

А.Д. Петров, Днепр  
К.Э. Демичев, Киев  
П.А. Стеблянко, Каменское  
Ю.А. Черняков, Днепр

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТА МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ И ПСЕВДОУПРУГОСТЬЮ

**Abstract.** The work is devoted to the experimental substantiation of a variant of the model of behavior of a material with shape memory (SPF). In this model, it is possible to quantify complex interactions between stresses, temperature, deformation, and loading rate of the SPF material, which will be suitable for modeling the continual level.

**Актуальность.** Сплавы обладающие памятью формы (СПФ) представляют собой группу сплавов обладающих способностью восстанавливать прежнюю форму даже после довольно больших деформаций. Если при низких температурах СПФ деформируется пластически, то при этом деформация может быть восстановлена с помощью сравнительно незначительного увеличения температуры. Механизмом этого восстановления является преобразование из мартенситной фазы в изначальную аустенитную фазу.

Эти характеристики делают СПФ удобными для использования в «интеллектуальных» конструкциях и устройствах или в качестве составных частей в некоторых передовых композиционных материалах. Сплав NiTi лидирует в большинстве этих применений из-за его превосходной памяти и структурных свойств.

Первые СПФ были разработаны в середине прошлого века, однако строгих и надежных определяющих моделей континуального уровня, необходимого для инженерных применений материалов пока не существует. Связь между микроскопическим и макроскопическим поведением очень сложна и до сих пор не разработана до степени, требуемой такими моделями. Отчасти это связано с довольно сильной зависимостью механической реакции на температуру, скорость нагружения, диапазон деформации, геометрию образца, термомеханическую историю, природу окружающей среды, а также взаимодействия между самими этими параметрами. Различные примеры такого моделирования приведены, например, в работах [6, 7]. Такие сплавы как NiTi, CuZnAl, CuAlNi, AuCd и другие могут восстанавливать деформации до 3% .

Характерной чертой диаграммы материала СПФ при активном нагружении является участок идеальной пластичности. Аналогичные участки имеют место и при разгрузке, но при определенных температурах.

При создании рабочей модели поведения материалов обладающих СПФ мы использовали идею, доказанную в работе [1], следующего содержания. В **идеальной** упругопластической среде в случае гладких и кусочно-гладких поверхностей текучести могут существовать **нестационарные** поверхности разрыва скоростей перемещений  $\Sigma$ . На этих поверхностях напряжения непрерывны, претерпевают разрыв компоненты пластической деформации. Компоненты скоростей перемещений, нормальные к поверхностям  $\Sigma$ , непрерывны, сама поверхность  $\Sigma$  совпадает с поверхностью максимальной скорости пластического сдвига. При этом отмечается, что такие поверхности разрыва могут существовать только при условии, когда напряженное состояние сводится к условию пластичности максимального касательного напряжения. Стационарные поверхности разрыва скоростей перемещений  $\Sigma$  в идеальных упруго-пластических телах существовать не могут, если исключить возможность возникновения трещин, нарушение сплошности среды.

В работах [2, 3] решен ряд нестационарных задач механики деформируемого твердого тела, где применялись физические соотношения, позволяющие описывать простые и близкие к простым процессы деформирования и процессы деформирования по траекториям малой кривизны. Здесь использовались соотношения теории процессов малой кривизны при неизотермических процессах деформирования элемента тела [5] и вариант метода расщепления [4, 8]. Двухмерные сплайны применялись в рамках этого метода в работах [2, 8] для аппроксимации неизвестных величин и их частных производных по координатам (схема расщепления Писмана, Рэчфорда, Дугласа). Отметим, что в двумерных нестационарных задачах данного класса их можно использовать, непосредственно в рамках конечно-разностного метода не прибегая к расщеплению по геометрическим параметрам.

**Постановка нестационарной задачи теории термоупруго-пластичности для материала СПФ.** Основной задачей нестационарной теории термоупругопластичности материалов СПФ является определение перемещений (скоростей перемещений) и компонент тензоров напряжений и деформаций, возникающих в теле в процессе его нагружении, когда некоторые элементы тела работают за пределом упругости материала. Процесс нагружения будем рассматривать развивающимся во времени, что может вызвать движение отдельных частей тела.

