

**СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МЕТАЛЛАХ ПРИ  
УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

<sup>1</sup>Назаров А.А., <sup>1</sup>Жиляев А.П., <sup>1</sup>Самигуллина А.А., <sup>1</sup>Мурзаев Р.Т.,

<sup>2</sup>Мухаметгалина А.А., <sup>3</sup>Царенко Ю.В., <sup>3</sup>Рубаник В.В.

<sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,  
г. Уфа, Россия, E-mail: AANazarov@imsp.ru

<sup>2</sup>Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия

<sup>3</sup>Институт технической акустики НАНБ, г. Витебск, Беларусь, E-mail: ita@vitebsk.by

Знакопеременные механические напряжения, создаваемые в материалах при интенсивном ультразвуковом воздействии с амплитудами деформации  $\varepsilon_m \geq 10^{-4}$ , инициируют осциллирующую пластическую деформацию и приводят к значительным изменениям их дефектной структуры. К настоящему времени хорошо исследовано воздействие ультразвука с амплитудами значительно выше указанного порога, которое приводит к интенсивному размножению дислокаций и упрочнению материала. Такое воздействие используется в ультразвуковом упрочнении, наноструктурировании, финишной обработке поверхности материалов и т.д. [1]. Менее исследованы эффекты, связанные с ультразвуковой обработкой (УЗО) при умеренных амплитудах, когда напряжения сопоставимы с пределом текучести материала, и нет интенсивной генерации дислокаций, но ультразвук может способствовать повышению подвижности дислокаций, релаксации дефектной структуры и внутренних напряжений. Эти эффекты могут представлять интерес как потенциальный инструмент для контролируемого воздействия на структуру и свойства неравновесных материалов, каковыми являются, например, ультрамелкозернистые (УМЗ) и наноструктурные (НС) материалы.

УМЗ материалы, полученные деформационными методами, такими как кручение под квазигидростатическим давлением (КГД), равноканальное угловое прессование (РКУП), всесторонняя изотермическая ковка (ВИК) и т.п., характеризуются наличием высокой плотности решеточных дислокаций, а также неравновесных границ зерен, содержащих внесенные при деформации дислокации и являющихся источниками дальнедействующих внутренних напряжений [2,3]. Эксперименты показывают, что отжиг при умеренных температурах приводит к возврату структуры и снижению внутренних напряжений, что способствует улучшению механических свойств УМЗ материалов. УЗО, действующая аналогичным образом, может рассматриваться как потенциально выгодная альтернатива такому отжигу.

В настоящей работе изложены результаты теоретического и экспериментального исследования воздействия УЗО на структуру УМЗ металлов.

Теоретическое исследование проведено методом моделирования в рамках дискретной дислокационной динамики. Для этого было выбрано модельное зерно квадратной формы с двумерной кристаллической решеткой, в которой имеются три плоскости скольжения дислокаций, расположенные под углом  $60^\circ$  друг к другу (рис. 1 а). В стыках зерна расположены клиновые дисклинации мощности  $\pm\Omega$ , образующие квадрупольную конфигурацию. В зерне хаотически распределены краевые дислокации всех трех систем скольжения. Количества дислокаций противоположного знака одинаковы как в целом по системе, так и отдельно по каждой плоскости скольжения. При воздействии знакопеременного напряжения сдвига на систему дислокации приходят в осциллирующее движение. Численное исследование этого движения позволило выделить несколько типичных процессов структурной перестройки системы, которые при этом происходят: образование динамических мультипольных конфигураций, которые могут совершать дрейфовое движение, образование неподвижных барьеров типа дислокаций Ломера-Коттрелла и поглощение дислокаций границами зерен. После определенного количества циклов деформации устанавливается стационарное состояние, в котором структура системы зависит как от исходной плотности дислокаций, так и амплитуды ультразвука. При высокой плотности дислокаций и амплитуде напряжений ниже некоторой пороговой дислокации образуют в зерне конфигурации, создающие дальнедействующие напряжения, и полной компенсации поля напряжений дисклинаций не происходит (рис.

1 б). При этом среднеквадратичное напряжение в зерне увеличивается по сравнению с исходным состоянием. При относительно низкой плотности дислокаций и достаточной амплитуде напряжений все дислокации попадают в границы зерен, «гася» дисклинации и приводя к релаксации поля далекодействующих напряжений (рис. 1в). При этом, в зависимости от соотношения между плотностью дислокаций и мощностью дисклинаций, происходит частичная или полная релаксация далекодействующего поля напряжений.

