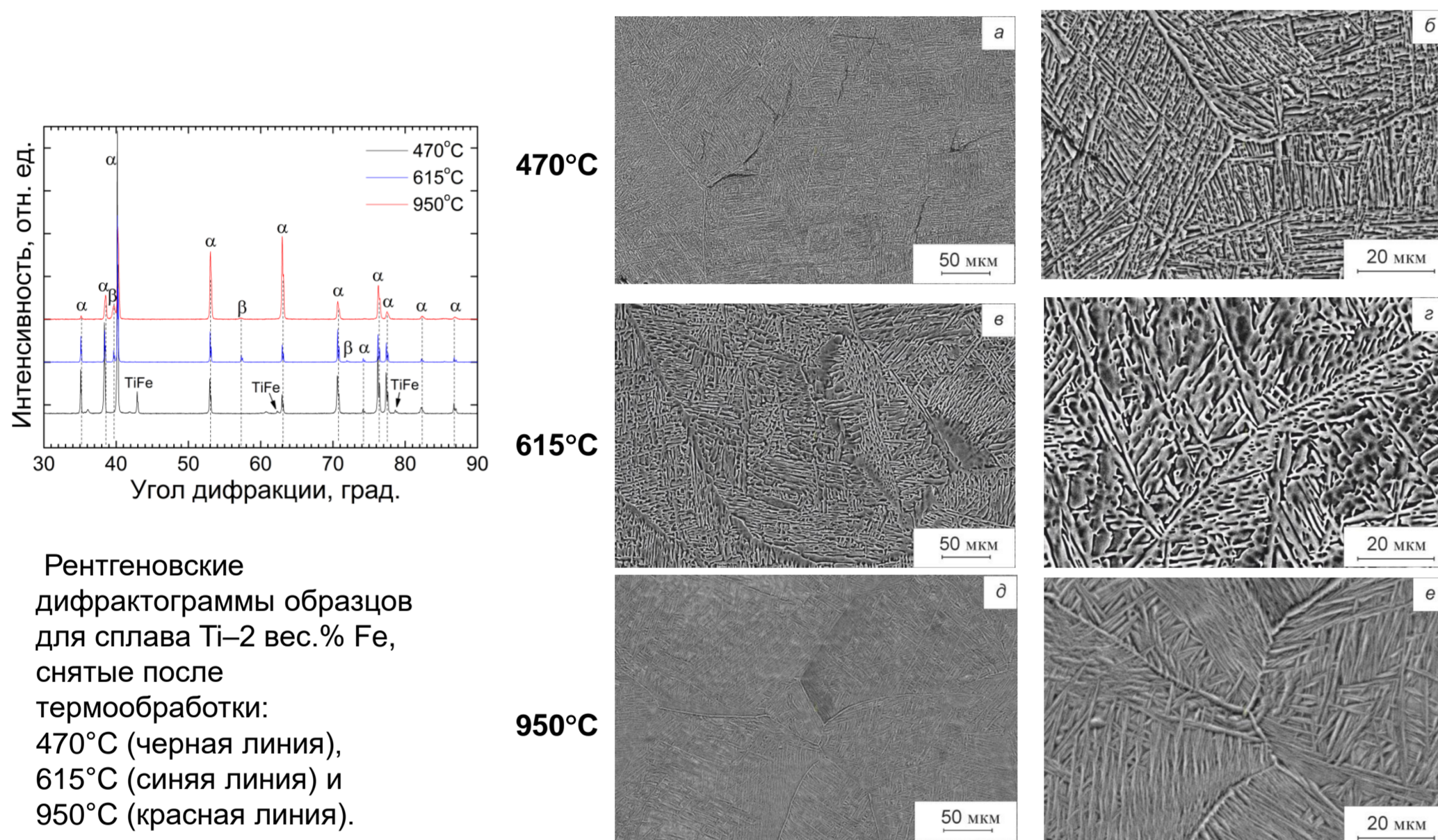


**Микроструктура сплавов после КВД обработки**



ПЭМ микрофотографии микроструктуры образца, отожженного при 615°C, после КВД обработки: (а,г,ж) светлопольные изображения, (б,д,з) темнопольные изображения и (в,е,и) электрограммы отснятых областей.

**Микроструктура сплавов после отжига**



Рентгеновские дифрактограммы образцов для сплава Ti–2 вес.% Fe, снятые после термообработки: 470°C (черная линия), 615°C (синяя линия) и 950°C (красная линия).

