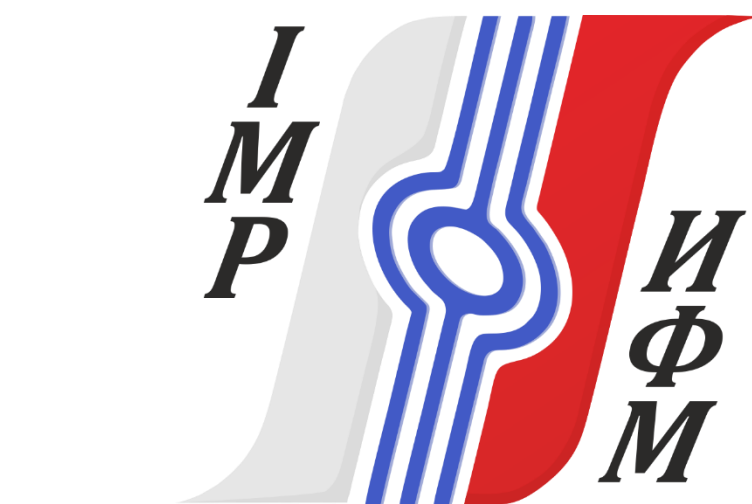




Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и состояние границ зерен в гафниевой бронзе

В. В. Попов¹, Е. Н. Попова¹, Р. М. Фалахутдинов¹, С. А. Судакова¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург, Россия

Введение

В современной электротехнической и атомной промышленности требуются материалы, сочетающие высокую прочность и электропроводность, и с этой точки зрения привлекательны низколегированные хромистые, циркониевые и хромоциркониевые бронзы. В настоящее время предпринимаются многочисленные попытки улучшить функциональные характеристики металлов и сплавов, применяя к ним различные экстремальные воздействия. Выполнен большой объем исследований низколегированных бронз, подвергнутых интенсивной пластической деформации (ИПД) разными способами - кручением под высоким гидростатическим давлением (КВД), равноканальным угловым прессованием (РКУП) и динамическим канально-угловым прессованием (ДКУП). При всех способах ИПД достигается повышение прочностных характеристик. При этом в случае легирования меди оловом основной эффект обусловлен понижением энергии дефектов упаковки, а в случае легирования цирконием – дисперсионным упрочнением. Легирование меди гафнием представляется весьма перспективным, поскольку Hf не только понижает энергию дефектов упаковки, но и может обеспечить дисперсионное упрочнение за счет образования выделений при последующем старении. Поскольку растворимость гафния в меди при эвтектической температуре выше, чем циркония, можно было ожидать, что и упрочняющий эффект от него будет выше, что подтверждают имеющиеся литературные данные.

Влияние кручения под высоким давлением на структуру и свойства гафниевой бронзы исследовалось в ряде работ. В работах исследовались структура и свойства закаленной бронзы только после высокой степени деформации (КВД на 5 оборотов), когда достигается стадия насыщения по измельчению структуры. В работах исследовалась бронза, в которой КВД проводилось после предварительного отжига, вследствие чего гафний в исходном состоянии находился в связанном состоянии, что исключало возможность дисперсионного упрочнения при последующем старении. Кроме того, в этих работах не изучалось состояние границ зерен (ГЗ) после деформации, в то время как во многих исследованиях показано, что интенсивная пластическая деформация металлических материалов приводит к формированию в них неравновесных (деформационно-модифицированных) границ зерен. По мнению некоторых авторов, неравновесные ГЗ отвечают за повышенные свойства материалов, подвергнутых ИПД, которые превышают свойства, ожидаемые только за счет изменений размера зерна.

В настоящей работе ставилась задача изучить влияние степени деформации методом кручения под высоким давлением на структуру, механические свойства и состояние границ зерен гафниевой бронзы.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе исследовали гафниевую бронзу Cu-0.78Hf, состав которой определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре ICPE-9000 с точностью 0.0005%. Результаты представлены в таблице.

