

Рис. 2. Зависимости обратимой деформации от остаточной деформации, полученные в биметалле “Ti₅₀Ni₅₀ – 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 (№ Т14Р-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 основой целью настоящей работы.

В работе установлено, что при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ плотность дислокаций меняется неоднородно и в исходно однородном материале возникают области с высокой и низкой плотностью дефектов. Поскольку плотность дислокаций оказывает влияние на параметры мартенситных переходов, то в процессе термоциклирования области с различной плотностью дефектов претерпевают различные мартенситные переходы в разных температурных интервалах.

Для того чтобы установить особенности изменения плотности дислокаций при термоциклировании проведены исследования изменения мартенситных превращений в интервале температур неполного прямого и обратного фазовых переходов. Полученные данные показали, что при охлаждении в процессе прямого перехода плотность дислокаций в материале увеличивается однородно по объему сплава. При этом увеличение плотности дислокаций происходит только в аустенитной фазе, а мартенситная фаза лишь наследует дефекты при превращении. В процессе нагревания плотность дислокаций уменьшается и в сплаве наблюдается разупрочнение, степень которого зависит от доли материала, претерпевшего обратное превращение. Показано, что именно полнота процесса разупрочнения определяет скорость изменения температур мартенситных переходов при термоциклировании и формирование неоднородной дислокационной структуры.

Вместе с тем изменение плотности дислокаций при разупрочнении должно оказывать влияние на изменение функциональных свойств и на накопление необратимой деформации при термоциклировании. Поэтому в работе изучали изменения деформации при термоциклировании сплава $TiNi$ под напряжением. Было выбрано два значения напряжения, 50 МПа, которое было ниже предела переориентации мартенситных кристаллов (125 МПа), и 200 МПа, которое было выше предела переориентации мартенситных кристаллов.

Полученные данные позволили установить, что величины эффектов памяти формы и интенсивность накопления необратимой деформации при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под напряжением зависят от доли прямого превращения, реализуемого при охлаждении (рис. 1). Чем больший объем материала претерпевает переход в мартенситную фазу при охлаждении под напряжением, тем большая необратимая односторонняя пластическая деформация накапливается в образце.

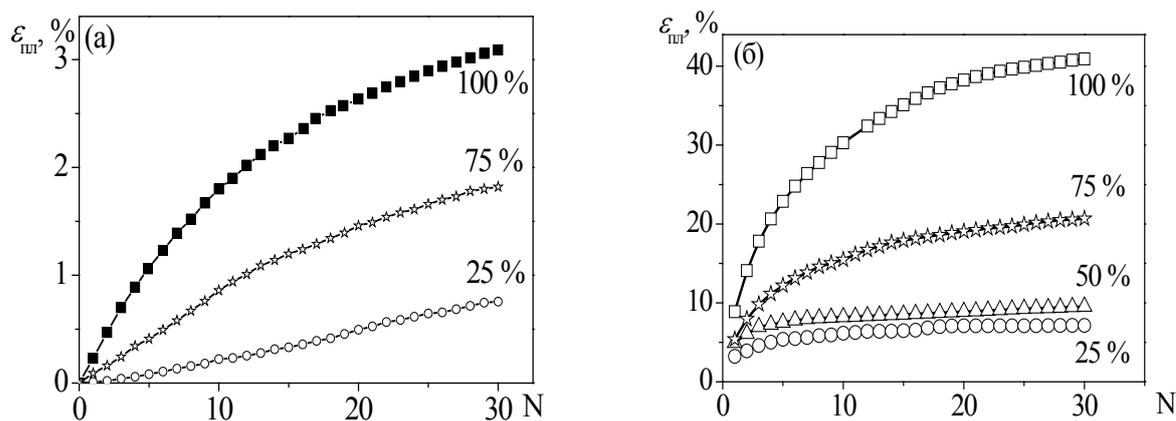


Рис. 1. Зависимости суммарной накопленной пластической деформации $\epsilon_{пл}$ от количества циклов, полученные при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под напряжением 50 МПа (а) и 200 МПа (б) в интервале температур неполного прямого перехода. Доля прямого перехода, реализованного при охлаждении, указана у кривых.

Для того чтобы определить причины накопления необратимой деформации проанализировали данные об изменении деформации, накопленной за 30 циклов, и изменении плотности дефектов, о чем судили по данным электросопротивления в зависимости от напряжения, действующего при термоциклировании. Полученные данные впервые пока-

зали, что увеличение плотности дефектов за тридцать циклов не зависит от того, действует ли напряжение при теплосменах или нет. Вместе с тем макроскопическая деформация возникает только в том случае, если термоциклирование осуществляется под нагрузкой. Различие между этими двумя экспериментами заключается лишь в том, что при охлаждении в свободном состоянии в материале с равной вероятностью возникают 24 варианта мартенсита, при этом фазовая и пластическая деформация, сопровождающие появление каждого из мартенситных кристаллов, компенсируют деформации, созданные кристаллами мартенсита других ориентаций. При охлаждении под нагрузкой в материале возникают благоприятно ориентированные кристаллы мартенсита, в которых сдвиг со-направлен с нагрузкой. Доля таких кристаллов превосходит доли каждого из остальных вариантов мартенсита, поэтому фазовая и пластическая деформации не компенсируются, что является причиной проявления эффекта пластичности превращения и накопления необратимой макроскопической деформации. Таким образом, в работе впервые показано, что накопление необратимой деформации связано с появлением благоприятно ориентированных кристаллов мартенсита.

