

## О ВОЗМОЖНОСТЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ В ПОЛУЧЕНИИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОВЫШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Назаров А.А.<sup>1</sup>, Самигуллина А.А.<sup>1</sup>, Мулюков Р.Р.<sup>1</sup>, Царенко Ю.В.<sup>2</sup>,  
Рубаник В.В.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by

Знакопеременные напряжения, создаваемые в материале под воздействием ультразвуковой волны, оказывают значительное влияние на дефектную структуру материалов, зависящее от амплитуды ультразвука. При высоких амплитудах ультразвуковое воздействие приводит к размножению дислокаций и упрочнению материала, что используется в ультразвуковом поверхностном упрочнении [1,2]. При амплитудах напряжений, существенно меньших статического предела текучести материала, ультразвук повышает подвижность существующих дислокаций и способствует релаксации структуры материала и внутренних напряжений [3,4].

Оба вида воздействия ультразвука представляют в настоящее время интерес с точки зрения получения ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурных (НС) материалов, обладающих повышенными механическими свойствами.

УМЗ и НС материалы, полученные методами интенсивной пластической деформации (ИПД), такими как кручение под квазигидростатическим давлением (КГД) и равноканальное угловое прессование (РКУП), характеризуются наличием неравновесных границ зерен, содержащих внесенные при деформации дислокации и являющихся источниками дальнедействующих внутренних напряжений [5,6]. При этом УМЗ и НС материалы обладают существенно более высокой прочностью, но пониженной пластичностью по отношению к крупнозернистым материалам [7]. Для повышения пластичности этих материалов предложены несколько путей, одним из которых, например, является создание бимодальной структуры [7]. Эти подходы, однако, приводят к значительному обратному снижению достигнутой в результате деформационного наноструктурирования прочности.

Можно ожидать, что воздействие ультразвуком умеренной амплитуды, приводящим к релаксации внутренних напряжений, будет способствовать повышению пластичности УМЗ материалов, так как усовершенствование структуры деформированных металлов повышает способность материала к накоплению новых дислокаций.

В работе [8] впервые был рассмотрен процесс перестройки дислокационных границ деформационного происхождения под влиянием ультразвука, где было показано, что под воздействием периодических напряжений может происходить выстраивание несовершенных стенок ячеек в тонкие, совершенные полигонизационные стенки. Качественный анализ показывает, что аналогичные перестройки, снижающие упругую энергию кристалла, могут происходить и в УМЗ материалах. В частности, воздействие ультразвука может способствовать релаксации стыковых дисклинаций, которые являются характерными элементами неравновесной структуры границ зерен деформированных металлов [5].

Ряд проведенных нами экспериментальных исследований показывает, что указанный механизм действительно может действовать в УМЗ материалах.

Например, при воздействии ультразвуковой обработки на структуру наноструктурного никеля, полученного методом КГД, обнаружено, что при определенных оптимальных значениях амплитуды напряжений ультразвук действительно снижает уровень внутренних напряжений в этих материалах, приводит к релаксации неравновесных границ зерен, повышению термической стабильности структуры [9].



Компьютерное моделирование в двумерной молекулярно-динамической модели показывает, что после УЗО повышается доля большеугловых границ зерен [10].

При воздействии УЗО на УМЗ никель, полученный методом РКУП, обнаружено заметное повышение пластичности при испытаниях растяжением. При амплитуде напряжений 20 МПа происходит рост пластичности с 12% после РКУП до 14.5% после УЗО. При этом предел прочности не только сохраняется, но даже несколько возрастает [11].

Проведены исследования образцов нихрома после кручения под квазигидростатическим давлением и ультразвуковой обработки при различных интенсивностях. Рентгенографическую съемку образцов нихрома после ИПД кручением проводили на дифрактометре ДРОН-2 с использованием характеристического  $Fe-K\alpha$  (1,936090 А) излучения (рис.1). Рентгенограммы были получены в цифровом виде и обработаны с помощью специализированного программного обеспечения. В качестве измеряемого параметра профиля дифракционной линии брали ширину на половине высоты пика (полуширина пика).

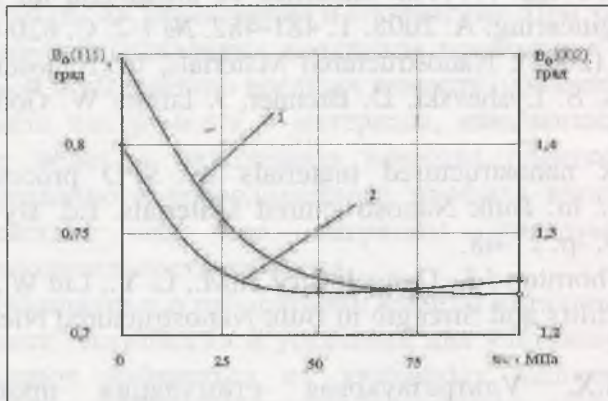


Рисунок 1 – Зависимость полуширины дифракционных линий нихрома после кручения от амплитуды знакопеременных напряжений: кривая 1 – линия (002); кривая 2 – линия (111)

Результаты рентгеноструктурных исследований свидетельствуют, ультразвуковое воздействие с относительно невысокой амплитудой знакопеременных напряжений 25-50 МПа приводит к заметному снижению внутренних напряжений в наноструктурированных образцах нихрома.