Химический состав исследованной бронзы (остальное – медь)

	Hf	Fe	Ni	Zn	Sn
ат. %	0.28	~0.001	~0.005	~0.005	~0.003
мас. %	0.78	~0.001	~0.005	~0.005	~0.005

Отливки бронзы подвергались горячей ковке при 600°C, а затем закаливались в воду от 950°C. Такой режим обработки был выбран для образования однофазного твердого раствора с учетом диаграммы состояния Cu-Hf и данных о растворимости гафния в меди. Цилиндрические образцы закаленной бронзы диаметром 10 мм подвергались интенсивной пластической деформации методом кручения под высоким давлением (КВД). Для КВД от цилиндрических образцов отрезали пластины толщиной 0.5 мм. Деформирование проводилось при комнатной температуре, на 0.5, 1, 3 и 5 оборотов при давлении 4 ГПа, с угловой скоростью 0.3 об/мин.

Значения истинной деформации на середине радиуса образцов, подвергнутых КВД

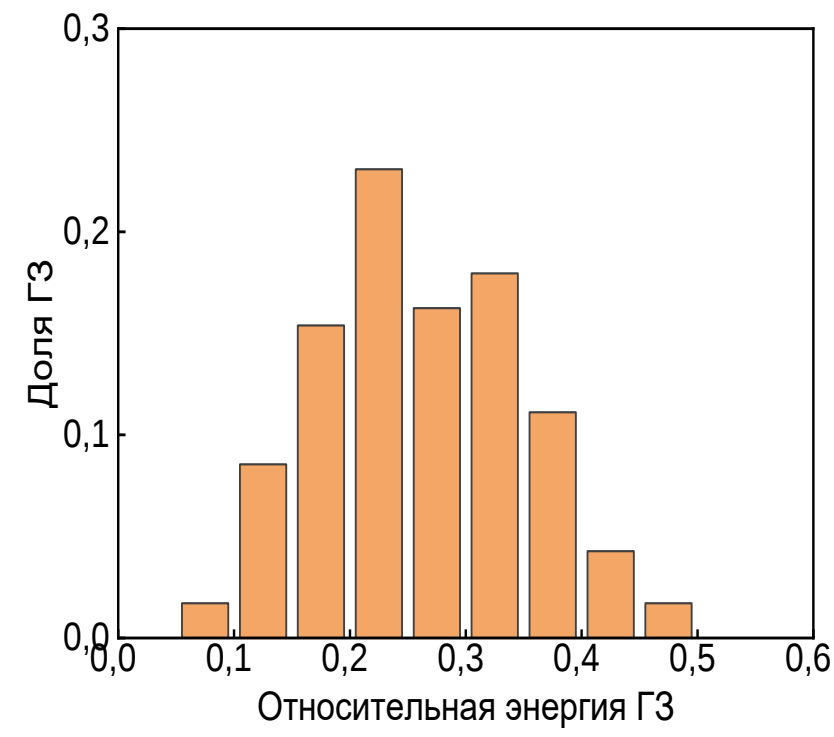
Обороты КВД	0.5	1	3	5
ε	3.7	4.7	6.2	7.2

Исследование структуры деформированных образцов проводилось на просвечивающем электронном микроскопе JEM-200CX с последующей обработкой снимков с помощью программного комплекса SIAMS-600. При этом строились гистограммы распределения зерен по размерам и проводилась статистическая обработка полученных результатов.

Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М.

