

Повышение ударной вязкости ультрамелкозернистого никеля после ультразвуковой обработки

Самигуллина А.А.^{1,†}, Мулюков Р.Р.^{1,2}, Назаров А.А.^{1,2}, Мухаметгалина А.А.²,
Царенко Ю.В.³, Рубаник В.В.³

[†]asiya_nazarova@mail.ru

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 Уфа

²Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди 32, 450074 Уфа

³Институт технической акустики НАН Беларуси, пр. Людникова 13, 210023 Витебск

Проведены испытания на ударную вязкость образцов никеля, подвергнутых равноканальному угловому прессованию (РКУП). Показано влияние отжига и ультразвуковой обработки с амплитудами напряжения 20, 50 и 100 МПа на ударное разрушение ультрамелкозернистого никеля, полученного РКУП.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, ультразвуковая обработка, ударная вязкость.

The increase of impact strength of ultrafine grained nickel after ultrasonic treatment

A.A. Samigullina¹, R.R. Mulyukov^{1,2}, A.A. Nazarov^{1,2}, A.A. Mukhametgalina²,
Yu.V. Tsarenko³, V.V. Rubanik³

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

²Bashkir State University, 32 Zaki Validi str., 450074 Ufa

³Institute of Technical Acoustics NAS of Belarus, Lyudnikova av. 13, 210023 Vitebsk

Impact strength tests of nickel samples exposed to equal-channel angular pressing (ECAP) were carried out. The influence of annealing and ultrasonic treatment with stress amplitudes of 20, 50 and 100 MPa on the impact fracture of ultrafine grained nickel processed by ECAP was shown.

Keywords: equal-channel angular pressing, ultrasonic treatment, impact strength.

1. Введение

Большое число исследований последних лет [1-4] показывают, что ультрамелкозернистые (УМЗ) материалы, получаемые методами интенсивной пластической деформации (ИПД), обладают высокой твердостью и прочностными характеристиками, при этом значительно уступая крупнозернистым материалам в пластичности. Кроме того, УМЗ материалы, как правило, показывают низкие значения ударной вязкости [5], что неблагоприятно с точки зрения конструктивной прочности металлов.

Одним из способов улучшить поведение УМЗ материалов при ударных нагрузках может являться низкотемпературный отжиг, снижающий дефектность структуры и внутренние напряжения, создаваемые неравновесными границами зерен. Однако отжиг может приводить к нежелательному росту зерен и к снижению прочностных свойств.

В работе [6] было показано, что улучшить характеристики пластичности, не снижая при этом пределов проч-

ности и текучести, можно с помощью другого физического метода воздействия на материал, а именно, путем ультразвуковой обработки. В зависимости от амплитуды ультразвуковой волна по-разному влияет на дефектную структуру металла [7-11]. При этом становится возможным управление структурой, а, следовательно, и механическими свойствами УМЗ материалов.

Целью данной работы является выяснение влияния низкотемпературного отжига и ультразвуковой обработки на поведение УМЗ никеля, полученного методом РКУП, при испытаниях на ударную вязкость.

2. Материалы и методика исследования

В качестве материала для исследования был выбран технически чистый никель марки НП-2 со следующим химическим составом: 99.5 Ni, 0.1 Fe, 0.15 Si, 0.1 Mg, 0.05 Mn, 0.1 Cu, 0.002 Pb. Образцы в форме цилиндра были подвергнуты РКУП по маршруту Вс (с вращением заготовки на угол 90° вокруг ее оси перед каждым следующим проходом) в установке с углом пересечения

каналов 90°, в 12 проходов при температуре 350°C. В результате были получены образцы, имеющие в поперечном сечении диаметр 18 мм и длину 115 мм. Часть образцов отжигали в воздушной печи при температуре 100°C в течение 1 часа, а другую часть подвергали ультразвуковой обработке (УЗО) по методике, описанной в [7]. Частота ультразвуковых колебаний составляла 22 кГц, а амплитуда нормальных напряжений в центре образцов достигала 20, 50 и 100 МПа.

Тонкая структура образцов исследовалась на просвечивающем электронном микроскопе JEM2000EX. Фольги для электронно-микроскопических исследований вырезали из центральной части образцов, и готовили стандартными методами на приборе для струйной полировки.

Механические свойства, приведенные в статье, исследовались в поперечном сечении на образцах, вырезанных из средней части цилиндров, полученных в результате РКУП и подвергнутых дальнейшим обработкам (отжигу и ультразвуку). Испытания на растяжение проводили при комнатной температуре со скоростью деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ на плоских образцах с рабочей частью $2 \times 1 \times 1.5 \text{ мм}^3$ на испытательной машине Instron. Для каждого состояния было испытано не менее 3-х образцов.

