

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе

Литвинова Степана Викторовича на тему:

«Моделирование реологических процессов в полимерных и композиционных материалах при термосиловом воздействии»,

представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.4.7. Высокомолекулярные соединения

Актуальность и научная новизна диссертации

Кратко об актуальности. Сама тема неисчерпаемая и отвечает признакам выбранного научного профиля. Можно сказать, что технический прогресс внес в подавляющее большинство отраслей (строительство, машиностроение, авиастроение, медицину, быт и т.д.), элементы и конструкции из полимеров и композитов на их основе. Изделия из указанных материалов отличаются высокой прочностью при низкой по сравнению с металлами плотностью. При этом, общеизвестно, что высокомолекулярные органические тела обладают рядом характерных свойств, которые необходимо принимать во внимание при их проектировании, выработке и эксплуатации. К таким свойствам относится существенная зависимость физико-механических характеристик полимерных материалов от внешних факторов, особенно температуры, а также другие реологические сложности. Среди них — ползучесть и релаксация напряжения, которые развиваются как при постоянных напряжениях и деформациях, так и при переменных. Кроме того, необходимо учитывать изотермические и неизотермические условия. Здесь много трудностей теоретического и практического характера и не так много задач в этой области удастся квалифицированно решить с целью прогностических действий. Поскольку в работе речь идет о реологии, в частности неньютоновских жидкостей к коим относятся полимерные, как дань памяти, отмечу одного из ведущих исследователей и теоретиков этой области, сформировавшим концептуальные взгляды работавшем в прошлом веке в Волгоградском политехническом институте (ныне ВолгГТУ) - Николая Васильевича Тябина. К сожалению, упоминания о нем в диссертации я не увидел. Ежегодные Тябинские чтения проводит ВолгГТУ.

Теперь о рассматриваемой работе. Диссертация С. В. Литвинова посвящена созданию и исследованию новых и существующих методов оценки напряженно-деформированного состояния конструкций из полимерных материалов с учетом воздействия на полимерный объект выборочного числа практических факторов (среды), в том числе температуры, ионизирующего излучения, добавок и др. Работа ориентирована на объективное исследование методов расчета технических полимерных конструкций на прочность, деформацию, долговечность и связана с

упомянутым выше прогнозированием. Эта тема является сложной и по моему мнению, **актуальной и практически значимой**. Хотя с практикой в данном случае сложнее, чем с теорией. Это и в диссертации отчетливо прослеживается. В работе С. В. Литвинова сгенерированы модели и разработаны методики, позволяющие определять, насколько существенно влияют на напряженно-деформированное состояние осесимметричных полимерных тел воздействия физических полей в сочетании с реологическими свойствами материала. Выполнено сравнение результатов, получаемых с использованием нелинейного уравнения Максвелла-Гуревича и его линеаризованного варианта. Отмечу, что многие авторы, учитывая интеллектуальные и методические сложности ограничиваются рассмотрением только строго определенных законов связи деформаций ползучести и напряжений. Важным достоинством работы С. В. Литвинова является определенная универсальность математических моделей. Они позволяют использовать как линейную, так и нелинейную теорию ползучести.

Еще раз подчеркну в пользу автора, что решение реологических задач для полимерных материалов с учетом термовязкоупругости связано с определенными математическими трудностями и в большинстве случаев может быть выполнено только численно. Правда компьютерное моделирование здесь сильно продвинулось и потеснило математическое. Автор для выбранной им задачи применил метод конечных элементов. Также для проверки достоверности результатов использовал метод конечных разностей. Кроме того, помимо численных методов С. В. Литвинов воспользовался аналитическими и численно-аналитическими методами и методиками.

Известно, что одним из условий, предшествующих решению задач механики полимеров, является анализ реологических свойств последних. Автором предложена методика определения физико-механических параметров материала анализом кривых релаксации напряжения. Правда, насколько это оригинально, мне установить не удалось, учитывая мой «химический профиль».

Достоверность выводов и результатов исследования

Достоверность результатов у меня сомнения не вызвала. Осуществлена проверка математических моделей и сопоставление новых результатов с опубликованными ранее исследованиями других авторов в данной области.

