



«24» 04 2017 г.  
На № \_\_\_\_\_

№ 1000/17-76  
“ ” 201 г.

127051, г. Москва, ул. Петровка 24  
ИНН 7707028980, КПП 770701001  
Тел.: (495) 312-30-27  
Тел./Факс: (495) 311-03-23  
E-mail: info@niat.ru

Утверждаю  
Генеральный директор ОАО НИАТ  
Плихунов В.В. д.т.н., профессор



В диссертационный совет Д 501.001.91  
при Московском государственном  
университете имени М.В.Ломоносова

119991, Москва, Ленинские горы,  
Главное здание МГУ, механико-  
математический факультет.

### Отзыв ведущей организации

на диссертацию Климова Кирилла Юрьевича на тему  
«Реономные свойства сплавов с памятью формы и их влияние на  
устойчивость»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.02.04 –механика деформируемого  
твердого тела.

На отзыв представлены: текст диссертационной работы на 150 стр., включая 76  
рисунков, библиографический список из 101 наименования, автореферат на 29  
стр., включая список из 14 публикаций по теме диссертации (6 статей в  
рецензируемых журналах перечня ВАК РФ). Диссертация состоит из введения,  
трех глав, заключения и списка используемой литературы.

### Актуальность избранной темы.

В настоящее время не существует единого мнения о том, являются ли  
механические свойства сплавов с памятью формы (СПФ) склерономными, или  
реономными. Большинство исследователей считают, что поведение СПФ от  
масштаба времени не зависит. Поэтому влияние масштаба времени на  
поведение СПФ исследовано явно не достаточно. Однако, в тексте

рецензируемой диссертации приведены убедительные экспериментальные подтверждения того факта, что СПФ обладают реономными свойствами (явление ограниченной ползучести при мягком ступенчатом нагружении в режиме мартенситной неупругости и релаксация напряжений). С учетом этих экспериментальных данных актуальной становится проблема экспериментального исследования и теоретического моделирования реономных явлений, характерных для СПФ, которой посвящена первая часть рецензируемой диссертации. Данная тематика имеет важное прикладное значение для описания поведения, проектирования и оптимизации разворачивающихся систем, поверхностей изменяемой геометрии, использующих активные элементы из СПФ, в тех случаях, когда существенно время срабатывания соответствующих устройств.

Известно, что тонкостенные элементы из СПФ склонны к потере устойчивости в тех случаях, когда фазовые и структурные превращения в этих элементах происходят под действием сжимающих напряжений. Последнее десятилетие в научной литературе появилось много решений соответствующих задач устойчивости для СПФ. Однако, все эти решения получены в предположении о склерономном поведении СПФ. Вопрос о влиянии учета реономных свойств СПФ на саму постановку задач устойчивости для СПФ и результаты решения этих задач до появления рецензируемой диссертации исследован не был. В работе показано, что неучет даже незначительных проявлений реономных свойств СПФ при анализе устойчивости элементов из этих материалов может привести к весьма существенным ошибкам. Поэтому анализ влияния реономных свойств СПФ на устойчивость элементов из этих материалов является актуальным направлением исследований. Таким образом, диссертация направлена на решение актуальных проблем механики деформируемого твердого тела.

**Цель диссертационной работы** К.Ю. Климова состоит в разработке методов теоретического моделирования реономного поведения СПФ, формулировке и решении задач устойчивости для модельных элементов из СПФ, с учетом реономных свойств этих материалов.



### Краткий анализ содержания.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** кратко описана история открытия СПФ, их свойства, даётся краткий обзор по моделированию поведения СПФ и анализу устойчивости неупругих систем. Определяется место данной диссертации среди известных исследований поведения СПФ, формулируются основные проблемы, решению которых посвящена диссертация.

**В первой главе** приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие в пользу того, что СПФ обладают реономными свойствами. Подробно описаны качественные особенности диаграмм ограниченной ползучести, наблюдаемой при мягком ступенчатом нагружении образцов из СПФ в режиме мартенситной неупругости и сверхупругости, обращается внимание на эффект релаксации деформаций при мягкой ступенчатой разгрузки в режиме сверхупругости, на характеристики эффекта релаксации напряжений в СПФ. Следует обратить внимание на систематический (по пунктам) характер изложения материала в первой главе. Такая систематизация помогает оценить адекватность описания всех этих явлений в дальнейшем тексте работы.

**Вторая глава** посвящена формулировке различных моделей описания реономных свойств СПФ, применению этих моделей к анализу конкретных явлений. Все три типа рассмотренных моделей опираются на понятие диаграммы предельно медленного процесса. Две последние модели вводят еще и понятие предельно быстрого процесса. Описаны математические трудности, возникающие при использовании второй (дробно - линейной) модели. Предложены математические методы преодоления этих трудностей. Все модели применяются для описания реономных свойств, проявляемых СПФ в простейших механических процессах (мягкое и жесткое нагружение в режиме мартенситной неупругости и сверхупругости, разгрузка, релаксация

напряжений. Выбрана наилучшая модель, проведена ее экспериментальная идентификация.

