

## ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ГИСТЕРЕЗИС ПРИ ТЕРМОУПРУГИХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Морева М.В., Грязнов А.С., Плотников В.А.

*ФГБОУВПО «Алтайский государственный университет», Барнаул, Россия*

*Andarielle@mail.ru*

Мартенситные превращения (МП) в никелиде титана и подобных ему материалов часто трактуют как обратимые. Явления обратимости проявляются в восстановлении формы и сверхэластичности. Но подобную обратимость нельзя считать термодинамически обратимой, поскольку подобный макроскопический процесс, как и любой другой необратим и подчиняется второму началу термодинамики и, следовательно, сопровождается диссипацией энергии и производством энтропии.

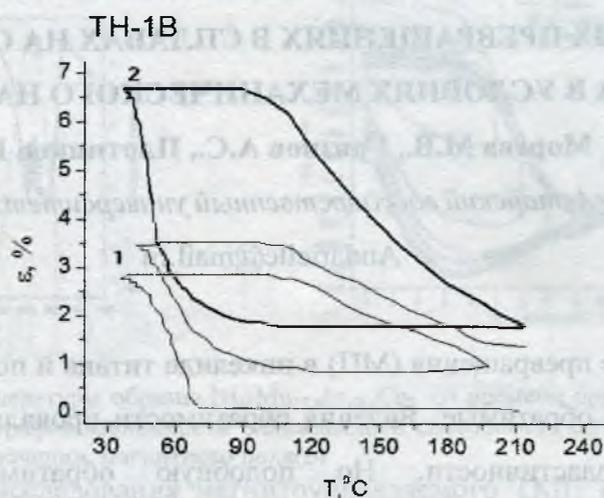
При несомненном отсутствии обратимости мартенситных превращений в строгом термодинамическом смысле важно, что в TiNi наблюдается обратимое движение мартенситных границ, которое осуществляется не путем зарождения и роста высокотемпературной фазы, а путем сокращения ранее образованных мартенситных кристаллов, превращение происходит в последовательности — кристаллы, образовавшиеся последними схлопываются первыми [1,2]. Обратимость хорошо наблюдается в масштабах мартенситных кристаллов, и является больше геометрической особенностью, чем термодинамической.

Если обратимости термоупругих МП уделяется достаточно внимания, то необратимым процессам, в том числе и закономерностям гистерезиса сравнительно недостаточно. Однако именно в закономерностях гистерезиса скрыты фундаментальные черты МП.

При исследовании МП интересен деформационный гистерезис в связи с особенностями накопления и возврата мартенситной деформации.

Деформационный гистерезис при мартенситных превращениях в никелиде титана есть фундаментальное явление. Основной и наиболее значимой причиной его проявления являются диссипативные процессы и производство энтропии.

Циклирование мартенситных превращений при циклическом изменении температуры приводит к эволюции процесса накопления и рассеяния энергии, то есть к эволюции петли гистерезиса (рис. 1).



**Рисунок 1.** Петля деформационного гистерезиса при циклировании мартенситных превращений в сплаве ТН-1В при внешнем напряжении 36 МПа: 1 – первый и второй циклы, 2 – цикл насыщения

В сплаве ТН-1В петля гистерезиса смещается к большим деформациям, характеризуя с одной стороны накопление остаточной деформации до 2 % при выходе на насыщение, с другой — увеличение максимального значения накапливаемой в цикле деформации. Это приводит к росту площади петли при циклировании. Следует отметить, что петля гистерезиса в первом цикле была незамкнутой, и величина «разрыва» определяла величину остаточной деформации. С последующими циклами эта величина уменьшалась, и в цикле насыщения петля гистерезиса становится замкнутой.

Согласно нелокальному неравновесно – термодинамическому описанию мартенситных состояний [3] и акустической эмиссии при мартенситных превращениях [4] гистерезис в цикле превращений имеет сложную природу.

Во-первых, площадь петли гистерезиса обусловлена процессом производства энтропии вследствие действия источников-стоков тепла, локализованных на межфазных (мартенситных) границах раздела, движущихся со скоростью, близкой к скорости распространения сдвиговых волн. В связи с высокой скоростью перемещения границы возникает температурный фронт с высоким температурным градиентом, что требует дополнительного локального переохлаждения при прямом  $B2 \rightarrow B19'$  или локального перегрева при обратном  $B19' \rightarrow B2$  превращениях.

Во-вторых, при мартенситных превращениях наблюдается накопление структурных дефектов в результате пластической релаксации микронапряжений, генерируемых на межфазной границе. Явление носит название фазового наклепа, его проявление приводит к упрочнению сплава. Процесс пластической релаксации, представляющий собой продуцирование полных дислокаций при достижении

напряжениями на межфазной границе предела текучести сплава, сопровождается диссипацией энергии, что приводит к дополнительному уширению петли гистерезиса [4]. Фактически рассеяние энергии осуществляется при взаимодействии межфазной границы с локальными дефектами структуры (трение границы раздела на локальных препятствиях), к которым можно отнести дислокации и их скопления, выделение частиц второй фазы.

В-третьих, площадь петли гистерезиса связана со специфическим рассеянием энергии – акустической эмиссией, обусловленной динамикой мартенситной границы. Динамика мартенситной границы существенно связана со скоростью движения ее и взаимодействием с другими границами, то есть множественностью возникновения (исчезновения) мартенситных кристаллов, где характер взаимодействия мартенситных кристаллов связан со степенью коррелированности образования (исчезновения) их в объеме и во времени процесса (в широком смысле со степенью когерентности в системе мартенситных кристаллов) [3].

Характерной особенностью деформационного гистерезиса в циклах мартенситных превращений является его рост при увеличении механического напряжения в цикле до некоторого критического значения.

1. Курдюмов Г.В., Хандрос Л.Г., ЖТФ, 1949, 19, 761.
2. Курдюмов Г.В., Хандрос Л.Г., тДАН УССР, 1950, №1, 27.
3. Паскаль Ю.И. Нелокальное неравновесно-термодинамическое описание мартенситного превращения // Изв. вузов. Физика, 1981 – № 11. – с. 74-78.
4. Плотников В.А., Потекаев А.И., Паскаль Ю.И. Мезоскопический уровень акустической эмиссии при мартенситных превращениях // Изв. Вузов. Физика, 1999. – № 9. – С. 72-79.