Практическая значимость результатов работы

Определенную практическую ценность представляет разработанный автором пакет прикладных программ в среде Matlab для анализа напряженно-деформированного состояния полимерных конструкций в осесимметричной постановке. Развита метод конечных элементов, который распространен на случай теплового воздействия на объект исследования при наличии высокоэластических деформаций. Получено решение задачи о длительной прочности адгезионного соединения при нормальном отрыве, разработана практичная достаточно оригинальная методика получения упругих и релаксационных параметров полимера, хорошо аппроксимирующая эксперименты, используя релаксацию напряжения. Представлена связь между изменением релаксационных свойств материала и напряженно-деформированным состоянием конструкций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа выполнена в традиционном стиле, как бы сказать классическом, изложена на 289 страницах машинописного текста (с 4 приложениями) и состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, содержащим 202 наименования. Работа имеет 124 рисунка и изложена профессиональным языком. Содержание диссертации в достаточном для понимания сути объеме раскрывает автореферат и обосновывает решение поставленных автором целей, задач и защищаемых положений.

Основное содержание диссертации

В первой главе приводится обзор работ, посвященных тематике диссертации, также рассматриваются основные уравнения механики деформируемого твердого тела, теории упругости, пластичности и ползучести, а также постановка задач теплопроводности. Представлены основные модели для используемого в последующих главах метода конечных элементов. Уточнено выражение для минимизируемого функционала в задачах определения температурного поля.

Вторая глава посвящена определению реологических параметров, входящих в нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича связанного с полимером. Приводится описание процессов, проходящих при квазистатическом нагружении полимерных стержней, а также релаксации напряжения в этом случае. Представлена апробация методики определения реологических характеристик на примере анализа кривых релаксации напряжения поливинилхлорида (ПВХ) при изменении

температуры. Получено близкое совпадение с экспериментальными данными. Честно приведено расхождение в результатах исследований, приведенных различными авторами и даже у одного автора. Также автор диссертации получил физико-механические параметры эпоксидного полимера как функции двух факторов: температуры и деформации в теле. Кроме того, представлена методика решения задач с учетом ползучести полимерных матриц..

В третьей главе подвергнуты анализу одномерные плоские задачи связанные с термовязкоупругостью неоднородных полимерных цилиндров в осесимметричной постановке. Решение осуществлено аналитически, а также методами конечных разностей и конечных элементов. Рассмотрено постоянное и нестационарное температурное поле в толще конструкции. Выборочно рассмотрены, так сказать, вопросы оптимизации самого решения плоских задач термовязкоупругости. Осуществлен выбор оптимального интервала времени, а также положения центра тяжести конечного элемента, координаты которого потом используются при вычислении элементов матрицы жесткости. Для шага времени автор предлагает неравномерное распределение по логарифмическому закону и по закону геометрической прогрессии. Оптимизация положительно сказывается на точности результатов.

Четвёртая глава работы - это моделирование напряжённо-деформированного состояния тел, в том числе в смежных с полимерами областях, под воздействием физических полей и наличия каких-либо функциональных добавок в полимерной матрице. Рассматривается влияние гам-ма-излучения и добавок гидроксипатита на реологические параметры полиэтилена высокой плотности. Автором получены эмпирические зависимости модулей упругости, высокоэластичности, скорости и начальной релаксационной вязкости от указанных выше факторов. Описано решение задачи о сжатии полимерного цилиндра при совместном действии внутреннего давления, облучения и добавок. Здесь же рассматривается вопрос оптимизации толстостенных тел путём создания искусственной неоднородности распределением добавок в полимере по такому закону, чтобы изменение физико-механических параметров материала приводило к равнопрочному состоянию тела. Дано решение двумерной задачи напряжённо-деформированного состояния с учетом воздействий на тело ионизирующего излучения и добавок. Соискателем ученой степени показано, что предложенная методика расчёта подходит и к иным материалам. Это хорошо! Для этого осуще-

ствлено моделирование напряжённо-деформированного состояния железобетонной оболочки в условиях температурного и радиационного воздействия.

