

- [6] Горшков В.А., Климов А.И. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 1893-1898.
- [7] Петвиашвили В.И., Похотелов О.А. Уединенные волны в плазме и атмосфере. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [8] Gloersen P. // Phys. Fluids. 1960. Vol. 3. N 6. P. 857-870.
- [9] Neumann H.D. // Phys. Fluids. 1960. Vol. 3. N 3. P. 545-548.
- [10] Ершов А.П., Клишин С.В., Кузовников С.В. и др. // ТВТ. 1990. № 2. С. 1041-1044.
- [11] Теслякин С.Ф. Кинетические и газодинамические процессы в неравновесных средах / Под ред. Прохорова. М., 1986. С. 99.
- [12] Pinegre M. // These. Univ. de Rouen, 1976.
- [13] Заварин Д.Г. Дис. Л., 1987.
- [14] Мукин В.А., Осипов А.И., Рязин А.П., Уваров А.В. // Хим. физ. 1994. Т. 12. № 3. С. 380-382.

01;05

Журнал технической физики, т. 66, в. 11, 1996

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ И УСТРОЙСТВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

© Ф.Трошу, В.Браиловский, Кян Яоян, П.Террьо, М.-А.Менье

Mechanical Engineering Department, Ecole Polytechnique of Montreal  
Montreal (Quebec), Canada

(Поступило в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

Поскольку процесс проектирования приборов всегда итеративен, то становится невозможным создавать сравнительно сложные устройства методом проб и ошибок. Чтобы обеспечить конкурентоспособность, все более необходимым становится использование специальных проектных методов для ускорения цикла создания прибора. При применении сплавов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ), недостаток соответствующего математического обеспечения является одной из причин, объясняющих, почему так мало коммерческих приложений реализовано вопреки большому числу существующих изобретений, связанных с неординарными свойствами сплавов с эффектом памяти формы.

Основная цель нашего исследования заключается в установлении связи между изготовлением, конструированием и промышленным внедрением сплавов с эффектом памяти формы (рис. 1). Основное внимание сосредоточено на разработке аналитических методов для сплавов с памятью формы, учитывающих температурную зависимость свойств и гистерезис материала. Моделирование зависимости напряжение-деформация при любой температуре выполняется с помощью билинейной зависимости, или кригинга, новой интерполяционной техники, включающей линейные конечные элементы и сплайны, как частный случай. Поведение деталей из сплавов с эффектом памяти формы анализируется с помощью конечных элементов. Параллельно с этим общим подходом были развиты методы проектирования для моделирования поведения простых деталей, таких как прямые проволоочки, спирали и пружины Belleville и осесимметричные разъемы. Другая сторона этого исследования состоит в интеграции влияния микроструктуры и



Рис. 1. Процесс проектирования устройств из сплавов с эффектом памяти формы.

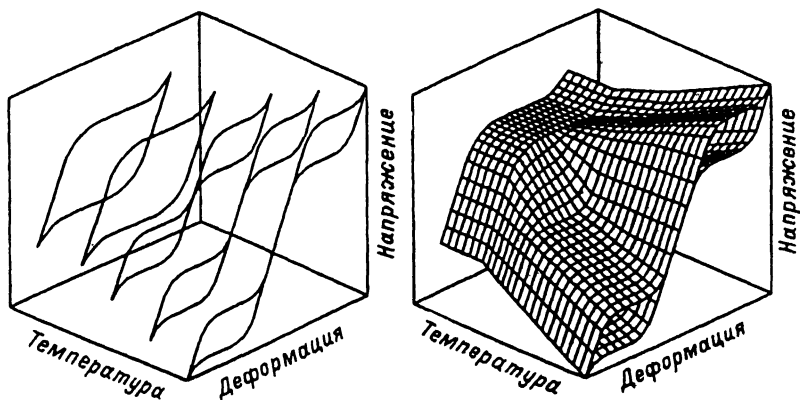


Рис. 2. Поверхности нагружения и разгрузки, полученные методом кригинга из экспериментальных результатов (LIBK AMF).

термообработки на закономерности поведения материала. Также исследуются динамическое поведение и характеристики затухания сплавов с эффектом памяти формы.

Этот подход включает три стадии: экспериментальное описание материала, числовую интерпретацию экспериментальных результатов кригингом и конечноэлементное моделирование деталей из сплавов с эффектом памяти формы с помощью ранее полученных реологических моделей как закономерностей материала.

Экспериментальное описание производится одноосным растяжением (сжатием) для получения закона поведения материала и методом

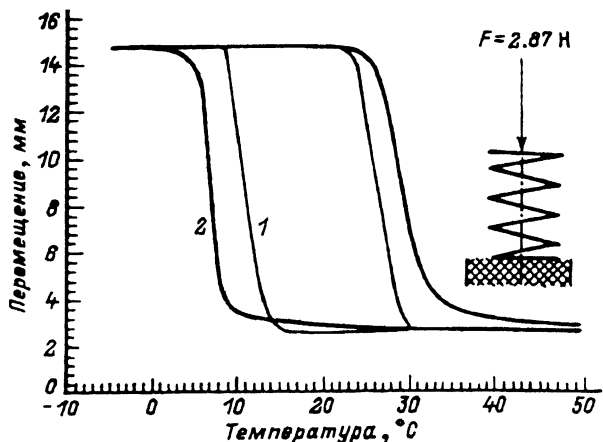
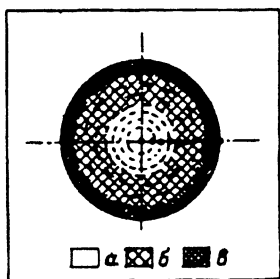


Рис. 3. Зависимости перемещения от температуры для спиральной пружины при постоянной нагрузке (SPRING AMF), полученные расчетом (1) и экспериментально (2).

