

# ОДНОВРЕМЕННОЕ ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ, ПУТЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Назаров А.А.<sup>1</sup>, Самигуллина А.А.<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*

[AA.Nazarov@imsp.ru](mailto:AA.Nazarov@imsp.ru)

<sup>2</sup>*Институт технической акустики НАНБ, г. Витебск, Беларусь*

[ita@vitebsk.by](mailto:ita@vitebsk.by)

Ультрамелкозернистые (УМЗ) металлы и сплавы, полученные деформационными методами, имеют очень высокую прочность, но значительно более низкую пластичность по сравнению с крупнокристаллическими материалами. Это связано с ограниченной возможностью упрочнения за счет накопления дислокаций при малом размере зерен, а также с неравновесным состоянием УМЗ материалов, которое характеризуется высокими внутренними напряжениями, создаваемыми внесенными в процессе деформации дефектами.

Для релаксации внутренних напряжений и повышения пластичности используют различные обработки, включающие отжиг. При отжиге, однако, может происходить рост зерен, и повышение пластичности неминуемо сопровождается потерей определенной части уже достигнутой высокой прочности. Поэтому поиск путей повышения пластичности УМЗ материалов без потери прочности является одной из важных фундаментальных задач физики этих материалов.

Ультразвуковая обработка (УЗО) обладает очень широким спектром воздействия на микроструктуру и механические свойства материалов. Одним из таких воздействий является релаксация внутренних напряжений в предварительно деформированных материалах, то есть, стимуляция процессов возврата. Один из механизмов такого эффекта, ультразвуковая стимуляция полигонизации, был рассмотрен в работе [1]. Качественная модель воздействия ультразвука на неравновесную структуру УМЗ металлов была предложена в работах [2,3]. Согласно этой модели, ультразвук стимулирует генерацию дислокаций в зернах и их дрейфовое движение к неравновесным границам зерен под действием создаваемых последними напряжений, что приводит в «гашению» этих источников внутренних напряжений.

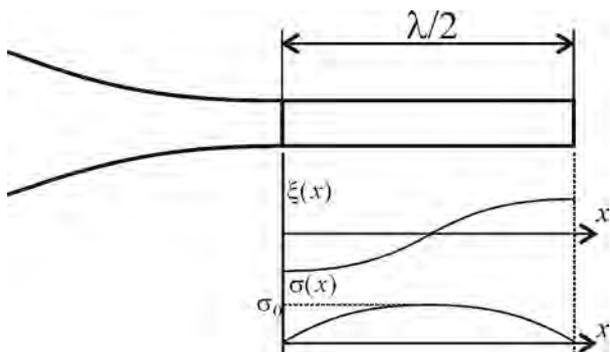
При умеренных амплитудах ультразвуковых напряжений релаксация структуры УМЗ материалов может приводить к изменению их механических свойств. Эти изменения в достаточно широком интервале амплитуды ультразвука были исследованы на примере никеля технической чистоты НП2 с УМЗ структурой, полученной равноканальным угловым прессованием (РКУП).

Цилиндрические образцы никеля НП2 диаметром 20 мм и длиной около 100 мм были подвергнуты РКУП в 12 проходов по маршруту В<sub>С</sub> при температуре 350°С. После РКУП образцы были подвергнуты небольшой экструзии для увеличения длины до 110 мм. Один из обработанных таким образом образцов был оставлен для сравнительных исследований, а из второго был изготовлен образец для УЗО с резьбой на конце и рабочей длиной 104 мм, примерно равной половине длины волны ультразвука частотой 22 кГц в никеле. Это образец был подвергнут УЗО по схеме, представленной на рис. 1.

