

## ОТЗЫВ

**официального оппонента** д.ф.-м.н. Гаришина Олега Константиновича на диссертационную работу Янкина Андрея Сергеевича «Деформационные свойства высоконаполненных вязкоупругих полимеров при двухчастотных законах нагружения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Диссертационная работа А.С. Янкина посвящена важной проблеме – совершенствованию моделей описания механического поведения вязкоупругих материалов в условиях действия сложных гармонических нагрузок и разработке процедур идентификации этих моделей для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций аэрокосмической отрасли в условиях экстремального нагружения. При этом учитываются такие нелинейные эффекты как искажение петли гистерезиса, влияние уровня деформации на поведение материала.

**Актуальность исследования** обусловлена необходимостью получения информации о механических свойствах высоконаполненных полимерных композитов при сложных динамических воздействиях для прогнозирования поведения реальных изделий из подобных материалов. Предложенный в диссертационной работе А.С. Янкина подход с использованием комплексных величин позволяет описать деформационные свойства высоконаполненных полимеров и в результате экспериментальной процедуры получить необходимую информацию для расчета НДС вязкоупругих конструкций.

**Научная новизна** работы заключается в разработке методик проведения двухчастотного эксперимента и определения вязкоупругих характеристик материала. Получены новые экспериментальные данные о виде зависимостей характеристик материала от условий деформирования. Разработаны модели, которые описывают нелинейное поведение вязкоупругих материалов в зависимости от вида двухчастотного воздействия при изменяющихся частотах, амплитудах деформации и температуре. Предложен простой способ описания вязкоупругих параметров с помощью полиномов. Предложен и реализован подход к идентификации коэффициентов моделей, основанный на процедуре покоординатного спуска, с последующей оценкой их адекватности.

**Целью диссертационной работы** является экспериментально-теоретическое исследование высоконаполненных композитов на полимерной основе, которое включает совершенствование методик проведения двухчастотного опыта и определения параметров материала, развитие моделей описания поведения вязкоупругого материала, а также процедуры их идентификации для программной реализации при динамических расчетах конструкций.

**Практическое значение** работы связано с возможностью использования разработанных моделей поведения высоконаполненных полимерных композитов для проведения динамических расчетов реальных конструкций аэрокосмической техники в различных организациях.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обуславливается корректным использованием измерительного и экспериментального оборудования, а также соответствием экспериментальных и модельных данных. Основные выводы и рекомендации обоснованы в работе и вытекают из ее содержания.

Содержание диссертационной работы А.С. Янкина и основные результаты, полученные в ней, полностью отражены в **публикациях**, перечисленных в автореферате диссертации, и достаточно **апробированы**. Список публикаций автора содержит 17 работ, из которых 8 в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и/или входящих в базы данных Web of Science и Scopus. В работе автора нет заимствованных материалов без

ссылок на источник заимствования. Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, списка условных обозначений, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертация изложена на 136 страницах, содержит 52 рисунка, 14 таблиц, 1 приложение, библиографический список содержит 141 наименование.

**Во введении** обосновывается актуальность исследования, практическая значимость работы, краткое изложение содержания диссертации по главам, формулируется цель и задачи работы, ее новизна и практическая значимость.

**Первая глава** является обзорной. В ней автор приводит сведения о рассматриваемом классе полимерных материалов, применении и условиях их работы. Рассматриваются и анализируются существующие подходы для описания механического поведения исследуемых полимерных композитов в зависимости от вида нагружения и целей исследования. Рассматриваются физико-механические свойства высоконаполненных полимеров, а также нелинейные эффекты, проявляющиеся при циклическом нагружении.

**Во второй главе** описывается разработанная автором методика проведения двухчастотных опытов применительно к экспериментальному оборудованию, а также программа определения вязкоупругих параметров материала в условиях действия одно- и двухчастотных нагрузок. Проводятся испытания по учету жесткости активных элементов нагружающего стенда. Оценивается степень точности реализации входного сигнала и влияние геометрических параметров образца на определяемые характеристики. Для рассматриваемых материалов докторант выделяет три математических описания их вязкоупругого поведения в комплексной форме для малых деформаций при двухчастотных нагрузлениях – с использованием трех, двух (нелинейные модели) и одного (линейная модель) членов интегрального ряда Вольтерры.