а — аустенит, б — аустенит+мартенсит, в — мартенсит.

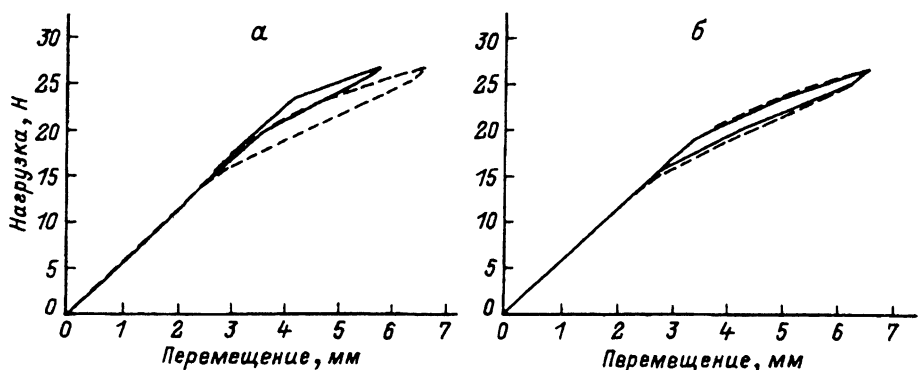


Рис. 4. Зависимость сила-перемещение для балки при трехточечном изгибе. а — 4-элементное моделирование, б — 12-элементное моделирование (SIM AMF); пунктир — испытания Y. Gillet.

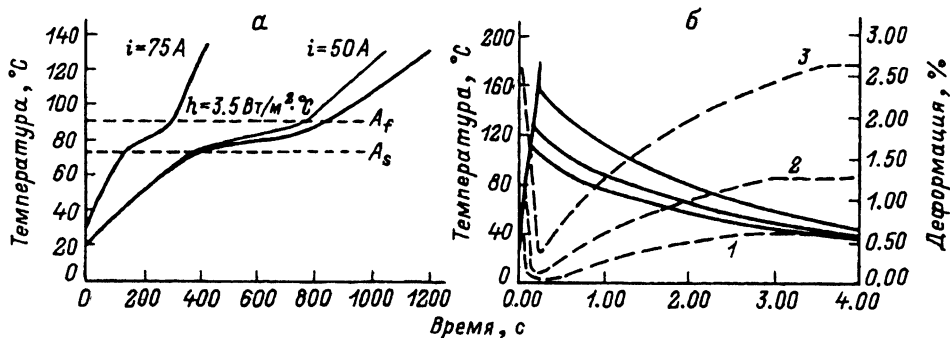


Рис. 5. Временные зависимости для сплавов TiNi (а) и Cu-Al-Be (б) при нагреве прямой проволоки электротоком.

Сплошные кривые — температура-время, штриховые кривые — деформация-время. Напряжение, МПа: 1 — 60, 2 — 120, 3 — 240.

дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для определения температур превращения.

Числовая интерполяция двойным кригингом (LIBK AMF) позволяет получить поверхности нагружения и разгрузки, включая траектории субпетель в трехмерном пространстве напряжение-деформация-температура (рис. 2). Эта модель может быть использована для моделирования как сверхупругости и резиноподобного поведения сплавов с эффектом памяти формы, так и однократного и обратимого под напряжением эффектов памяти формы. Заметим, что интерполяционное пространство можно сконструировать также с помощью уравнений, основанных на различных микро- и макромеханических теориях. Плоская (линеализированная) версия модели поведения используется для расчета спиральных пружин (SPRING AMF). В этой программе поперечное сечение кольца пружины разделяется на цилиндрические элементы для моделирования совместного существования превращенных и упругих зон в сечении проволоки (рис. 3).

Моделирование методом конечных элементов с помощью модуля SIM AMF позволяет вычислить общую термомеханическую реакцию сплава с эффектом памяти формы. Оно основано на упругопластическом анализе, учитывает геометрическую и материальную нелинейности и было успешно использовано для некоторых случаев использования сверхупругости (рис. 4 для трехточечного изгиба балки).

Моделирование методом конечных элементов с помощью модуля HEAT AMF работает в области время-температура и может быть использовано для оценки временных характеристик приводов из сплавов с эффектом памяти формы. Эта модель позволяет объединить влияние внешних и внутренних источников (стоков) тепла (электроток, фазовое превращение, тепловой обмен с окружающей средой) при расчете времен срабатывания и повторного взведения приводов (рис. 5, а). Следующая стадия будет заключаться в объединении упругопластичности с передачей тепла. До сих пор эта процедура использовалась для линейного привода и позволяла получить полный термомеханический отклик: температура, времена срабатывания и повторного взведения, генерируемая сила и перемещение (рис. 5, б).

### Заключение

Принципиальные направления этого исследования таковы: распространение одномерной модели на общий трехмерный случай, основанное на объединении микроструктурного и феноменологического подходов; объединение упругопластичности с передачей тепла для общего анализа с использованием конечных элементов; создание базы данных для усталостного поведения материалов с памятью формы; развитие динамических закономерностей при демпфировании (DYN AMF).

Мы благодарим доктора Y. Gillet из университета в г. Мэтц за сотрудничество в создании программы для линейного привода во время его остановки в Монреале после защиты диссертации.