

В диссертационный совет Д002.075.01  
на базе Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт проблем машиноведения РАН

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Константина Борисовича Устинова  
на диссертацию Шубина Сергея Николаевича  
«Моделирование термоупругого поведения эластомерных композитов с  
внутренними механизмами адаптации к температурным воздействиям»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертация С.Н. Шубина посвящена развитию моделей механики деформируемого тела в наполненных эластомерах – материалах, относимых к классу дисперсных композитов.

Актуальность и практическая значимость исследования обусловлены необходимостью разработки новых композиционных материалов, пригодных для эксплуатации в экстремальных условиях Крайнего Севера, в частности, в связи с освоением в этом регионе нефтегазовых месторождений. Уплотнительные элементы, используемые в нефтегазовом оборудовании, обычно делаются из эластомеров. Но больший коэффициент термического расширения эластомера по сравнению металлом приводит к тому, что при падении температуры из-за сжатия эластомера на уплотнительном элементе падает контактное давление что может привести к протечкам и тяжелым экологическим последствиям. В диссертации исследуются две возможности решения этой проблемы – использование композитов с частицами наполнителя, имеющими отрицательный коэффициент термического расширения, и частицами, претерпевающими при охлаждении фазовый переход, сопровождающийся тепловыделением, что задерживает охлаждение уплотнительного элемента. Показывается, что частицы первого типа могут быть эффективно использованы при длительных низкотемпературных воздействиях, а второго типа – при резком падении внешней температуры вплоть до температур ниже температуры стеклования эластомера вследствие резкого падения давления в трубе.

Ранее в развитых в диссертации постановках для нелинейно-упругого материала подобные задачи не ставились и не решались. Автором построены математические модели, позволяющие выявить закономерности деформирования высоконаполненных композитов с эластомерной матрицей при механическом и температурном воздействии. Разработанные модели позволяют описывать нелинейные эффекты, в частности отслоение частиц от матрицы в процессе

деформирования, что для эластомерных композитов с частицами не шаровой формы сделано впервые. Отдельно стоит отметить разработанный автором работы алгоритм по созданию представительных элементов объема дисперсных композитов с эллипсоидальными включениями. Этими обстоятельствами определяются научная новизна и научная значимость работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Список литературы содержит 124 наименований. Общий объем – 133 страниц в формате машинописного текста.

В первой главе описан разработанный алгоритм построения пространственных микроструктур дисперсно-упрочненных композитов.

Во второй главе исследуются композиты с включениями, имеющими отрицательный коэффициент термического расширения. В приближении малых деформаций для линейно-упругой матрицы дана аналитическая оценка эффективности использования таких частиц для поддержания контактного давления при длительном воздействии низких температур. Затем строятся и исследуются микроструктуры композита для случая нелинейно-упругой матрицы. При генерации структур используется метод, разработанный и представленный в первой главе и позволяющий, в частности, достигать высокие степени наполнения, в том числе – частицами, имеющими вытянутую форму. При численной генерации микроструктур используются данные о микроструктуре реальных композитов. Исследуется роль адгезии на границе матрицы и включений, а именно, рассматриваются два предельных случая – идеальный контакт и отсутствие адгезии. Исследуется, как отслоения матрицы от включений, возникающие из-за отсутствия адгезии, влияют на диаграммы деформирования при сжатии. Показывается согласованность построенных диаграмм деформирования, построенных в результате численных экспериментов, с экспериментальными диаграммами.

В третьей главе ставится задача о термомеханическом отклике композита, с включениями, претерпевающими при охлаждении фазовое превращение, сопровождающееся тепловыделением. Такие композиты затем исследуются на основе разработанных численных процедур. В частности, показывается эффективность использования таких частиц для существенного уменьшения зоны промерзания – области композита, в которой температура может опуститься ниже температуры стеклования.

К сильным сторонам представления работы следует отнести, в частности, стиль изложения: автор без необходимости не переписывает в текст громоздкие и в общем известные формулы, а лишь ссылается на них и приводит результаты расчетов. Полезными представляются приводимые автором приближенные аналитические решения, которые могут быть использованы для получения качественной оценки поведения исследуемых композитов в зависимости от различных параметров.

**Научные положения, выводы и рекомендации**, сформулированные в диссертации, получены на основе чёткого понимания и трактовки рассматриваемых физических явлений, с использованием физических и математических моделей, адекватных изучаемым эффектам и экспериментальным данным, и, поэтому, являются достоверными.

**По диссертации имеются замечания:**

1. При постановке задач не указаны характерные размеры включений. Безусловно в классической механике эффективные свойства не зависят от абсолютных размеров, но известно, что в эластомерах (на примере включений в виде частиц технического углерода) механические свойства могут весьма сильно зависеть от размера включений. Это может быть объяснено проявлением на данных масштабах совершенно других механизмов взаимодействия включения с материалом матрицы по сравнению с механизмами, описываемыми классическими моделями в духе Эшелби. Если речь идет о макроскопических включениях, много больших, чем, например, обычно используемые частицы технического углерода – то следовало бы хотя бы обозначить проблему.
2. В работе сравниваются объемные доли включений синтезированных ПЭО с помощью разных алгоритмов, однако не приводятся сравнения времени работы алгоритмов.
3. В диссертации говорится о невозможности достижения необходимых плотностей упаковок для включений, сильно отличающихся от шарообразных (игольчатых, дискообразных). Это, безусловно так, но только для изотропного в пространстве распределения включений. Было бы интересно рассмотреть влияние таких включений при их частично или полностью упорядоченном распределении в пространстве. Если же такое распределение неприемлемо по технологическим соображениям – то уместным было бы хотя бы упоминание таких возможностей.
4. Каково влияние взаимосвязи между отслоением матрицы от частицы и расширением частицы вследствие фазового перехода при охлаждении? Не расширится ли частица в область отслоения и какое влияние окажет это расширение?
5. В работе фазовый переход ядра включений происходит скачком, при этом не рассматривается кинетика фазового перехода.

Указанные замечания в целом носят уточняющий характер и не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Работа является законченным исследованием, выполнена на высоком научном уровне и содержит результаты, вносящие существенный вклад в механику неоднородных (композитных) материалов. Положения, предложенные автором, аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Результаты работы могут быть использованы при разработке оборудования, работающего при низких

температурах, что может быть важным для развития регионов Крайнего Севера России.

Автореферат дает ясное представление о постановке исследования и основных результатах. Содержание работы С.Н. Шубина и основные результаты, полученные в ней, полностью отражены в публикациях, перечисленных в диссертации и автореферате, и апробированы на международных конференциях. По результатам работы опубликовано 4 статьи, индекируемые базой данных Scopus. В работе автора нет заимствованных материалов без указания ссылок на источник заимствования.

Диссертация Шубина Сергея Николаевича «Моделирование термоупругого поведения эластомерных композитов с внутренними механизмами адаптации к температурным воздействиям» удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела». Шубин Сергей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по этой специальности.

Официальный оппонент

В.н.с. лаборатории Геомеханики ИПМех РАН

Д.ф.-м.н., доцент

119526, Российская Федерация, Москва,

пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

тел.: +7(495)434-00-17

e-mail: ustинoff127@mail.ru

К.Б. Устинов

07.06.2018

Я, Устинов Константин Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

К.Б. Устинов.

Подпись К.Б. Устинова заверяю

Специалист по кадрам

*Нагольник Юрий Петрович*

*Зн. Подпись № 4*

