

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА НЕОБРАТИМУЮ ДЕФОРМАЦИЮ СПЛАВА TiNi

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

Санкт Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия
gracheva_a@mail.ru

В работе [1] было показано, что при нагревании сплава TiNi в процессе термоциклирования, в нем имеют место процессы релаксации, которые оказывают влияние на накопление необратимой деформации. В этом случае, выдержка при температурах выше температуры окончания обратного мартенситного превращения также должна сопровождаться релаксационными процессами и приводить к изменению параметров мартенситных переходов при термоциклировании. В связи с этим основной целью работы явилось изучения влияние температуры и длительности выдержки сплава на изменение необратимой деформации и эффекты памяти формы в сплаве TiNi.

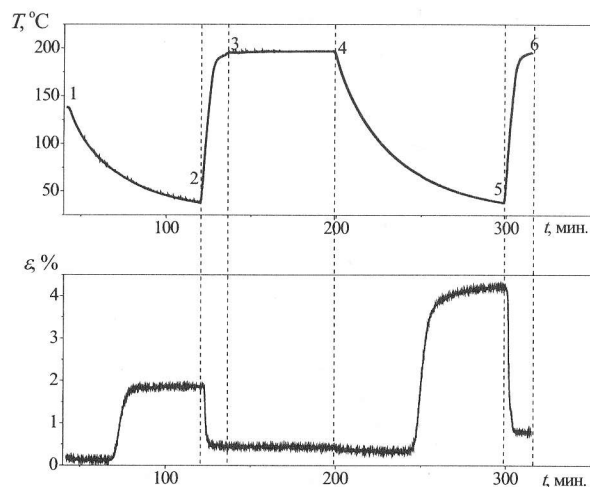


Рис. 1. Схема эксперимента: изменение температуры и деформации от времени при охлаждении под напряжением 50 МПа (1–2); нагревании до T^* (2–3); изотермической выдержки при T^* (3–4); охлаждении под напряжением 50 МПа (4–5); нагревании до 140 °С (5–6)

Для этого проволочные образцы сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ устанавливали в захваты испытательной машины Lloyd 30k Plus, оснащенной криотермокамерой и видеоэкстензометром и проводили эксперимент, показанный на рисунке 1. Образец нагружали до напряжения 50 МПа при температуре 140 °С, при которой сплав TiNi находился в аустенитной B2 фазе, охлаждали под напряжением 50 МПа до температуры 30 °С, при которой сплав TiNi находился в мартенситной B19' фазе (рис. 1, путь: 1–2), нагревали до температуры T^* (рис. 1, путь: 2–3), выдерживали при температуре T^* в течение времени t (рис. 1, путь: 3–4), охлаждали до температуры 30 °С (рис. 1, путь: 4–5), и вновь нагревали до температуры T^* (рис. 1, путь: 5–6). Таким образом, в образце реализовывали два термоцикла, между которыми осуществляли выдержку при максимальной температуре в цикле. Величина T^* составляла 130, 160 и 200 °С, длительность выдержки варьировали от 0 до 120

минут. При охлаждении под напряжением в сплаве накапливалась деформации за счет реализации эффекта пластичности превращения, а при последующем нагревании деформация частично восстанавливалась при реализации эффекта памяти формы. Поскольку восстановление деформации было неполным, то в образце накапливалась необратимая деформация. Величину восстановленной деформации в первом и втором циклах обозначали соответственно $\epsilon_1^{ПФ}$ и $\epsilon_2^{ПФ}$, а величину невосстановленной деформации – ϵ_n^1 и ϵ_n^2 .

На рис.2а представлены зависимости отношения деформации, невосстановленной во втором цикле, к деформации, невосстановленной в первом цикле, от длительности выдержки при различных температурах T^* . Видно, что накопление необратимой деформации во втором цикле зависит, как от температуры T^* , при которой была осуществлена выдержка, так и от длительности выдержки. Так, выдержка при температуре 130 °С (на 30 °С выше A_c – температуры окончания обратного перехода) приводит к тому, что необратимая деформация уменьшается при увеличении длительности выдержки. Следовательно, выдержка при этой температуре упрочняет сплав и препятствует движению дислокаций. Выдержка при температуре 160 °С не оказывает влияния на накопление деформации во втором термоцикле. Выдержка при температуре 200 °С способствует значительному возрастанию пластической деформации, которая накапливается в образце во втором цикле. Следовательно, выдержка при этой температуре сопровождается релаксационными процессами, которые облегчают дислокационное скольжение в последующем термоцикле. На рис. 2а видно, что увеличение необратимой деформации, накопленной во втором цикле, происходит при увеличении длительности выдержки до 60 минут. Дальнейшая выдержка при температуре 200 °С не оказывает заметного влияния на способность сплава к дислокационному скольжению.

