

## ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ СПЛАВА TiNi

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

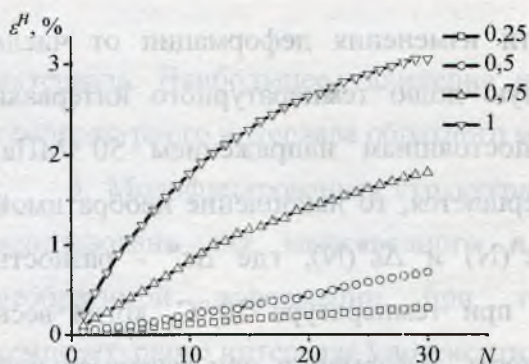
*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

alekspb@list.ru

Сплавы с памятью формы, благодаря своей уникальной способности восстанавливать форму при нагреве, часто применяются в роли рабочего тела линейных актуаторов. При этом известно, что многократные теплосмены через температурный интервал мартенситных превращений приводят к изменению их функциональных свойств [1,2]. При термоциклировании в свободном состоянии (без напряжения) наблюдается уменьшение температур фазовых переходов и изменение их последовательности [1]. Если при термоциклировании на образец действовало внешнее напряжение, то наряду с изменением характеристик мартенситных переходов, происходит изменение параметров эффектов памяти формы [2], при этом накапливается односторонняя необратимая деформация. Причиной этого является пластическая аккомодация напряжений, создаваемых растущей мартенситной пластиной во время прямого превращения. Тем не менее, остаётся не ясной стадийность накопления пластической деформации в процессе фазового перехода. В связи с этим целью работы являлось изучение влияния объёмной доли фазового

превращения на накопление необратимой деформации при термоциклировании.

Для решения поставленной задачи проволочные образцы ( $d=0.5$  мм) сплава  $Ti_{50}Ni_{50}$  были подвергнуты термоциклированию через различную долю температурного интервала прямого или обратного мартенситного превращения (0,25; 0,5; 0,75; 1) под постоянным растягивающим напряжением 50 МПа. Описание методики дано в [3]. Дополнительно был выполнен расчёт накопления

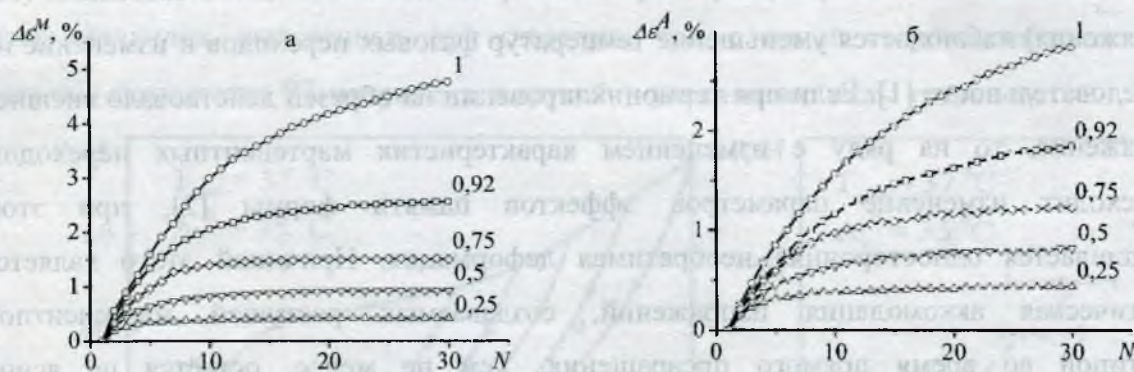


**Рисунок 1.** Зависимости накопления необратимой деформации от числа циклов при термоциклировании сплава  $Ti_{50}Ni_{50}$  под постоянным напряжением 50 МПа через различную долю ( $\Phi$ ) температурного интервала прямого мартенситного превращения

необратимой деформации при термоциклировании на основе модифицированной структурно-аналитической теории прочности [4].



На рисунке 1 представлены зависимости накопления необратимой деформации от числа циклов, полученные при термоциклировании сплава  $Ti_{50}Ni_{50}$  через различную долю температурного интервала прямого мартенситного превращения под постоянным напряжением 50 МПа. Видно, что интенсивность накопления необратимой деформации при термоциклировании зависит от доли прямого перехода, реализованного при охлаждении. Кроме этого накопление необратимой деформации нелинейно зависит от доли температурного интервала превращения. Так за 30 термоциклов через полный интервал превращения накапливается 3,05% необратимой деформации, тогда как за 30 термоциклов, в которых было реализовано 0,25 доли температурного интервала 0,3%.



