

# РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Жаворонок С.И.<sup>1</sup> к.ф.-м.н., Нуштаев Д.В.<sup>2</sup>

1)Московский авиационный институт, Москва, Россия;

2)ООО «ТЕСИС», Москва, Россия.

В связи с расширением области практического применения сплавов с памятью формы (СПФ) и созданием изделий сложной геометрической формы возникает потребность в конечно-элементном моделировании процессов фазово-структурных переходов, протекающих в СПФ. Вследствие сложности математического описания поведения СПФ при фазово-структурных переходах в коммерческих конечно-элементных пакетах модели деформирования СПФ либо отсутствуют, либо описывают только некоторые явления.

В программном комплексе [SIMULIA Abaqus](#) реализована модель Ауричио [4], описывающая сверхупругое поведение СПФ. Для тестирования выбрана максимально простая геометрическая модель (рис. 1).

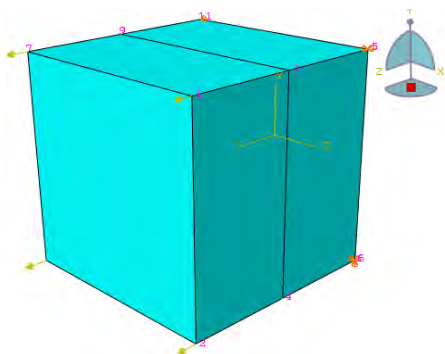


Рис. 1: Нагрузка и ГУ модели

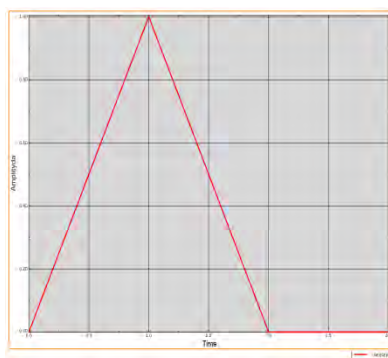


Рис. 2: Амплитуда действия нагрузки

Граничные условия – кинематические (рис. 1):

1. На узлы 5, 6, 11, 12 накладываются ограничения по перемещениям в направлении оси Oz.
2. На узел 6 накладывается ограничение по перемещениям в направлении осей Ox и Oy.
3. Для исключения возможности вращения модели относительно оси Oz, на узел 5 накладывается ограничение в направлении оси Ox.

Сплав Ni-Ti находится в начальном аустенитном состоянии и подвергается одноосному растяжению до полной реализации прямого превращения. Далее происходит разгрузка модели, сопровождаемая обратным превращением (рис. 2).

## Результаты тестирования модели Ауричио:

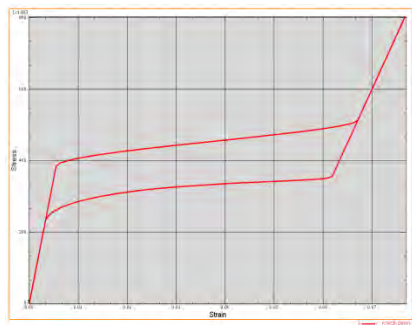


Рис. 3: Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$

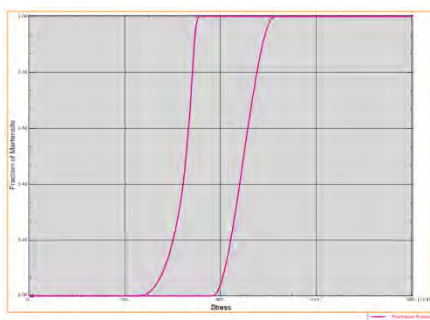


Рис. 4: Зависимость объемной доли мартенсита от напряжений

На основе анализа модели Ауричио и, полученных на ее основе, результатов численного моделирования можно сделать следующие основные выводы:

1. Характер диаграмм деформирования не противоречит физической сути процесса деформирования СПФ при постоянной температуре и механическом нагружении.
2. Модель позволяет производить неупругое (пластическое) деформирование СПФ в мартенситном состоянии.
3. Модель не позволяет производить описания температурного механизма фазовых превращений.

Модель Ауричио адекватно описывает изотермическое деформирование СПФ под действием механических напряжений (сверхупругость) и может использоваться при конечно-элементном моделировании реальных процессов при выполнении ограничений на тип нагружения.

Для расширения возможностей конечно-элементного моделирования поведения СПФ был предложен новый алгоритм решения данных задач, основанный на термомеханической модели Лагудаса [1]. Произведено компилирование данной модели, реализованной на языке FORTRAN, в основной код SIMULIA Abaqus с использованием компилятора Microsoft Visual Studio.

Получено решение ряда тестовых задач. Конечно-элементная модель с механической нагрузкой и ГУ принята в соответствии с рис. 1. Рассмотрено три расчётных случая, отличающихся величиной действующей механической нагрузки и видом температурного воздействия.

