

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Демидовой Елены Сергеевны на тему:  
«Эффекты обратимости неупругой деформации  
при мартенситных превращениях в изотермических условиях»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.04. – механика деформируемого твердого тела

**Актуальность темы диссертации.** Разнообразное применение сплавов с эффектом памяти формы (СПФ) обусловлено особенностями их поведения при мартенситных переходах, которые могут иметь широкие интервалы прямого и обратного превращений и широкий гистерезис, что не всегда удобно с практической точки зрения. В связи с этим, целесообразно найти пути сокращения температурных интервалов для проявления эффектов памяти формы. В последнее десятилетие была обнаружена возможность протекания изотермических переходов в сплавах на основе никелида титана. Однако функциональные свойства материалов, обусловленных такими переходами, а также механизмы указанных переходов мало изучены и поэтому представляют собой актуальную с научной и практической точки зрения проблему.

**Новизна полученных результатов.** В диссертации предложена принципиально новая физическая модель изотермического мартенситного перехода в сплавах на основе никелида титана, базирующаяся на том, что кинетика превращения в изотермических условиях контролируется термоактивируемым изменением концентрации дефектов замещения в локальных областях кристаллов. Также впервые показана обратимость деформаций, появляющихся в результате мартенситного превращения при изотермической выдержке сплава  $Ti_{40,7}Hf_{9,5}Ni_{44,8}Cu_5$  под напряжением, и определены условия максимальности указанной деформации. Кроме того, для математического описания наблюдаемых явлений впервые было проведено их моделирование с использованием модифицированных моделей Аврами и структурно-аналитической модели Лихачева–Волкова.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена тем, что для экспериментальных исследований использовались современные и хорошо апробированные оборудование и методики эксперимента – под контролем опытных наставников, – а также воспроизводимостью результатов экспериментов. Теоретические положения согласуются с существующими научными представлениями о природе изучаемых явлений. Расчеты выполнены на основе хорошо апробированных методик (под контролем их разработчиков) и согласуются с экспериментальными данными.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов.** Основным научным результатом диссертации является разработка оригинальной модели, объясняющей механизм реализации термоупругого мартенситного перехода при изотермической выдержке. Этот результат носит фундаментальный характер для теории мартенситных переходов. В то же время он дает возможность разработки приводов на основе СПФ, работающих в узком интервале температур, что несомненно востребовано с практической точки зрения.

09/2-02-55 от 01.02.2021

**Оценка содержания и оформления диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 111 страницах. Список литературы содержит 81 наименование.

Во введении дается краткая характеристика работы, описываются цель и задачи исследования.

Первая глава – самая объемная – знакомит читателя с основными понятиями, а также особенностями исследования поведения СПФ при изотермической выдержке. Подробно описано современное состояние науки в этой области и неопределенность в понимании природы мартенситных переходов, наблюдаемых при изотермической выдержке сплавов на основе TiNi. Представлены существующие модели функционально-механического поведения СПФ и отмечено, что до настоящего времени ни одна из них не была адаптирована для описания мартенситных превращений, реализующихся в изотермических условиях, а также для описания изменения деформации в условиях выдержки под нагрузкой при постоянной температуре.

Во второй главе дается постановка задачи и описываются методики проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований термоупругих мартенситных превращений при изотермической выдержке сплава Ti<sub>40,7</sub>Ni<sub>9,5</sub>Ni<sub>44,8</sub>Cu<sub>5</sub> и изменения деформации при изотермической выдержке сплава Ti<sub>40,7</sub>Ni<sub>9,5</sub>Ni<sub>44,8</sub>Cu<sub>5</sub> под нагрузкой. На основе анализа экспериментальных данных предложены объяснения причин и механизмов изотермического превращения в сплавах на основе TiNi.

В четвертой главе представлены результаты моделирования мартенситных превращений и изменения деформации при изотермической выдержке сплавов на основе TiNi с применением теории Авраами и структурно-аналитической теории Лихачева–Волкова.

В заключении приведены основные результаты работы.

