

УДК 539.4

МАТЕРИАЛЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ КАК ОБЪЕКТ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ, РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ

© 2011 г.

А.А. Мовчан, С.А. Казарина

Институт прикладной механики РАН, Москва

Movchan47@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Приводятся новые экспериментальные данные по механическому поведению сплавов с памятью формы (СПФ). Показано, что для поведения этих материалов характерны как склерономные, так и реономные эффекты. Представлены микромеханическая модель нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях и ее термодинамическое замыкание. Исходя из доказанного положения о процессах монотонного пропорционального нагружения, сформулирован аналог деформационной теории пластичности для СПФ. Для описания немонотонного и (или) непропорционального термомеханического нагружения СПФ предложен аналог теории пластического течения с изотропным и трансляционным упрочнением. Построены модели реономного поведения СПФ. Приведены постановки различных классов краевых и начально-краевых задач термомеханики для СПФ и некоторые результаты их решения.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, механика, термодинамика, определяющие соотношения, склерономные свойства, реономные свойства, краевые и начально-краевые задачи.

Анализируются термомеханические свойства сплавов с памятью формы (СПФ), связанные с происходящими в этих материалах термоупругими фазовыми и структурными превращениями. Под фазовыми превращениями в простейшем случае понимается происходящий при охлаждении или росте напряжений прямой переход из аустенитной фазы в мартенситную и происходящее при нагреве или разгрузке обратное превращение. Если прямое фазовое превращение происходит под действием постоянного напряжения с ненулевым девиатором, то в СПФ по мере снижения температуры накапливаются неупругие (фазовые) деформации, интенсивность которых является нелинейно возрастающей функцией приложенных напряжений. Структурное превращение связано с увеличением степени ориентированности мартенситных структурных элементов при монотонном нагружении СПФ и приводит к явлению мартенситной неупругости – нелинейному росту деформаций мартенситной фазы с ростом приложенных напряжений. При обратном превращении как фазовые, так и структурные деформации снимаются полностью или частично (явление памяти формы).

Установлено, что диаграмма мартенситной неупругости для малых напряжений имеет степенную асимптотику. Касательный модуль достаточ-

но высок в начальной точке диаграммы и монотонно убывает при росте напряжений до первой точки перегиба, где он имеет минимальное значение. Далее следует монотонное возрастание касательного модуля до второй точки перегиба, связанное с насыщением процесса развития структурных деформаций. После второй точки перегиба касательный модуль монотонно уменьшается, что связано с развитием обычных пластических деформаций. Участок диаграммы мартенситной неупругости с начала нагружения и до второй точки перегиба неплохо аппроксимируется функцией Вейбулла. Касательный модуль диаграммы прямого превращения монотонно убывает с ростом напряжений.

При росте напряжений структурный переход в мартенситной части СПФ может происходить как при прямом, так и при обратном термоупругом фазовом превращении. Разгрузку после нагружения в режиме мартенситной неупругости можно в первом приближении считать упругой. Для процесса накопления структурных деформаций характерно явление деформационного упрочнения, проявляющееся после разгрузки и повторного нагружения СПФ в мартенситном состоянии. Экспериментально обнаружено явление перекрестного упрочнения [1], состоящее в том, что добиться упрочнения СПФ в отношении процессов

мартенситной неупругости можно путем предварительного прямого фазового превращения в нагруженном состоянии. В опытах по двухэтапному прямому превращению, когда при переходе с первого этапа на второй напряжение скачком уменьшалось [2], установлено, что для самого явления накопления деформаций прямого фазового превращения уход в упругую область после частичной разгрузки не характерен.

В большинстве публикаций, посвященных исследованию СПФ, термоупругие фазовые и структурные превращения считаются бездиффузионными атермическими процессами, а их деформационные проявления трактуются как склерономные, т.е. независимые от масштаба времени и происходящие со скоростями, соответствующими скоростям изменения внешних воздействий. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований, согласно которым СПФ проявляют как склерономные, так и реономные свойства [3, 4]. Форма диаграммы интенсивность деформаций – интенсивность напряжений для жесткого изотермического нагружения СПФ зависит от скорости деформирования, с ростом которой деформации, соответствующие тем же значениям напряжений, уменьшаются. При мягком ступенчатом изотермическом нагружении СПФ в мартенситном состоянии наблюдается развитие деформаций со временем при постоянном значении температуры и напряжения после скачкообразного роста напряжений и соответствующего скачка упругих и неупругих деформаций. Сразу после скачка скорость деформаций весьма велика, но с течением времени монотонно убывает, обращаясь в нуль по истечении определенного периода времени. Аналогичные явления наблюдаются при мягком ступенчатом нагружении СПФ в режиме сверхупругости. При ступенчатой разгрузке в режиме сверхупругости наблюдается затухающее уменьшение деформаций со временем при постоянном напряжении и температуре после скачкообразного уменьшения напряжений. Изменение деформаций со временем при постоянном напряжении после его скачкообразного изменения сравнимо по величине с мгновенным скачком неупругих деформаций, соответствующих данному скачку напряжений.