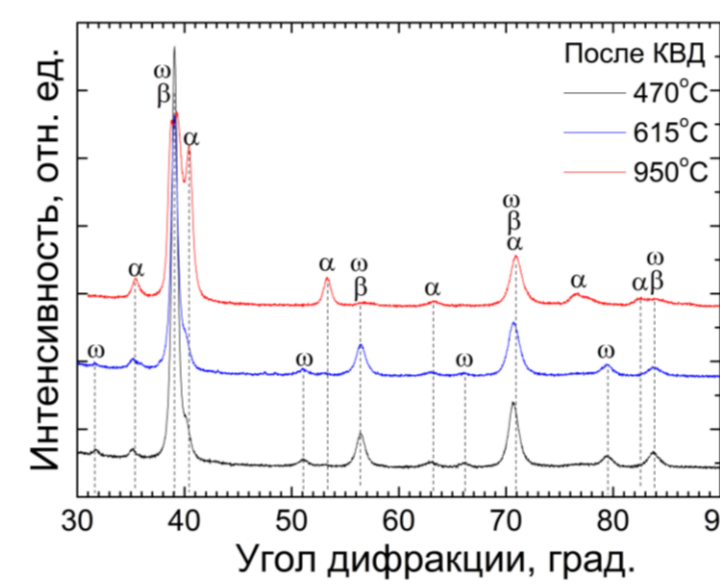
СЭМ микрофотографии микроструктуры сплава Ti–2вес.% Fe. Микроструктура сплава, закаленного после отжига при (а,б) 470°C, (в, г) 615°C и (д, е) 950°C.

Фаза	T, °C	Параметры решеток		X (%)	d (нм)
		a, c (нм)			
(αTi)	470	0.2950, 0.4690		8	38
	615	0.2952, 0.4693		10	36
	950	0.2951, 0.4684		40	18
(βTi)	470	0.3255		16	47
	615	0.3256		11	47
	950	0.3258		6	37
(ωTi)	470	0.4626, 0.2814		76	25
	615	0.4626, 0.2814		69	23
	950	0.4626, 0.2820		54	20

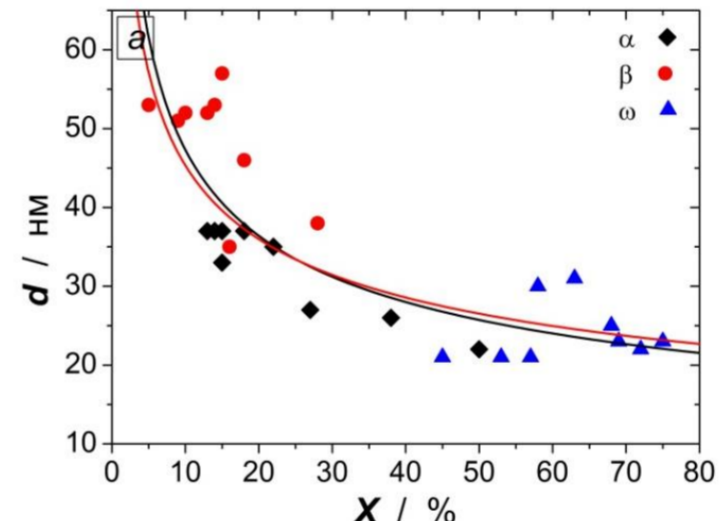
**Выводы**

1. С помощью отжига в различных областях фазовой диаграммы Ti–Fe и последующей закалки в воде были получены образцы сплава Ti–2 вес.% Fe, с различным фазовым составом, содержанием железа в фазах, а также различными объемными долями фаз и средним размером зерен фаз.
2. После кручения при высоком давлении (КВД) все образцы содержали α-, β- и ω-фазы близкого состава. При этом, в образцах наблюдались радиальные зависимости объемных долей фаз и средних размеров зерен фаз.
3. Проведенное наноиндентирование показало различие величин твердости и модуля Юнга образцов, отожженных при разных температурах, и их зависимость от радиальной координаты области индентирования.
4. Измерения твердости образцов показали наличие минимума в их центре, максимум в середине радиуса и сильное ее снижение при приближении к краю. Модуль Юнга образцов уменьшается от центра к краю образца, достигая очень низкой величины. Такое поведение твердости и модуля Юнга образцов, вероятно, связано с их особенностью в процессе КВД обработки.
5. Эксперимент показал, что структура сплава перед КВД оказывает существенное влияние на его микроструктуру, фазовый состав и механические свойства после КВД.