Несомненным достоинством диссертации является то, что исследования проводятся на переднем крае мировой науки в данной сфере. Используя самые современные наработки, автор вторгается в еще неисследованные области, для изучения которых приходится разрабатывать новые методики исследований и выдвигать новые гипотезы для объяснения новых результатов. При этом описание существующего положения дел в науке, постановка целей исследования, обоснование необходимости разработки новых методик, изложение результатов экспериментов и математического моделирования, обоснование выводов и гипотез выполнено четко и логично, с глубоким пониманием сути работы.

Например, для определения величины образования новой фазы Елена Сергеевна не ограничивалась проведением исследований только по уже давно известным методикам измерения сопротивления, которое очень чувствительно к любым изменениям в структуре материала, но также проводила исследование с помощью построения и изучения калориметрических кривых в процессе прямых и обратных мартенситных переходов при изотермической выдержке (и без нее). Примечательно и то, что данные, полученные в результате этих экспериментов, не могли быть объяснены в рамках существующих представлений о природе мартенситных превращений и требовали разработки новой теоретической концепции.

Работа оформлена аккуратно и соответствует требуемым стандартам, хотя имеются некоторые опечатки. Например, используемая в работе структурно-аналитическая теория приписывается неизвестному Лихачеву-Волкову, также как и закон типа Клаузиуса–Клапейрона некоему Клаузиусу-Клапейрону.

При прочтении диссертации возникли некоторые **вопросы**, которые желательно было бы четче осветить в работе (и на которые хочется получить ответы).

1. На стр. 61 написано: «Установлено, что для всех температур  $T^*$  внутри температурного интервала прямого перехода (рис. 3.2 а) максимальное значение  $\Phi$  достигается за 5 минут выдержки». Однако из рис. 3.2 а видно, что при  $t=5$  мин. значения  $\Phi$  заметно ниже, чем для  $t=60$  мин. (для разных температур выдержки). Поясните, пожалуйста, о каком тогда «максимальном значении  $\Phi$ » у Вас идет речь.
2. Чем Вы можете объяснить то, что (I) для всех нагрузок немонотонная зависимость  $\varepsilon_{\text{iso}}^{\text{max}}(\Delta T)$  достигает своего максимума при одной и той же температуре, равной  $M_n^\sigma - 6^\circ\text{C}$ , и (II) зависимость этой же деформации от напряжения достигает максимума при 160 МПа?
3. В схеме, проиллюстрированной на рис. 3.16, не понятно, почему “доля мартенсита будет увеличиваться до тех пор, пока она не будет равна доле мартенсита, которая должна была бы образоваться при охлаждении «бездефектного» сплава”. Куда при этом уйдут все дефекты? Если на начальных этапах выдержки дефекты из отдельных нанодоменов переходят в соседние нанодомены (позволяя первым перейти в мартенситную фазу), то в этих (оставшихся аустенитными) соседних доменах концентрация дефектов повышается все больше и больше с ростом мартенситной фазы в процессе выдержки, а следовательно, в них повышается барьер  $E_{m.d.}$  и падает вероятность того, что в них когда-нибудь случайным образом будет выполнено условие (3.2). Почему же при этом максимальная доля мартенсита в дефектном сплаве дойдет до соответствующей доли в бездефектном сплаве?
4. Чем объясняется изменение единиц измерения параметра  $k$  (следующее из (4.1) и декларированного на стр. 85 изменения значения  $n$ ) при смене знака  $\Delta T$ ? И каким образом согласуются единицы измерения  $k$  в выражениях (4.1), где они должны быть  $[c^{-n}]$ , и (4.6), где они  $[c^{-1}]$ ?

Данные пожелания не снижают практической и теоретической значимости работы.

Диссертация Демидовой Елены Сергеевны на тему: «Эффекты обратимости неупругой деформации при мартенситных превращениях в изотермических условиях» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Демидова Елена Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04. – механика деформируемого твердого тела. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета  
Доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор

Пронина Юлия Григорьевна

29.01.2021