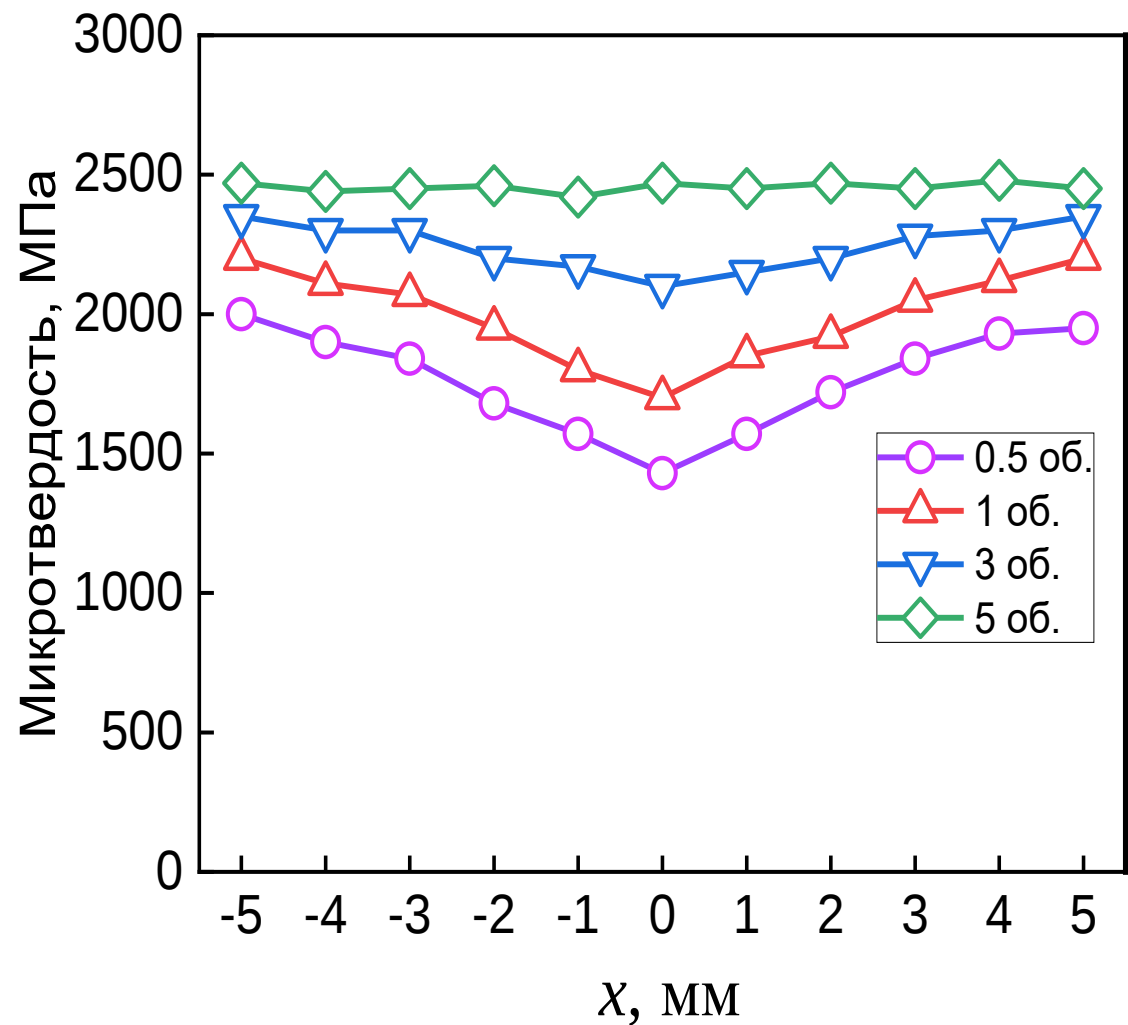
В настоящей работе относительная энергия границ зерен оценивалась на образцах с канавками, полученными химическим травлением. Исследования проводили с помощью сканирующего мультимикроскопа СММ-2000, работающего в режиме сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Съемка проводилась на середине радиуса исследуемых образцов. Обработка изображений, полученных с помощью СТМ, проводилась в приложении Gwyddion путем построения линий перпендикулярно границам зерен. В результате был получен профиль границы зерна, на основании которого вычислялось значение двугранного угла у дна канавки травления.

Для сравнения относительных энергий границ зерен гафниевой бронзы, продеформированной кручением под высоким давлением, с энергией равновесных границ, за эталон была взята медь, отожженная при температуре 800°C в течение двух часов с последующим охлаждением с печью. После такой обработки медь заведомо не содержала неравновесных границ зерен. Распределение границ зерен по энергиям в отожженной меди представлено на рисунке ниже. Средняя относительная энергия границ зерен в этом случае составляла 0.25.

