

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Литвинова Степана Викторовича «Моделирование реологических процессов в полимерных и композиционных материалах при термосиловом воздействии», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.4.7. Высокомолекулярные соединения.

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время среди всех видов материалов наиболее широко внедряются в различные отрасли промышленности полимерные материалы и композиты на их основе. Именно этим материалам отводится особая роль в современной технике. Потребность в таких материалах для развития различных, в том числе высокотехнологичных, областей промышленности в России высока. Такая высокая востребованность промышленности в полимерных материалах объясняется уникальностью и разнообразием их эксплуатационных свойств, и, в первую очередь – механических, к которым можно отнести реологические свойства – высокоэластичность и вязкоупругость. Именно эти свойства, принципиально отличающие высокомолекулярные соединения от низкомолекулярных во многих практических случаях определяют «рабочий» диапазон нагрузок и деформаций изделий из полимеров. Однако проявляются эти свойства у различных полимерных структур крайне разнообразно и, кроме того, существенно зависят от условий эксплуатации (температуры, влажности, диапазонов нагрузок и деформаций и пр.). Существует достаточно много подходов к описанию и прогнозированию вязкоупругого поведения полимерных материалов. Развитие и углубление представлений о структурных особенностях высокомолекулярных соединений, а также более широкая возможность применять к описанию напряжённо-деформированных состояний полимеров современного математического аппарата и программных комплексов, позволяет решать задачи, связанные с реологическими свойствами полимеров на более высоком уровне и представлять обобщающие уравнения состояний для более широкого класса

полимерных материалов. Таким образом, направление научного исследования, заявленного в рассматриваемой работе, является, безусловно, актуальным, важным с научной и с практической точек зрения.

Краткое рассмотрение содержания диссертации.

Работа состоит из введения, семи глав, основных выводов, библиографического списка и трёх приложений. Изложена на 289 страницах машинописного текста и содержит 124 рисунка и 24 таблицы. Нет необходимости пересказывать содержание работы, тем более что оно четко изложено в автореферате. Остановлюсь лишь на очень кратких формулировках содержания отдельных глав, поскольку они потребуются для оценки работы в целом.

В главе 1 выполнен обзор и анализ литературы в области механики полимеров, механики деформируемого твёрдого тела, теории упругости ползучести и пластичности. Рассматривается применение метода конечных элементов для решения задач, определённых в диссертационной работе. В главе 1 особое внимание уделено теоретическим вопросам распределения и определения температурного поля, так как рассматриваемые деформационно-прочностные свойства полимерных материалов существенно зависят от температурных условий.

В главе 2 проведено описание методик определения деформационных параметров на основе обобщённого уравнения Максвелла-Гуревича. Это уравнение лежит в основе решений всех рассматриваемых в диссертационной работе задач по описанию и моделированию релаксационных процессов в полимерах. Проведено сопоставление и показано хорошее совпадение экспериментально полученных семейств кривых релаксации напряжений и ползучести с рассчитанными величинами на основе предложенных подходов на примере ПВХ. Представленный автором метод определения физико-механических свойств материала для выбранного уравнения связи позволил, на примере ЭДТ-10, провести анализ

кривых релаксации с представлением результатов как функции температуры и полной начальной деформации.

В Главе 3 решаются задачи, которые является логическим продолжением использования обобщённого уравнения Максвелла-Гуревича в современных программных комплексах. Отсутствия ранее этого подхода ставит перед исследователями задачи самостоятельной разработки программных модулей по определению упруго-релаксационного поведения полимерных материалов в различных напряжённо-деформированных состояниях. Эта часть работы посвящена решению одномерных плоских задач термовязкоупругости для полимерных тел. Решение задачи получено с привлечением следующих подходов - аналитического, метода конечных разностей и метода конечных элементов. Моделируется термовязкоупругость толстостенных цилиндрических тел в различных температурных и временных условиях. Показано, что результаты моделирования, полученные разными методами, совпали, что свидетельствует об адекватности предложенных моделей. Автор продолжает рассматривать и оптимизировать подходы, связанные с математическим моделированием вязкоупругого поведения полимерных тел в условиях переменных температур. На первый план выходит оптимизация методик расчёта плоских задач вязкоупругого поведения полимерных тел. Поскольку исследуются итерационные процессы во времени, автором рассматривается несколько оптимизационных подходов по увеличению общей точности решения поставленных задач. Изначально автор рассматривает переменный шаг времени. В связи с тем, что максимальная скорость роста высокоэластических деформаций наблюдается в самом начале процесса и сильно затухает с течением времени, автором предложены неравномерные по времени законы разбиения временного интервала. Рассматриваются логарифмический закон и закон распределения по геометрической прогрессии. Также рассматривается вопрос о назначении центральной точки конечного элемента. Вместо использования среднего

значения по радиусу конечного элемента, автор использует центрально взвешенную точку путём приравнивания внешнего и внутреннего объёмов конечного элемента между собой. Приводится решение модельных задач, отражающих эффект от использования оптимизационных подходов.

