УДК 539.5 DOI: 10.18698/2308-6033-2022-1-2142

Моделирование эффекта мартенситной неупругости в плоских композиционных пружинах, выполненных из сплава с эффектом памяти формы

© А.А. Бутрина, С.М. Ганыш, С.С. Гаврюшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Разработана математическая модель плоской композиционной пружины, работающей в области малых перемещений, обладающей эффектом памяти формы. Для описания поведения материала применен феноменологический подход, основанный на диаграмме фазовых переходов. В качестве модели материала выбрана феноменологическая модель Бринсон. Предложены соотношения для определения приведенных механических характеристик монослоя, эквивалентного композиционному слою в пружине. Эффект памяти учтен с помощью дополнительного внутреннего силового фактора — момента памяти формы при изгибе, являющегося результатом ориентации мартенсита по сечению. Для получения упругой характеристики плоской пружины использован конечно-элементный подход, в котором момент памяти формы выступает в качестве дополнительной узловой нагрузки. Представлен алгоритм построения зависимости между изгибающим моментом в сечении и моментом памяти формы для изотермического нагружения в зоне стабильности мартенсита. Получены зависимости момента памяти формы при изгибе от изгибающего момента для различных конфигураций поперечного сечения плоской пружины.

Ключевые слова: *сплав с эффектом памяти формы, плоская пружина, композиционная пружина*

Введение. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к разработке интеллектуальных материалов и созданию на их основе конструкций с адаптивными возможностями. Он особенно активно проявляется при совершенствовании применяющихся в авиационно-космической отрасли, робототехнике и медицине сенсорных и актюаторных компонентов датчиков, исполнительных механизмов и микроконтроллеров, имеющих упругие элементы, выполненные из сплавов с эффектом памяти формы [1, 2].

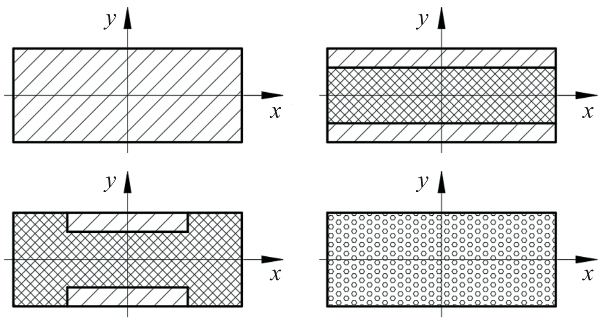

Рис. 1. Примеры поперечного сечения плоской пружины

Среди геометрических форм таких изделий широко распространены плоские пружины, которые могут быть выполнены в виде как монослоя, так и многослойной (композитной) конструкции [3–5] (рис. 1).

Цель работы — разработка алгоритма расчета плоских композиционных пружин, работающих в условиях мартенситной неупругости.

Математическая модель сплава с эффектом памяти формы. Такие сплавы обладают рядом особенностей, в том числе способностью подвергаться большим обратимым деформациям и способностью восстанавливать первоначальную форму после термоциклирования. Эффект мартенситной неупругости проявляется в результате накопления структурной деформации, сохраняющейся в процессе разгрузки, которая, однако, может быть снята после окончания термоцикла [6] (рис. 2).

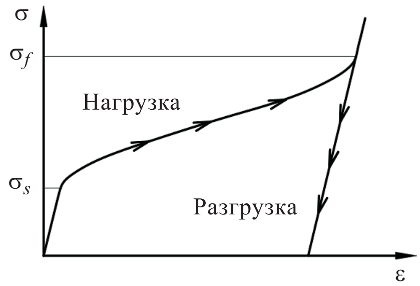

Рис. 2. Зависимость напряжения σ от структурной деформации ε: σ_S, σ_f — постоянные параметры диаграммы фазовых переходов для сплава с эффектом памяти формы

Для практических расчетов наиболее удобны феноменологические модели макроуровня, основанные на диаграмме фазовых переходов сплава [7]. В процессе исследования была применена модифицированная модель Бринсон [8, 9], в которой для описания эффекта мартенситной неупругости в качестве внутренних переменных используются объемная доля хаотического (неориентированного мартенсита) ξ_M и объемная доля ориентированного мартенсита ξ_S, связанные соотношением баланса долей:

$$\xi_S + \xi_M = 1. \qquad (1)$$

Соотношение, определяющее объемную долю ориентированного мартенсита, может быть записано в дискретной форме, что позволяет учитывать разгрузку и повторное нагружение:

$$\begin{cases} \text{При } \sigma_{k+1} > \sigma_k \\ \qquad \xi_S^{(k+1)} = \begin{cases} 0\text{, если } \sigma_{k+1} \le \sigma_S; \\ \begin{cases} F_{MS}(\sigma_{k+1})\text{, если } F_{MS}(\sigma_{k+1}) > \xi_S^{(k)} \text{ и } \sigma_S < \sigma_{k+1} < \sigma_f; \\ \xi_S^{(k)}\text{, если } F_{MS}(\sigma_{k+1}) \le \xi_S^{(k)} \text{ и } \sigma_S < \sigma_{k+1} < \sigma_f; \end{cases} \\ 1\text{, если } \sigma_{k+1} \ge \sigma_f. \end{cases} \\ \text{При } \sigma_{k+1} \le \sigma_k \\ \qquad \xi_S^{(k+1)} = \xi_S^{(k)}, \end{cases} \tag{2}$$

где $\xi_S^{(k+1)}$, $\xi_S^{(k)}$ — объемные доли ориентированного мартенсита на текущем и предыдущем шаге соответственно; σ_{k+1}, σ_k — напряжения на текущем и предыдущем шаге соответственно; $F_{MS}(\sigma)$ — функция, аппроксимирующая фазовый переход:

$$F_{MS}(\sigma) = \frac{1}{2}\cos\left[\pi\frac{\sigma - \sigma_f}{\sigma_S - \sigma_f}\right] + \frac{1}{2}. \tag{3}$$

Для деформаций предполагается справедливым аддитивное разложение на упругую и неупругую составляющие:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_L \xi_S = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_L \xi_S, \tag{4}$$

где ε_L — механическая характеристика материала, представляющая собой максимальную деформацию, возникающую в результате полного перехода мартенсита из хаотического состояния в ориентированное; E — модуль упругости.

Момент памяти формы. Для учета эффекта ориентации мартенсита вводится дополнительный внутренний силовой фактор: момент памяти формы при изгибе [9]. Он приводит к тем же изменениям кривизны осевой линии плоской пружины, что и дополнительные деформации, вызванные ориентацией мартенсита:

$$M_{\text{изг}}^{SMA} = \int_A E\varepsilon_L \xi_S(y)\, y\, dA; \tag{5}$$

$$\Delta æ = \frac{M_{\text{изг}} + M_{\text{изг}}^{SMA}}{EI_{\text{изг}}}, \tag{6}$$

где $M_{\text{изг}}^{SMA}$ — момент памяти формы в сечении; $\Delta æ$ — изменение кривизны осевой линии; $M_{\text{изг}}$ — изгибающий момент в сечении;