Проведен критический анализ известных моделей поведения СПФ. Предложена микромеханическая модель нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях [5, 6], в рамках которой учитывается влияние на процесс деформирования не только внешних приложенных напряжений, но и случайным образом распределенных по представительному объему

СПФ микронапряжений. Построено термодинамическое замыкание модели деформирования [7, 8], обеспечивающее выполнение в ее рамках первого и второго законов термодинамики. Сформулирована соответствующая система определяющих соотношений, количественно и качественно правильно описывающая широкий круг эффектов и явлений, характерных для СПФ.

Рассмотрены процессы монотонного пропорционального изменения компонент девиатора напряжений, состоящие из конечного числа фрагментов прямого или обратного превращения или структурного перехода, причем фазовые и структурные превращения могут происходить как последовательно, так и одновременно. Предполагается, что функции распределения интенсивности микронапряжений в мартенситном и аустенитном состоянии СПФ совпадают. Доказано [5, 6], что в этом случае деформации, напряжения и параметр фазового состава СПФ связаны между собой конечным соотношением, не зависящим от истории процесса. Таким образом, сформулирован аналог деформационной теории пластичности для СПФ и определены границы его применимости.

Для описания процессов немонотонного или (и) непропорционального нагружения СПФ сформулированы два варианта аналогов теории пластического течения для этих материалов. В первом варианте [1] ассоциированный закон течения записывается для суммарных фазово-структурных деформаций, а левая часть уравнения поверхности нагружения представляет собой произведение величины объемной доли мартенситной фазы на функцию интенсивности напряжений. Во втором варианте ассоциированный закон течения и поверхность нагружения строятся только для структурных деформаций, поскольку для фазовых деформаций явление деформационного упрочнения не характерно. В рамках этой модели изотропное упрочнение в отношении структурных деформаций определяется накоплением фазовых деформаций, и тем самым описывается явление перекрестного упрочнения. Кинематическое упрочнение связано со структурными деформациями. Предложены модели реономного поведения СПФ [3, 4, 6], основанные на предположении о существовании предельно медленных и предельно быстрых процессов в этих материалах.

Сформулированы различные классы краевых и начально-краевых задач для СПФ. Приводятся результаты решения некоторых таких задач.

Работа выполнена при финансовом содействии ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, проект ГК №16.740.11.0132.

Список литературы

1. Мовчан А.А., Казарина С.А., Тант Зин Аунг // Деформации и разрушение материалов. 2009. №9. С. 2–6.
2. Мовчан А.А., Казарина С.А. // Деформация и разрушение материалов. 2006. №7. С. 19–23.
3. Мовчан А.А., Тант Зин Аунг // Вестник Тамбовск. ун-та. Сер.: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. Вып. 3. С. 860–861.
4. Мовчан А.А., Казарина С.А., Тант Зин Аунг // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16, №3. С. 305–311.
5. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. // Изв. РАН. МГТ. 2010. №3. С. 118–130.
6. Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко Т.Л. // Упругость и неупругость: Матер. Междунар. симпоз. по проблемам механики деформируемых тел, посвященный 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина / М.: МГУ. 2011. С. 198–201.
7. Мовчан А.А., Ньюнт Со // Журнал прикладной механики и технической физики. 2006. Т.47, №4. С. 98–103.
8. Мовчан А.А., Казарина С.А., Мишустин И.В., Мовчан И.А. // Деформации и разрушение материалов. 2009. №8. С. 2–9.

ISHAPE MEMORY ALLOYS AS AN OBJECT OF DEFORMABLE SOLID MECHANICS: EXPERIMENTAL INVESTIGATION, CONSTITUTIVE EQUATIONS, SOLUTION OF BOUNDARY PROBLEMS

A.A. Movchan, S.A. Kazarina

Based on the recent experimental data, it is shown that both scleronomous and rheonomous effects are characteristic of the behavior of shape memory alloys (SMA). A micromechanical model of non-linear deformation of SMA during phase and (or) structure transforms and a thermodynamic closing of this model are proposed. Based on the proved postulate about the processes of proportional loading, an analogue of deformation theory of plasticity for SMA is proposed. For the description of non-monotone or non-proportional loading SMA, an analogue of plastic flow theory for SMA is presented. Various formulations of boundary and initial boundary value problems for SMA are considered. A number of solutions of these problems are described.

Keywords: shape memory alloys, mechanics, thermodynamics, constitutive equations, scleronomous properties, rheonomous behavior, boundary and initial-boundary problems.