

УДК 539.4

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

© 2011 г.

Л.Г. Сильченко, Т.Л. Сильченко

Институт прикладной механики РАН, Москва

sileger@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Критические нагрузки элементов из сплавов с памятью формы (СПФ) при термоупругих мартенситных превращениях оказываются существенно более низкими, чем соответствующие эйлеровы нагрузки даже в наименее жестком мартенситном состоянии [1–5]. Учет структурного превращения при анализе устойчивости является усугубляющим фактором, приводящим к еще большему снижению критической нагрузки, особенно для относительно тонкостенных элементов. В ряде более ранних исследований сформулирована система подходов, которая позволяет относительно легко находить весь интервал критических нагрузок для элементов из СПФ, причем наиболее интересное нижнее значение этого интервала определяется в соответствии с концепцией повсеместного дополнительного фазового и (или) структурного переходов.

Рассматривается ряд особенностей потери устойчивости тонкостенных элементов из СПФ при термоупругих и структурных превращениях, которые ранее не учитывались. К их числу относится изучение влияния способа приложения сжимающей нагрузки на критические характеристики элементов из СПФ. В частности, рассмотрена потеря устойчивости стержня из СПФ при термоупругих превращениях в случае, когда одновременно меняются и внешняя сжимающая нагрузка, и температура. Показано также, как влияет выбор модели цилиндрической оболочки из СПФ на ее критические нагрузки.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, термоупругие мартенситные превращения, структурное превращение, потеря устойчивости, стержень, цилиндрическая оболочка.

Влияние способа приложения сжимающей нагрузки к стержню из сплавов с памятью формы на его устойчивость

На примере стержня из сплавов с памятью формы (СПФ) изучено влияние характера приложения сжимающей нагрузки на критические характеристики тонкостенных элементов из СПФ. Наиболее простой теоретический способ получения критических нагрузок состоит в нахождении такой минимальной, но неизменной в процессе фазового перехода нагрузки, которая все еще приводит к потере устойчивости. Именно таким образом были найдены критические нагрузки при прямом и обратном фазовых превращениях не только стержней из СПФ, но и пластин разного очертания, а также оболочек. При этом в качестве определяющих соотношений рассматривались различные варианты зависимостей, моделирующих поведение СПФ, включая нелинейный их вариант, при котором приращение неупругих деформаций нелинейным образом зависит от напряжений [3]. В последнем случае были учтены внутренние микронапряжения, распределенные случайным образом, причем была предложена модель, которая позволяет учесть не только фазовые,

но и структурные деформации, связанные с изменением напряженного состояния. Предполагалось, что в общем случае распределение микронапряжений в мартенсите и аустените может быть неодинаковым. Подход, основанный на учете структурных деформаций, позволил относительно просто найти критическую нагрузку стержня из СПФ при мартенситной неупругости [4]. При этом рассматривалось изотермическое деформирование стержня из хаотического мартенсита под воздействием увеличивающейся по величине концевой сжимающей силы. Все указанные ранее решения относительно просты, поскольку позволяют записать аналитические соотношения для деформаций при докритическом деформировании.

Значительно более сложной является проблема нахождения критической нагрузки, когда фазовое превращение осуществляется при постоянной температуре за счет изменения величины действующих напряжений. Определенный интерес представляют и промежуточные, наиболее сложные для получения решения, варианты задания нагрузки, когда одновременно изменяются как сжимающая нагрузка, так и температура. В этом случае докритический анализ элемента из СПФ

представляет собой самостоятельную, достаточно сложную проблему, решение которой может быть получено только численным образом. Именно исследованию зависимости критической силы стержня из СПФ от одновременно меняющихся температуры и внешней сжимающей нагрузки, зависящих от одного параметра, здесь уделено наибольшее внимание. На основе полученных решений оценено влияние учета структурного превращения на величину искомой критической нагрузки. Также проведены различного рода численные параметрические исследования. Все указанные ранее решения были найдены в рамках предложенной ранее системы гипотез, смысл которой в окончательном виде на данный момент времени сформулирован в [2].

