

05.1;05.3;05.4

Производство работы сплавом TiNi при термоциклировании в интервале температур $B2 \leftrightarrow R$ мартенситного превращения

© С.П. Беляев, Н.Н. Реснина, К.О. Аншукова

Санкт-Петербургский государственный университет
E-mail: resnat@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2012 г.

Исследована возможность производства полезной работы сплавом TiNi при термоциклировании в интервале температур $B2 \leftrightarrow R$ мартенситного превращения. В режиме производства работы при термоциклировании охлаждение сплава осуществляли под постоянным напряжением 0, 50, 100 или 150 МПа, а нагревание под постоянным напряжением 200 МПа. Полученные результаты показали, что в интервале температур $B2 \leftrightarrow R$ перехода сплав способен производить полезную работу. Максимальная величина работоспособности, равная 0.45 MJ/m^3 , наблюдалась в том случае, когда при охлаждении действовало напряжение 100 МПа. При этом коэффициент полезного действия составил 1.3%, что приблизительно в 2 раза меньше, чем при термоциклировании в интервале температур $B2 \leftrightarrow B19'$ перехода.

Одним из перспективных направлений применения сплавов с памятью формы является создание тепловых мартенситных двигателей. В этих двигателях в качестве рабочего тела выступает сам сплав с памятью формы, который может производить полезную работу при перепаде температур в несколько десятков градусов. Несмотря на очевидные преимущества перед обычными тепловыми машинами, такие как нерасходуемость рабочего тела, высокая экологичность и нетоксичность, тепловые мартенситные двигатели не нашли широкого применения. В первую очередь это связано с тем, что сплавы с памятью формы демонстрируют плохую стабильность свойств при термоциклировании. Это приводит к изменению рабочих характеристик двигателя, изменению геометрических размеров рабочего тела и уменьшению долговечности.

Обычно в качестве рабочего тела выбирают сплавы на основе TiNi, претерпевающие термоупругое мартенситное превращение из кубической $B2$ решетки в моноклинную $B19'$. Такое превращение сопровождается значительной сдвиговой деформацией, величина которой составляет 10–12%, что и является причиной проявления высоких функциональных свойств. Вместе с тем большая сдвиговая деформация приводит к тому, что растущая мартенситная пластинка создает в аустенитной матрице высокие внутренние напряжения, значение которых в локальных областях может превысить дислокационный предел текучести. Это вызывает дислокационное скольжение и приводит к возрастанию плотности дефектов кристаллической решетки. В результате в сплаве с числом циклов накапливается необратимая деформация, которая является причиной нестабильности размера и функциональных свойств рабочего элемента, уменьшения работоспособности, коэффициента полезного действия и долговечности аппарата [1].

Отметим, однако, что в сплаве TiNi при определенных условиях наблюдается другое мартенситное превращение из кубической $B2$ -фазы в ромбоэдрическую R -фазу. Этот переход сопровождается небольшой сдвиговой деформацией, не превышающей 1,5%, и увеличения плотности дефектов при повторяющихся превращениях практически не происходит [2]. Поэтому можно предположить, что при термоциклировании в режиме производства работы сплав TiNi, испытывающий $B2 \leftrightarrow R$ переход, будет демонстрировать стабильные свойства. Однако до настоящего времени исследования на эту тему не проводились. В связи с этим в данной работе предпринято изучение размерной и функциональной стабильности сплава TiNi при производстве полезной работы на $B2 \leftrightarrow R$ переходе.

В качестве объекта исследования выбран сплав $Ti_{48}Ni_{52}$, отожженный при температуре 773 К в течение 2 ч. По данным калориметрических исследований после указанной термообработки в сплаве наблюдается $B2 \leftrightarrow R$ мартенситное превращение при температурах $R_s = 251$ К, $R_f = 238$ К, $A_s = 253$ К, $A_f = 263$ К (R_s — температура начала прямого $B2 \rightarrow R$ перехода; R_f — температура окончания прямого $B2 \rightarrow R$ перехода; A_s — температура начала обратного $R \rightarrow B2$ перехода; A_f — температура окончания обратного $R \rightarrow B2$ перехода). Для производства полезной работы использовали рабочий цикл с заданными напряжениями, подробно описанный в работе [3]. Цилиндрический образец диаметром 4 мм и длиной рабочей части 25 мм охлаждали под