Испытания на ударную вязкость (KCV) проводили при комнатной температуре на копре с вертикально падающим грузом CEAST 9350. Образцы для испытаний имели размеры $55 \times 10 \times 5 \text{ мм}^3$. Из каждого цилиндра было вырезано по 2 стандартных образца. Для испытаний в каждом состоянии было использовано по 4 цилиндрических образца.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Механические свойства образцов после всех проведенных обработок показаны в таблице 1.

Таблица 1.

Механические свойства никеля в различных состояниях

Состояние	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
РКУП	940±50	910±55	20±1
РКУП+отжиг 100°C	900±55	860±65	25±1,5
РКУП+УЗО 20 МПа	970±55	915±30	24±1,5
РКУП+УЗО 50 МПа	1060±40	935±35	26±1
РКУП+УЗО 100 МПа	920±50	840±55	27±2

Испытания на ударную вязкость дали следующие результаты. Энергия разрушения образца после РКУП составила 116 Дж, что соответствует значению ударной вязкости $KCV=2,9 \text{ МДж/м}^2$. Образцы после отжига и УЗО со всеми амплитудами пластически деформировались во время удара и не были разрушены при использовании максимальной энергии копра 706 Дж, т.е. энергия разрушения образцов повысилась не менее чем в 7 раз. Это говорит об их значительной пластичности по сравнению с первоначальным деформированным состоянием,

что согласуется с данными, полученными из испытаний на растяжение.

Отсутствие разрушения при комнатной температуре образцов после отжига и УЗО показывает эффективность этих обработок для оптимизации механических свойств материала. Кроме того, из таблицы 1 видно, что УЗО не привело к уменьшению прочности по сравнению с деформированным состоянием, а напротив, способствовала ее небольшому повышению.

Исследование микроструктуры никеля в указанных состояниях показало следующее:

В состоянии после РКУП микроструктура никеля представлена вытянутыми вдоль направления деформации зернами, границы которых определяются нечетко, являются широкими и «размазанными» (рис.1а). Во внутренних объемах зерен наблюдается значительная плотность дефектов, в некоторых зернах присутствует субструктура. Электронограмма показывает азимутальное размытие рефлексов, что наряду с наблюдаемой визуальной структурой свидетельствует о ее неравновесности и значительных внутренних напряжениях, связанных с искажениями решетки.

Отжиг при температуре 100°C в течение 1 часа привел к некоторой релаксации структуры и небольшому росту зерна (рис.1б): внутренние объемы зерен становятся более свободными от дислокаций, зерна и фрагменты имеют четко определяемые и ровные границы. На электронограмме наблюдаются отдельные точечные рефлексy, соответствующие ориентировкам отдельных зерен.

Подобная структура наблюдается и после ультразвуковой обработки (рис.1в,г,д): основной эффект виден на границах зерен, которые также становятся более ровными и четко определяемыми. Это говорит о том, что в результате ультразвуковой обработки, как и в результате отжига, происходит релаксация структуры. Косвенно это подтверждают и электронограммы, на которых практически отсутствует азимутальное размытие рефлексов.

Исследование микроструктуры никеля частично объясняет результаты испытаний на ударную вязкость тем, что все проведенные постдеформационные обработки (отжиг и УЗО) приводят к значительной релаксации структуры, повышая пластичность образцов. Это способствует увеличению их вязкости. Наклепанный деформированный образец разрушается из-за охрупчивания, а последующая релаксация приводит к тому, что при значительно более высоких энергиях удара образец пластически деформируется и не разрушается.

4. Заключение

Результаты данной работы показывают принципиальную возможность влияния ультразвуковой обработки на механическое поведение материала с целью улучшения его конструктивных свойств. Показано, что ультразвуковая обработка с амплитудами напряжения, использованными в работе, как и отжиг, оказывает заметное релаксирующее воздействие на структуру УМЗ никеля, подвергнутого интенсивной пластической деформации методом РКУП, и повышает его энергию раз-