Пусть первоначально изотропное и однородное тело  $V$ , ограниченное поверхностью  $S$ , в начальный момент времени  $t=0$  находится в естественном ненапряженном состоянии, где  $\alpha^i$  – оси произвольной ортогональной системы координат,  $i = 1, 2, 3$ . Затем тело подвергается нагружению внешними силами и нагреву. Это могут быть объемные силы  $\vec{K}(\alpha^i, t)$ , действующие на каждый элемент тела, и поверхностные силы  $\vec{\Sigma}_n(\alpha^i, t)$ , действующие на части поверхности тела  $S_{\Sigma}$ . На другой части поверхности тела  $S_v$ , которая может быть определенным образом закреплена, задаются скорости перемещений

$\vec{V}(\alpha^i, t)$ . Конфигурация тела задается уравнением поверхности  $\Phi(\alpha^i) = 0$ , которая ограничивает его.

Исходя из перечисленных данных, необходимо определить температурное поле, составляющие вектора скорости перемещений, компоненты тензора напряжений и компоненты тензора деформаций. Для этого необходимо воспользоваться уравнениями движения, геометрическими, физическими уравнениями и уравнением теплопроводности.

При решении нестационарной задачи теории пластичности в тех частях тела, где возникают необратимые деформации, будем пользоваться определяющими уравнениями, описывающими соответствующие процессы деформирования.

Механические характеристики материала при исследовании процессов деформирования задаются в виде мгновенных диаграмм растяжения образцов, которые получены при различных значениях температуры. Отметим, что особенностью для локальной диаграммы материала СПФ является наличие участка с отрицательным углом наклона. При достижении такой точки диаграммы в соответствующей материальной точке тела происходит в некотором смысле потеря устойчивости, конечным результатом которой будет быстрый перескок в новое устойчивое положение. Это приводит к тому, что в данной материальной точке тела скачкообразно изменяется деформация (появляется составляющая пластической деформации). Далее аналогичный процесс происходит в соседней точке тела, в которой еще не было пластической деформации и т. д. В результате диаграмма материала для всего образца имеет ярко выраженный участок с постоянным значением напряжения (идеальная пластичность).

#### **Локальная диаграмма материала обладающего памятью формы.**

Механические характеристики материала при исследовании процессов деформирования задаются в виде диаграмм растяжения образцов, полученных при разных значениях температуры [6, 7]. Локальная диаграмма материала при активном нагружении – OACB и BDFO при разгрузке (рис.1). Предполагалось, что точки B, C, D расположены на одной прямой и наклон этой прямой совпадает с наклоном первого участка диаграммы OA.

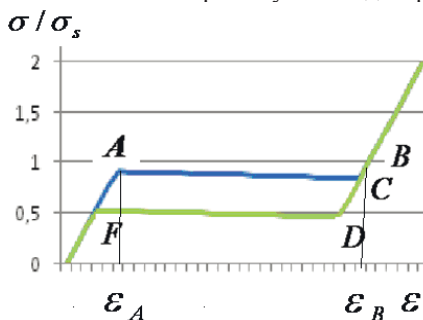


Рис. 1. Локальная диаграмма материала

Обработка экспериментальных результатов позволила построить таблицы и диаграммы для различных значений температуры (соответственно 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 0 градусов Цельсия). Результаты сравнения с экспериментальными данными представлены ниже в виде таблиц и построенным по ним диаграмм (рис. 1-6). Напряжения даны в безразмерном виде  $\sigma/\sigma_s$ . Верхние линии ( $\sigma+>$ ) соответствуют активному нагружению образца, а нижние ( $\sigma-<$ ) – разгрузке.