Глава 4. В этой главе автор рассматривает вопросы влияния на упруго-релаксационные свойства полимера наличия добавки гидроксиапатита (ГА) и облучения материала гамма-лучами. При этом определение физико-механических параметров происходит только по анализу кривых релаксации напряжений полимерного материала, содержащего различные концентрации ГА и полученные при различной интенсивности гамма-излучения. Имея зависимости физико-механических параметров, появляется возможность определения напряжённо-деформированного состояния в теле при различных уровнях ГА и гамма-излучения.

Этот вопрос очень актуален, поскольку повсеместно происходит облучение полимерных материалов гамма-излучением, особенно медицинского предназначения с целью его стерилизации. При этом гамма-излучение может как улучшать некоторые разновидности полимера путём развития дополнительных сшивок в материале, так и приводить к деструкции других разновидностей полимеров.

Автором рассматривается задача, целью решения которой является нахождение такого закона распределения добавок в полимере, при котором созданная при этом неоднородность материала приведёт к работе тела, как равнопрочного. Это очень интересно с практической точки зрения, поскольку достижение равнопрочного состояния позволяет максимально использовать потенциал тела и увеличить значения нагрузок, воспринимаемых изделий без разрушения.

Далее автор проводит моделирование поведения полимерного тела в виде плоского цилиндра под действием осевых сжимающих нагрузок при разных уровнях ГА и ионизирующего излучения. Автор выявляет особенности механического поведения указанных полимерных структур и даёт

практические рекомендации по их обработке. Подобные конструкции используются в медицине при протезировании, что определяет практическую важность данной задачи.

Приводится задача рассмотрения цилиндрического изделия из полимербетона на основе фурфуролацетоновой смолы. Для данного материала изменение физико-механических параметров, к примеру, модуля упругости, сказывается на значении прочности изделия. В диссертационной работе приводятся результаты расчётов такого закона изменения модуля упругости, при котором цилиндр будет находиться в обычном однородном состоянии, а также равнопрочном и равнонапряжённом.

Кроме того, в настоящей главе автор проводит моделирование бетонного цилиндра под действием температурного поля и ионизирующего излучения. Тем самым автор показывает работоспособность использованных решений и к иным материалам, в том числе и строительного предназначения.

В 5 главе рассматриваются задачи термовязкоупругости осесимметричного двумерного элемента. Представлены методики построения матрицы жёсткости и вектора нагрузок для прямоугольного двухмерного конечного элемента применительно к задачам термовязкоупругости полимерных тел. Температурное поле описывается в работе классическим уравнением теплопроводности Фурье. Отличие представленных в работе программных комплексов от существующих заключается в том, что проведено непосредственное аналитическое интегрирование функции формы заданного конечного элемента, которое включает узловые значения градиента температурного поля, а также учитывается изменение высокоэластических деформаций во времени.

Автор использует полученный конечный элемент, на задаче расчёта полимерного цилиндра, в процессе остывания при постепенном извлечении из разогретого тела с последующим контактом с окружающей средой при нормальной комнатной температуре. За счёт разности скорости остывания разных частей тела, в его толще образуется температурный градиент,

приводящий к неоднородности физико-механических параметров в его толще. За счёт этого в теле образуется накопление остаточных напряжений, которые к концу исследуемого временного интервала полностью не релаксируют. Данный факт позволяет спрогнозировать остаточные напряжения в полимерных телах, которые могут негативно сказаться в процессе дальнейшей их эксплуатации.