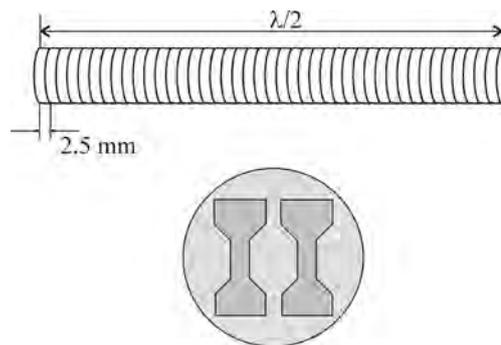
При приложении ультразвуковых колебаний в образце возбуждается стоячая волна, в которой смещения распределены по закону  $\xi = \xi_0 \cos \omega x$ , где  $\xi_0$  – максимальная амплитуда, с которой колеблются концы стержня, и  $\omega$  – круговая частота колебаний. Нормальные упругие напряжения в образце распределены по закону  $\sigma(x) = \sigma_0 \sin \omega x$ , где  $\sigma_0$  – максимальная амплитуда напряжений, которая достигается в середине образца (рис. 1).

Интенсивность колебаний была выбрана таким образом, чтобы эта амплитуда составила  $\sigma_0 = 100$  МПа, так что разные поперечные сечения образца подвергаются УЗО с амплитудой напряжений сжатия-растяжения в интервале от 0 на концах до 100 МПа в середине.

Для исследования микроструктуры и механических свойств после УЗО с разной амплитудой образец был разрезан на 42 диска толщиной 2,5 мм, из каждого из которых были изготовлены по два образца для испытаний растяжением с размерами рабочей части  $2 \times 1 \times 1.5$  мм<sup>3</sup> (рис. 2). Аналогичные образцы для растяжения были изготовлены из дисков, вырезанных из четырех участков образца, не подвергнутого УЗО. Все эти образцы были испытаны растяжением при комнатной температуре с помощью испытательной машины INSTRON, из результатов испытаний были определены предел текучести  $\sigma_T$ , прочности  $\sigma_B$  и удлинение до разрушения  $\delta$ .

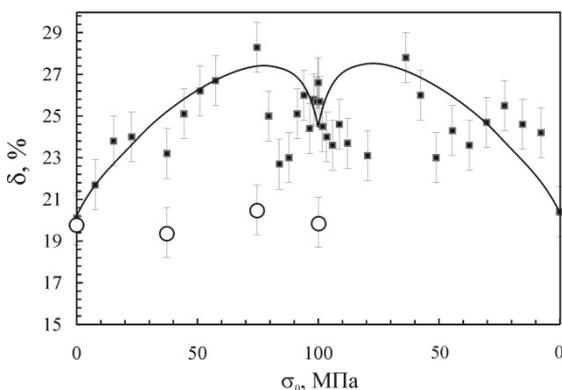


**Рис. 1.** Схема ультразвуковой обработки цилиндрического образца УМЗ никеля

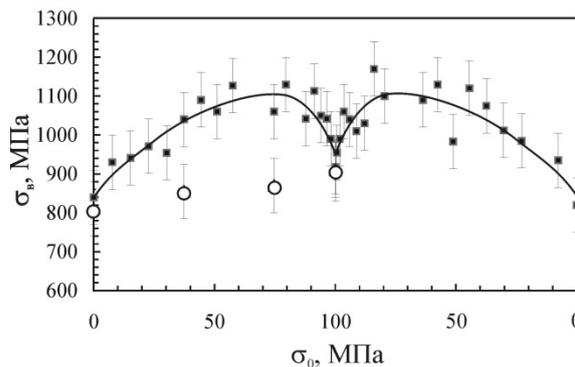


**Рис. 2.** Схема вырезки образцов из УМЗ никеля после ультразвуковой обработки

Результаты испытаний приведены на рис. 3 и 4, где изображены зависимости удлинения до разрушения  $\delta$  и предела прочности  $\sigma_B$  от амплитуды ультразвуковых напряжений, соответствующих различным поперечным сечениям образца. Черные квадраты с указателями погрешностей изображают результаты измерений для облученного ультразвуком образца, сплошные линии - линии тренда зависимостей, а белые кружки - результаты измерений для необлученного ультразвуком образца.



