

На правах рукописи



Тихомирова Ксения Алексеевна

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ФАЗОВОГО И СТРУКТУРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВОВ
С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ. ОДНОМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2018

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Роговой Анатолий Алексеевич
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Мовчан Андрей Александрович
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
отдела механики адаптивных
композиционных материалов и систем
ФГБУН Институт прикладной механики
РАН, г. Москва

Кащенко Михаил Петрович
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики ФГБОУ ВО «Уральский
государственный лесотехнический
университет», г.Екатеринбург

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»

Защита состоится «**11**» **октября 2018 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1, тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИМСС УрО РАН <http://www.icmm.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, доцент



Зуев А.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интерес к исследованию сплавов с памятью формы (СПФ), возникший в середине прошлого столетия в связи с обнаружением уникальных свойств этих материалов, в последние годы все усиливается. Этот интерес объясняется тем, что макромеханические эффекты, проявляемые СПФ в связи с мартенситными превращениями, а также биосовместимость некоторых из этих сплавов обусловили их широкое применение в различных областях промышленности и в медицине.

Сразу за открытием эффекта памяти формы в никелиде титана в 50-х гг. прошлого века последовало создание первых простых феноменологических моделей, описывающих этот эффект. Множество материаловедческих работ, посвященных исследованию этого и других эффектов в СПФ на разных масштабных уровнях, сделало возможным построение фундаментальных физических теорий, позволяющих моделировать деформационное поведение СПФ в различных термосиловых режимах. Однако алгоритмическая сложность численной реализации таких теорий, а также большое число требующих экспериментального определения материальных функций и констант затрудняет их использование для решения прикладных задач. В настоящее время проблема разработки феноменологических моделей, пригодных для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций из СПФ, является одной из ключевых в данной области исследования. Число публикаций, посвященных этому вопросу, за последнее десятилетие весьма значительно и возрастает с каждым годом. Общим недостатком всех феноменологических моделей по сравнению с физическими является их неуниверсальность – неспособность описать сразу весь спектр макромеханических явлений, связанных с переходными процессами в СПФ (они обычно описывают только один или несколько конкретных эффектов). Помимо этого, такие модели часто не учитывают влияние предшествующей истории деформирования на последующие фазовые и структурные превращения, которое, как свидетельствуют экспериментальные данные, часто бывает весьма значительным. Разделение деформации ориентированного мартенсита на фазовую и структурную составляющие, используемое во всех известных феноменологических моделях, ставит под вопрос корректность учета взаимного влияния этих двух составляющих деформации. Таким образом, несмотря на то, что степень разработанности темы исследования можно оценивать как высокую, вопрос создания простых, но наиболее универсальных феноменологических моделей остается актуальным.

Целью диссертационной работы является разработка одномерной феноменологической модели для описания процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы. К модели предъявляются следующие требования:

- Универсальность – способность описать с единых позиций основные макромеханические эффекты, обусловленные фазовыми и структурными превращениями в СПФ.
- Возможность учитывать влияние истории деформирования на процессы последующих превращений.

- Возможность осуществлять единообразный учет фазовой и структурной составляющих деформации как связанных с образованием ориентированного мартенсита.

- Простота численной реализации модели и экспериментальной идентификации ее параметров.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Формулирование теоретического представления о взаимосвязи процессов фазового и структурного деформирования в СПФ на макромеханическом уровне.

2. Экспериментальная проверка адекватности сформулированного представления на примере никелида титана; установление границ применимости гипотез и экспериментальное определение материальных функций, содержащихся в нем.

3. Построение феноменологической модели фазово-структурных деформаций в СПФ на основе сформулированного теоретического представления.

4. Сопоставление разработанной модели с известными феноменологическими моделями, построенными на аналогичных принципах.

5. Апробация полученных соотношений: применение их для описания ряда макромеханических эффектов, вызванных фазовыми и структурными превращениями в СПФ; сопоставление с результатами других моделей и с литературными экспериментальными данными.

6. Демонстрация возможностей модели на примере описания эволюции напряженно-деформированного состояния в совместно деформируемом пакете стержней из СПФ.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально подтверждена гипотеза о независимости пути дальнейшего деформирования образца из СПФ от типа начальной деформации (фазовой или структурной) и установлены пределы ее применимости на примере никелида титана. Впервые экспериментально показано совпадение диаграмм доориентации для образцов с начальными фазовой и структурной деформациями. Предложен способ экспериментальной идентификации материальной функции, определяющей взаимосвязь диаграмм прямого превращения и мартенситной неупругости. Даны методические рекомендации, позволяющие исключить при построении диаграмм мартенситной неупругости и прямого превращения погрешность от пластической деформации и деформации ползучести, накапливаемых в процессе испытания.