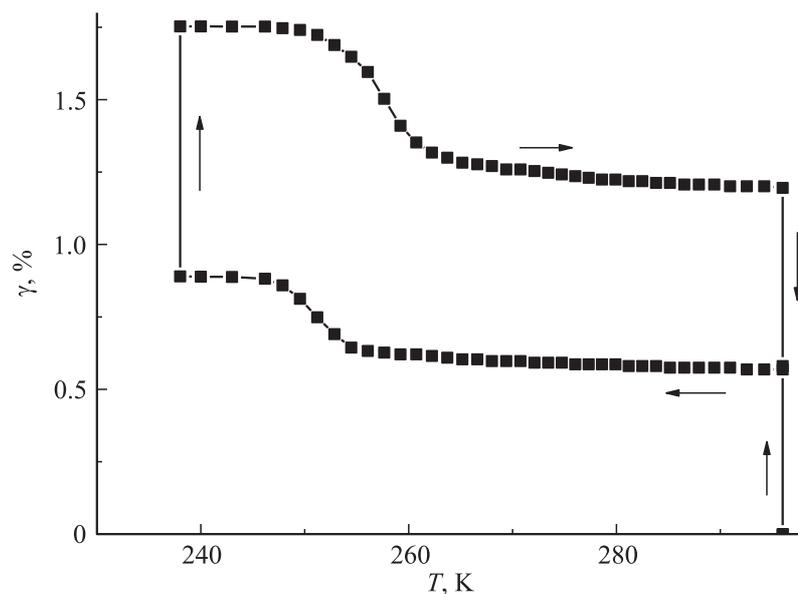


Рис. 1. Изменение деформации при охлаждении под напряжением 100 МПа и нагревании под напряжением 200 МПа.

постоянным напряжением τ_c до температуры 238 К, далее нагрузку увеличивали до напряжения τ_h и нагревали при постоянной нагрузке τ_h до температуры 295 К. После этого нагрузку уменьшали до значения τ_c и всю описанную процедуру повторяли тридцать раз. Было проведено четыре серии экспериментов, в которых напряжение τ_c составляло 0, 50, 100 или 150 МПа. Величина напряжения при нагревании τ_h во всех четырех сериях была одинаковой и составляла 200 МПа.

На рис. 1 представлена зависимость деформации от температуры, полученная при охлаждении сплава $\text{Ti}_{48}\text{Ni}_{52}$ под напряжением $\tau_c = 100$ МПа и нагревании под напряжением $\tau_h = 200$ МПа. Видно, что при охлаждении в сплаве наблюдается эффект пластичности превращения, т.е. в интервале температур $B2 \rightarrow R$ перехода происходит накопление деформации. При увеличении напряжения от 100 до 200 МПа при температуре 238 К образец дополнительно деформируется за счет процесса переориентации кристаллов R мартенсита. При последующем

нагревании вся накопленная деформация восстанавливается в процессе реализации эффекта памяти формы. По кривым $\gamma(T)$ определяли величины эффектов пластичности превращения и памяти формы и величину необратимой деформации. По полученным значениям рассчитывали величину удельной работы за цикл (A) по методике, представленной в [3]. Коэффициент полезного действия в исследуемом цикле (η) определяли как отношение совершенной работы A к теплоте, затраченной при нагревании. В предположении, что теплоемкость никелида титана в аустенитном и мартенситном состояниях одинакова ($C_A = C_M = C$), можно записать

$$\eta = \frac{A}{C(R_f - A_f) + q + A},$$

где q — скрытая теплота $B2 \rightarrow R$ мартенситного превращения, R_f и A_f — температуры окончания прямого и обратного превращений соответственно, которые определяли по зависимостям „деформация–температура“.