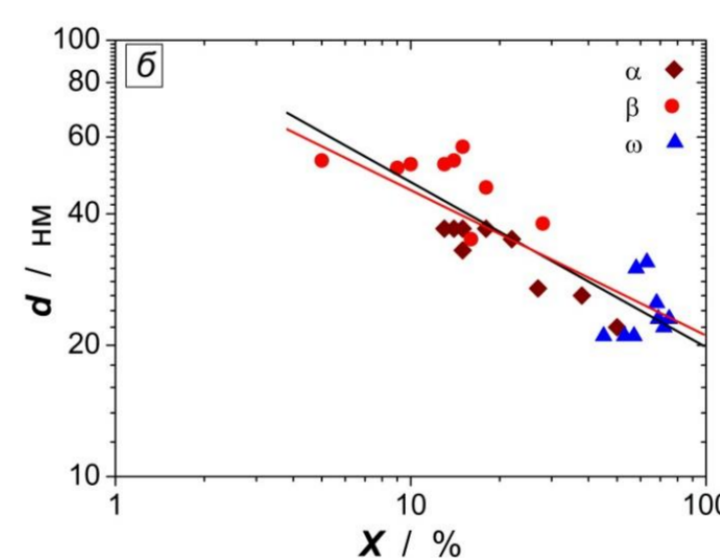
«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00222, <https://rscf.ru/project/24-22-00222/>»



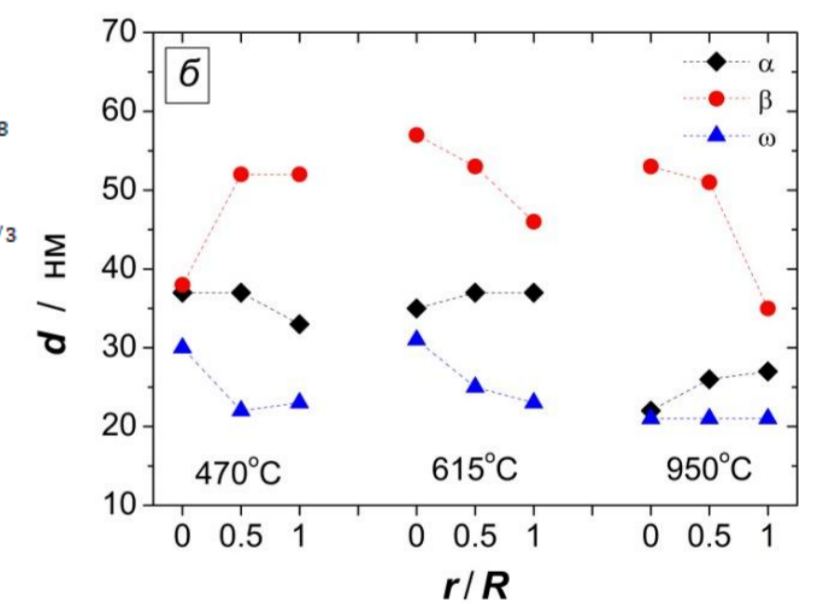
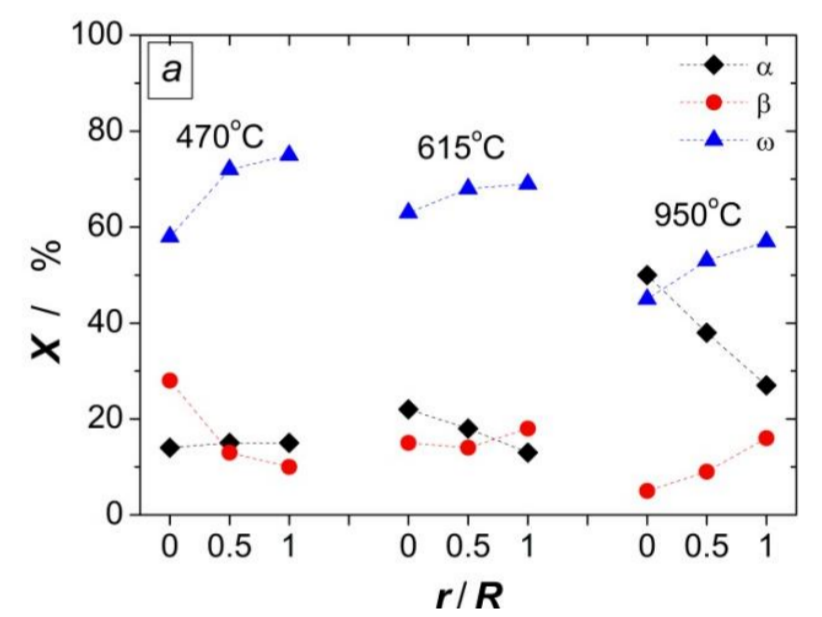
Рентгеновские дифрактограммы образцов для сплава Ti–2 вес.% Fe, снятые после КВД обработки: 470°C (черная линия), 615°C (синяя линия) и 950°C (красная линия).



