

РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ЦИЛИНДРА И ПЛАСТИНЫ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

А.С. Кухарева

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: kukhareva_as@mail.ru

Аннотация. Решены полностью связанные термомеханические краевые задачи для цилиндра и пластины из сплава с памятью формы, нагруженных внешней силой и охлаждаемых или нагреваемых с поверхности. Свойства материала описываются с помощью микроструктурной модели. Показано, что даже при малой скорости охлаждения, поля температур, напряжений и распределение объемной доли мартенсита по ширине образца неоднородны. Отмечается, что величина эффекта пластичности превращения уменьшается при увеличении скорости охлаждения.

1. Введение

Сплавы с памятью формы (СПФ) способны накапливать или возвращать значительные неупругие деформации при различных термосиловых воздействиях. Благодаря необычному деформационному поведению они находят широкое применение в различных отраслях техники и медицины. Из СПФ изготавливают термочувствительные и исполнительные элементы в термомеханических соединениях, прессах, мартенситных двигателях, приводах, предохранительных и регулирующих устройствах. Для решения широкого круга технических проблем необходимо разработать методы расчета напряженно-деформированного состояния в телах из СПФ различных форм и размеров.

Основной особенностью материалов с памятью формы является то, что в них происходят термоупругие мартенситные превращения, которые могут инициироваться как изменением температуры, так и изменением напряжения. Многие физические и механические свойства существенно меняются в результате мартенситного перехода. Кроме того, мартенситные превращения сопровождаются выделением или поглощением тепла. Задача расчета деформаций и напряжений тесно связана с задачей нахождения поля температур. Все эти обстоятельства сильно осложняют решение краевых задач для тел из СПФ. Классические методы инженерной механики не применимы для расчетов сложных режимов функционирования элементов из СПФ, поскольку напряженно-деформированное состояние в каждой точке тела в каждый момент времени определяется не только краевыми и начальными условиями, но и всей историей термосилового нагружения. Очень важно учитывать, что вариации температуры и напряжения могут вызывать изменение неупругой деформации и структурно-фазового состояния, что в свою очередь влечет за собой изменение напряжения и температуры.

В настоящее время получен ряд решений краевых задач для тел простой формы из СПФ [1-3], в которых задачи механики и теплопроводности решаются в постановке с

деформаций и тепловыделения при известных напряжениях и изменении температуры. Решение проводилось по шагам, на каждом из которых задавались приращения внешних воздействий и времени. Рассчитывались изменения температур и напряжений, затем находились изменение неупругих деформаций и тепловыделение. Производился пересчет температур и напряжений с учетом новых данных. Итерации повторялись, пока не выполнялось условие окончания итерационного процесса, означающее, что конечные значения изменений температуры, напряжения, неупругих деформаций и тепловыделения найдены с заданной точностью. Для решения задачи о нахождении поля температур при известном источнике тепла применяли метод сеток с неявной схемой. Для описания свойств СПФ использовалась микроструктурная модель [4], учитывающая его строение и основные физические закономерности развития фазовой и пластической деформации.

В расчетах в качестве модельного рассматривали материал со следующими характеристиками, типичными для никелида титана: характеристические температуры $A_f = 365$ К, $A_s = 350$ К, $M_s = 315$ К, $M_f = 300$ К; модуль Юнга $E = 78$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0.33$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 10$ Вт \cdot (м \cdot К) $^{-1}$; удельная теплота превращения $q_0 = -150$ МДж \cdot м $^{-3}$; плотность $\rho = 6.5 \cdot 10^3$ кг \cdot м $^{-3}$; удельная теплоемкость $c = 4.7 \cdot 10^2$ Дж \cdot кг $^{-1}$ \cdot К $^{-1}$; коэффициенты теплового расширения аустенита и мартенсита $\alpha_A = 14 \cdot 10^{-6}$ К $^{-1}$, $\alpha_M = 6 \cdot 10^{-6}$ К $^{-1}$; коэффициент теплообмена со средой $H = 10^4$ Вт \cdot м $^{-2}$ \cdot К $^{-1}$. Точность расчета деформации 10^{-8} , тепловыделения – 10^3 Дж/м 3 с.