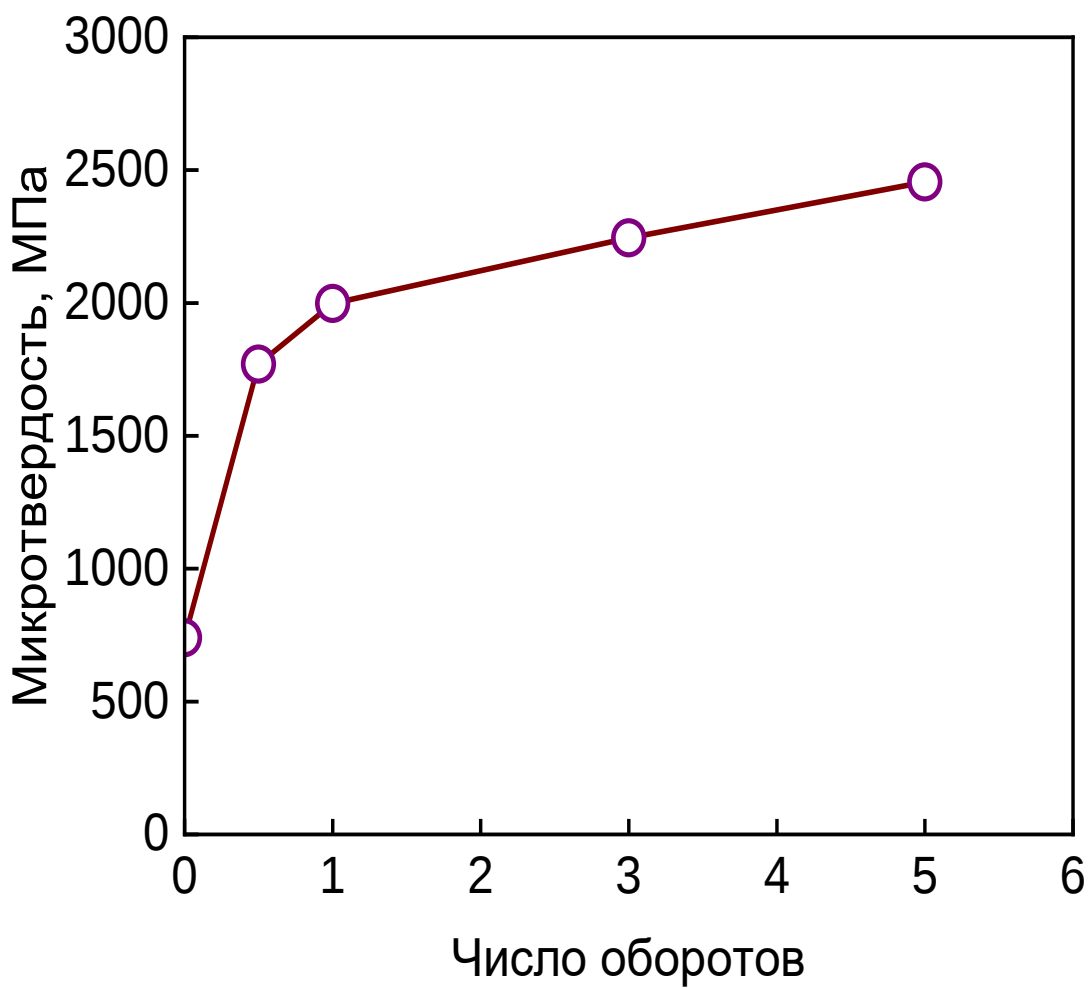


Гистограмма распределения границ зерен по относительной энергии в отожженной крупнозернистой меди.