С другой стороны, воздействие ультразвуком высокой мощности или его сочетанием с квазистатической деформацией можно рассматривать как один из возможных деформационных методов измельчения зерен в металлах. В частности, наложение ультразвука при осадке (ковке) позволяет существенно изменить механику деформации за счет уменьшения роли трения бойков с поверхностью образца [12].

В работе [13] впервые исследовано изменение субструктуры меди при ультразвуковой ковке. Показано, что на острие концентратора из меди при ковке формируется субзеренная структура с размером субзерен 100-300 нм.

Нами создана оснастка для ультразвуковойковки, позволяющая осуществлять ковку попеременно вдоль различных осей, как это делается при деформационном наноструктурировании методом всесторонней изотермическойковки.

С помощью этой оснастки была проведена всесторонняя ковка образцов меди марки М1 в виде куба со стороной 6х6х6 мм. При осадке вдоль каждой оси степень деформации составила  $e=0,3$ , образцы были откованы тремя циклами осадки вдоль всех трех осей, так что суммарная накопленная деформация составила примерно  $e=2,7$ .

Измерения микротвердости образцов показали значения около 1300-1350 МПа. Для сравнения, микротвердость меди М1, подвергнутой РКУП в 8 проходов при температуре 200°С, составляет 1200 МПа, а после 12 проходов РКУП с противодействием при комнатной температуре - около 1500 МПа [14]. Таким образом, предварительные



исследования позволяют предположить, что ультразвуковая ковка может приводить к существенному измельчению зерен, как при РКУП.

Авторы благодарят Г.И. Раба за изготовление образцов для исследований методом РКУП.

### Список литературы

1. Макаров В.Ф., Половинкин А.Х. Ультразвуковое поверхностное упрочнение деталей ГТД // Инструмент и технологии. -2006. -№ 23. -С. 116-118.
2. Панин А.В., Мельникова Е.А., Перевалова О.Б., Почивалов Ю.И., Леонтьева-Смирнова М.В., Чернов В.М., Иванов Ю.Ф. Формирование нанокристаллической структуры в поверхностных слоях стали ЭК-181 в процессе ультразвуковой обработки // Физическая мезомеханика. - 2009. - Т. 12, № 2. - С. 83-93.
3. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Электротермическая обработка стальной проволоки в ультразвуковом поле /Перспективные материалы и технологии– Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2008, гл.6.
4. Rubanik V.V., Rubanik V.V., Klubovich V.V. The influence of ultrasound on shape memory behavior // Materials Science and Engineering: A. 2008. Т. 481-482. № 1-2. С. 620-622.
5. Nazarov A.A. and Mulyukov R.R. (2002): Nanostructured Materials, in: Nanoscience, Engineering and Technology Handbook, Eds. S. Lyshevski, D. Brenner, J. Iafrate W. Goddard, CRC Press, USA, Chapter 22 (P.22-1–22-41)
6. Valiev R.Z., Nazarov A.A. Bulk nanostructured materials by SPD processing: techniques, microstructures and properties // In: Bulk Nanostructured Materials. Ed. By M.J. Zehetbauer and Y.T. Zhu. Wiley-WHC, 2009. -p. 21-48.
7. Zhao Y., Topping T., Bingert J.F., Thornton J.J., Dangelewicz A.M., Li Y., Liu W., Zhu Y., Zhou Y., Lavernia E.J. High Tensile Ductility and Strength in Bulk Nanostructured Nickel // Adv. Mater.- 2008. -V. 20.- P. 3028–3033
8. Назаров А.А., Ханнанов Ш.Х. Ультразвуковая стимуляция процесса полигонизации // ФХОМ. -1986. -№ 4. -С. 109-114.
9. Назарова А.А., Мулюков Р.Р., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Назаров А.А. Влияние ультразвуковых колебаний на структуру и свойства ультрамелкозернистого никеля. ФММ. -2010. -Т.110, №6.- С. 600-607.
10. Назарова А.А., Дмитриев С.В., Баимова Ю.А., Мулюков Р.Р., Назаров А.А. Компьютерное моделирование воздействия ультразвука и отжига на структуру двумерного сильно деформированного нанокристаллического материала // ФММ.- 2011. - Т. 111, №5. -С. 536-543.
11. Самигуллина А.А., Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Попов В.А., Даниленко В.Н., Мулюков Р.Р. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства ультрамелкозернистого никеля, полученного равноканальным угловым прессованием // Письма о материалах, -Т. 2, Вып.4. -С.214-217.
12. Клубович В.В., Артемьев В.В., Сакевич В.Н. Ультразвуковые виброударные процессы. Мн.: БНТУ, -2004. - 258 с.
13. Liu Y., Suslov S., Han Q., Xu C., Hua L. Microstructure of the pure copper produced by upsetting with ultrasonic vibration // Materials Letters. 2012.- V. 67. -P. 52–55.
14. Рааб Г.И. Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - Уфа, 2009. - 36 с.