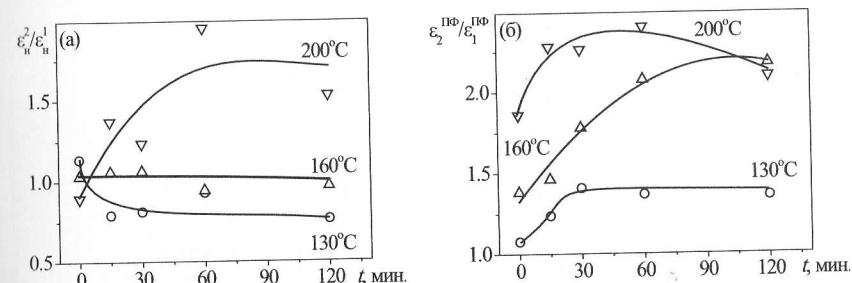


Рис. 2. Зависимости $\epsilon_n^2/\epsilon_n^1$ (а) и $\epsilon_2^{ПФ}/\epsilon_1^{ПФ}$ (б) от длительности выдержки при различных температурах T^* . Величина T^* указана у кривых

На рис. 2б представлены зависимости отношения деформации, восстановленной во втором цикле, к деформации, восстановленной в первом цикле, от длительности выдержки при различных температурах T^* . Видно, что выдержка при температуре T^* приводит к возрастанию обратимой деформации в цикле, при этом максимальное увеличение обратимой деформации во втором цикле наблюдается при выдержке при температуре 160 °С. Увеличение обратимой деформации с термоциклами связывают с проявлением эффекта тренировки, который обусловлен появлением в образце внутренних ориентированных напряжений, которые складываются с внешними напряжениями и вызывают появление большого количество ориентированных кристаллов мартенсита, по сравнению с первым циклом, что и является причиной возрастания обратимой деформации. Можно предполагать, что именно этот механизм ответственен за увеличение обратимой деформации после изотермической выдержки. Вместе с тем, причиной внутренних напряжений должны быть дефекты, появившиеся в сплаве в первом термоцикле. Это

неизбежно должно было привести к увеличению необратимой деформации. Однако на рис. 2а видно, что выдержка при температуре 160 °С не оказывает влияния на накопление необратимой деформации в первом цикле. Видимо, при этой температуре в сплаве увеличение плотности дефектов за счет термоциклирования компенсируется уменьшением плотности дефектов за счет релаксации, это приводит к тому, что величина необратимой деформации не меняется, а величина обратимой деформации - возрастает. Природа этого эффекта будет изучена дополнительно.

На рис. 3 представлены зависимости отношения деформации, невосстановленной во втором цикле, к деформации, невосстановленной в первом цикле, и отношения деформации, восстановленной во втором цикле, к деформации, восстановленной в первом цикле, от температуры T^* , полученные при различных выдержках. Видно, что увеличение температуры T^* само по себе – без выдержки – приводит к понижению необратимой деформации и увеличению эффекта памяти формы во втором цикле. Следовательно, можно заключить, что нагревание до высокой температуры позволяет увеличить обратимую деформацию и частично препятствует появлению необратимой деформации. Выдержка при высоких температурах оказывает слабое влияние на изменение обратимой деформации – чем выше температура выдержки, тем больше величина эффекта памяти формы. С другой стороны выдержка при высоких температурах облегчает появление необратимой деформации во втором цикле. На Рисунке 3а видно, что чем больше температура выдержки, тем больше необратимой деформации накапливается во втором цикле.

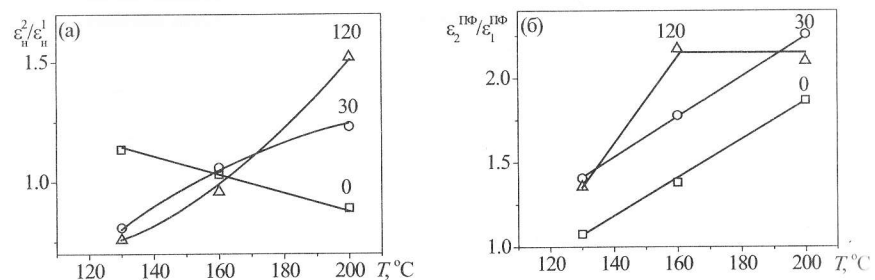


Рис. 3. Зависимости $\epsilon_2^h / \epsilon_1^h$ (а) и $\epsilon_2^{пф} / \epsilon_1^{пф}$ (б) от температуры T^* , полученные при различной длительности выдержки t . Величина t указана у кривых в минутах