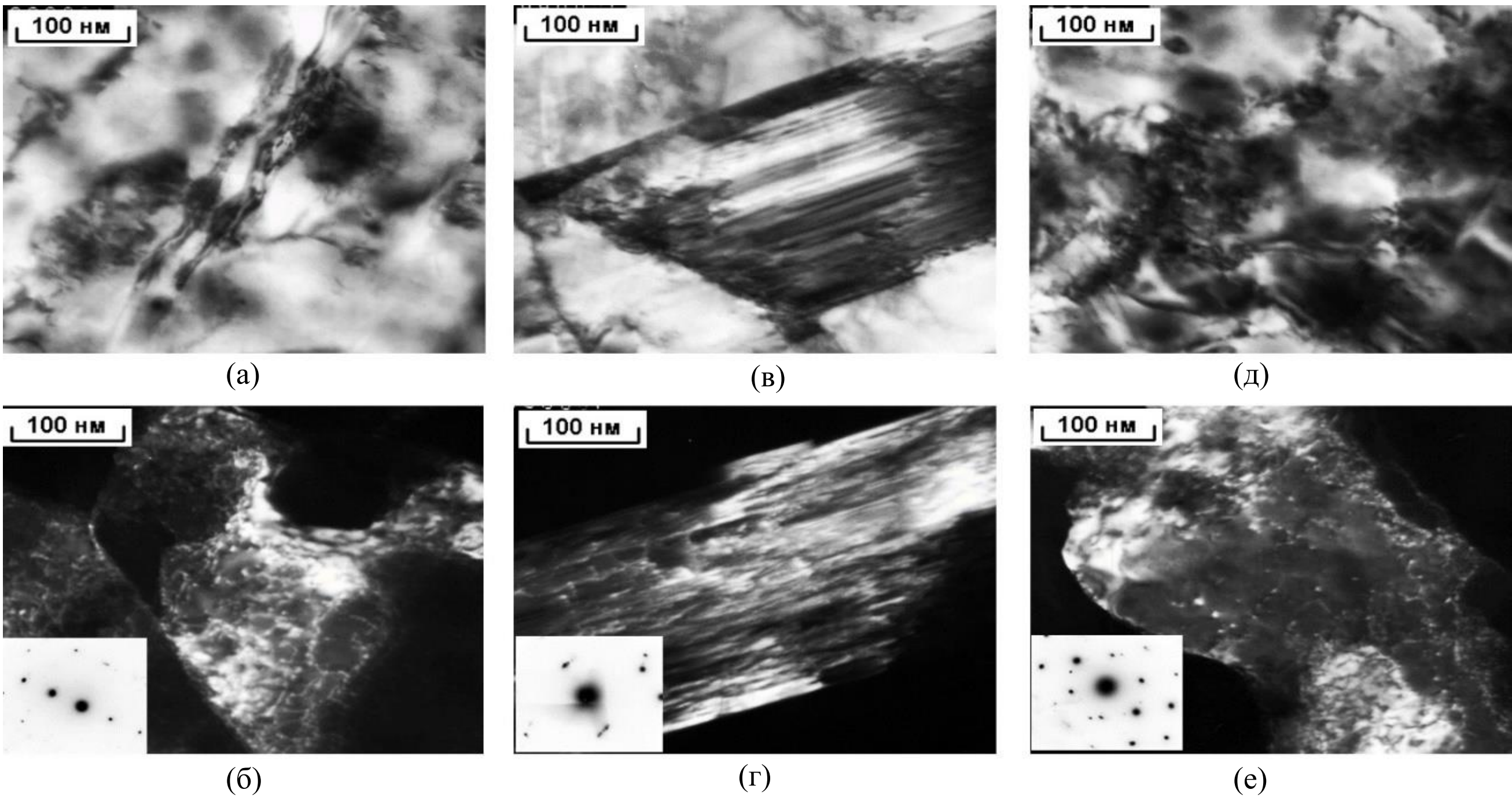
Результаты и их обсуждение



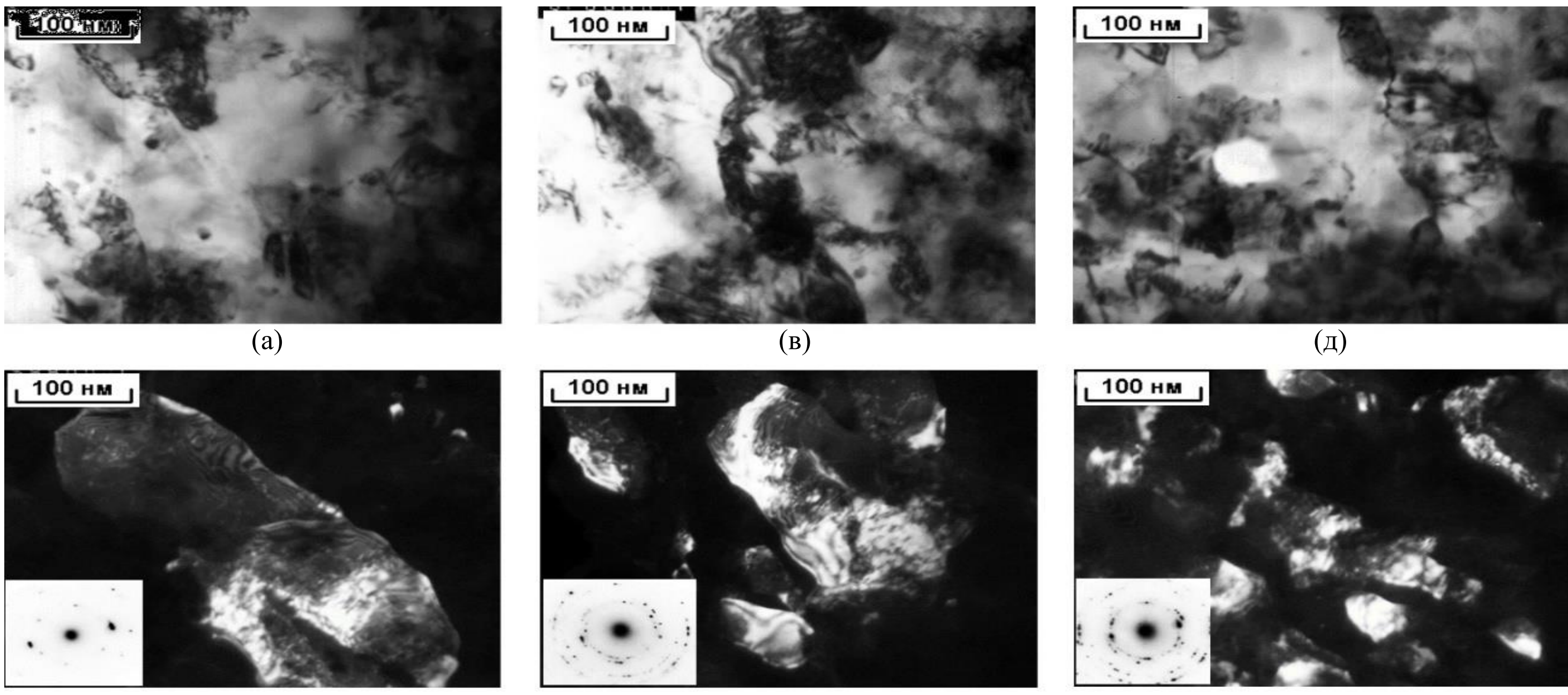
Изменение микротвердости по радиусу образцов в зависимости от степени деформации.