3. Результаты численного моделирования

Разработанный алгоритм численного решения связанной термомеханической задачи был применен для расчета напряженно-деформированного состояния в цилиндре и пластине из СПФ (Рис. 1).

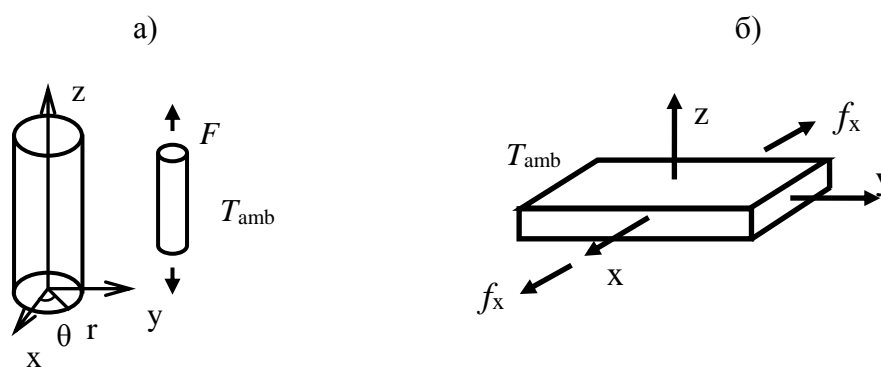


Рис. 1. Схема нагружения цилиндра и пластины.

Рассматривали цилиндр радиусом 10 мм и пластину толщиной 20 мм, моделировали нагружение продольной растягивающей силой в направлении оси Oz для цилиндра и Ox для пластины, соответствующей начальному напряжению 100 МПа, при температуре 350 К (аустенитное состояние) и последующее охлаждение через интервал прямого мартенситного превращения при постоянной силе. Для исследования влияния скорости изменения температуры окружающей среды на величину эффекта пластичности превращения при охлаждении задавали изменение температуры окружающей среды от 350 К до 290 К с различными скоростями: 0.01, 0.25, 0.5, 1, 2, 5, 10 и 100 К/с, и выдержку при 290 К до выравнивания температуры по толщине пластины. Следили за накоплением деформации в направлении действия силы и изменением распределений по толщине температуры, объемной доли мартенсита и напряжений.

Результаты вычислений показали, что даже при малой скорости изменения температуры окружающей среды наблюдается неоднородное распределение температур по сечению образца (Рис. 2), что приводит к неоднородному распределению объемной доли мартенсита, напряжений и деформаций. Вследствие чего, величина эффекта пластичности превращения уменьшается при увеличении скорости охлаждения (Рис. 3).