**В третьей главе** проводится анализ разработанных уравнений, в результате которого устанавливается взаимосвязь вязкоупругих параметров друг с другом и их зависимость от параметров нагружения. Для определения характера этих зависимостей автором проводятся одно- и двухчастотные эксперименты на растяжение/сжатие, результаты которых сопоставляются друг с другом, выявляются общие закономерности в виде зависимостей вязкоупругих параметров от частоты и температуры. Проводится гармонический анализ входных и выходных сигналов, по результатам которого оценивается корректность в реализации режимов деформирования экспериментальным стенду и точность описания экспериментальных данных разрабатываемыми моделями.

**В четвертой главе** предлагаются полиномиальные уравнения математических моделей для описания зависимостей вязкоупругих параметров от частоты и температуры. Представлен разработанный экспериментальный план, по которому проводится параметрическая идентификация коэффициентов моделей методом покоординатного спуска. Описываются этапы идентификации. Производится сопоставление опытных данных (рассматриваются процессы симметричных гармонических нагрузений на растяжение/сжатие) с результатами, полученными с применением предлагаемых моделей для большого объема экспериментов, поэтому данный раздел имеет наибольшую практическую ценность. Обсуждается возможность использования моделей для описания поведения материала, даются рекомендации по их использованию в зависимости от вида воздействия и поведения материала при статических и гармонических испытаниях.

Личный вклад автора в рассматриваемые проблемы подтверждается публикациями, в том числе – в журналах из перечня ВАК.

**К основным задачам, имеющим существенную ценность при создании математических моделей для исследования вязкоупругого деформирования высоконаполненных полимерных композитов при сложных гармонических воздействиях и процедур их идентификации, можно отнести:**

1. Анализ закономерностей нелинейного деформирования (искажение формы петли гистерезиса, учет величин амплитуд деформации) высоконаполненных полимеров.
2. Разработка на основе нелинейного представления Вольтерры феноменологических полиномиальных комплексных моделей, позволяющих описать нелинейное поведение вязкоупругих материалов в условиях одно- и двухчастотных воздействий.
3. Реализация процедуры и алгоритмов идентификации коэффициентов математических моделей деформирования рассматриваемого класса материалов.

Решения данных задач вносят значительный вклад в развитие математических моделей деформирования, основанных на нелинейной теории вязкоупругости.

**К основным результатам работы следует отнести следующее:**

1. Разработана методика проведения двухчастотных экспериментов с учетом особенностей и возможностей используемого экспериментального стенда.
2. Разработана программа определения вязкоупругих параметров полимеров с описанием экспериментальных точек тригонометрическим рядом Фурье.
3. Получены новые экспериментальные данные о характере зависимостей определяемых параметров материала от частоты и температуры.
4. Предложены полиномиальные математические модели деформирования вязкоупругих материалов, учитывающие искажение петли гистерезиса и влияние амплитуд деформации на поведение материала.
5. Реализована процедура идентификации полиномиальных зависимостей, которая является более простой в отличие от идентификации ядер ползучести по гармоническим испытаниям. В рамках процедуры был построен экспериментальный план для параметрической идентификации, определены коэффициенты моделей и проверена их адекватность.
6. Произведена оценка применимости разработанных нелинейных моделей поведения композита при двухчастотных гармонических нагрузках и показано их преимущество по сравнению с линейной вязкоупругой моделью.

**По содержанию и основным результатам имеются следующие вопросы и замечания:**

1. При построении нелинейных моделей автор учитывает второй член интегрального ряда Вольтерры, что свидетельствует о различном механическом поведении материала при растяжении и сжатии. На мой взгляд, этот вопрос недостаточно подробно отображен в тексте диссертации. Об этом эффекте в тексте работы можно судить только по значениям вязкоупругих параметров, соответствующих второму члену ряда Вольтерры.
2. В работе не указана информация о структурном составе компонент композита. Насколько я понял из беседы с диссидентом, исследуемые материалы имеют объемную степень наполнения около (60-90) %, причем используется трехфракционный наполнитель. Это довольно специфический материал с высокой жесткостью и пониженной по сравнению с обычными резинами деформативностью.
3. На стр. 41 написано, что "... Также было ограничено время проведения эксперимента по количеству циклов...", но количество циклов не указано.
4. На стр. 41 также написано: "...Это значит, что фиксируемое данным датчиком перемещение складывается из «реального» перемещения образца  $u_{ic}$  и перемещения элементов си-

стемы  $u_c$ . В связи с этим необходимо определенным образом учитывать жесткость нагружающей системы..." Написано очень непонятно. Хорошо бы привести соответствующую схему для наглядности.

5. Из работы не понятно, насколько целесообразным является учет жесткости системы. Почему захваты нельзя считать абсолютно жесткими?

6. На стр. 44 "... Также нужно отметить, что при реализации симметричного цикла нагружения вследствие разносопротивляемости материала перемещение элементов системы  $u_c$  при сжатии будет больше, чем при растяжении ..." Нет объяснений почему так, а не наоборот.