В главе 6 решается задача по определению прочности адгезионного взаимодействия на примере двух цилиндрических металлических дисков, соединённых эпоксидной смолой с использованием разрабатываемого метода конечных элементов, а именно, при помощи 4-узлового конечного элемента. Поставленная задача представляется крайне актуальной, так как до настоящего времени не существует ни единой точки зрения на природу адгезионного взаимодействия, ни достаточно надёжных методов расчёта прочности адгезионного взаимодействия, возникающего между разнородными материалами. Автор при моделировании этого процесса учитывает релаксационные процессы, протекающие в полимерном адгезиве при одноосном нагружении системы металл-полимер-металл, изменение температурных режимов. Проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученных авторами других подходов к решению этой задачи. Экспериментально доказана справедливость предложенного подхода при решении поставленной задачи. Необходимо отметить, что в отличие от исследований других авторов, в результате которых с течением времени происходит разрушение адгезионного соединения, в настоящей работе приводится совершенно противоположный результат, при котором с течением весьма длительного периода времени напряжения от своего максимального значения снижаются, наблюдается их релаксация, и они приходят к некоторому конечному значению.

Но автору следовало бы дать больше пояснений по вопросам распределения напряжений (нормальных и касательных) на рассматриваемый элемент. Эти неясности вызывают ряд вопросов, которые будут приведены ниже.

Достоверность полученных результатов

Полученные в работе данные обосновываются и подтверждаются:

- применением правильно выбранных теоретических и методологических подходов к решению поставленных задач вязкоупругого поведения полимерных структур;
- соответствием полученных результатов современным научным представлениям в области теоретических и практических вопросов, связанных со строением и свойствами полимерных материалов;
- достаточно хорошим соответствием рассчитанных по предложенным моделям характеристик вязкоупругого поведения полимерных тел с представленными экспериментальными результатами.

Научная новизна работы

1. На основе нелинейного уравнения Максвелла-Гуревича предложена методика определения характеристик упруго-релаксационных свойств полимеров, находящихся в напряжённо-деформированном состоянии с учётом вязкоупругого их поведения и в условиях переменного температурного поля.
2. Получены и использованы в описании реологических свойств полимеров матрица жёсткости и вектор нагрузок конечного элемента, в которые входят компоненты температурного градиента и высокоэластической деформации. Вследствие непосредственного аналитического интегрирования функции формы удалось значительно повысить точность производимых вычислений.
3. Повышена точность математической модели напряжённо-деформированного состояния полимерных тел посредством построения матрицы жёсткости и вектора нагрузок для предложенного конечного элемента полимерной структуры.
4. Предложена конечно-элементная модель определения длительной прочности адгезионного соединения на нормальный отрыв.

5. С учётом предложенной ранее методики определения параметров физико-механических свойств полимера проведён анализ зависимости напряжённо-деформированного состояния полимерного тела при изменении различных факторов (наличие физических полей в виде температурного поля, ионизирующего излучения, наличие добавок и т.д.).

6. Разработана теоретическая модель и предложена методика обработки кривых релаксации напряжений полимеров с последующим определением зависимостей параметров физико-механических свойств полимера как функции нескольких переменных, что позволяет прогнозировать напряженно-деформированное состояние и для промежуточных значений экспериментальных кривых.

В отличие от известных работ, так или иначе затрагивающих тему исследования физико-механических свойств полимеров, вопросов реологии, напряженно-деформированного состояния и адгезии, представленная диссертация наиболее органично сочетает в себе обобщение накопленного опыта, теоретический анализ, математическое описание процесса, с корректной постановкой эксперимента и практическим приложением полученных научных результатов.

Практическая значимость работы

Значимыми результатами проведённых в работе теоретических и экспериментальных исследований являются практические рекомендации по внедрению в программные комплексы полученной конечно-элементной модели для наиболее точного определения поведения полимерных тел в различных нагруженных и деформированных состояниях и режимах.

С практической точки зрения представляет интерес также решение задачи определения напряжённо-деформированного состояния в плоском полимерном диске и анализ изменения этого состояния под действием внешних воздействий, таких, как ионизирующее излучение. Подобные полимерные конструкции используются в медицинской отрасли для целей

эндопротезирования, при этом применяемое для стерилизации ионизирующее излучение может как приводить к сшиванию полимера, так и к его деструкции.