2. Разработана одномерная феноменологическая модель для описания процессов фазового и структурного деформирования СПФ, обладающая высокой степенью универсальности и имеющая ряд достоинств по сравнению с существующими моделями: учет влияния истории деформирования на последующие превращения; единообразное описание деформации фазовых и структурных превращений без разделения ее на две составляющие, но с учетом взаимного влияния этих двух процессов.

3. Предложена классификация типов диаграмм изотермического деформирования СПФ в зависимости от температуры деформирования, основанная на анализе фазовой диаграммы. С использованием разработанной

модели выполнено теоретическое описание всех выделенных типов диаграмм деформирования.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработке феноменологической модели процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы, способной корректно описать основные макромеханические явления, обусловленные фазовыми и структурными превращениями в этих материалах, а также в разработке теоретической классификации типов диаграмм изотермического деформирования СПФ в зависимости от температуры деформирования.

Практическая значимость заключается в экспериментальном обосновании используемого моделью теоретического представления; в определении материальных функций (диаграмм прямого превращения, мартенситной неупругости и функции их взаимосвязи), полученных из экспериментов на проволочных образцах из никелида титана; в ряде рекомендаций по проведению этих экспериментов.

Методология и методы исследования основаны на использовании основных положений механики деформируемого твердого тела, методов вычислительной механики, а также стандартных методов планирования эксперимента. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Феноменологическая модель для описания процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы.
2. Экспериментальное обоснование используемого моделью теоретического представления о взаимосвязи фазовых и структурных деформаций, установление границ его применимости.
3. Численная реализация модели, ее апробация на решении ряда простых задач.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность разработанной модели подтверждается экспериментальным обоснованием содержащихся в ней предположений и гипотез, а также сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными и с результатами, полученными с помощью других аттестованных моделей. Достоверность результатов экспериментов обеспечивается выполнением измерений на нескольких образцах и последующей статистической обработкой данных, использованием методических рекомендаций, позволяющих снизить погрешность измерений, а также проведением контрольных измерений. Достоверность результатов численного расчета подтверждается практической сходимостью решения при измельчении сетки.

Модель была апробирована на решении ряда простых задач, в которых реализуются различные макромеханические эффекты в СПФ в условиях однородного одноосного напряженного состояния, а также на решении связанной термомеханической задачи о совместном деформировании пакета стержней из СПФ.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: V, VI, VII Всероссийская научная конференция «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (Москва, 2015, 2016, 2017), Международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды» памяти Л.И. Седова (Москва, 2017), XXVI Всероссийская школа–конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2017), XX Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2017), II Международная научная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы» (Санкт-Петербург, 2016). Полностью диссертация обсуждалась на научных семинарах Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. д.т.н., акад. РАН В.П. Матвеев), кафедры Механика композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (рук. д.т.н. А.Н. Аношкин), кафедры Математическое моделирование систем и процессов ПНИПУ (рук. д.ф.-м.н. П.В. Трусов).

Проведение исследований поддержано РФФИ (грант №16-31-00161-мол_а).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, включая 5 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук (в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 – в изданиях, входящих в базу Scopus).

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, в выборе методов и подходов, наиболее применимых для их достижения, в получении результатов, составивших основное содержание диссертационной работы.

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения общим объемом 157 страниц. Список литературы включает 153 наименования. Текст диссертации содержит 27 рисунков и 6 таблиц.

Во **введении** обоснованы актуальность и научная новизна, определены цели и задачи исследования, оценена теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложено краткое содержание глав работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней описаны основные макромеханические эффекты и особенности, обусловленные протеканием фазовых и структурных превращений в СПФ, и выполнен анализ литературы, посвященной моделированию деформационного поведения СПФ.

Во **второй главе** изложено теоретическое представление о взаимосвязи фазовых и структурных деформаций в СПФ, включающее предположения, введенные в работах А.А. Мовчана^{1,2}, но дополненные и по-иному сформулированные. Поскольку обе составляющие деформации связаны с образованием ориентированного мартенсита, хотя и имеют разные механизмы возникновения (при прямом фазовом переходе ориентированный мартенсит

¹ Мишустин И.В., Мовчан А.А. Известия РАН. МТТ. – 2014. – №1.

² Мовчан А.А. и др. Деформация и разрушение материалов. – 2017. – №3.