**Рисунок 2.** Зависимости изменения деформации, измеренной при  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\Delta\varepsilon^M$  (а) и изменения деформации при  $T = T_{\text{max}}$   $\Delta\varepsilon^A$  (б) от числа циклов при термоциклировании образцов сплава  $TiNi$  под постоянным напряжением 50 МПа через различную долю температурного интервала обратного мартенситного превращения

На рисунке 2 представлены зависимости изменения деформации от числа циклов при термоциклировании через различную долю температурного интервала обратного мартенситного превращения под постоянным напряжением 50 МПа. Поскольку при нагревании превращение не завершается, то накопление необратимой деформации исследовали по зависимостям  $\Delta\varepsilon^A(N)$  и  $\Delta\varepsilon^M(N)$ , где  $\Delta\varepsilon^M$  - разность деформации в текущем и предыдущем цикле при температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , когда весь материал был в мартенситной фазе,  $\Delta\varepsilon^A$  - разность деформации при максимальной температуре в текущем и предыдущем цикле. Значения  $\Delta\varepsilon^M$  значительно больше  $\Delta\varepsilon^A$ , так как в  $\Delta\varepsilon^M$  даёт вклад не только накопление пластической деформации, но и увеличение фазовой деформации. Видно, что  $\Delta\varepsilon^M$  и  $\Delta\varepsilon^A$  увеличиваются тем интенсивнее, чем больше доля обратного превращения была реализована при нагреве. Максимальные изменения деформации наблюдаются при  $\Delta T > 0.9(A_k - A_n)$ , где  $A_n$  - температура начала, а  $A_k$  - температура конца обратного превращения.

Расчёт изменения необратимой деформации при термоциклировании был проведён на основе структурно - аналитической теории прочности. Для этого модель



была модифицирована, за счёт изменения определяющего уравнения, отвечающего за упрочнение сплава во время прямого мартенситного превращения и разупрочнения во время обратного. Сравнение расчётных и экспериментальных кривых, полученных для термоциклирования в неполном температурном интервале прямого превращения, представлено на рисунке 3. Видно, что расчётные кривые хорошо совпадают с экспериментальными.

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1. Основная часть необратимой деформации при термоциклировании под постоянным напряжением накапливается на завершающей стадии прямого мартенситного превращения. Это

связано с тем, что растущая мартенситная пластина создаёт высокие локальные напряжения, пластическая аккомодация которых в основном происходит на завершающем этапе превращения.

2. Изменение деформации при термоциклировании в неполном температурном интервале обратного мартенситного превращения нелинейно зависит от доли температурного

интервала. Наибольшее удлинение наблюдается при термоциклировании через 0,9 температурного интервала обратного мартенситного превращения.

3. Модифицированная структурно-аналитическая теория прочности, может быть использована для качественного и для количественного описания накопления необратимой деформации при термоциклировании через различную долю температурного интервала мартенситных превращений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (№ 14-08-31085 мол\_а).

1. Tang W., Sandström R. Mater. Des. 1993. Vol. 14, № 2. P. 103–113.
2. Furuya Y., Park Y.C. Nondestruct. Test. 1992. Vol. 8-9, № 1-6. P. 541–554.
3. Belyaev S., Resnina N., Sibirev A. J. Alloys Compd., 2012. Vol. 542. P. 37–42.
4. Волков А.Е. Изв. Академии Наук. Сер. Физическая. 2002. Vol. 66, № 9. P. 1290–1297.

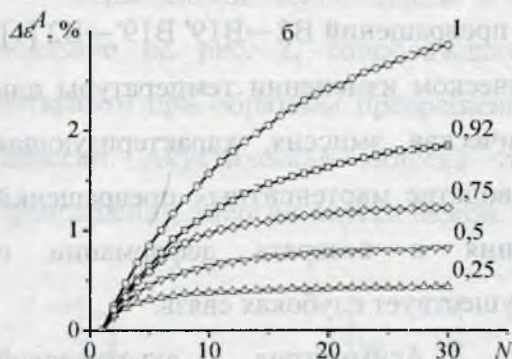


Рисунок 3. Экспериментальные и расчётные зависимости накопления необратимой деформации от числа циклов при термоциклировании образцов сплава  $Ti_{50}Ni_{50}$  под постоянным напряжением 50 МПа через различную долю температурного интервала прямого мартенситного превращения