

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 немонокотонно, 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.¹, Рубаник В. В.^{2,3}, Реснина Н. Н.¹, Рубаник В. В. мл.^{2,3},
Ломакин И. В.¹, Демидова Е.С.¹**

¹ Санкт Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия

² Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

³ Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь
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

обратимое формоизменение при охлаждении и нагревании, величина которого будет на несколько порядков больше, чем у обычных биметаллических пластин.

Вместе с тем, для того чтобы использовать биметаллы с эффектом памяти формы в термомеханических приводах необходимо решить ряд задач, основными из которых являются получения биметаллических пластин с эффектом памяти формы, исследование их структуры и свойств, оптимизация геометрических размеров элементов из биметаллических пластин и определение оптимальных режимов деформирования пластин, обеспечивающих максимальное обратимое формоизменение биметаллов при многократных тепло-сменах. Для того чтобы решить эти задачи необходимо провести комплексное исследование функциональных свойств биметаллов с эффектом памяти формы, что и явилось основной целью данной работы.

Сплавы с эффектом памяти формы можно соединить с другими металлами и сплавами различными методами сварки (дуговая, лазерная, плазменная, сварка трением и т.д.). Однако общим для всех этих методов является образование зоны термического влияния в области сварного шва, что связано с локальным разогревом соединяемых материалов. Ширина зоны термического влияния зависит от вида сварки и варьируется от десятков до сотен микрометров. Микроструктура сплавов в зоне термического влияния отличается от структуры в остальном объеме соединяемых сплавов, что приводит к охрупчиванию биметаллов и существенно ухудшает их свойства. Единственным способом соединения сплавов, который не приводит к образованию зоны термического влияния, является сварка взрывом, поэтому именно этот метод был использован в настоящей работе для получения биметаллов с эффектом памяти формы.

В работе были получены сваркой взрывом композиты “ $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ - сталь”, “ $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ – $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ ”, “ $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ – бронза” и “ $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ – ВТ6”. Материал пассивного упруго – пластического слоя меняли для того чтобы оценить влияние механических свойств этого слоя на способность биметаллических композитов обратимо деформироваться.

Структуру биметаллических композитов, полученных сваркой взрывом, исследовали методами оптической микроскопии, электронной сканирующей микроскопии и по измерению микротвердости. Данные электронной микроскопии показали, что в процессе сварки взрывом сварной шов оказывается узким, при этом не наблюдается зон термического влияния и макроскопических дефектов (трещин, пор, несплошностей). В композите “ $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ – $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ ” обнаружены области, в которых происходило локальное подплавление в процессе сварки взрывом. В этих областях структура соответствует структуре слитка – по границам областей образуются столбчатые кристаллы, а внутри области – равноосные. Полученные результаты показали, что при соударении пластины подвергаются значительной пластической деформации, которая приводит к уменьшению размера зерна и увеличению микротвердости. По мере удаления от сварного шва пластическая деформация уменьшается, при этом наблюдается увеличение размера зерен и уменьшение микротвердости.

Исследование мартенситных превращений, проведенное методом дифференциальной сканирующей калориметрии, показало, что пластическая деформация, которую приобретают пластины при соударении, приводит к частичному подавлению мартенситных переходов, увеличивает их температуры и расширяет температурные интервалы фазовых переходов. Установлено, что отжиг при температурах 450 – 600 °С в течение 1 – 2 часов полностью восстанавливает параметры мартенситных переходов, имеющих место в слое из сплава TiNi . Кроме этого показано, что варьируя температуру термообработки удастся направленно менять последовательность мартенситных переходов в слое из сплава TiNi , обогащенного никелем.

Для исследования функциональных свойств биметаллов с эффектом памяти формы была разработана специальная методика, позволяющая регистрировать изменение прогиба плоских образцов при трех-точечном деформировании и последующем термоциклировании через температурный интервал мартенситных переходов. Все образцы деформировали

до некоторой деформации при температуре, при которой слой из сплава с эффектом памяти формы находился в мартенситной фазе. После этого образцы разгружали, нагревали через температурный интервал обратного перехода для того чтобы инициировать эффект памяти формы, и далее охлаждали и нагревали в интервале температур прямого и обратного мартенситных превращений для того чтобы зарегистрировать обратимое формоизменение.

