ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

**посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/369

МИКРОТВЁРДОСТЬ, СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ И НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЯ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Миронов Ю.П., Лотков А.И., Гришков В.Н., Рубцов В.Е., Белобородов В.А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Одним из методов решения актуальной на сегодняшний день задачи: повышения механических свойств сплавов на основе TiNi, является формирование субмикроструктурных или нанокристаллических структур методами интенсивной пластической деформации (SPD). Метод фрикционной перемешивающей обработки (FSP) можно рассматривать, как один из методов SPD. Кроме того, FSP является основой сварки трением с перемешиванием (FSW). Применение FSW для сварки сплавов на основе TiNi с другими материалами исключают проблемы, которые возникают при сварке с плавлением. В [1] выполнено исследование сварки сплавов на основе TiNi методом FSW. В зоне сварного шва авторы наблюдали измельчение зёрненной структуры, слабое влияние FSP на температуры мартенситных превращений, сохранение памяти формы и сверхэластичности.

Ранее, на примере сплавов двух составов: Ti-50.9(ат.%)Ni и Ti-50.2(ат.%)Ni, показано [2], что FSP приводит к исчезновению текстуры и микронапряжений, характерных для исходных образцов, при сохранении фазового состояния B2 в первом из них. Цель настоящей работы состоит в выявлении взаимосвязи микротвёрдости с микроскопическими и структурно-фазовыми параметрами никелида титана, обработанного FSP.

Исследовали сплав Ti-1 (производства МАТЭК-СПФ, Россия) в виде листового проката толщиной 1.2 мм, состава: Ti - 55.8 Ni - 0.04 C - 0.04 O (вес.%). По определённым нами температурам мартенситных превращений состав сплава близок к Ti-Ni50.6 (ат.%).

Процесс FSP осуществляли на лабораторном стенде для экспериментальных исследований сварки трением с перемешиванием [3]. Использовался рабочий инструмент из жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС6У [2].

Исследования дорожек FSP проводили на оборудовании ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН: 1) на дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия), с фильтрованным Co-K α излучением проводили PCA образцов; 2) координатные зависимости микротвёрдости по Виккерсу получали с помощью микротвердомера DM-8 (Affri, Италия) на пяти нагрузках: 0.245, 0.49, 0.981, 1.961 и 2.942 Н; также для характерных мест образцов получали нагрузочные диаграммы индентирования с помощью прибора NanoTest (Micromaterials Ltd.) [4] на нагрузках 0.1 и 0.3 Н; 3) металлографические исследования микроструктуры образцов проводили с помощью оптического микроскопа Axiovert 200 MAT (Zeiss).

Из анализа оптических изображений сечений пластины, перпендикулярных пластине и направлению дорожки, получено, что средний размер зёрен в исходном состоянии составляет 13 мкм вдоль направления прокатки и 9 мкм – в поперечном (рис.1,а). В области дорожки FSP основной объём образцов имеет средний размер зёрен примерно в 4 раза меньше исходных (рис.1,б). При этом в области дорожки наблюдаются локальные области с субмикронным размером зёрен.

Из данных PCA следует, что при неизменном фазовом состоянии образцов сплава – структуре B2 (ОЦК), за пределами зоны термического влияния (ЗТВ) дорожки имеется наличие малого среднего размера ОКР – $\langle D \rangle \approx 40$ нм и высокая величина микродеформации, связанная с напряжениями II-го рода – $\varepsilon^{\text{II}} \approx 0.9\%$. Напротив, в области непосредственной близости к дорожке или в дорожке наблюдали низкое значение микродеформации решётки B2 – $\varepsilon^{\text{II}} \approx 0.1\%$ и превышение среднего размера ОКР предельную для метода величину ($\langle D \rangle \geq 150$ нм). Помимо этого, в этой области образцов не наблюдается исходная текстура прокатки. При этом величина параметра решётки B2, измеренная вдоль нормали к плоскости пластины, составляет: $a_{\text{B2}} \approx 3.010$ Å – в образцах в исходном состоянии; 3.0116 ± 0.0003 Å – в области ЗТВ; и может изменяться в пределах $3.011 \div 3.013$ Å в дорожке FSP.

Секция 11. Перспективные интеллектуальные производственные технологии для создания конструкций и изделий с улучшенными функциональными характеристиками, в том числе для эксплуатации в экстремальных условиях

Рис.1. Фотографии нормального сечения листового TiNi: а) – вдали от дорожки; б) – в дорожке FSP.

Координатные зависимости микротвёрдости HV в плоскости обработки показали:

- 1) увеличенные флуктуации HV в дорожке FSP относительно исходной поверхности;
- 2) снижение средней величины HV вблизи краёв дорожки;
- 3) возрастание величины HV в центре дорожки для малых нагрузок индентора;

При максимальной нагрузке на индентор, средние значения HV в дорожке составляли 2.9 ГПа, вдали от дорожки – 3.3 ГПа. При уменьшении нагрузки на индентор формально повышались как средние величины HV, так и их пиковые значения в центре дорожки (до 5 ГПа). В связи с тем, что образцы исследованного сплава при комнатной температуре проявляют довольно высокую величину обратимой деформации, полученные величины HV оказываются завышенными тем больше, чем меньше нагрузка.

Анализ кривых индентирования показал, что изменения максимальной глубины индентирования, её пластической составляющей, микротвёрдости, эффективного модуля Юнга, коэффициента упругого восстановления, работы упругой и пластической деформации не превышают пределов статистической погрешности измерений. При этом сама погрешность этих измерений значительно выше в пределах дорожки FSP.

Анализ величины упругой деформации решётки B2 фазы, полученной из зависимости $d_{(310)}(\sin^2\Psi)$, показал, что вблизи поверхности дорожки FSP имеется её касательное сжатие и нормальное растяжение. Суммарная величина ориентированной деформации не превышает 0.1%.

Таким образом, FSP-обработка образцов сплава на основе никелида титана в состоянии B2-фазы приводит к неравномерному измельчению зёрненной структуры образцов, сохранению указанных выше характеристик индентирования, при увеличении дисперсии их величин, рекристаллизационному отжигу и появлению слабой величины упругого тангенциального сжатия решётки B2-фазы в приповерхностном слое дорожки FSP.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.2.

1. Mani Prabu S.S., Madhu H.C., Perugu C.S. et al. *J. Alloys Compd.* 776 (2019) 334-345.
2. Yu.P. Mironov, V.N. Grishkov, A.I. Lotkov, V.Y. Rubtsov, V.A.Beloborodov. *AIP Conference Proceedings* 2167, 020226 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5132093>
3. Kalashnikov K.N., Tarasov S.Y., Chumaevskii A.V. et al. *Int J Adv Manuf Technol* (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03631-3>.
4. W.C. Oliver and G.M. Pharr, *J. Mater. Res.*, Vol. 19, No. 1 (2004), p.3-20.