**Рис. 3.** Зависимость удлинения до разрушения УМЗ никеля от амплитуды ультразвуковой обработки



**Рис. 4.** Зависимость предела прочности УМЗ никеля от амплитуды ультразвуковой обработки

Рисунки показывают, что и предел прочности, и пластичность после РКУП и небольшой экструзии распределены равномерно по длине образца, и все изменения после УЗО связаны именно с действием ультразвука.

Распределения предела прочности и удлинения до разрушения после УЗО по длине образца симметричны относительно его центра, что свидетельствует об отсутствии значи-

тельного затухания ультразвука. Предел текучести изменяется аналогичным образом от 800 МПа до 1050 МПа.

Результаты исследований показывают весьма необычное воздействие ультразвука на характеристики прочности и пластичности УМЗ никеля. Одновременно с повышением удлинения до разрушения происходит не снижение, а прирост предела текучести. При этом очевидно, что результат воздействия зависит от амплитуды ультразвука. Имеется оптимальная амплитуда (в данном случае  $\sigma_0 \approx 75$  МПа), при которой эффект повышения обеих характеристик максимален. При дальнейшем увеличении амплитуды ультразвука величина прироста уменьшается. Можно предположить, что при амплитудах, лежащих существенно выше исследованных значений, возможен обратный эффект - снижение пластичности. Что касается прочности, она может меняться немонотонно, снижение может смениться ростом при высоких амплитудах за счет генерации дислокаций.

Рентгеноструктурные и электронномикроскопические исследования показали, что при всех исследованных амплитудах ультразвука заметный рост зерен отсутствует, происходит релаксация неравновесных границ зерен и снижение среднеквадратичных упругих напряжений. Следовательно, изменение механических свойств связано с релаксационным воздействием ультразвука на микроструктуру УМЗ материала.

Таким образом, подвергая УМЗ материал ультразвуковой обработке с умеренной амплитудой, можно добиться значительного одновременного повышения характеристик прочности и пластичности УМЗ металлов, что обычно невозможно при использовании других методов обработки, включающих отжиг.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 14-02-31160-мол\_а и БРФФИ 15Вт-003.*

#### **Список литературы**

1. Назаров А.А., Ханнанов Ш.Х. Ультразвуковая стимуляция процесса полигонизации // Физ. и химия обр. матер. - 1986. - № 4. - С. 109-114.
2. Назаров А.А., Самигуллина А.А., Мулюков Р.Р., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. Изменение микроструктуры и механических свойств наноматериалов при ультразвуковом волновом воздействии // Пробл. машиностр. и надежн. машин. - 2014. - № 2. - С. 77-84.
3. Samigullina A.A., Nazarov A.A., Mulyukov R.R., Tsarenko Yu.V., Rubanik V.V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing // Rev. Adv. Mater. Sci. - 2014. - V. 39. - P. 14-34.

### **БИМЕТАЛЛЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

**Беляев С. П.<sup>1</sup>, Рубаник В. В.<sup>2,3</sup>, Реснина Н. Н.<sup>1</sup>, Рубаник В. В. мл.<sup>2,3</sup>,  
Ломакин И. В.<sup>1</sup>, Демидова Е.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Санкт Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

<sup>3</sup> Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь  
[spbelyaev@mail.ru](mailto:spbelyaev@mail.ru)

Биметаллы с эффектом памяти формы являются потенциальными материалами для их использования в качестве силовых элементов термомеханических приводов с эффектом памяти формы. Эти композиционные материалы состоят из двух слоев, один из которых является сплавом с эффектом памяти формы и выступает в роли активного элемента, а другой – выступает в роли пассивного упруго-пластического элемента. После предварительной деформации такие биметаллические пластины способны демонстрировать