Пятая глава диссертации посвящена осесимметричным задачам термовязкоупругости. Использован новый конечный элемент. Осуществлен переход к канонической системе уравнений МКЭ. Коэффициенты матрицы жесткости и вектора нагрузки определены путем символьного интегрирования. Анализ достоверности полученных коэффициентов дан для предельного случая, соответствующего плоской деформации. Решена практически важная задача извлечения полимерного тела из какого-либо источника тепла (печь, экструдер и т.д.), когда тело охлаждается путём отдачи тепла в окружающую среду и, соответственно, в теле возникает неоднородное состояние, приводящее к накоплению внутренних напряжений.

В *шестой* главе автором описывается конечно-элементный расчет длительной прочности адгезионного соединения с учетом реологии полимерного материала. В рассмотрение приняты два члена спектра времен релаксации полимера. Проведено сравнение результатов с решением других авторов (А. С. Фрейдин, Р. А. Турусов). Установлено определенное расхождение с результатами указанных авторов и объяснены его причины. Также приведены результаты расчета адгезионного соединения с учетом изменения температуры. Решение данной задачи имеет практический оттенок.

Общая оценка выполненной работы

Поставленные автором вопросы рассмотрены достаточно подробно. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций вполне диссертательна, что подтверждается применением нескольких методов к решению каждой задачи с последующим сопоставлением результатов, сравнением с опубликованными данными других авторов в данной области. Диссертационная работа соответствует пунктам 7 и 8 паспорта специальности «Высокомолекулярные соединения» - об этом я уже говорил вначале.

Автореферат в большой мере отражает содержание работы, ее этапы и объем.

Личный вклад соискателя по моему впечатлению включает:

- сбор, систематизацию, анализ и обобщение основной информации по исследуемой проблеме;
- вывод уравнений для расчета полимерных цилиндрических тел с учетом термовязкоупругости;

— разработку численных алгоритмов расчета, создание программы для расчетов в пакете Matlab;

— разработку методик определения реологических и упругих параметров материалов с учетом изменения температуры, радиационного облучения и введения добавок;

— решение ряда модельных задач, представляющих теоретический и некоторый практический интерес.

Все это выделяет эту работу в ряду аналогичных исследований и позволяет положительно оценить личный вклад соискателя.

Качество оформления диссертации

Диссертация выполнена на современном уровне с использованием компьютерных технологий, что обеспечило высокое качество оформления. Работа хорошо иллюстрирована. К научной лексике и оформлению в некоторых местах можно слегка придираться (об этом немного говорится ниже), но это, так сказать, рабочие моменты.

По диссертации и автореферату имеются следующие замечания:

Оговорюсь сразу, что замечания и недостатки – дело весьма субъективное и отражают только мнение того кто их пишет или делает. Автореферат – документ, который читают значительно чаще, поэтому к нему и придирок больше. Поэтому, как мне показалось, можно указать на следующее.

Основные

1. Сразу можно придираться к тексту диссертации - спокойно можно обойтись без терминов гомогенный и гетерогенный - сущность не изменится!

2. Математические модели исследуемых процессов особенно в автореферате описаны несколько небрежно. Математик был бы недоволен. Когда автор в актуальности пишет о значениях функций, то при этом никак не упоминаются аргументы. Это очень важно для понимания решаемой задачи. И далее при описании математических моделей с ходу неясна размерность задачи и состав независимых переменных. Остается возможность догадываться по применяемым обозначениям

частных производных, что это все-таки задача многомерная. См. например, уравнение внизу с. 8 автореферата, где не все обозначения расшифрованы.

3. На с. 9 автореферата и в самом тексте диссертации неудачно используется термин «достоверность» в отношении аппроксимации. Например, при чтении только автореферата сложно точно сказать, но по смыслу, по-видимому, имелась ввиду одна из оценок погрешности аппроксимации функции. А далее погрешность решения, названа достоверностью. Обычно достоверность используется применительно к событиям для оценки их вероятности.

4. Некоторому пониманию предложенных математических моделей способствует наличие и предметных моделей, которые позволяют уловить общий смысл. Но для полного понимания их, скажем так, этого недостаточно. Не хватает абстрагированной математической постановки задачи вообще оторванной от предметной области, которая позволила бы в полной мере оценить цель моделирования, условия вычислительного эксперимента, адекватность выбранной модели. Тем более, что автор претендует на расширение применимости моделей в смежных областях.