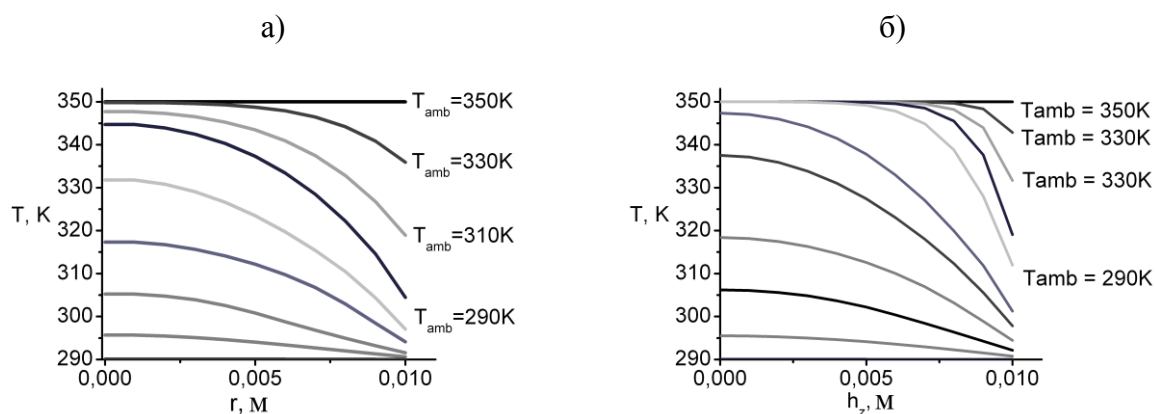


Рис. 2. Распределение температур по радиусу цилиндра (а) и толщине пластины (б) при охлаждении со скоростью изменения температуры окружающей среды -10 К/с. Справа указана температура окружающей среды.

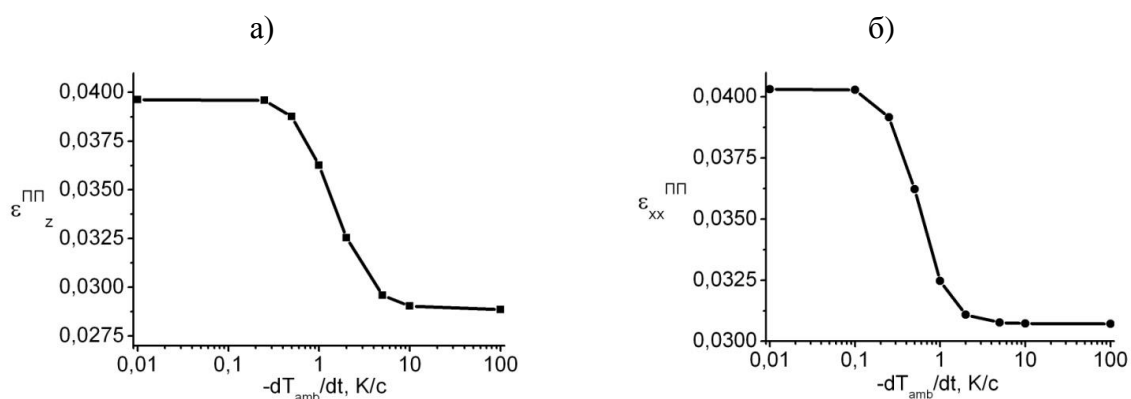


Рис. 3. Зависимость величины эффекта пластичности превращения ($\epsilon^{\text{ПП}}$) от скорости охлаждения для цилиндра (а) и пластины (б).

Литература

- [1] Ю.Б. Какулия, А.М. Шарыгин // *Журнал функциональных материалов* **8** (2007) 303.
- [2] Р.Х. Орлов, Н.П. Тютюнников // *Механика композиционных материалов и конструкций* **13(1)** (2007) 131.
- [3] V.A. Likhachev, A.I. Razov, A.E. Volkov, In: *Proceedings of the Second International Conference on SMST* (1997), p.335.
- [4] А.Е. Волков // *Известия Академии Наук. Серия физическая* **66(9)** (2002) 1290.

THE SOLUTION OF BOUNDARY PROBLEMS FOR SHAPE MEMORY ALLOY CYLINDER AND PLATE

A.S. Kukhareva

Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

e-mail: kukhareva_as@mail.ru

Abstract. A connected thermomechanical boundary problems for TiNi cylinder and plate, loaded by an external force and subjected to cooling or heating from the surface, has been solved. The constitutive relations are given by the microstructural model. Even for a low cooling rate, the temperature, stress, and martensite volume fraction are inhomogeneous, and the transformation-induced strain in the force direction decreases with an increase in the temperature rate.

References

- [1] Yu.B. Kakulia, A.M. Sharygin // *Journal of Functional Materials* **8** (2007) 303. (In Russian).
- [2] R.H. Orlov, N.P. Tyutyunnikov // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii* **13(1)** (2007) 131.
- [3] V.A. Likhachev, A.I. Razov, A.E. Volkov, In: *Proceedings of the Second International Conference on SMST* (1997), p.335.
- [4] A.E. Volkov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **66(9)** (2002) 1290.