Экспериментальные точки описываются зависимостью  $d \approx 113 \cdot X^{-0.38}$  (черные линии), что очень близко к  $d \approx 100 \cdot X^{-1/3}$  (красные линии), т.е. с увеличением размера зерна их доля в материале уменьшается.

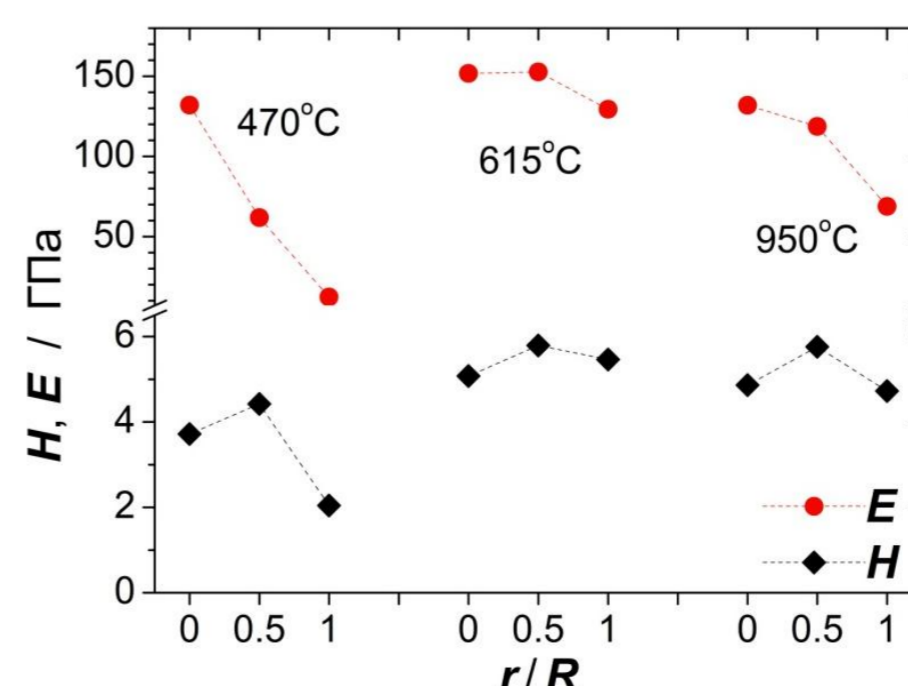


(а) Корреляция между средним размером зерен и объемной долей фаз. (б) Зависимость (а) в логарифмических координатах.



Зависимости (а) объемных долей фаз и (б) среднего размера зерен фаз от радиальной координаты r/R для всех образцов.

Фаза	T, °C	r/R = 0			r/R = 0.5			r/R = 1		
		Параметры решеток a, c (нм)	X (%)	d (нм)	Параметры решеток a, c (нм)	X (%)	d (нм)	Параметры решеток a, c (нм)	X (%)	d (нм)
(αTi)	470	0.2951; 0.4690	14	37	0.2951; 0.4691	15	37	0.2951; 0.4690	15	33
	615	0.2951; 0.4691	22	35	0.2951; 0.4688	18	37	0.2950; 0.4690	13	37
	950	0.2951; 0.4686	50	22	0.2951; 0.4686	38	26	0.2951; 0.4687	27	27
(βTi)	470	0.3256	28	38	0.3255	13	52	0.3255	10	52
	615	0.3256	15	47	0.3255	14	53	0.3255	18	46
	950	0.3256	5	53	0.3256	9	51	0.3256	16	37
(ωTi)	470	0.4626; 0.2814	58	30	0.4626; 0.2814	72	22	0.4626; 0.2814	75	23
	615	0.4625; 0.2816	63	31	0.4626; 0.2814	68	25	0.4628; 0.2814	69	23
	950	0.4629; 0.2812	45	21	0.4630; 0.2812	53	21	0.4630; 0.2812	57	21



Зависимости твердости (H) и модуля Юнга (E) образцов сплава после КВД от радиальной координаты r/R области индентирования. Величины ошибок меньше размера точек. Штриховые прямые связывают точки, соответствующие одной и той же температуре отжига.