ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Беляева Ф.С. на тему «Микроструктурная модель необратимой деформации и дефектов в сплавах с памятью формы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук по специальности 01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела.

Большая часть работ, связанных с экспериментальным и теоретическим моделированием механического поведения сплавов с памятью формы (СПФ), посвящена исследованиям процессов фазовых и структурных переходов, при которых накапливаются или исчезают фазовые деформации и деформации мартенситной неупругости. Известно, однако, что накопленные фазовые и структурные деформации при полном обратном превращении часто снимаются не полностью, что объясняется развитием в СПФ еще и пластических деформаций. Наличием этих деформаций объясняется не только неполный возврат фазово - структурных деформаций при обратном превращении, но и нестабильность поведения СПФ в процессах циклического термомеханического нагружения. Эта последняя проблема имеет важное прикладное значение.

Необходимо отметить, что работ, в которых анализируются сопровождающее фазово - структурные процессы в СПФ пластическое деформирование значительно (на порядок и более) меньше, чем исследований, посвященных моделированию фазово - структурных деформаций. Поэтому проблема моделирования развития пластических деформаций в СПФ, сопровождающих фазово - структурные переходы, рассматриваемая в данной диссертации, является весьма актуальной.

Проблеме прочности и разрушения элементов из СПФ посвящено также значительно меньше работ, чем связанных с изучением их деформирования. При этом большая часть работ, связанных с разрушением СПФ, исследует классические проблемы механики разрушения (разрушение элементов из СПФ, содержащих макротрещины, с учетом фазовых переходов в окрестностях вершин этих макротрещин, проблема описания процессов развития таких макротрещин при циклических или статических нагружениях). Еще гораздо меньше работ связаны с изучением накопления рассеянных повреждений в СПФ при их термомеханическом нагружении. Актуальная проблема описания накопления рассеянных повреждений в элементах из СПФ исследуется в данной диссертации. Поскольку накопление рассеянных повреждений в СПФ определяется происходящими в этих материалах пластическими деформациями, сопровождающими фазовые и структурные переходы, то обе названные выше проблемы неразрывно связаны и рассматриваются в рецензируемой работе с единых позиций.

В течение последних 15 лет в работах А.Е. Волкова с соавторами интенсивно развивается оригинальная микроструктурная модель, описывающая термомеханическое

поведение СПФ. В рамках этой модели прямое превращение рассматривалось как процесс развитие изолированных вариантов мартенсита. В тексте данной работы приводится убедительное обоснование того факта, что такой ход событий приведет к слишком высокому упругому противодействию. Приведены экспериментальные данные, согласно которым при прямом превращении происходит совместное развитие согласованных пар мартенситных вариантов. Построена модификация микроструктурной модели, учитывающая это обстоятельство. В этом состоит основной элемент научной новизны данной работы, касающийся моделирования фазовых превращений в СПФ.

Рецензируемая диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Первая глава содержит аналитический обзор работ по тематике диссертации. Обзорная часть работы хорошо написана и читается с интересом. Она четко определяет место диссертации среди других исследований, посвященных той же тематике.

Во второй главе диссертации излагаются те усовершенствования, которые предлагаются в работе для микроструктурной теории фазовых переходов в СПФ. В матрицу энергии взаимодействия вариантов мартенсита добавляются недиагональные элементы для тех вариантов, которые могут образовывать согласованные пары с вариантом, соответствующим данной строчке на главной диагонали. Добавленные элементы матрицы отрицательны и одинаковы по абсолютной величине. За счет их наличия уменьшается энергия смешивания, т.е. упругая энергия, связанная с развитием мартенситного варианта. При этом, однако, падает и деформация прямого превращения поскольку за счет роста дополнительного варианта в паре, менее благоприятно ориентированного к действующему напряжению, уменьшается объемная доля основного варианта. В рамках предложенной модели проведены тестовые расчеты процессов накопления деформации прямого превращения и памяти формы под действием постоянного напряжения, рассчитаны сверхупругие петли. Намечены пути идентификации модели.

Третья глава диссертации посвящена теоретическому моделированию процесса развития микропластической деформации, сопровождающей фазовые переходы в СПФ. Рассмотрение основано на гипотезе о том, что микропластическая деформация, связанная с ростом некоторого варианта мартенсита, сонаправлена с собственной деформацией этого варианта. Считается, что микропластическая деформация происходит без изменения объема. Поэтому она пропорциональна девиатору собственной деформации этого варианта. Соответствующий коэффициент пропорциональности представляется в виде произведения меры микропластической деформации ε_n^{mp} варианта номер n на некий

масштабирующий коэффициент κ, определяющий, насколько сильно изменяются микропластические деформации при изменении соответствующей меры.