**В третьей главе** формулируются и решаются задачи устойчивости простейших модельных элементов из СПФ с учетом реономных свойств этих материалов. Поскольку СПФ является деформируемым твердым телом, обладающим реономными свойствами, то сама постановка задачи устойчивости для таких тел связана с решением некоторых проблем. Возникает вопрос о корректности постановки задач устойчивости по Ляпунову на бесконечном временном интервале, или речь может идти только об определении критического времени для таких тел под действием заданной нагрузки (как для металлов, обладающих свойством нелинейной ползучести). Процессы деформирования СПФ являются термодинамически необратимыми. Возникает вопрос о правомерности решения задач устойчивости для таких тел, находящихся под действием консервативных нагрузок, в квазистатической постановке.

В третьей главе рассмотрены задачи устойчивости для жесткого стержня на реономном шарнире, о деформируемом стержне из СПФ, о стойке Шенли на стержнях из СПФ. Показано, что для элементов из СПФ имеет смысл постановка задачи устойчивости по Ляпунову на бесконечном временном интервале, а результаты решения задач устойчивости для первой и третьей модели в квазистатической и динамической постановках совпадают. Установлено, что критические значения определяются величиной касательного модуля к предельно медленной диаграмме нагружения СПФ. Полученные решения являются аналитическими (доведены до конечных формул). Важнейший из полученных результатов сводится к тому, что учет даже незначительных реономных свойств СПФ может коренным образом изменить решение задач устойчивости и получаемый результат.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

**Достоверность и обоснованность** полученных научных результатов работы основаны на качественном и количественном сравнении полученных теоретических результатов по моделированию поведения СПФ с



экспериментальными данными, на использовании строгих математических методов исследования и классических критериев устойчивости. Факт совпадения результатов, получаемых для задач устойчивости в квазистатической и динамической постановках также свидетельствует о достоверности получаемых результатов.

**Апробация** результатов диссертационной работы выполнена на различных российских и международных научных конференциях, семинарах кафедр механико-математического факультета МГУ. Результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, в том числе в 6 статьях в научных журналах, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в том, что в ней впервые исследовано влияние реономных свойств СПФ на устойчивость простейших модельных систем, содержащих эти материалы. Впервые предложена модель реономного поведения СПФ, основана на предположении о наличии предельно - медленных и предельно - быстрых процессов в этих материалах. Впервые установлено, что имеет смысл постановка задач устойчивости по Ляпунову на бесконечном временном интервале для СПФ. Впервые обнаружено совпадение результатов решения задач устойчивости для элементов из СПФ в квазистатической и динамической постановках. Впервые показано, что результат решения задач устойчивости для элементов из СПФ с учетом их реономных свойств определяется касательным модулем к диаграмме предельно - медленного процесса.

**Практическая ценность** работы определяется тем, что с использованием предложенных моделей реономного поведения СПФ может быть правильно рассчитано время срабатывания систем, содержащих рабочие тела из СПФ. Сформулированные постановки задач устойчивости элементов из СПФ и полученные решения этих задач позволят предотвратить катастрофические последствия потери устойчивости силовых элементов из СПФ, работающих в области сжимающих напряжений.

**Автореферат** правильно и полно отражает содержание диссертации.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Автору удалось описать нелинейную начальную асимптотику кривых ограниченной ползучести для никелида титана только в рамках второй (дробно - линейной) модели реономного поведения СПФ, использование которой связано с математическими трудностями. Однако, того же результата можно было добиться с использованием уравнений нелинейной наследственной вязкоупругости, предложенных Ю.Н. Работновым со степенным ядром Дуффинга. В рамках диссертации используются только модели, соответствующие экспоненциальным ядрам.

2. Для модели № 3 со степенной зависимостью для скорости роста реономной деформации рассмотрены лишь целые показатели степени. Можно было бы добиться лучшего совпадения с экспериментальными данными при использовании действительных показателей.

3. В работе проведена идентификация модели реономного поведения СПФ для образцов из никелида титана. Однако, не сообщается ни состав материала, ни данные о его термообработке.

4. Данное замечание связано с неудачным делением диссертации на разделы. Второй и третий разделы содержат огромное количество подразделов и параграфов, т.е. используется одинарная, двойная и тройная нумерации. При этом элементы с тройной нумерацией не внесены в оглавление диссертации. Для формул используется неудобная четверная нумерация. Вторую и третью главы диссертации следовало бы разделить каждую еще, по крайней мере, на 2 главы.

### **Заключение**

Сформулированные замечания не влияют на общее положительное мнение о рецензируемой диссертации. На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Климова Кирилла Юрьевича «Реономные свойства сплавов с памятью формы и их влияние на устойчивость» является законченной научно-квалификационной работой, имеющей фундаментальное и прикладное значение и соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее



автор К.Ю. Климов заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Диссертация Климова К.Ю. обсуждена и одобрена на Научно - техническом совете ОАО НИАТ 24 апреля 2017 г.

Протокол № 2

Отзыв составил:

Петров Л.М. д.т.н., профессор

Подпись  Петрова Л.М.

удостоверяю

Ученый секретарь ОАО НИАТ

Егоров В.Н. д.т.н., профессор 



Контактные данные организации: Открытое Акционерное Общество "Национальный Институт Авиационных Технологий" (ОАО НИАТ):

117587, Россия, Москва, Кировоградская ул., д. 3

Телефон: +7 (495) 311-72-15

Факс: +7 (495) 312-30-27

E-mail: [info@niat.ru](mailto:info@niat.ru)

Официальный сайт: [http:// niat.ru](http://niat.ru)