На рис. 2 представлены зависимости величины удельной работы за цикл (a) и коэффициента полезного действия (b) от числа циклов, полученные в различных сериях. Видно, что в том случае, когда образец охлаждали под напряжением 50 МПа, величина работы в первом цикле оказалась отрицательной (рис. 2, a). Дальнейшее термоциклирование приводит к возрастанию работоспособности и, начиная со второго цикла, сплав производит положительную работу в цикле. Сравнение результатов, полученных в различных сериях, показало, что максимальное значение производимой работы сплав демонстрирует в том случае, когда при охлаждении действует напряжение 100 МПа, однако величина полезной работы оказывается незначительной и к тридцатому циклу составляет 0.45 MJ/m^3 . Для сравнения укажем, что в сплавах TiNi и TiNiCu при термоциклировании через интервал $B2 \leftrightarrow B19'$ мартенситного перехода работоспособность может достигать $10\text{--}13 \text{ MJ/m}^3$ [3,4]. Малая величина работоспособности, обнаруженная в данной работе при термоциклировании через интервал $B2 \leftrightarrow R$ мартенситного перехода, связана в первую очередь с малой величиной сдвиговой деформации, которая сопровождает данный тип фазового перехода.

На рис. 2, b представлены зависимости коэффициента полезного действия, вычисленные по экспериментальным данным. Видно, что за исключением первого цикла, КПД меняется от 0.5 до 1.3% в зависимости от напряжения, действующего при охлаждении. Зависимость $\eta(\tau_c)$,

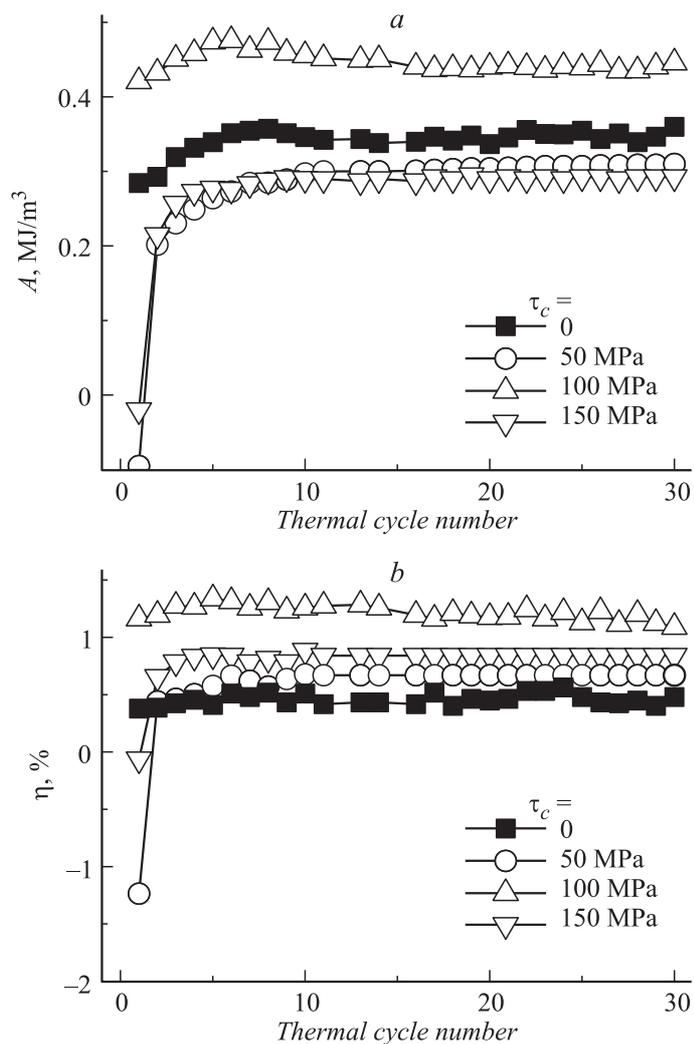


Рис. 2. Зависимости полезной работы (а) и коэффициента полезного действия (б) от количества термоциклов.