образуется из аустенитной фазы в процессе охлаждения под нагрузкой или – в некоторых случаях – возрастания напряжения, при структурном – из менее ориентированного мартенсита в результате возрастания или смены направления напряжения), важен корректный учет связи этих двух составляющих деформации и их взаимного влияния. Теоретическое представление основывается на взаимном расположении диаграмм прямого превращения F_1 и мартенситной неупругости F_2 , описывающих зависимость осевой компоненты девиатора фазово-структурной деформации e_{phst} от напряжения σ , действующего при фазовом или структурном превращении (рис. 1). Каждая точка диаграммы прямого превращения соответствует осевой компоненте девиатора фазовой деформации, накопленной в результате полного прямого превращения под действием постоянного напряжения σ ; диаграмма мартенситной неупругости иллюстрирует накопление структурной деформации при изотермическом нагружении хаотического мартенсита. Поскольку обе составляющие деформации – фазовая и структурная – связаны с образованием ориентированного мартенсита, то на графике рис. 1 они не различаются и обозначены как фазово-структурные. Обе диаграммы ограничены сверху максимальным значением деформации e_{phst}^{max} , достигаемым при наиболее ориентированной мартенситной структуре. Помимо девиаторной составляющей, фазово-структурная деформация содержит объемную компоненту ε_V , величина которой не зависит от напряжения и значительно меньше, чем e_{phst}^{max} . Вводится **Гипотеза 1** о независимости пути дальнейшего деформирования образца из СПФ от типа начальной деформации (фазовой или структурной). На рис. 1 стрелками показана реализация Гипотезы 1 в случае изотермического (структурного) деформирования: для образцов с одинаковой начальной фазово-структурной деформацией e_0 , накопленной в результате охлаждения под напряжением σ_1 (точка A, фазовый переход) и в результате деформирования хаотического мартенсита напряжением σ_2 (точка B, структурный переход), диаграммы их дальнейшего деформирования,

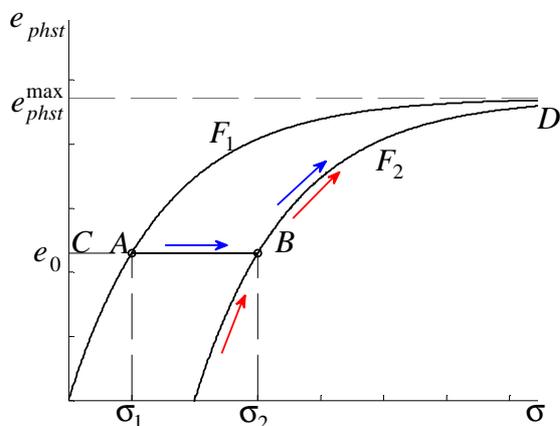


Рис. 1. Схематические диаграммы прямого превращения и мартенситной неупругости

осуществляемого в мартенситном состоянии после разгрузки, совпадают (участок кривой $CABD$). Эти диаграммы называются *диаграммами доориентации*, их совпадение объясняется *эффектом перекрестного упрочнения*², который иллюстрирует наличие непосредственной взаимосвязи между процессами фазового и структурного деформирования. При деформировании в мартенситном состоянии накопление структурной деформации в обоих образцах начинается с напряжения σ_2 ,

служащего *пределом структурного превращения* σ_s^{st} . Взаимосвязь напряжений фазового σ_1 и структурного σ_2 превращений определяется соотношением

$$\sigma_2 = \sigma_s^{st} = f(\sigma_1) = F_2^{-1}(F_1(\sigma_1)). \quad (1)$$

Таким образом, сформулированное теоретическое представление включает три материальные функции: F_1 , F_2 и функцию их взаимосвязи f , две из которых независимы, и содержит Гипотезу 1. В подтверждение данного представления, используемого далее при построении феноменологической модели, выполнено экспериментальное исследование на проволочных образцах из никелида титана. При этом ставились следующие цели: 1) проверка выполнения Гипотезы 1 в условиях как постоянной, так и изменяющейся температуры, и установление границ ее применимости; 2) определение трех материальных функций; 3) исследование эффекта перекрестного упрочнения. Для достижения поставленных целей было выполнено три серии термомеханических испытаний.

Первая серия (установочная) включала эксперименты по построению диаграмм доориентации для трех уровней напряжений σ_1 и σ_2 . Было показано совпадение таких диаграмм для образцов с начальными фазовой и структурной деформациями с точностью, определяемой шириной доверительных интервалов, во всем реализуемом диапазоне нагрузок (до 600 МПа). Этот результат, во-первых, служит подтверждением выполнения Гипотезы 1 в условиях дальнейшего структурного превращения в рассмотренном диапазоне напряжений, а во-вторых, является новым экспериментальным результатом в исследовании эффекта перекрестного упрочнения. Из условия совпадения диаграмм доориентации установлена взаимосвязь между напряжениями σ_1 и σ_2 , представляющая собой материальную функцию f (см. (1)). Такой способ непосредственного определения функции f , предложенный в настоящей работе, имеет ряд преимуществ по сравнению с известными методами: более высокая точность и возможность проведения проверочного эксперимента, состоящего в определении диаграмм F_1 и F_2 .