Влияние модели оболочки на ее критические характеристики устойчивости

Задача о потере устойчивости замкнутой цилиндрической оболочки из СПФ была решена в [5] с использованием гипотезы повсеместного фазового превращения. В настоящем исследовании было получено решение на основе модели пологой оболочки и линейного варианта определяющих соотношений, но была указана модификация нужных соотношений для получения решения с использованием нелинейных определяющих соотношений. Структурное превращение не учитывалось. В качестве нагрузки рассматривались концевые сжимающая сила и крутящий момент. Полученные области устойчивости в координатах осевые сжимающие напряжения – сдвигающие напряжения для различных длин оболочки, в частности, позволили установить, что модель пологой оболочки не позволяет судить о зависимости критической нагрузки осевого сжатия от длины оболочки из СПФ, как это имеет место и в упругом случае. Поэтому, помимо изучения степени влияния структурного превращения на величину критических нагрузок цилиндрической оболочки из СПФ, была поставлена другая цель – анализ влияния модели оболочки на величину искомой критической нагрузки цилиндрической оболочки, находящейся в условиях равномерного сжатия вдоль ее образующей. Для этого в рамках нелинейных определяющих соотношений, как с учетом, так и без учета структурного превращения, на основе концепции повсеместного дополнительного фазового и структурного перехода было проведено сопоставление найденных критических нагрузок в широком диапазоне длин на основе трех вариантов моделей оболочки. Все они подчиняются гипотезам Кирхгофа – Лява: 1) модель

пологой оболочки (используется для сравнения), 2) модель пологой оболочки в части зависимостей для кривизн, но с использованием полноценного «второго» уравнения равновесия в касательной плоскости в окружном направлении, 3) классическая теория оболочек Кирхгофа – Лява. Следует отметить, что поскольку рассматривается устойчивость оболочки из СПФ, то, конечно, при образовании интегральных силовых факторов получаются более сложные соотношения, отражающие специфику учета определяющих соотношений, моделирующих фазовое и структурное превращение. Кроме того, поскольку рассматривается задача устойчивости, то в соответствующих уравнениях равновесия появляются дополнительные слагаемые, отражающие так называемую «фиктивную» нагрузку. Заметим, что для случая сжатия цилиндрической оболочки вдоль образующей как «фиктивная» нагрузка обычно рассматривается единственное слагаемое, в качестве которого фигурирует проекция на нормаль к срединной поверхности докритических значений осевых напряжений, что приводит к модификации «третьего» уравнения равновесия. Соответствующие добавки были введены для всех трех ранее указанных вариантов моделей. Кроме этого, для случая классической теории оболочек Кирхгофа – Лява, помимо только что упомянутого слагаемого, имеет смысл рассматривать еще одно слагаемое, когда дополнительно учитывается проекция докритических значений осевых напряжений оболочки в окружном направлении, что приводит к модификации «второго» уравнения равновесия. Расчеты показывают, что именно в рамках данного четвертого варианта получаются самые низкие значения искомой сжимающей критической нагрузки.

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., Сильченко Л.Г. Устойчивость стержня, претерпевающего прямое или обратное мартенситные превращения под действием сжимающих напряжений // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, №3. С. 169–178.
2. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Влияние структурного превращения и нелинейности процесса деформирования на устойчивость стержня из сплава с памятью формы // Изв. РАН. МТТ. 2010. №6. С. 137–147.
3. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Микромеханическая модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и струк-

турных превращениях // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2010. №3. С. 118–130.

4. Сильченко Л.Г., Сильченко Т.Л. О потере устойчивости элементов из сплавов с памятью формы при структурном превращении с учетом пороговых напряжений // Механика композиционных материалов и кон-

струкций. 2010. Т. 16, №4. С. 455–467.

5. Сильченко Л.Г., Мовчан И.А. Устойчивость цилиндрической оболочки из сплава с памятью формы при сжатии и кручении // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15, №4. С. 486–496.

SOME FEATURES OF THE BUCKLING OF ELEMENTS MADE OF SHAPE-MEMORY ALLOYS

L.G. Sil'chenko, T.L. Sil'chenko

The buckling loads for elements made of shape-memory alloys (SMA) at the thermoelastic martensite transitions turn out to be essentially lower than corresponding Euler's loads, even in the least rigid martensite condition. The account of the structural transition in the buckling analysis is an aggravating factor giving rise to greater decrease in the buckling load, especially for relatively thin-walled elements. In a number of earlier works the system of approaches which allows to determine rather easily the entire interval of the buckling loads for the SMA elements is formulated, with the most interesting lower value of this interval defined according to the concept of overall additional phase and (or) structural transitions.

A number of features of the buckling of the SMA thin-walled elements at the thermoelastic and structural transitions are considered which were not taken into account earlier. They include the study of the effect of the way the compressing load is applied on buckling characteristics of the SMA elements. In particular, the buckling of a SMA rod at thermoelastic transitions is considered in the case when both external compression load and temperature are varied simultaneously. It is also shown how the choice of model of the SMA cylindrical shell affects its buckling loads.

Keywords: shape memory alloys, thermoelastic martensite transitions, structural transition, buckling, rod, cylindrical shell.