

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА УПРУГИЙ МОДУЛЬ СПЛАВА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Косогор А.А.<sup>1,2</sup>, Львов В.А.<sup>1</sup>, Ховайло В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва,  
Россия

<sup>2</sup>Институт Магнетизма, Киев, Украина  
annakosogor@gmail.com

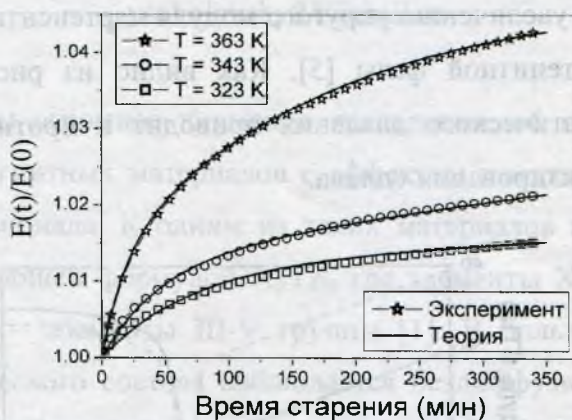
Механические напряжения могут создаваться в сплавах с эффектом памяти формы: 1) внешними силами; 2) кристаллографическими дефектами; 3) в пленках из-за несоответствия параметров кристаллических решеток пленки и подложки; 4) ферромагнитным упорядочением. В частности, после мартенситного превращения (МП), которое сопровождается изменением симметрии кристаллической решетки, кристаллографические дефекты при старении сплава стремятся подстроиться под новую симметрию кристаллической решетки [1]; пространственная реконфигурация кристаллических дефектов искажает кристаллическую решетку и, таким образом, приводит к появлению внутреннего механического напряжения [2]. Поскольку внутреннее напряжение возникает из-за реконфигурации (диффузии) дефектов, то оно зависит от времени. Как правило, характерные времена диффузии значительно превышают длительность МП, а значит, функциональные свойства сплава также меняются со временем при постоянных физических условиях. Изменение функциональных свойств сплавов с эффектом памяти формы представляют особый интерес благодаря широкому применению этих сплавов.

Внутреннее механическое напряжение, возникающее при реконфигурации дефектов, можно разделить на внутреннее аксиальное напряжение и гидростатическое давление. Аксиальное напряжение и изотропное давление создают два разных физических механизма старения мартенсита [2]. Анизотропный механизм согласуется с принципом соответствия симметрии кристаллической решетки и подсистемы дефектов [1], в то время как, изотропный механизм учитывает изменение объема при МП [2,3]. Последовательный анализ влияния механических напряжений на сплавы с эффектом памяти формы в рамках теории Ландау [2,3] позволяет количественно описывать изменение функциональных свойств этих сплавов.

На рисунке 1 показаны теоретические и экспериментальные временные зависимости модуля Юнга мартенситной фазы сплава Cu-Al-Ni, состаренного при

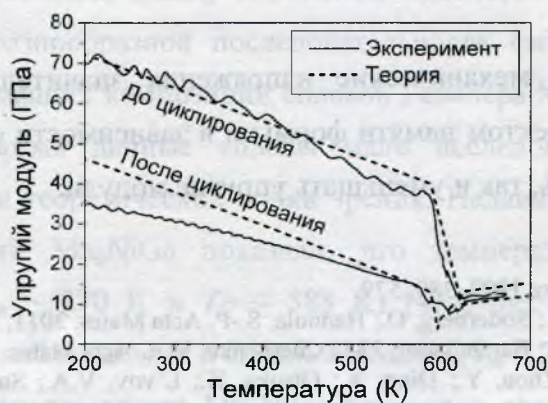


разных температурах [4]. Соответствие теории эксперименту достигается при величине внутреннего давления  $P = 0.4 \text{ GPa}$  и аксиального напряжения  $\sigma_{zz} = -13.5 \text{ MPa}$ . И эксперимент, и теория показывают, что чем выше температура старения, тем сильнее выражено увеличение модуля Юнга мартенситной фазы при старении мартенсита. Увеличение упругого модуля мартенситной фазы при старении мартенсита соответствует стабилизации мартенсита.



**Рисунок 1.** Экспериментальные (точки) и теоретические (линии) временные зависимости модуля Юнга сплава Cu-Al-Ni, состаренного при разных температурах [4]

Внутренние напряжения возникают в сплаве не только при его старении, но и при циклировании [3]. На рисунке 2 показаны температурные зависимости модуля Юнга сплава Ni-Mn-Ga, полученные до и после термомеханического циклирования сплава.



**Рисунок 2.** Экспериментальные и теоретические температурные зависимости модуля Юнга сплава Ni-Mn-Ga, измеренные/рассчитанные до и после циклирования [3]

Как видно из рисунка, циклирование приводит к уменьшению модуля Юнга мартенситной фазы, а следовательно, к ее дестабилизации. Таким образом, внутреннее напряжение стабилизирует мартенситную фазу при старении мартенсита и дестабилизирует ее в ходе циклических МП. По существу, процессы стабилизации или



дестабилизации это приближение кристалла с дефектами к равновесному состоянию или отклонение его от равновесия. Согласно теории с экспериментом наблюдается при значении внутреннего давления  $P = -7.5$  ГПа [3]. Тут внутреннее давление отрицательное, поскольку приводит к увеличению объема кристалла.

Влияние сжимающего гидростатического давления на сдвиговый упругий модуль  $C_{44}$  сплава Ti-Ni показано на рисунке 3. Рисунок 3 показывает, что давление в 1 ГПа приводит к заметному увеличению упругого модуля мартенситной фазы и уменьшению упругого модуля аустенитной фазы [5]. Как видно из рисунков 2 и 3, влияние сжимающего гидростатического давления приводит к противоположному эффекту, наблюдаемому при циклировании сплава.

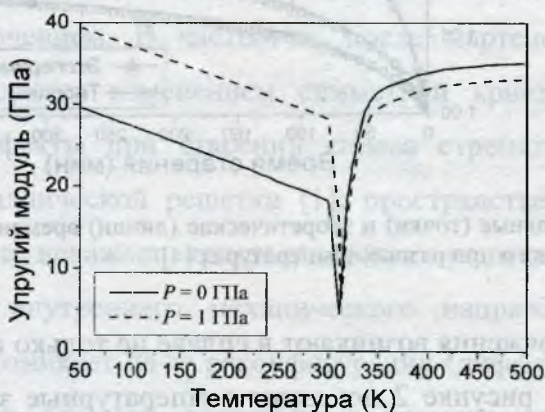


Рисунок 3. Влияние гидростатического давления на температурные зависимости упругого модуля  $C_{44}$  сплава Ti-Ni

Таким образом, механические напряжения значительно влияют на упругие модули сплавов с эффектом памяти формы и в зависимости от знака этих напряжений могут, как увеличивать, так и уменьшать упругие модули.

1. Ren, X.; Otsuka, K. Nature 1997, 389, 579.
2. Kosogor, A.; L'vov, V.A.; Soderberg, O.; Hannula, S.-P. Acta Mater. 2011, 59, 3593.
3. L'vov, V.A.; Kosogor, A.; Barandiaran, J.M.; Chernenko, V.A. Acta Mater. 2012, 60, 1587.
4. Kosogor, A.; Xue, D.; Zhou, Y.; Ding, X.; Otsuka, K.; L'vov, V.A.; Sun, J.; Ren, X. J. Phys. Condens. Matter. 2013, 25, 335402.
5. Chernenko V.A., L'vov V.A., Cesari E., Kosogor A., Barandiaran J.M. Metals 2013, 3, 237.