Тест №1: Моделирование сверхупругого поведения материала

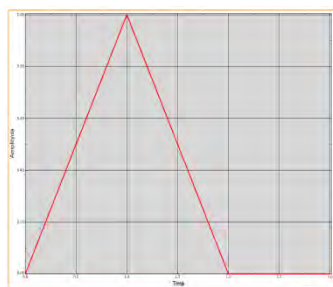


Рис. 5: Амплитуда действия нагрузки

Тест №2: Моделирование сверхупругого поведения материала при температуре  $A^{os} < T < A^{of}$  со смешанным обратным превращением

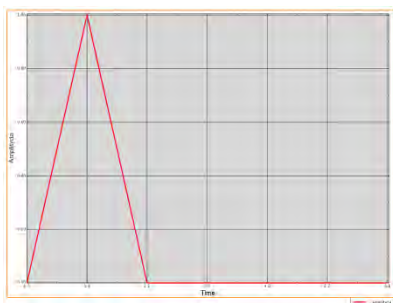


Рис. 6: Амплитуда действия нагрузки

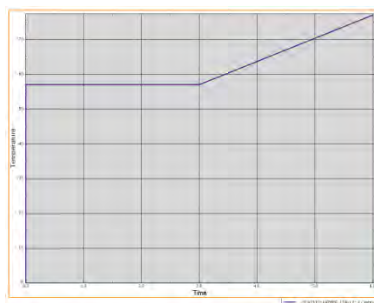


Рис. 7: Изменение температуры модели

Тест №3: Моделирование фазово-структурных переходов, обусловленных температурными воздействиями.

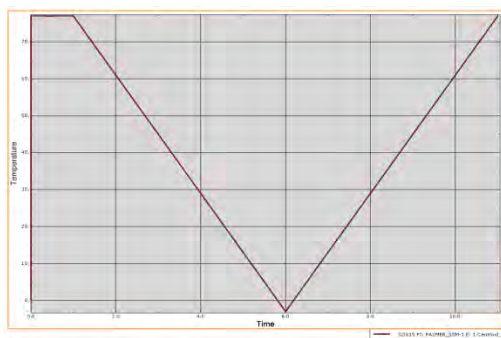


Рис. 8: Изменение температуры модели

**Результаты тестирования модели Лагудаса:**

Тест №1:

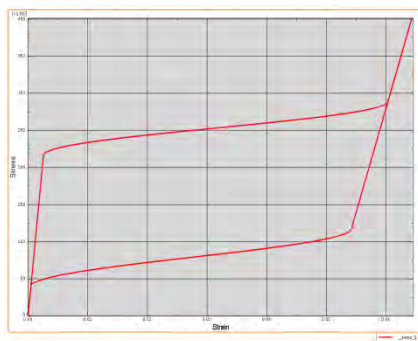


Рис. 9: Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$

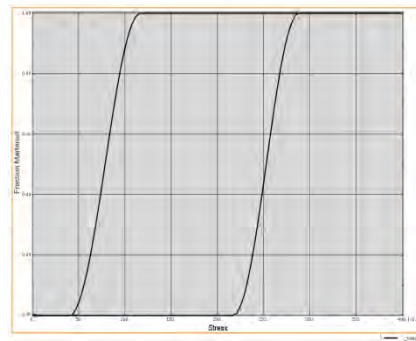


Рис. 10: Зависимость объемной доли мартенита от напряжений

## Тест №2:

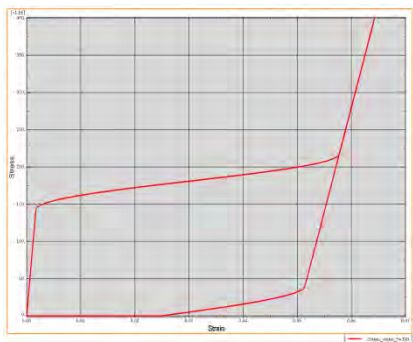


Рис. 11: Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$

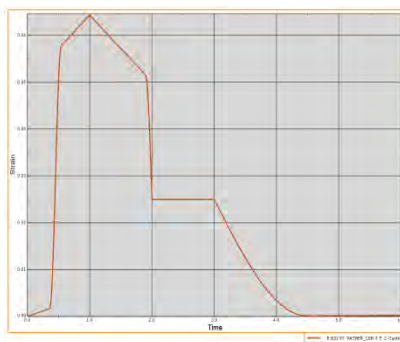


Рис. 12: Изменение значения полной деформации модели

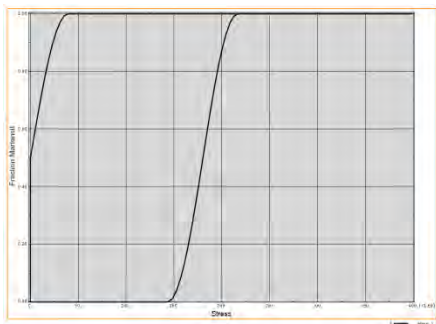


Рис. 13: Зависимость объемной доли мартенсита от напряжений

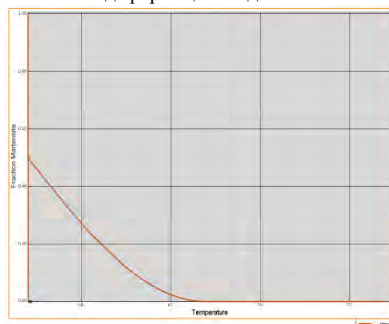


Рис. 14: Зависимость объемной доли мартенсита от температуры

## Тест №3

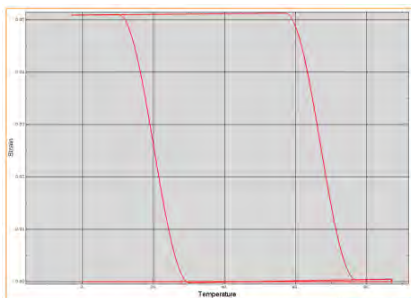


Рис. 15: Зависимость деформаций модели от температуры

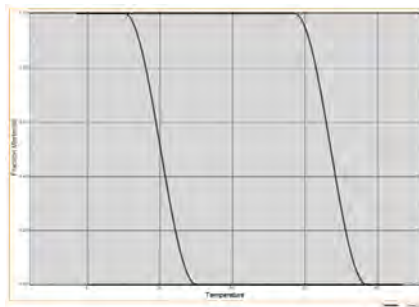


Рис. 16: Зависимость объемной доли мартенсита от температуры

Во всех случаях результаты соответствуют теоретическим представлениям о поведении СПФ при заданных температурных и силовых режимах.

Для оценки достоверности результатов проведено сравнение решений тестовых задач с имеющимися экспериментальными данными.

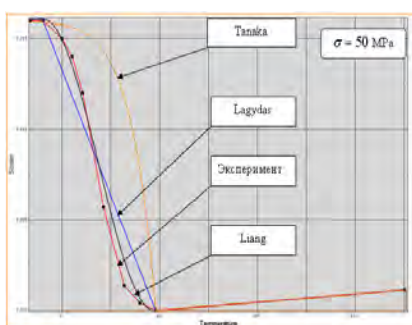


Рис. 17: Зависимость деформации от температуры

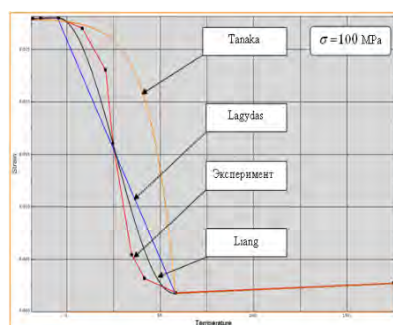


Рис. 18: Зависимость деформации от температуры

На основе сравнения функций Танака [2], Лагудаса и Лианга-Роджерса [3], аппроксимирующих диаграмму «деформация – температура» при фазовом превращении, сделан вывод о наилучшей сходимости с экспериментальными данными у аппроксимирующей функции Лианга-Роджерса.

На основе качественного анализа модели и результатов решения тестовых задач были сделаны выводы о недостатках модели Лагудаса и области ее практической применимости:

1. В модели отсутствует связь максимальной фазово-структурной деформации  $H$  от величины действующих при фазовых переходах напряжений.
2. Модель недостаточно полно описывает влияние напряжений на температуры начала и окончания фазовых превращений. Экспериментально установлено, что вклад напряжений в температуры начала и

окончания фазовых превращений различен. Следовательно, для более полного описания данного воздействия необходимо задание дополнительных констант  $K$  (по две на прямое и обратное превращение)

3. Данная модель реализована в односвязной поставке. Протекание фазовых переходов зависит от напряжений и заданного поля температур.

На основании результатов экспериментальной проверки решения тестовых задач ведутся работы по усовершенствованию полученного алгоритма с целью более достоверного описания явлений, протекающих при фазово-структурных превращениях в СПФ.

Список использованной литературы:

1. Boyd J.G., Lagoudas D.C. Thermomechanical constitutive model for shape memory materials. Part I: The monolithic shape memory alloy // Intern. Journ. Of Plasticity. 1996. Vol. 12. N 6. P. 805–842.
2. Tanaka K.A. Thermomechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior // Res Mechanica. 1986. Vol. 18. P. 251–263.
3. Liang C.A., Rogers C.A. One dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1990. V. 1. N. 2. P. 207–234.
4. Auricchio F., Taylor R.L. "Shape-memory alloys: modeling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior". Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engrng. 1996; 143: 175-194