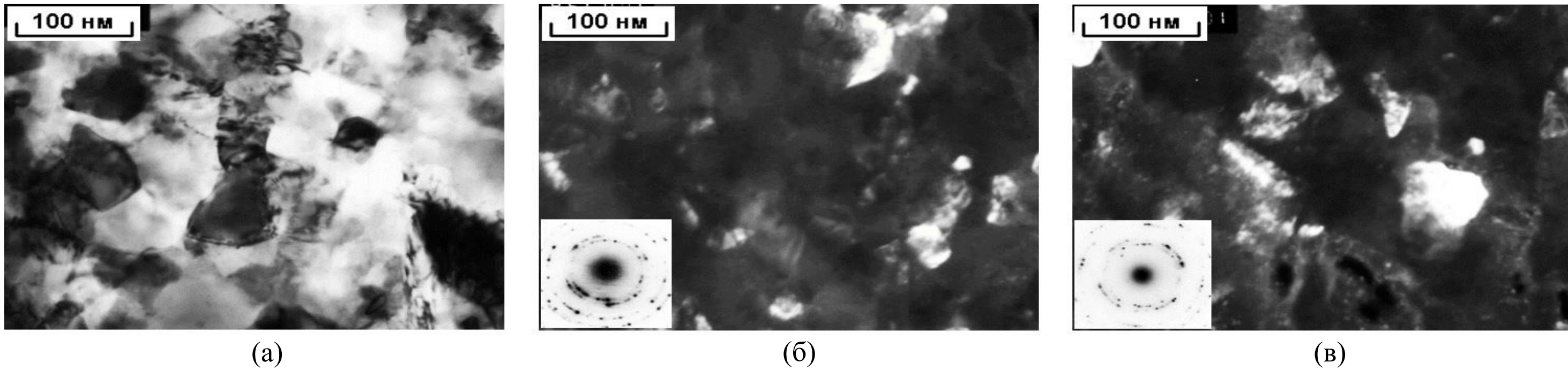
Зависимость микротвердости на середине радиуса образцов от степени деформации.