В рамках **второй серии** (проверочной) получены диаграммы прямого превращения F_1 и мартенситной неупругости F_2 , даны рекомендации, позволяющие увеличить точность экспериментального построения этих диаграмм. Показано наличие прогнозируемой соотношением (1) взаимосвязи между тремя материальными функциями: F_1 , F_2 и функции f , полученной из установочного эксперимента.

Третья серия экспериментов посвящена проверке выполнения Гипотезы 1 в условиях обратного фазового перехода, связанного с превращением ориентированного мартенсита в аустенит в результате нагрева. Критерием при этом служило совпадение температурных границ обратного превращения для образцов с разными типами начальной деформации. Выполнено три группы испытаний, в ходе которых образцы с начальными фазовой, структурной и фазово-структурной деформациями подвергаются обратному фазовому переходу в одинаковых условиях (нагреву под постоянной нагрузкой или с постоянной

фиксированной деформацией). Показано, что при последующем обратном превращении Гипотеза 1 может считаться выполненной с допустимой точностью только при невысоких напряжениях (до 250 МПа для фазового превращения и 350 МПа для структурного). При более высоких нагрузках необходим учет влияния внутренних напряжений, возникающих в результате структурного деформирования, на сдвиг характерных температур превращения.

Третья глава посвящена разработке одномерной феноменологической модели фазовых и структурных деформаций в СПФ. В основу модели закладывается теоретическое представление о взаимосвязи фазовых и структурных деформаций, сформулированное и экспериментально подтвержденное в главе 2. Используются следующие понятия. *Мартенситный элемент* – это совокупность равномерно распределенных по объему материала кристаллических ячеек мартенситной фазы, образование которых в ходе прямого фазового превращения произошло одновременно и сообщило объемной доле мартенсита q элементарное приращение dq . Под *деформацией мартенситного элемента* понимается приращение макроскопической фазово-структурной деформации, сообщаемое материалу в результате фазового или структурного превращения кристаллических ячеек, соответствующих этому элементу. *Степень ориентированности мартенситного элемента* – это мера сонаправленности длинных осей кристаллических ячеек в элементе с действующим внешним напряжением. Она определяет деформацию элемента, зависит от уровня напряжения, действующего в момент возникновения элемента на этапе прямого фазового перехода, и может быть увеличена в результате структурного превращения, связанного с переориентацией мартенситных ячеек.

Разрабатываемая модель содержит Утверждение и Гипотезу 1, основанные на теоретическом представлении главы 2. **Утверждение:** фазово-структурная деформация мартенситного элемента однозначно определяется его текущей степенью ориентированности и не зависит от механизма ее приобретения (фазовое или структурное превращение) и предшествующей истории изменения. **Гипотеза 1:** дальнейшее поведение мартенситного элемента под влиянием внешнего термосилового воздействия однозначно определяется его текущей степенью ориентированности и не зависит от механизма ее приобретения и предшествующей истории изменения. Экспериментальное исследование, реализованное в главе 2, подтверждает выполнение Гипотезы 1 в случае, если все элементы обладают одинаковой степенью ориентированности (*однородное фазовое деформирование*). Предполагается, что Гипотеза 1 справедлива и для случаев неоднородного фазового деформирования, примером которых может служить охлаждение в условиях изменяющейся нагрузки. Вводится также **Гипотеза 2:** при обратном фазовом превращении мартенситные элементы исчезают в порядке, противоположном порядку их возникновения. Подтверждением этой гипотезы служит экспериментально наблюдаемый и описанный в литературе факт, что мартенситные пластины, возникшие первыми при охлаждении, при нагреве исчезают последними.

При построении определяющих соотношений мартенситные элементы рассматриваются как последовательно соединенные структурные элементы модели, а общая фазово-структурная деформация системы определяется как суммарная деформация каждого из них (наглядно это показано на рис. 2, иллюстрирующем геометрическую интерпретацию модели). Пусть полностью мартенситному состоянию соответствует всего n структурных элементов, каждый из которых образовался под действием напряжения σ_1^i (i – номер элемента) при приращении объемной доли мартенсита на $\Delta q = 1/n$. Деформация каждого элемента при этом определяется диаграммой прямого превращения с добавлением