7. Не исследуется и не учитывается размягчение материала после первых циклов нагружения (эффект Маллинза). Для его устранения экспериментальные данные снимаются после предварительной "тренировки" образца (3-5 циклов). Этот эффект достаточно существенно проявляется в высоконаполненных полимерах, каким является ПДИ, и может вносить определённый вклад в искажение выходного сигнала. Вопрос: можно ли его в принципе описать с помощью данного подхода?

8. Стр. 57: "... Разработана методика определения вязкоупругих параметров материала при одно- и двухчастотных нагрузках с использованием преобразования Фурье, учитывающая жесткость элементов экспериментальной установки, искажение задаваемого сигнала, а также геометрию используемых образцов..." Как можно говорить об учете геометрии используемых образцов, если для всех экспериментов их форма и размеры были одни и те же?

9. Стр. 59: Что такое  $K_1, \dots, K_i, \dots, K_7$ ? Если это фиксированные значения  $K=K_i$ , то как они выбирались и каковы их значения? В чем смысл и каковы условия их подбора?

10. Стр. 107: В подрисуночной подписи (да и в тексте тоже) нет пояснений, что изображено на рисунках 4.3-4.8 голубыми точками. Это результаты экспериментов или точками обозначена какая-то обобщенная экспериментальная кривая?

11. На стр. 115 написано: "... Нужно отметить, что постоянство коэффициента Пуассона для наполненных полимеров при различных статических деформациях часто не подтверждается экспериментально [2, 12]. В первом приближении для расчета конструкции при небольших значениях деформации можно принять коэффициент Пуассона, равным 0,495, что и делается достаточно часто в отрасли двигателестроения. При увеличении уровня действующей деформации необходимо определять коэффициент Пуассона экспериментально."

Все эластомеры, будучи некристаллическими материалами, состоящими из длинных полимерных молекул практически несжимаемые (коэффициент Пуассона – 0,495). И малый коэффициент Пуассона у них может быть только в случае появления микропор (вызванных или развитием структурной поврежденности при деформировании или заранее спланированных при изготовлении). В первую очередь это касается эластомерных композитов с жестким дисперсным наполнителем. Однако в смесевых ракетных топливах пористость вроде бы нежелательна. Да и в диссертации про нее ни слова. Можно ли говорить о коэффициенте Пуассона для конечно деформируемых сред? Для них в качестве меры сжимаемости используют соотношение объемов в свободном и нагруженном состоянии  $J=V/V_0$ .

12. Модель учитывает действие только одной и двух гармоник нагружения, однако, как отмечает сам автор, в ходе эксплуатации твердотопливных систем могут наблюдаться более сложные гармонические нагрузки (например, при транспортировке). С одной стороны, понятно, что первым приближением к таким нагрузкам является, именно, двухчастотное нагружение. С другой стороны, не ясно, как будут работать представленные уравнения в та-

ких случаях. На сколько сложно перейти от двухчастотной модели к многочастотной и планируется ли это сделать в будущем?

**Замечания по оформлению работы:**

Есть некоторые небрежности и неточности в тексте и рисунках, но в целом диссертация написана ясным и грамотным языком. Иногда, на мой взгляд, описания даны излишне кратко, что создает определенные затруднения для понимания.

Приведенные замечания не носят принципиального характера и не снижают в целом положительную оценку работы. Публикации и диссертационная работа свидетельствуют о необходимом уровне квалификации автора. Представленные в работе данные свидетельствуют о решении научной задачи описания поведения высоконаполненных полимеров при двухчастотных воздействиях, имеющей существенное значение для развития механики композиционных материалов, что соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. Таким образом, диссертационная работа соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации согласно положению о присуждении ученых степеней, и требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На основании вышесказанного считаю, что диссертант выполнил содержательное исследование, им получены новые актуальные научные результаты, ряд которых представляет интерес в современных приложениях к твёрдотопливной ракетной технике, и Янкин Андрей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент  
Олег Константинович Гаришин,  
старший научный сотрудник лаборатории  
Микромеханики структурно-неоднородных сред  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт механики сплошных сред  
Уральского отделения Российской академии наук  
(614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1,  
e-mail: gar@icmm.ru, телефон: +7 (342) 2378392)  
доктор физико-математических наук



О.К. Гаришин

Подпись О.К. Гаршина удостоверяю  
Инспектор по кадрам Института  
механики сплошных сред УрО РАН

Л.А. Ушакова

Дата: 13.11.2017