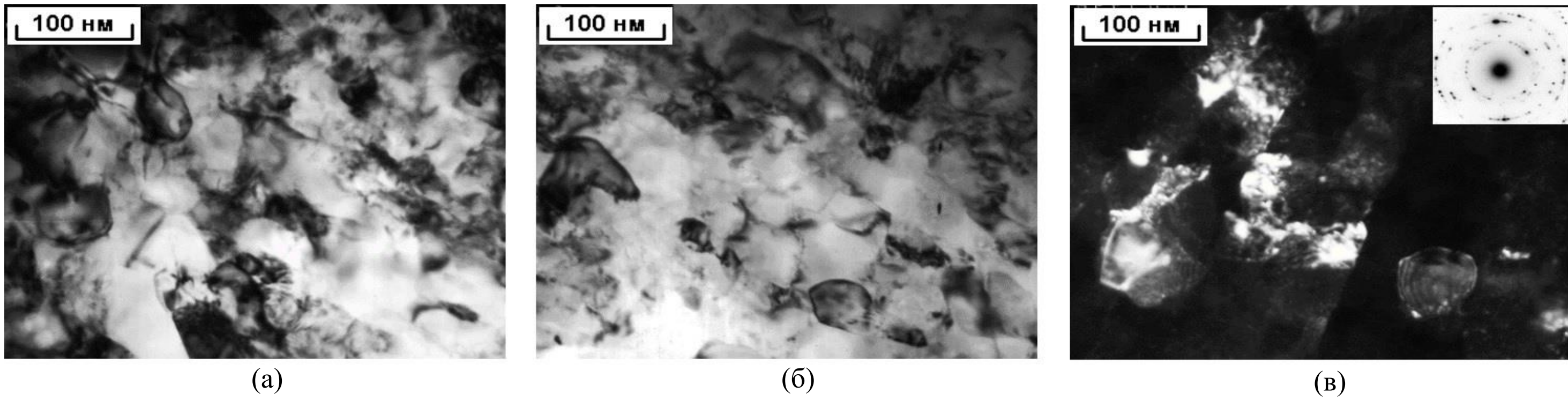
Структура Cu-Hf бронзы после КВД на 0.5 оборота: в центре образца (а, б), на середине радиуса (в, г) и на периферии (д, е): (а, в, д) – светлые поля; (б, ж, з) – темное поле в рефлексе (111)_{Cu} и электронограмма, ось зоны [112]; (г) – темное поле в рефлексе (002)_{дв} и электронограмма; (и) – темное поле в рефлексе (002)_{Cu} и электронограмма, ось зоны [110].



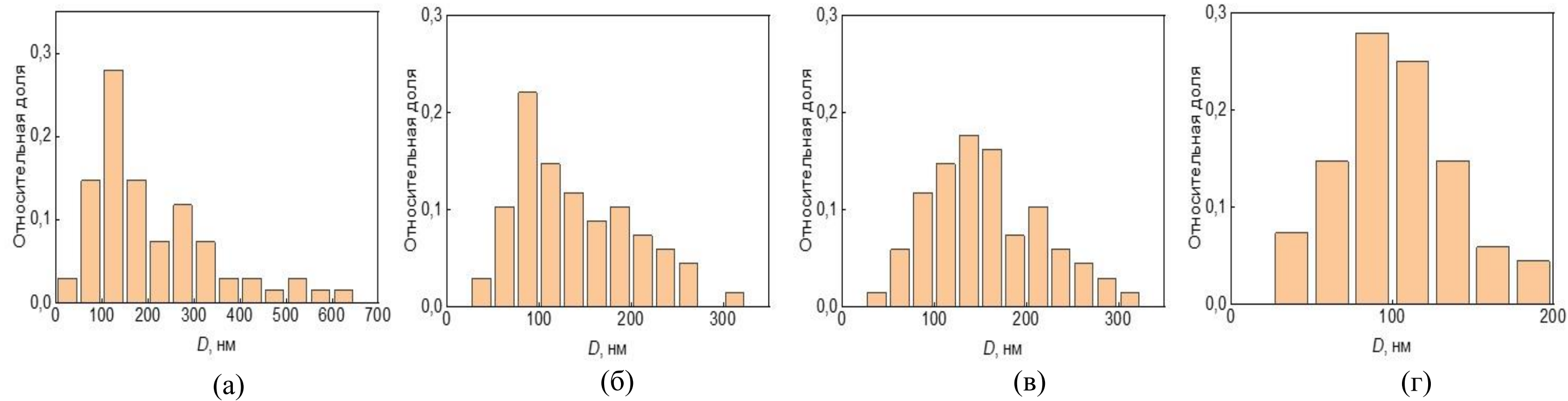
Структура Cu-Hf бронзы после КВД на 1 оборот: в центре образца (а, б), на середине радиуса (в, г) и на периферии (д, е): (а, в, д) – светлые поля; б – темное поле в рефлексе (002)_{Cu} и электронограмма; г, д – темные поля в рефлексах (111)_{Cu} и электронограммы.