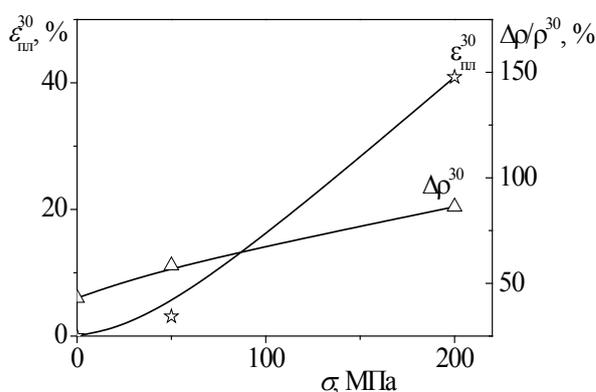


Рис. 2. Зависимости деформации, накопленной за тридцать циклов и относительного изменения электросопротивления от величины напряжения, действующего при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$.

Анализ изменения пластической деформации и плотности дефектов за тридцать циклов через различную долю прямого перехода и под различным напряжением (рис. 3) показал, что при охлаждении под малым напряжением в сплаве образуются как ориентированные кристаллы мартенсита, которые дают вклад и в накопление необратимой деформации и в увеличение плотности дефектов, так и неориентированные кристаллы, которые дают вклад только в изменение плотности дефектов. Это хорошо согласуется известными представлениями. Вместе с тем, впервые было показано, что при охлаждении под напряжением, превышающим предел переориентации, неориентированные кристаллы, возникшие на начальных этапах превращения, дополнительно подвергаются силовой переориентации на завершающей стадии перехода, что и дает дополнительный вклад в накопление необратимой деформации.

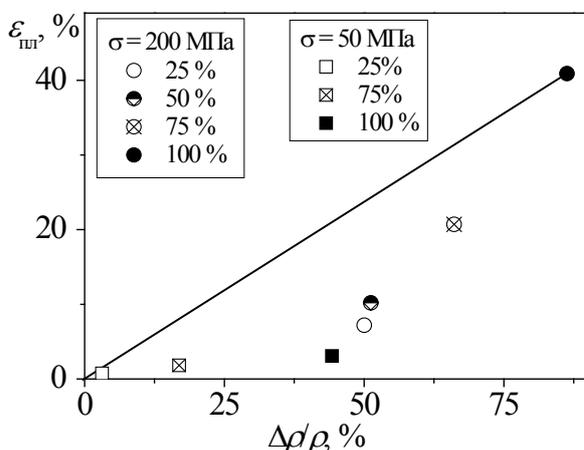


Рис. 3. Изменения пластической деформации и удельного электросопротивления за 30 термоциклов под напряжением 50 МПа (квадраты) и 200 МПа (окружности). Доля прямого превращения, реализуемого при термоциклировании, указана в легенде.

Обнаружено, что при обратном переходе в процессе нагревания под напряжением, в сплаве происходит разупрочнение. Этот процесс влияет на накопление необратимой деформации при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой. Разупрочнение обеспечивает уменьшение предела текучести при нагревании, что облегчает накопление пластической деформации при последующем охлаждении. Установлено, что факторы, влияющие на полноту реализации разупрочнения при нагревании – максимальная температура до которой нагревали образец и скорость нагревания – оказывают влияние на изменение параметров мартенситных превращений, функциональных свойств и необратимой деформации.

Таким образом, полученные результаты показали, что полнота реализации процессов упрочнения и разупрочнения при охлаждении и нагревании определяет параметры мартенситных переходов и оказывает влияние на стабильность функциональных свойств и накопление необратимой пластической деформации при термоциклировании. Чем больше в сплаве областей с высокой плотностью дефектов, тем меньше величина необратимой деформации, накапливающейся в образце при термоциклировании. Для того, чтобы этого добиться необходимо подавить процессы разупрочнения, которые имеют место при нагревании. С другой стороны, чем интенсивнее процесс разупрочнения реализуется при нагревании, тем больше в образце областей с низкой плотностью дефектов, а, следовательно, тем меньше изменение температур мартенситных переходов при термоциклировании.

Работа выполнена в рамках комплексного проекта СПбГУ № 6.37.147.2014 и 0.37.177.2014.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Пермякова И.Е.¹, Глезер А.М.^{1,2}, Иванов А.А.³, Шеляков А.В.³

¹ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия,
inga_perm@mail.ru

² НИТУ МИСиС, Москва, Россия,
a.glezer@mail.ru

³ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия,
andrej.ivanov@gmail.com; alex-shel@mail.ru

Введение

Новые перспективные процессы лазерной обработки все чаще внедряются в нанотехнологии и современное материаловедение. В настоящее время наблюдается возрастающий научный интерес к изменению физических свойств сплавов при переходе из аморфного в кристаллическое состояние. Метод лазерной обработки позволяет контролировать процесс формирования нанокристаллов, путем изменения энергии лазерного излучения, длительности импульсов, их частоты. Привлекательным при использовании лазерного облучения является и то, что, задавая закон распределения температур по объему материала, можно получать композиты с необходимым составом структурных единиц и структурных параметров. Использование лазерного воздействия может быть эффективным для локального повышения механических, магнитных характеристик аморфных сплавов (АС) и композитов на их основе. Анализируя литературные данные, следует отметить, что в научных кругах существует некий дефицит в исследованиях подобного рода.