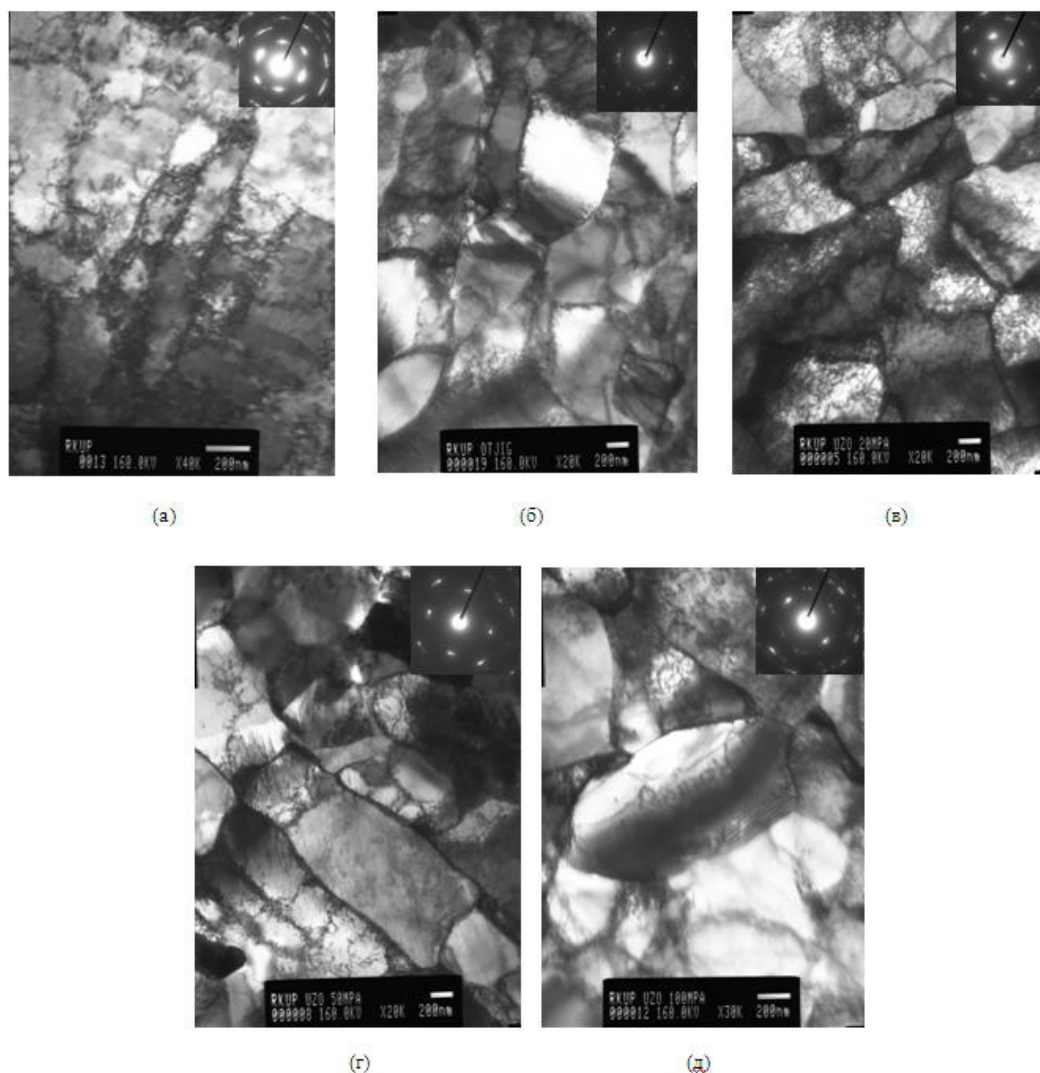


Рис. 1. Микроструктура никеля после РКУП (а), РКУП и отжига при 100°C в течение 1 часа (б), РКУП и УЗО с амплитудами 20 (в), 50 (г) и 100 МПа (д).

рушения при комнатной температуре не менее чем в 7 раз. Результаты данной работы требуют дальнейшего исследования с целью получить более точные количественные характеристики обнаруженного эффекта.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-02-31160 мол_а.

Литература

1. A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov. Nanostructured Materials. In: Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, ed. by W. Goddard, D. Brenner, S. Lyshevski, G. Iafrate, CRC Press (2003) Chapter 22, P. 1.
2. A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon. Progr. Mater. Sci. **53**, 893 (2008).
3. R.R. Mulyukov. Nanotechnologies in Russia. **2**(7-8), 38 (2007).
4. A.P. Zhilyaev, G.V. Nurislamova, B.-K. Kim, M.D. Baro, J.A. Szpunar, T.G. Langdon. Acta Mater. **51**, 753 (2003).
5. G.V. Klevtsov, A.V. Ganeev, I.P. Semenova, R.Z. Valiev. St.Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. **4**(1), 182, (2013). (in Russian)
6. A.A. Samigullina, Yu.V. Tsarenko., V.V. Rubanik, V.A. Popov., V.N. Danilenko, R.R. Mulyukov. Letters on Materials. **2**, 214 (2012). (in Russian)
7. A.I. Lebedev. Phys. Solid State. **51**, 362 (2009).
8. V.V. Rubanik, V.V. Rubanik, V.V. Klubovich. Mater. Sci. Eng. A. **481-482**(1-2), 620 (2008).
9. N.A. Tyapunina, E.K. Naimi, Zinenkova. Ultrasound Action on Crystals with Defects. M.: Mosk. Gos. Univ. (1999). (in Russian)
10. S.V. Dmitriev, A.I. Pshenichnyuk, A.M. Iskandarov, A.A. Nazarova. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. **18**, 025012 (2010).
11. A.A. Nazarova, S.V. Dmitriev, A.I. Pshenichnyuk, R.R. Mulyukov. Phys. Sol. State. **52**, 2490 (2010).