Таким образом, результаты работы показали, что выдержка при температурах выше температуры A_c облегчает дислокационное скольжение, т.е. приводит к частичному разупрочнению сплава. Следствием этого является возрастание необратимой деформации, появляющейся в сплаве TiNi во втором цикле. Вместе с тем, величина обратимой деформации во втором цикле также увеличивается. Причина этого явления не ясна и требует дополнительного исследования.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-31-60043 мол_а_дк

Список литературы

1. Sibirev A., Belyaev S., Resnina N., J. Alloys Compd. 661 (2016) 155-160

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА TiNi, ПОДВЕРГНУТОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМООБРАБОТКЕ

Беляев С.П.¹, Зельдович В.И.², Пилюгин В.П.², Реснина Н.Н.¹,
Фролова Н.Ю.², Глазова Д.И.¹

¹Санкт Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия.

²Институт физики металлов им. Мухомова УрО РАН, Екатеринбург, Россия

dianka95@gmail.com

Известно, что изменение размера зерна в субмикронном и нанометровом диапазоне в сплавах, в том числе и в сплавах с памятью формы на основе TiNi, оказывает влияние на их механическое поведение и функциональные свойства [1]. Как правило, для получения сплавов с наноразмерным зерном материалы подвергают аморфизации за счет интенсивной пластической деформации и последующей термообработке, в процессе которой сплавы кристаллизуются. Варьируя параметры термообработки удается направленно менять размеры зерен от десятков до сотен нанометров. Уменьшение среднего размера зерна приводит к повышению прочности и снижению пластичности, что обусловлено торможением скользящих дислокаций на границах зерен и/или инициированием других механизмов пластической деформации [2]. Особенность механического поведения материалов с памятью формы состоит в том, что в них могут реализоваться два особых канала неупругой деформации: мартенситное превращение (в аустенитном состоянии) и переориентация мартенситных вариантов (в мартенситном состоянии). В настоящее время, влияние изменения размера зерна в субмикронном диапазоне на свойства сплавов с мартенситной неупругостью не установлено. В связи с этим целью настоящей работы явилось исследование механического поведения сплава TiNi с памятью формы с субмикронной зеренной структурой.

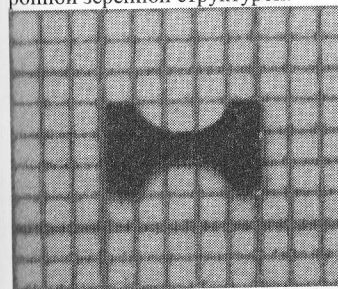


Рис. 1. Фотография образца для механических испытаний

В качестве объектов исследования были выбраны образцы сплава Ti – 50.2 ат. % Ni, подвергнутые аморфизации сдвигом под давлением и нагреванию до различных температур, что позволило сформировать в них различную структуру со средним размером зерна, варьируемым от 20 до 500 нм (более подробно процесс формирования структуры описан в [3]). Из дисков диаметром 6 мм были вырублены в специальном штампе образцы в форме лопаток с рабочей длиной 1 мм для механических испытаний. На рис. 1 представлена фотография образца на фоне масштабной подложки. Образцы крепили в специальные держатели, которые устанавливали в захваты испытательной машины Lloyd 30k Plus, оснащенной видеоэкстензометром для измерения деформации и криотермокамерой для проведения испытаний при различных температурах. Образцы деформировали со скоростью 0,01 мм/мин до разрушения с промежуточными разгрузками при двух температурах 130 °С – при которой весь объем сплава TiNi находился в аустенитном состоянии, и при 25 °С – при которой структура образцов была различной в зависимости от размера зерен, сформированных при кристаллизации. При 25 °С зерна диаметром до 10 нм а диаметром свыше 80 нм – в мартенситной B19' фазе.

Из дисков диаметром 6 мм были вырублены в специальном штампе образцы в форме лопаток с рабочей длиной 1 мм для механических испытаний. На рис. 1 представлена фотография образца на фоне масштабной подложки. Образцы крепили в специальные держатели, которые устанавливали в захваты испытательной машины Lloyd 30k Plus, оснащенной видеоэкстензометром для измерения деформации и криотермокамерой для проведения испытаний при различных температурах. Образцы деформировали со скоростью 0,01 мм/мин до разрушения с промежуточными разгрузками при двух температурах 130 °С – при которой весь объем сплава TiNi находился в аустенитном состоянии, и при 25 °С – при которой структура образцов была различной в зависимости от размера зерен, сформированных при кристаллизации. При 25 °С зерна диаметром до 10 нм а диаметром свыше 80 нм – в мартенситной B19' фазе.