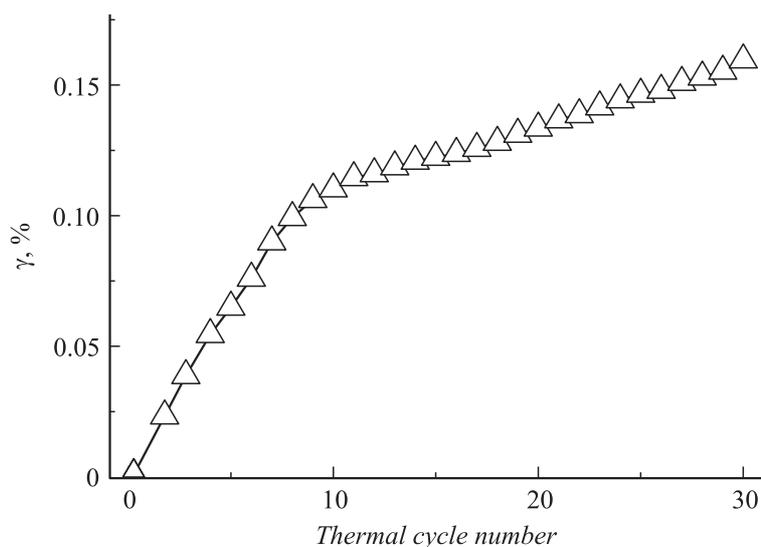


Рис. 3. Зависимость необратимой деформации от количества циклов при термоциклировании сплава $Ti_{48}Ni_{52}$ в интервале температур $B2 \leftrightarrow R$ перехода. $\tau_c = 100$ МПа, $\tau_h = 200$ МПа.

как и зависимость величины полезной работы от напряжения τ_c , является немонотонной, и максимальное значение 1.3% наблюдается в том случае, когда напряжение, действующее при охлаждении, составляет 100 МПа. Заметим, что максимальный КПД, наблюдаемый в сплавах на основе TiNi при совершении работы в интервале температур превращения $B2 \leftrightarrow B19'$, находится в пределах от 2.5 до 3%. Таким образом, при термоциклировании сплава TiNi в интервале превращения $B2 \leftrightarrow R$ величина коэффициента полезного действия оказывается приблизительно в 2 раза меньшей величины КПД, достигнутой на переходе $B2 \leftrightarrow B19'$.

Обратимся теперь к рассмотрению стабильности функционирования сплава в условиях производства полезной работы. Как уже упоминалось, в сплавах на основе никелида титана с превращением $B2 \leftrightarrow B19'$ повторяющиеся циклы производства работы приводят к возникновению необратимой пластической деформации. Эта деформация постепенно

накапливается в направлении действия силы с ростом числа циклов. В работе [3] показано, что за тридцать рабочих циклов, в которых напряжение, действующее при охлаждении, составляло 100 МПа, а при нагревании 200 МПа, сплав приобретает необратимую деформацию величиной 56%. Как видно из рис. 3, при таких же температурно-силовых воздействиях, только на другом превращении ($B2 \leftrightarrow R$), никелид титана за тридцать циклов деформируется лишь на 0.17%. Скорость накопления деформации значительно снижается после десятого цикла и в дальнейшем остается постоянной и равной $5 \cdot 10^{-5}$ за цикл.

Таким образом, малая деформация решетки при $B2 \leftrightarrow R$ мартенситном превращении, с одной стороны, является причиной небольшой величины производимой полезной работы, не превышающей 0.5 MJ/m^3 за цикл, и малого коэффициента полезного действия, равного 1.3%. С другой стороны, это обеспечивает высокую размерную стабильность рабочего элемента из сплава TiNi в условиях многократного его срабатывания.

Работа выполнена в рамках ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (государственный контракт № 8192 от 27.07.2012).

Список литературы

- [1] *Tobusi H., Date K., Miyamoto K.* // J. Solid Mech. and Mater. Eng. 2010. V. 4. P. 1094.
- [2] *Otsuka K., Ren X.* // Progr. Mater. Sci. 2005. V. 50. P. 511.
- [3] *Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А.* // Проблемы прочности. 1984. № 6. С. 77 (*Belyaev S.P., Kuz'min S.L., Likhachev V.A.* // Strenght of Materials. 1984. V. 16. N 6. P. 863).
- [4] *Беляев С.П., Войтенко Ю.В., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Ковалев В.М.* // Проблемы прочности. 1989. № 6. С. 40 (*Belyaev S.P., Voitenko Yu.V., Kuz'min S.L., Likhachev V.A., Kovalev V.M.* // Strenght of Materials. 1989. V. 21. N 6. P. 748).