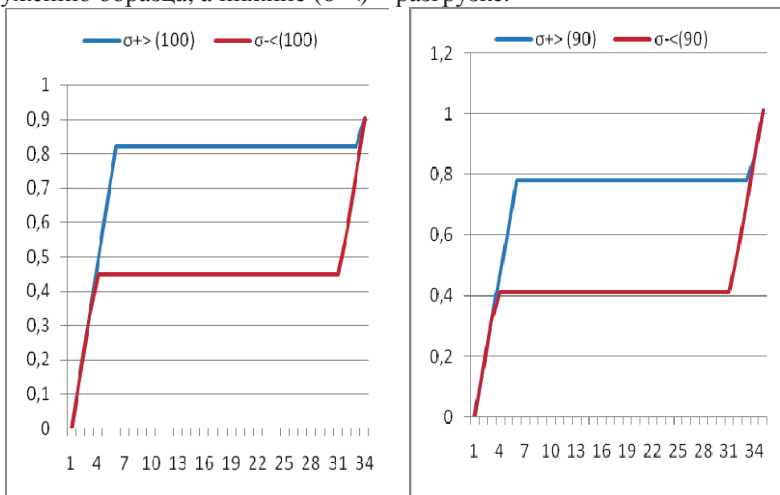


Рис. 2. Локальная диаграмма материала ( $100^{\circ}C, 90^{\circ}C$ )

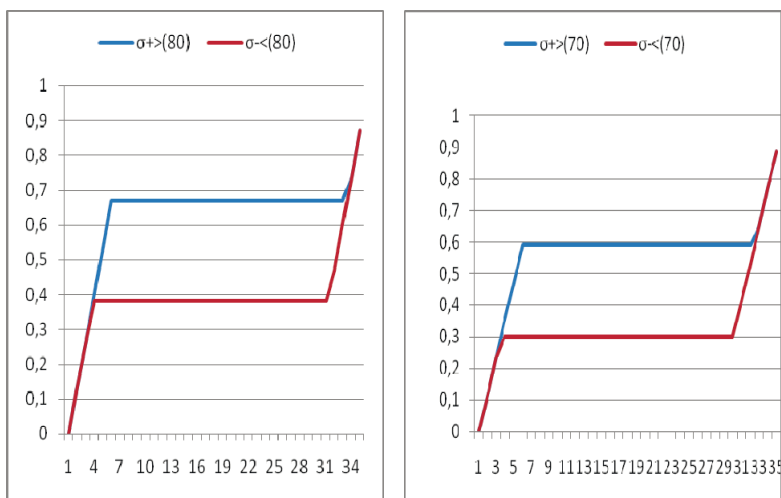


Рис. 3. Локальная диаграмма материала ( $80^{\circ}C, 70^{\circ}C$ )

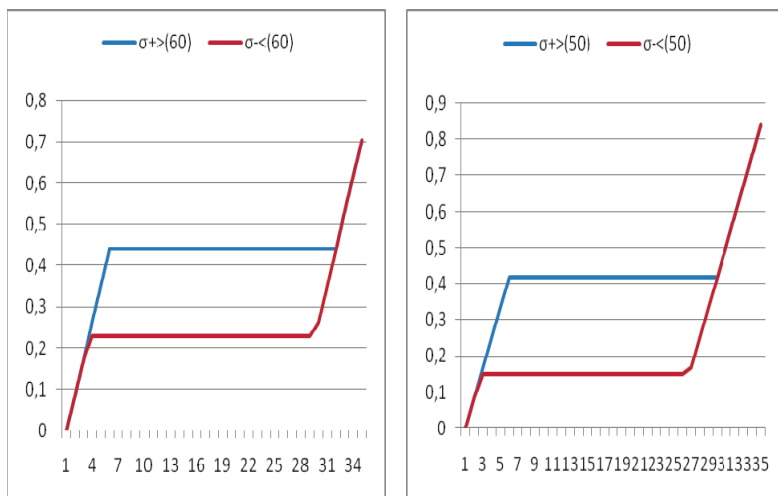


Рис. 4. Локальная диаграмма материала ( $60^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}$ )