Основные вопросы и замечания по работе

1. Разнообразие структур и свойств полимерных материалов существенно затрудняет нахождение обобщающих аналитических выражений и математических моделей для описания их упруго-релаксационного поведения. В этой связи, в работе следовало бы более определённо сформулировать к каким полимерным структурам (материалам) и в каких диапазонах деформаций (или напряжений) и температур применимы предложенные подходы.
2. Как можно трактовать (каков физический смысл) в уравнении Максвелла-Гуревича величины m -«модуля скорости»? Поясните зависимость этого параметра от температуры для ПВХ (рисунок 2.11, стр.66).
3. Из каких соображений автор делает заключение, что высокоэластическая деформация полимера по уровню сопоставима с упругой деформацией? Следует уточнить, для каких полимерных структур и в каком диапазоне деформаций (напряжений) и температур это утверждение справедливо.
4. Пригодны ли полученные из режима релаксации напряжений параметры напряжённо-деформированного состояния на основе обобщённого уравнения Максвелла-Гуревича для описания релаксационных процессов в других режимах – ползучести, режиме активного нагружения и др.?
5. По главе 5. Каким образом при построении матрицы жёсткости и вектора нагрузок для прямоугольного двухмерного конечного элемента учтены реологические свойства элемента (наличие вязкоупругости, высокоэластических деформаций)?

6. По главе 6. Не совсем понятно распределение нормальных и касательных напряжений в рассматриваемом конечном элементе при моделировании адгезионной прочности в режиме одноосного растяжения (именно этот случай рассматривает автор). В этом случае наиболее нагруженными площадками элемента являются площадки, перпендикулярные к направлению приложения усилий, и именно на них возникают наибольшие напряжения, и эти напряжения - нормальные.

7. Автор указывает на наибольшие касательные напряжения, действующие на элемент адгезива. Можно ли в этом случае говорить об адгезионном взаимодействии, ведь этот процесс, происходящий в объёме адгезива ближе к процессу когезии?

8. В работе экспериментальные и расчётные значения параметров указаны с точностью до 6 значащих цифр, что вряд ли соответствует реальным экспериментам и расчётам.

Однако указанные вопросы и замечания не снижают высокий уровень диссертационной работы и значимость полученных результатов.

Общая оценка выполненных диссертантом исследований и работы в целом

В диссертационной работе С.В. Литвинова разработаны комплексные подходы к моделированию напряжённо-деформированных состояний полимерных систем, связанные с учётом сложных реологических процессов и влиянием температурных режимов с применением современных численных методов и представлений о структуре и свойствах полимерных структур. Указанный подход диссертанта является совершенно правильным и весьма информативным. Предложенные теоретические подходы и методики расчёта характеристик механических свойств полимеров являются приоритетными и важными для рассматриваемой области знаний.

Работа написана логично и содержит большой и интересный теоретический и прикладной материал. Анализ вопроса выполнен

достаточно глубоко, сделаны сопоставления собственных данных с данными, полученными из научной литературы. Все это говорит о том, что автор работы является серьезным квалифицированным специалистом. Основное содержание диссертации опубликовано в научной печати и доложено на научных и научно-технических конференциях. Статьи и тезисы докладов по материалам диссертации перечислены в автореферате. Диссертационная работа соответствует пунктам 7 и 8 паспорта специальности «Высокомолекулярные соединения». Автореферат по содержанию полностью отвечает тексту диссертации.

Соответствие паспорту специальности:

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности «Высокомолекулярные соединения» по следующим пунктам:

- Физические состояния и фазовые переходы в высокомолекулярных соединениях. Реология полимеров и композитов.
- Усовершенствование существующих и разработка новых методов изучения строения, физико-химических свойств полимеров в конденсированном состоянии и других свойств, связанных с условиями их эксплуатации.

Общее заключение о диссертационной работе следующее:

На основании проведенного анализа считаю, что диссертационная работа С. В. Литвинова по уровню выполненных теоретических и экспериментальных исследований, их достоверности, актуальности, научной и практической важности полученных результатов соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, т. к. является законченной научно-квалификационной работой в области разработки теоретических методов и подходов к описанию и

прогнозированию вязкоупругого поведения полимерных систем в различных напряжённо-деформированных состояниях, совокупность которых представляет собой новое крупное достижение в развитии данного научного направления.

Автор диссертационной работы – Литвинов Степан Викторович – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.4.7. Высокомолекулярные соединения.

Официальный оппонент, заведующий
кафедрой инженерного материаловедения и метрологии,
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО
«Санкт - Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»

Цобкалло Екатерина Сергеевна

Цобкалло

25 марта 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (СПбГУПТД); адрес: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18; тел.: +7 (812) 315- 75-25; e-mail: rector@sutd.ru, priemcom@sutd.ru; http://sutd.ru.

Заведующий кафедрой инженерного материаловедения и метрологии, Е. С. Цобкалло; адрес кафедры: 190068, Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 46; e-mail: tsobkallo@mail.ru; тел. / факс: +7 (812) 310-41-16; +7 (812) 315-15-74.



Цобкалло Е.С.
Семко Е.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»