Структура Cu-Hf бронзы после КВД на 3 оборота (на середине радиуса образца): (а) – светлое поле; б, в – темные поля в рефлексах (002)_{Cu} и электронограммы



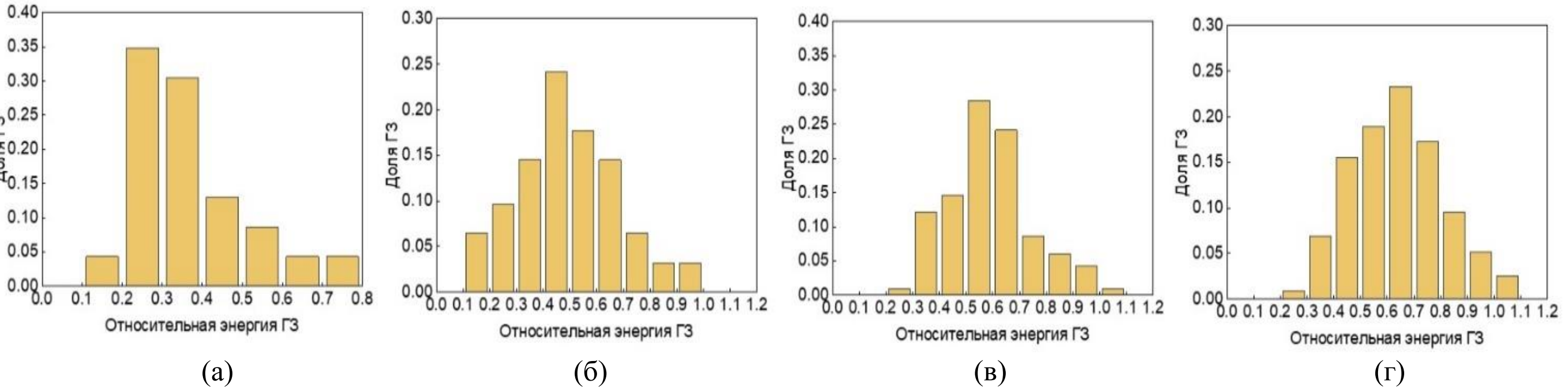
Структура Cu-Hf бронзы после КВД на 5 оборотов (на середине радиуса образца): (а, б) – светлые поля; в – темное поле в рефлексе (111)_{Cu} и электронограмма



Гистограммы распределения зерен по размерам в гафниевой бронзе после деформации КВД на 0.5 (а), 1 (б), 3 (в) и 5 оборотов (г)

Обработка	D _{ср.} , нм	D _{мин.} , нм	D _{макс.} , нм	СКО, нм	H, МПа
КВД 0.5 об.	300	50	650	138	1770
КВД 1.0 об.	160	40	330	69	2000
КВД 3.0 об.	130	40	300	48	2250
КВД 5.0 об.	110	30	200	36	2450

Параметры распределения зерен по размерам и микротвердость (на середине радиуса образца) гафниевой бронзы, подвергнутой КВД



Распределение границ зерен по энергиям в бронзе, продеформированной КВД на 0.5 (а), 1 (б), 3 (в) и 5 оборотов (г).

Обработка	Средняя относительная энергия ГЗ
КВД, 0.5 оборота	0.39
КВД, 1 оборот	0.51
КВД, 3 оборота	0.50
КВД, 5 оборотов	0.64

Средняя относительная энергия границ зерен образцов гафниевой бронзы, полученных ИПД методом КВД

Заключение

Исследовано формирование ультрамелкозернистой структуры в гафниевой бронзе при интенсивной пластической деформации методом кручения под высоким давлением. При низких степенях деформации (КВД на 0.5 и 1 оборот) наблюдается градиент структуры по радиусу образца – от центра к периферии размеры кристаллитов уменьшаются, микротвердость возрастает. После КВД на 3 оборота градиентный характер структуры по радиусу образца выравнивается. После КВД на 5 оборотов достигается стадия насыщения, при которой не происходит дальнейшего измельчения структуры и повышения микротвердости. Показано, что в результате КВД границы зерен приобретают специфическое деформационно-модифицированное состояние, характеризующееся повышенной энергией по сравнению с равновесными границами в отожженном материале.