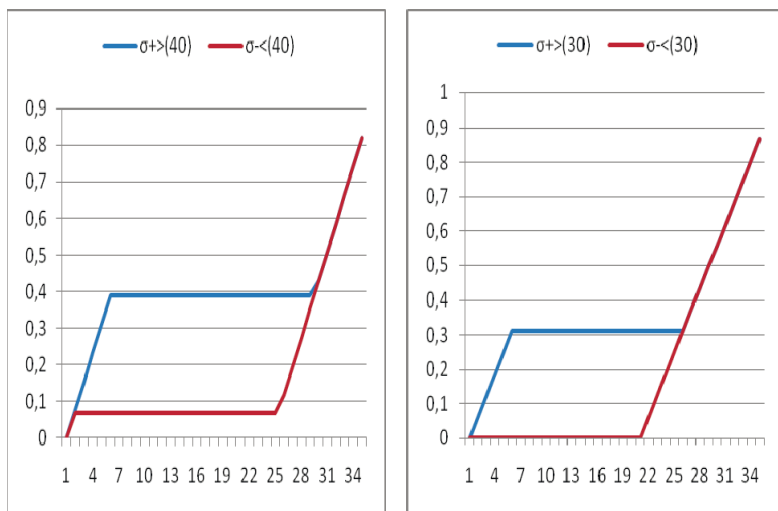


Рис. 5. Локальная диаграмма материала ( $40^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C}$ )

**Выводы.** Проведено экспериментальное обоснование варианта модели поведения материала с памятью формы (СПФ). В этой модели заложена возможность количественной оценки сложных взаимодействий между напряжениями, температурой, деформацией и скоростью нагружения материала СПФ, которые будут пригодны и для моделирования континуального уровня.

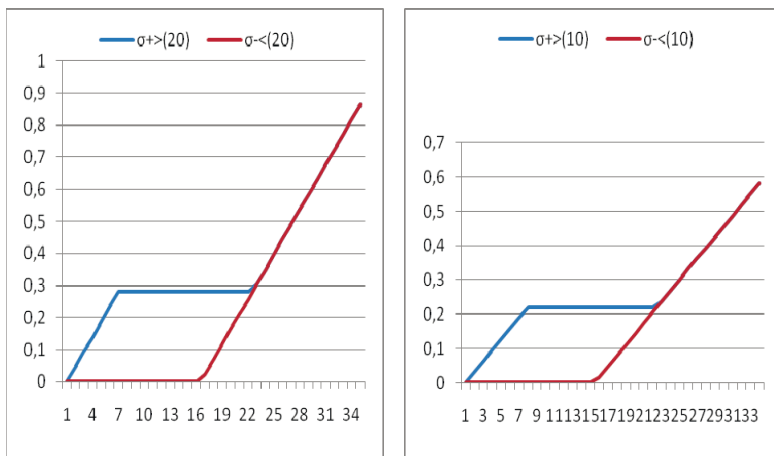


Рис. 6. Локальная диаграмма материала ( $20^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ )

1. *Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И.* Теория упрочняющегося пластического тела. – Москва: Наука, 1971. – 232 с.
2. *Дьомичев К.Е., Стеблянко П.О., Черняков Ю.А., Петров О.Д.* Математичне моделювання термомеханічних процесів у пружно-пластичних циліндричних тілах. – Київ: Міністерство освіти і науки України. – Вид-во Київського міжнародного університету, 2017. – 169 с.
3. *Петров О.Д., Черняков Ю.А.* Термо-напружено-деформований стан стрижня з неоднорідного матеріалу при наявності фазових перетворень // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – Випуск 1(26) : додаток. – Дніпродзержинськ, 2015. – С.26-36.
4. *Шевченко Ю.Н., Стеблянко П.О., Петров А.* Численные методы в нестационарных задачах теории термопластичности // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наукових праць. – Випуск 22. – Дніпропетровськ, 2014. – С.250-264.
5. *Шевченко Ю.Н., Савченко В.Г.* Пространственные задачи термовязкопластичности: фокус на украинские исследования (обзор) . // Прикл.мех.– 2016.– 52, №3.– С.3-70.
6. *Shaw, J. A., Kyriakides, S.* Thermomechanical aspects of NiTi. J. Mechanics and Physics of Solids 43, 1995. – p.1243-1281.
7. *Shaw, J. A. and Kyriakides, S.* On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy. Acta Materialia 45, 1997. – p.683-700.
8. *Steblyanko P.A., Shevchenko Yu.N.* Computational methods in stationary and non-stationary thermal-plasticity problems// Computational Methods in Stationary and Nonstationary Thermal-Plasticity. – Problems, ETS- Encyclopedia of Thermal Stresses , Shpringer Verlag, N 7, 2014. – p.630-636.

Поступила 9.10.2017р.