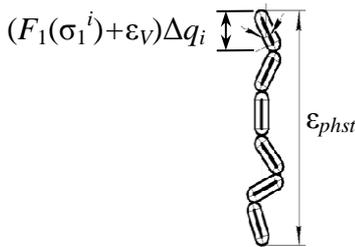


Рис. 2. Геометрическая интерпретация модели

объемной составляющей ε_V : $\Delta \varepsilon_{phst} = (F_1(\sigma_1^i) + \varepsilon_V) \Delta q$, а его предел структурного превращения – функцией f , согласно (1): $\sigma_s^{st^i} = f(\sigma_1^i)$. Если в процессе дальнейшего нагружения внешнее напряжение σ , совпадающее по знаку с σ_1^i , по абсолютной величине превысит этот предел, то произойдет переориентация элемента, и новое значение его деформации станет

равным $\Delta \varepsilon_{phst} = (F_2(\sigma) + \varepsilon_V) \Delta q = (F_1(f^{-1}(\sigma)) + \varepsilon_V) \Delta q$, то есть таким же, как если бы он был образован в результате фазового перехода при напряжении $f^{-1}(\sigma)$ без последующей переориентации. Новый предел структурного превращения элемента после переориентации принимает значение σ . Переориентация элемента может происходить неограниченное количество раз до тех пор, пока величина его деформации не достигнет максимального значения $(e_{phst}^{max} + \varepsilon_V) \Delta q$ (см. рис. 1). Устремляя число элементов n к бесконечности и переходя к интегральной сумме, получим общее выражение для фазово-структурной деформации системы:

$$\varepsilon_{phst} = \int_0^{q_0} F_1(\sigma_1(q)) dq + q_0 \varepsilon_V, \quad (2)$$

где q_0 – текущая доля мартенситной фазы. Функция $\sigma_1(q)$ называется *управляющим напряжением*, она служит аналогом степени ориентированности и определяет величину деформации и предел структурного превращения каждого элемента, соответствующего доле мартенситной фазы q . Формирование этой функции происходит на этапе прямого фазового превращения: когда объемная доля мартенсита получает приращение dq , текущему значению q ставится в соответствие действующее при этом внешнее напряжение σ , которое и является управляющим напряжением:

$$\sigma_1(q) \equiv \sigma \text{ при } dq > 0.$$

Структурное превращение учитывается путем трансформации функции $\sigma_1(q)$, что в случае сонаправленности напряжений σ и $\sigma_1(q)$ выполняется следующим образом. Если текущее напряжение σ превышает по абсолютному значению предел структурного превращения элемента, соответствующего доле

мартенситной фазы q , $|\sigma| > |\sigma_s^{st}(q)| = |f(\sigma_1(q))|$ (или, что то же, $|f^{-1}(\sigma)| > |\sigma_1(q)|$), то новое значение управляющего напряжения для этого элемента становится равным напряжению $f^{-1}(\sigma)$, эквивалентному текущему:

$$\sigma_1'(q) \equiv f^{-1}(\sigma), \text{ если } |\sigma_1(q)| < |f^{-1}(\sigma)|.$$

Штрихом здесь обозначено новое значение функции σ_1 после переориентации. Если напряжения σ и $\sigma_1(q)$ разных знаков, то новое значение управляющего напряжения предлагается определять по формуле

$$\sigma_1'(q) = \sigma + \sigma_1(q) + \sigma_{st}^{+-} \cdot \text{sign}(\sigma_1(q)),$$

где $\sigma_{st}^{+-}(q)$ – предел структурного превращения при знакопеременном нагружении. Определение σ_{st}^{+-} требует дополнительного экспериментального исследования; в частности, представленным в литературе данным эксперимента на эффект реверсивной памяти формы удовлетворяет зависимость $\sigma_{st}^{+-}(q) = |\sigma_1(q)|/4$. Асимметрия материальных функций F_1 и F_2 при растяжении и сжатии учитывается путем их масштабирования по напряжению и деформации.

Для однозначного определения функции $\sigma_1(q)$ учет истории деформирования должен начинаться от полностью аустенитного состояния материала ($q = 0$), в котором отсутствует фазово-структурная деформация. При возрастании и смене знака нагрузки следует проверять условие структурного превращения $|\sigma| > |\sigma_s^{st}(q)|$ либо $|\sigma| > \sigma_{st}^{+-}(q)$ и в случае его выполнения вычислять интеграл (2) с учетом изменившейся функции $\sigma_1(q)$. При обратном превращении с убыванием q зависимость $\sigma_1(q)$ в соотношении (2) «воспроизводится» в обратной последовательности, чем обеспечивается выполнение Гипотезы 2.