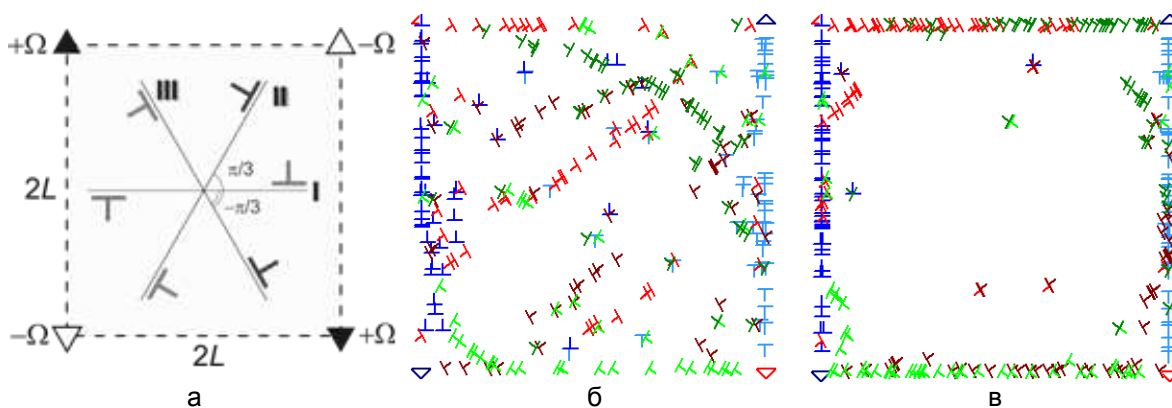


Рисунок 1 – Модельное зерно в двумерной решетке с тремя системами скольжения дислокаций, содержащее квадруполь клиновых стыковых дисклинаций и хаотическое распределение дислокаций (а); типичные конфигурации системы: при высокой плотности дислокаций и низкой амплитуде ультразвука (б), при высокой амплитуде ультразвука (в)

Экспериментально исследовано воздействие УЗО на структуру и микротвердость УМЗ никеля, полученного методом КГД. Образцы в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной около 0.35 мм были подвергнуты осциллирующим напряжениям сжатия-растяжения частоты около 20 кГц со значениями амплитуды, составляющими приблизительно 15, 30, 45, 60 и 90 МПа. Микроструктура исходных и подвергнутых УЗО образцов была исследована методами рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). Получены зависимости средней плотности дислокаций, среднеквадратичной упругой деформации (микроискажений решетки) и микротвердости от амплитуды ультразвука. Эксперименты показали, что при относительно низких амплитудах (15, 30 МПа) УЗО приводит к некоторому росту микротвердости, среднеквадратичной деформации и плотности дислокаций. При амплитуде 60 МПа происходит заметное снижение всех указанных характеристик по сравнению с исходным состоянием, а при дальнейшем увеличении амплитуды напряжений до 90 МПа – их обратное повышение (рис. 3 а,б). При УЗО также происходит увеличение доли большеугловых границ зерен без значительного изменения среднего размера зерна.

Обнаруженные закономерности могут быть объяснены с учетом результатов моделирования следующим образом. При амплитудах ниже 60 МПа происходит зарождение и накопление дислокаций в зернах. При этом напряжения недостаточны для преодоления образующихся в зернах барьеров, поэтому дислокации образуют внутри зерен субструктуру, и внутренние напряжения увеличиваются. Этот факт подтверждается электронномикроскопическими наблюдениями тонкой структуры образцов. Далее при повышении напряжений дислокации преодолевают внутризеренные барьеры и попадают в границы зерен, вступают в реакции с дислокациями соседних зерен, что приводит к увеличению углов разориентировки границ зерен, к уменьшению плотности дислокаций, а также эффективной экранировке полей напряжений зернограницных дефектов, что приводит к релаксации внутренних напряжений. При еще большем увеличении амплитуды напряжений процессы генерации и накопления дислокаций преобладают над процессами их аннигиляции и перестройки, вследствие чего эффект релаксации ослабевает и исчезает.

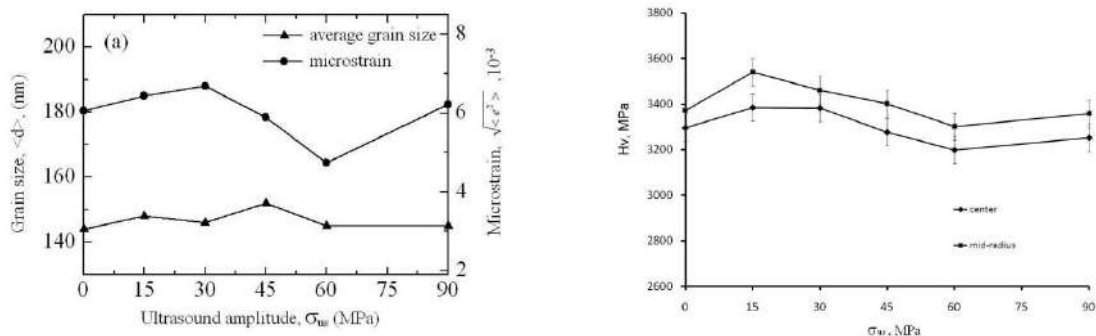


Рисунок 2 – Зависимости микроискажений, размера зерен (а) и микротвердости (б) в УЗМ никеле, полученном методом КГД, от амплитуды ультразвуковой обработки

Как видим, полученные методом дислокационного моделирования теоретические результаты и экспериментальные данные находятся во взаимном согласии и демонстрируют, что при УЗО происходят сложные процессы генерации, перестройки дислокаций и их стока в границы зерен, что в зависимости от амплитуды может привести как к повышению уровня внутренних напряжений, так и к их релаксации в УМЗ металлах.

Работа была поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

#### Список литературы:

1. Клубович В.В., Артемьев В.В., Сакевич В.Н. Ультразвуковые виброударные процессы. Минск: БНТУ, 2004. -258 с.
2. Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured Materials, in: Nanoscience, Engineering and Technology Handbook, Eds. S. Lyshevski, D. Brenner, J. Iafrate W. Goddard, CRC Press, USA, 2002. Chapter 22 (P.22-1–22-41).
3. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications. Hoboken: Wiley, 2013.- 440 p.