Имея в виду последующий анализ накопления рассеянных повреждений в СПФ, автор связывает микропластические деформации с микродефектами в материале, которые делятся на ориентированные микродефекты, приводящие к возникновению микронапряжений, и неориентированные (в тексте они называются "рассеянными"), которые микронапряжений не создают. Вводятся плотности как ориентированных, так и неориентированных микродефектов. Энергия смешивания зависит только от плотностей ориентированных микродефектов. Тем самым, предлагаемая модель отличается от прототипа, в рамках которого энергия смешивания зависела от всей микропластической деформации. Предложен оригинальный одномерный вариант теории пластичности с комбинированным упрочнением типа теории Кадашевича - Новожилова, в котором роль деформаций играет плотность ориентированных дефектов, а напряжений - термодинамическая сила. Проведена идентификация модели для никелида титана. Проведено сравнение результатов, рассчитанных по модели с экспериментальными данными по зависимости невозвращаемой деформации от номера цикла при циклическом изменении температуры под действием постоянных напряжений. Хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными свидетельствует о достоверности предложенной модели. Модель применена для описания ряда интересных эффектов, характерных для СПФ при фазовых переходах. Получено неплохое качественное соответствие с экспериментальными данными, также подтверждающее достоверность разработанной модели.

В главе 4 строится модель накопления повреждений и разрушения СПФ. Введен некоторый аналог параметра повреждаемости, скорость изменения которого пропорциональна сумме модулей скоростей изменения мер микропластических деформаций всех вариантов мартенсита, имеющихся в зерне. При отсутствии обратного фазового превращения параметр повреждаемости пропорционален введенной ранее плотности неориентированных микродефектов. Сформулировано предельное условие (критерий разрушения) который можно трактовать как условие достижения критического значения величиной поврежденности. В отличие от аналогов, развитых для СПФ в рамках ранее известной микроструктурной модели, это критическое значение зависит от действующих напряжений, уменьшаясь с ростом мгновенных значений первого инварианта тензора напряжений и интенсивности касательного напряжения. Предельное значение повреждения также уменьшается с ростом модуля плотности ориентированных микродефектов. Проведена идентификация модели на базе экспериментальных данных по

термоциклированию под действием постоянного напряжения или жесткого циклического нагружения в режиме сверхупругости. В рамках построенной модели решена практически важная задача о ресурсе рабочего элемента мартенситного двигателя.

По тексту диссертации необходимо сформулировать следующие замечания.

1. Часть обзора, связанная с описанием феноменологического подхода к моделированию поведения сплавов с память формы страдает неполнотой. Последняя работа, упоминаемая в обзоре по этой тематике, датирована 1996 г. Однако за истекшие с момента выхода этой работы 20 лет феноменологический подход к описанию механического поведения СПФ интенсивно развивался. В рамках соответствующих моделей удалось описать весьма широкий и достаточно полный круг явлений и эффектов, характерных для СПФ. Однако эти исследования в обзоре не упомянуты. Критика, имеющаяся в тексте обзора по отношению к феноменологическим моделям, касается, в основном, старых моделей, которые и упомянуты в обзоре. Эти недостатки преодолены в современных феноменологических моделях поведения СПФ.

2. Введение к диссертации содержит достаточно объемную часть (5 стр.) с обзором различных известных моделей поведения СПФ. Первый раздел диссертации целиком посвящен аналитическому обзору различных моделей поведения СПФ. Не понятно, зачем было представлять в одном тексте диссертации 2 обзора (первый – во введении, второй – весь первый раздел), не лучше ли было объединить все это в единый обзор?

3. Известно, что прямое фазовое превращение в СПФ сводится к одновременно происходящим процессам зарождения и развития мартенситных мезоэлементов, причем процессы зарождения и развития подчиняются различным закономерностям. Раздельный учет этих процессов позволил в рамках феноменологических моделей описать ряд явлений, характерных для СПФ, в частности, явление ориентированного превращения. Однако в рамках развиваемой в диссертации модели процессы зарождения и развития мартенситных мезоэлементов не разделяются.

4. В диссертации все внимание сосредоточено на происходящих в СПФ фазовых переходах, явления, связанные со структурными переходами (раздвойникование и переориентация мартенсита и связанное с этими процессами явление мартенситной неупругости) лишь упоминаются в тексте на стр. 89, причем вместо термина «раздвойникование» там фигурирует термине «двойникование». Необходимо отметить, что в микроструктурной модели – прототипе структурный переход описан.

5. Вызывает удивление используемая в тексте работы терминология, связанная с разделением микродефектов в СПФ на "рассеянные" и "ориентированные". Согласно

терминологии механики накопления рассеянных повреждений и те и другие микродефекты называются рассеянными.

Следует отметить, что перечисленные выше замечания частично касаются формы изложения и терминологии, частично могут рассматриваться как пожелания на будущее и, поэтому, не снижают общего положительного отношения к данной диссертации. Резюмируя сказанное выше, можно утверждать, что рецензируемая диссертация является законченной научной работой, посвященной решению актуальных проблем механики СПФ, имеющих большое прикладное значение. Полученные в диссертации результаты, безусловно, обладают научной новизной. Достоверность выводов диссертации подтверждена сравнением с экспериментальными данными других авторов. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Материалы работы достаточно полно представлены в тексте публикаций автора.

Таким образом, можно утверждать, что рецензируемая работа удовлетворяет всем критериям, установленным Положением «О порядке присуждения учёных степеней», а ее автор, Беляев Ф.С., заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико - математических наук.

Официальный оппонент
Профессор, д.ф.-м. н.,
главный научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института прикладной механики
Российской академии наук
125040, Москва, Ленинградский
проспект, д.7, стр. 1

Мовчан Андрей Александрович
Тел. 8(495)945-17-77
e-mail: movchan47@mail.ru

Подпись А.А. Мовчана удостоверяю
Ученый секретарь ИПРИМ РАН