Использование функции управляющего напряжения позволяет описать случаи неоднородного фазового деформирования СПФ за счет присвоения каждому мартенситному элементу собственного предела структурного превращения и отслеживания его изменения при переориентации. Учитываемая посредством функции $\sigma_1(q)$ история деформирования не только определяет пределы структурного превращения элементов, но также влияет на процесс их обратного превращения – температуру перехода и величину восстанавливаемой деформации. Формирование функции $\sigma_1(q)$ на этапе прямого фазового перехода и ее трансформация на этапе структурного превращения позволяет не разделять деформацию в определяющем соотношении (2) на фазовую и структурную составляющие, а учитывать их единообразно.

В главе также приведены основные термодинамические соотношения, необходимые для замыкания модели. Для определения зависимости доли мартенситной фазы от температуры и напряжения используются

тригонометрические соотношения³. Смещение характерных температур фазовых переходов от действия напряжений описывается с помощью обобщенного уравнения Клаузиуса–Клапейрона:

$$T_c = T_{c0} + \frac{T_{c0}}{[Q]} \sigma [\varepsilon_{ph}]. \quad (3)$$

Здесь T_{c0} – средняя температура интервала фазового перехода (прямого или обратного) в отсутствие напряжений, σ – действующее при переходе внешнее напряжение, $[\varepsilon_{ph}]$ – полное изменение фазовой деформации при переходе, положительное для прямого и отрицательное для обратного превращения, $[Q]$ – полная теплота, выделяемая (поглощаемая) в процессе перехода.

Сформулированы алгоритмические указания для численной реализации модели. Разработана геометрическая интерпретация модели, в которой фазово-структурная деформация представляется как относительное изменение длины цепочки из последовательно соединенных мартенситных структурных элементов, каждый из которых обладает собственной ориентацией, определяемой управляющим напряжением (рис. 2). Проведено сопоставление модели с двумя аттестованными моделями для сплавов и полимеров с памятью формы, сходство с которыми позволяет считать разработанную модель их обобщением.

В четвертой главе приводятся примеры использования модели. Решен ряд простых задач, в которых реализуются различные макромеханические эффекты в СПФ в условиях однородного одноосного напряженного состояния. При решении используется суммирование упругой и фазово-структурной составляющих деформации, упругая деформация вычисляется с помощью закона Гука с учетом различия упругих модулей в мартенситном и аустенитном состояниях. Модель применена для описания эффектов монотонной и реверсивной памяти формы, прямого превращения в условиях немонотонно изменяющейся нагрузки. Для некоторых задач приведено сопоставление с результатами других моделей и с экспериментальными данными из литературы.

Для демонстрации вычислительных возможностей модели решена связанная термомеханическая задача о совместном деформировании пакета стержней из СПФ в процессе охлаждения и последующего нагрева (расчетная схема приведена на рис. 3). Стержни, имеющие одинаковую начальную длину L , расположены в пакете горизонтально друг над другом без зазоров, так что в однородном фазовом состоянии предполагается однородность температурных свойств по высоте пакета, однако трение между стержнями отсутствует. Левые концы стержней жестко защемлены, правые шарнирно присоединены к жесткой оправке, имеющей возможность горизонтального перемещения и

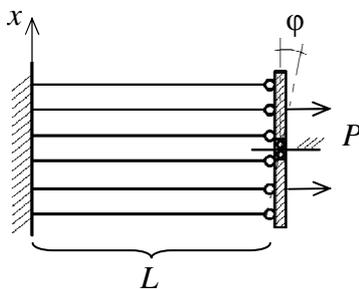


Рис. 3. Пакет совместно деформируемых стержней. Расчетная схема

³ Мовчан А.А., Чжо Т.Я. Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13, №4.

поворота относительно центра на угол φ . На оправку в направлении, перпендикулярном оси x , действует сила P , постоянная на этапах охлаждения и нагрева. При этом каждый стержень в процессе деформирования испытывает одноосное растяжение или сжатие. Изменение температурного поля происходит за счет теплообмена с окружающей средой через грань верхнего стержня, остальные поверхности теплоизолированы.

При решении используется связанное уравнение энергетического баланса⁴, учитывающее как выделение (поглощение) латентного тепла в процессе фазовых переходов, так и диссипацию энергии, обусловленную деформацией фазовых и структурных превращений при изменяющейся температуре. Использование этого уравнения делает постановку задачи связанной. В результате численного решения задачи описана эволюция напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе охлаждения и последующего нагрева. Выполнено три варианта расчетов: 1) с учетом только фазовой деформации без возможности структурного превращения; 2) с учетом процессов фазового и структурного деформирования; 3) с учетом фазовой и структурной деформаций, а также деформационной асимметрии растяжения и сжатия. Сделан вывод о значимости вклада структурной деформации в напряженно-деформированное состояние конструкции.