Первоначально было изучено влияние соотношения толщин слоев, входящих в биметаллический композит, на величину обратимой деформации. Для этого образцы с различным соотношением толщин деформировали до 5 %. На рис. 1 представлены зависимости обратимой деформации от соотношения толщин слоев композита, полученные для биметаллов “Ti_{49,3}Ni_{50,7} - сталь”, “Ti₅₀Ni₅₀ – Ti_{49,3}Ni_{50,7}”. Видно, что зависимости немонотонные и максимальное значение обратимой деформации достигается в биметаллах, в которых толщина функционального слоя составляет 55 – 60 %. Показано, что в таких биметаллах положение нейтральной линии при изгибе совпадает с положением сварного шва, т.е. в этих условиях функциональный слой подвергается только растяжению, а пассивный упруго-пластический слой – только сжатию.

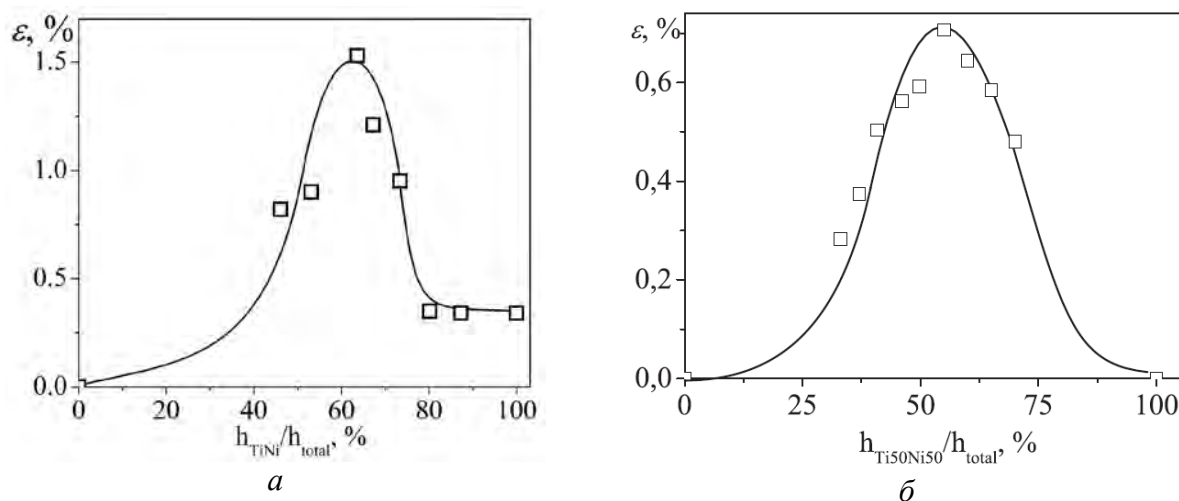


Рис. 1. Зависимости обратимой деформации от соотношения толщины функционального слоя (сплава TiNi) к общей толщине биметалла, полученные для композитов “Ti_{49,3}Ni_{50,7} - сталь” (а), “Ti₅₀Ni₅₀ – Ti_{49,3}Ni_{50,7}” (б).

Исследовано влияние деформации, остаточной после разгрузки, на способность биметаллов с оптимальным соотношением толщин, обратимо деформироваться при охлаждении и нагревании. Показано, что зависимость обратимой деформации от остаточной деформации определяется типом мартенситного превращения, реализуемого в слое из сплава TiNi, и способностью сплава к пластическому деформированию. Так, в биметаллах, в которых слой из сплава TiNi характеризуется низким пределом текучести (например, “Ti_{49,3}Ni_{50,7} - сталь” и “Ti₅₀Ni₅₀ – Ti_{49,3}Ni_{50,7}” после отжига при температуре 600 °С), зависимость обратимой деформации от остаточной является немонотонной и максимальное значение обратимой деформации достигается при $\epsilon_{\text{ост}} = 5\%$ (Рисунок 2 а). Деформирование до больших значений деформации понижает величину обратимой деформации, которая регистрируется в образце при многократных теплосменах. В биметаллах, в которых слой из сплава TiNi оказывается упрочненным, например за счет частиц вторичных фаз, как в биметаллах “Ti_{49,3}Ni_{50,7} - сталь” и “Ti₅₀Ni₅₀ – Ti_{49,3}Ni_{50,7}” после отжига при температурах 450 – 500 °С, зависимость обратимой деформации от остаточной является монотонной и максимальное значение обратимой деформации наблюдается при $\epsilon_{\text{ост}} = 9,5\%$ (рис. 2 б).