5. В литературном обзоре (мне кажется, что можно было бы вообще обойтись без него, а рассматривать необходимые положения и работы других авторов прямо по тексту – это время экономит) отмечено, что «вопросам исследования жёстких сетчатых полимеров посвящено «довольно мало» работ. Это конечно касается исключительно научного коридора, по которому движется автор. «Подобная ситуация обстоит и с работами по вопросам изучения и развития методов расчёта конструкций и их элементов из полимерных материалов в различных диапазонах температур и напряжений (условиях). Практически полностью отсутствуют, как среди отечественных, так и среди зарубежных, работы исследования механики армированных полимеров, учитывающие зависимость релаксационных свойств от температуры; приведение полных систем уравнений механики подобных армированных полимеров, а также алгоритм их использования для решения прочностных задач». Это сомнительное утверждение. Вообще такие утверждения делать опасно – увлеченных работающих людей много! Например, работы, посвященные механике и релаксационным явлениям в структурированных полимерных системах еще в советскую эпоху рассматривались в отечественной монографии А. А. Аскадского

«Структура и свойства теплостойких полимеров», М.: Химия, 1981, 320 с. Дальше в этом направлении потрудились тоже немало.

Несколько коротких полужамечаний (наблюдений), которые скорее всего можно связать с научными вкусами автора.

1) В работе проводится рассмотрение и решение задач **только** в осесимметричной постановке.

2) В работе отсутствует сравнение полученных результатов с расчетом, который можно выполнить с помощью конечно-элементных комплексов, таких как «Abaqus» или «Ansys».

3) В заключение главы 1, стр. 28, сказано, что осуществлен переход от эллиптических уравнений к вариационным. Слишком обще! Переход реализован только для уравнения теплопроводности.

4) В главе 4 дан вывод, сделанный на основе анализа таблиц 4.1 и 4.2, что **оптимальным** шагом разбиения по времени является разбиение в соответствии с геометрической прогрессией. А почему? Я сравнений не увидел.

5) В списке литературы приведено много ссылок на учебники и монографии, изданные в прошлом веке и значительно меньше на современные работы, что их нет что ли?

6) Все же к технологии надо еще приближаться и приближаться!

Высказанные замечания сильно не затрудняют общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертационная работа представляет собой целостное и законченное научное исследование в предметной области, выполненное на актуальную тему и отличающееся достаточной новизной результатов. Выводы по диссертации также можно покритиковать, но, тем не менее, они в полной мере позволяют оценить научный уровень диссертации как современный и достаточно высокий.

О достаточности и полноте публикаций по теме диссертации

Оценка этого дело субъективное. Автором опубликовано 80 работ по теме диссертации, из которых 39 в изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационного исследования, а также 20 работ в журналах, входящих в международные базы «Scopus» и «Web of Science». Получено 5 свидетельств на программы для ЭВМ. Приложены 5 копий актов внедрения результатов работы. Результаты работы обсуждались на конференциях и

семинарах различного уровня. Мне кажется, что нормативы докторской диссертации выполнены!

Выводы

Диссертация на тему «**Моделирование реологических процессов в полимерных и композиционных материалах при термосиловом воздействии**» С. В. Литвинова представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, удовлетворяющую требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (в актуальной редакции), в которой решена проблема по развитию метода конечных элементов при температурном воздействии и созданы компьютерные программы для расчета длительной прочности адгезионного соединения при нормальном отрыве, разработана приемлемая методика получения упругих и релаксационных параметров полимера, адекватно аппроксимирующая экспериментальные данные. Исследование влияния изменения релаксационных свойств материала на напряженно-деформированное состояние конструкций выполнено на актуальную тему и представляет практический интерес. Недостатки на диссертационность работы не влияют, а открывают простор для дальнейшей работы.

Считаю, что автор диссертационной работы, Литвинов Степан Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.4.7. Высокомолекулярные соединения.

Официальный оппонент, доктор химических наук (специальность 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения), профессор, профессор кафедры «Технология высокомолекулярных и волокнистых материалов» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Вячеслав
Евгеньевич
ДЕРБИШЕР

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»; 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28, тел.: (8442) 23-00-76, (8442)24-84-45, +7(961) 698-96-83; e-mail: rector@vstu.ru, derbisher_ve@vstu.ru, derbisher-28091945@yandex.ru; URL: <https://www.vstu.ru>