В пятой главе в результате анализа фазовой диаграммы никелида титана предложена теоретическая классификация типов диаграмм изотермического деформирования СПФ в зависимости от температуры деформирования. На фазовой диаграмме, приведенной на рис. 4, нанесены границы прямого ($\sigma_s^M - \sigma_f^M$) и обратного ($\sigma_s^A - \sigma_f^A$) фазовых переходов, построенные с использованием уравнения Клаузиуса–Клапейрона (3), в котором полное изменение фазовой деформации составляет, согласно (2), $[\varepsilon_{ph}(\sigma_1)] = F_1(\sigma_1) + \varepsilon_V$. Кроме того, на диаграмме изображены напряжения начала и окончания структурного превращения σ_{s0}^{st} и σ_f^{st} , принятые линейно зависящими от температуры, а также

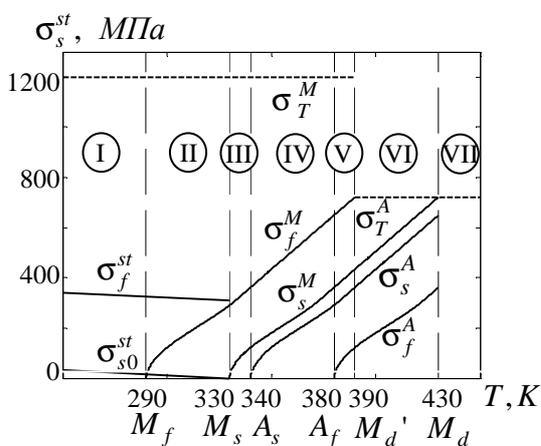


Рис. 4. Фазовая диаграмма никелида титана

пределы текучести мартенситной и аустенитной фаз σ_T^M и σ_T^A . Полагается, что температура деформирования материала достигается путем охлаждения без нагрузки из полностью аустенитного состояния. При этом вид диаграммы изотермического деформирования определяется тем, какие линии диаграммы рис. 4 и в какой последовательности пересекаются вертикальной изотермой нагружения при данной температуре. В связи с этим

⁴ Мовчан А.А., Казарина С.А. Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – №1.

можно выделить семь температурных интервалов, в каждом из которых диаграммы изотермического деформирования имеют качественно различный вид. Границами интервалов являются температуры начала и окончания прямого ($M_s - M_f$) и обратного ($A_s - A_f$) фазовых переходов, температура M_d' пересечения линий σ_f^M и σ_T^A , а также M_d , выше которой невозможно образование мартенсита напряжения. Деформационные кривые для каждого температурного интервала описаны с использованием разработанной модели; два из рассмотренных случаев соответствуют явлениям мартенситной неупругости и сверхупругости (интервалы I и V).

Заключение

В диссертационном исследовании разработана одномерная феноменологическая модель для описания процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы. Основные результаты заключаются в следующем:

1. Сформулировано теоретическое представление о взаимосвязи процессов фазового и структурного деформирования в СПФ на макромеханическом уровне, основанное на работах А.А. Мовчана^{1,2}. В представлении содержится гипотеза о независимости пути дальнейшего деформирования образца из СПФ от типа начальной деформации – фазовой или структурной, и используются три материальные функции: диаграммы прямого превращения F_1 , мартенситной неупругости F_2 и функция их взаимосвязи f .

2. Осуществлена экспериментальная верификация данного теоретического представления. Выполнены три серии термомеханических испытаний проволочных образцов из никелида титана, что позволило:

- выработать методические рекомендации к экспериментальному получению диаграмм прямого превращения F_1 и мартенситной неупругости F_2 , позволяющие увеличить точность их построения, и предложить метод непосредственного экспериментального определения функции их взаимосвязи f ;
- определить три материальные функции F_1 , F_2 и f для образцов из никелида титана, подтвердить наличие прогнозируемой взаимосвязи между ними;
- показать совпадение диаграмм доориентации для образцов с начальными фазовой и структурной деформациями, что является новым экспериментальным результатом в исследовании эффекта перекрестного упрочнения;
- показать, что введенная гипотеза выполняется с удовлетворительной точностью при последующем структурном деформировании во всем диапазоне экспериментально реализуемых нагрузок (до 500 МПа для фазового превращения и 600 МПа для структурного), а в условиях последующего обратного фазового перехода – только при напряжениях до 250 МПа для фазового превращения и 350 МПа для структурного.