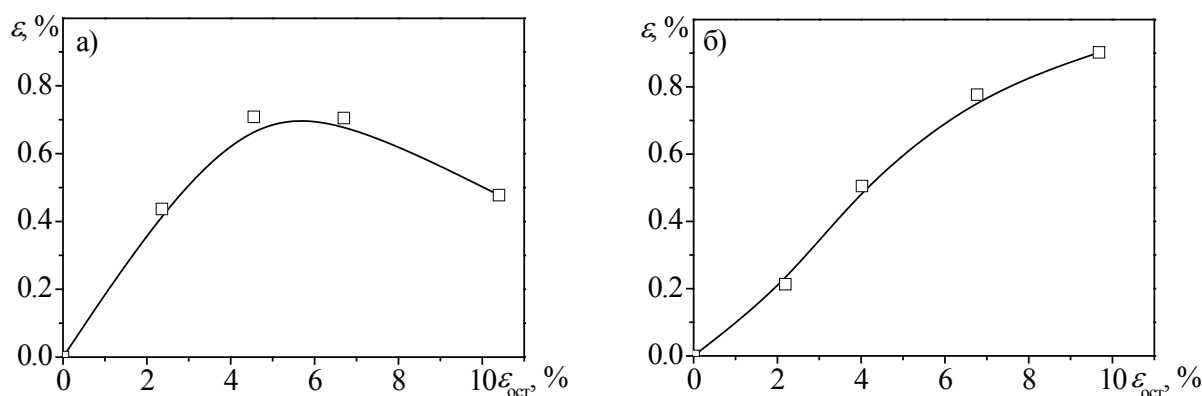


Рис. 2. Зависимости обратимой деформации от остаточной деформации, полученные в биметалле “ $Ti_{50}Ni_{50} - Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ ” с оптимальным соотношением толщин, отожженным при температуре 600 °C (а) и 450 °C (б).

Результаты исследования показали, что биметаллы с эффектом памяти формы, полученные сваркой взрывом, демонстрируют обратимое формоизменение при многократном термоциклировании и могут быть использованы в качестве активных элементов термомеханических приводов с эффектом памяти формы. В работе установлены оптимальные геометрические параметры биметаллов, определены оптимальные условия отжига и предварительного деформирования, позволяющие сформировать в образцах максимальное обратимое изменение формы при многократных теплосменах.

Работа выполнена в рамках совместного гранта РФФИ (№ 14-01-90007_Бел_а) – БФФИ (№ T14P-232).

ПРОЦЕССЫ, ОТВЕТСТВЕННЫЕ ЗА ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВА $TiNi$ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

Реснина Н. Н., Беляев С. П., Сибирев А. В.

Санкт Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия
resnat@mail.ru

В устройствах многократного действия элементы из сплавов с эффектом памяти формы подвергаются многократным теплосменам через температурный интервал мартенситных переходов. Известно, что в сплавах на основе $TiNi$ при термоциклировании меняются параметры мартенситных переходов и эффектов памяти формы и накапливается макроскопическая необратимая деформация. Последнее явление оказывает негативное воздействие на работоспособность устройства, так как приводит к деградации рабочих характеристик элемента из сплава с эффектом памяти формы и уменьшает долговечность материала. Поэтому исследование способов стабилизации свойств сплавов с памятью формы при термоциклировании является очень актуальной задачей. Большое количество исследований, посвященных данной проблеме, позволило установить основные закономерности изменения свойств при термоциклировании и связать эти изменения с увеличением плотности дислокаций. Однако процессы, отвечающие за изменения плотности дефектов и накопление необратимой деформации, до сих пор не установлены. Исследование этих процессов явилось основной целью настоящей работы.