3. Разработана одномерная феноменологическая модель фазовых и структурных деформаций в СПФ, основанная на введенном теоретическом представлении. Предложенная модель:

- способна описывать достаточно широкий круг макромеханических явлений, обусловленных фазовыми и структурными превращениями в СПФ, включая случаи неоднородного фазового деформирования (образования мартенситной фазы при изменяющейся нагрузке);
- учитывает влияние истории деформирования на последующие фазовые и структурные превращения;
- осуществляет единообразный учет деформации фазовых и структурных превращений без разделения ее на две составляющие;
- обладает алгоритмической простотой численной реализации;
- требует задания небольшого числа материальных функций, определяемых из макромеханических испытаний на стандартном оборудовании.

4. Предложен способ описания моделью фазового и структурного деформирования при знакопеременном нагружении с учетом асимметрии этих процессов при растяжении и сжатии. Представлена геометрическая интерпретация модели и сопоставление ее с двумя известными феноменологическими моделями для материалов с памятью формы.

5. Выполнена апробация модели на решении ряда простых задач, в которых реализуются различные макромеханические эффекты в СПФ в условиях однородного одноосного напряженного состояния: монотонный и реверсивный эффекты памяти формы, прямое превращение под действием изменяющейся нагрузки и последующие процессы структурного и обратного фазового превращений. Вычислительные возможности модели продемонстрированы на решении связанной термомеханической задачи о совместном деформировании пакета стержней из СПФ.

6. Предложена классификация типов диаграмм изотермического деформирования СПФ в зависимости от температуры деформирования, основанная на анализе фазовой диаграммы никелида титана. Выделено семь температурных интервалов, в каждом из которых диаграммы изотермического деформирования имеют качественно различный вид, в частности, в двух из них наблюдаются явления мартенситной неупругости и сверхупругости. Для каждого случая с использованием разработанной модели получено теоретическое описание деформационных кривых.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Тихомирова К.А. Разработка и численная реализация одномерной феноменологической модели фазовой деформации в сплавах с памятью формы // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 8, №2. – С. 192-206. (ВАК)

2. Tikhomirova K. Computation of phase and structural deformations in shape memory alloys. One-dimensional model // Materials Today: Proceedings. – 2017. – no. 4. – P. 4626-4630. (Scopus)

3. Тихомирова К.А. Изотермическое деформирование сплава с памятью формы в разных температурных интервалах. Случай одноосного растяжения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23, №2. – С. 263-282. (ВАК)

4. Тихомирова К.А. Феноменологическое моделирование фазовых и структурных деформаций в сплавах с памятью формы. Одномерный случай // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, №1. – С. 36-50. (ВАК)

5. Тихомирова К.А. Экспериментальное и теоретическое исследование взаимосвязи фазовой и структурной деформаций в сплавах с памятью формы // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018, №1. – С. 40-57. (ВАК, Scopus)

6. Тихомирова К.А. Одномерная феноменологическая модель фазовой деформации сплава с памятью формы // Материалы пятой конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», Москва, ИПРИМ РАН, 15-17 декабря 2015. – М.: ИПРИМ РАН, 2015. – С. 293-295.

7. Тихомирова К.А. Вычисление фазово-структурной деформации в сплавах с памятью формы. Одномерный случай // Тезисы второй международной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы», СПб., СПбГУ, 20-23 сентября 2016. – СПб.: СПбГУ, 2016. – С. 19.

8. Тихомирова К.А. Моделирование изотермического деформирования сплава с памятью формы при различных температурах с учетом пластической деформации // Тезисы докладов шестой конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», Москва, ИПРИМ РАН, 16-18 ноября 2016. – М.: ИПРИМ РАН, 2016. – С. 84-85.

9. Тихомирова К.А. Моделирование макромеханических явлений, вызванных фазово-структурными превращениями в сплавах с памятью формы. Случай одноосного напряженного состояния // Материалы XX Зимней школы по механике сплошных сред, Пермь, ИМСС УрО РАН, 13-16 февраля 2017. – Пермь: ИМСС УрО РАН, 2017. – С. 339.

10. Тихомирова К.А. Моделирование макромеханических явлений, обусловленных фазово-структурными превращениями в сплавах с памятью формы: одномерный случай // Материалы XXVI школы-конференции «Математическое моделирование в естественных науках», Пермь, ПНИПУ, 4-7 октября 2017. – Пермь: ПНИПУ, 2017. – С. 105-109.

11. Тихомирова К.А. Эволюция фазово-структурной деформации в охлаждающемся пакете стержней из сплава с памятью формы // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», Москва, МИАН, 13–15 ноября 2017. – М.: МИАН, 2017. – С.189-191.

12. Тихомирова К.А. Феноменологическое моделирование процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы. Одномерный случай // Сборник трудов седьмой конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», Москва, ИПРИМ РАН, 21–23 ноября 2017. – М.: ИПРИМ РАН, 2017. – С. 190-192.