ОТЗЫВ

о диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Макиевой Элины Игоревны на тему: «Динамика тел, взаимодействующих с проскальзыванием и разрушением» по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Диссертационная работа Э.И. Макиевой посвящена актуальной и практически значимой проблеме - разработке математических моделей динамики механических систем, функционирующих в условиях фрикционного взаимодействия и сопутствующего разрушения приповерхностных слоев контактирующих тел. Классические модели теоретической механики, как правило, оперируют идеализированными представлениями о неизменности структуры взаимодействующих тел и отсутствии массопереноса в зоне контакта. Однако в реальных системах (узлы трения машин, горные массивы, технологии обработки материалов давлением) трение неразрывно связано с износом, образованием частиц износа и локальным разрушением. Игнорирование этих факторов приводит к существенным расхождениям между теоретическими выводами и наблюдаемым поведением систем, особенно в критических и экстремальных режимах, предшествующих отказу.

Диссертант обоснованно выбирает двухуровневый подход к проблеме, разделяя исследование на «внешнюю» задачу (динамика тел с учетом разрушения) и «внутреннюю» задачу (динамика продуктов разрушения - промежуточной прослойки). Такая постановка соответствует современным тенденциям в трибологии и механике поврежденной среды и обладает несомненной научной новизной.

Неклассические модели динамики с проскальзыванием и разрушением, разрабатываемые в диссертации, ценны тем, что они переводят анализ систем из области «как они должны идеально работать» в область «как они реально ведут себя в экстремальных и критических условиях, вплоть до отказа». Они предоставляют адекватный теоретический и вычислительный инструмент для понимания, прогнозирования и управления сложнейшими процессами, где контакт, необратимая диссипация и изменение структуры являются не помехой, а сутью явления.

Выбранное направление актуально для теории и для практики. Развитие возможностей эксперимента и подходов к описанию динамики систем с трением и разрушением позволяет обсудить пределы применимости результатов, полученных при помощи формально-аксиоматических методов теоретической механики. Помимо этого проводимые исследования могут оказаться полезными при формировании технологий обработки материалов.

Диссертация состоит из двух глав, логически связанных между собой и образующих завершенное научное исследование. Логика построения является классической для механики гетерогенных сред и трибологии: от структуры (микроуровень) к функции (макроуровень). В первой главе после анализа возможных структур расположения элементов прослойки вдоль области контакта (структуры считаются фиксированными) решается внешняя задача - как эти структуры влияют на движение взаимодействующих тел. Во второй главе изучается внутренняя задача, дополняющая результаты первой главы в части причин возможных изменений структур прослойки - поведение самих продуктов разрушения, обусловленное напряженно-деформированным состоянием в их окрестности.

Первая глава посвящена динамике тел с проскальзыванием и разрушением при наличии промежуточной прослойки между их контактирующими поверхностями (макроуровень). Объектом анализа служат сами контактирующие тела, а промежуточная прослойка (продукты разрушения) учитывается как динамический фактор, модифицирующий их взаимодействие.

Приведены неклассические модели, учитывающие влияние промежуточной прослойки в области контакта тел кинематической пары (ее элементы возникают в результате локального хрупкого разрушения их приповерхностных слоев или могут быть внесены извне) на динамику рассматриваемой механической системы:

- Модель со связью, запрещающей проскальзывание тел кинематической пары, в общем случае отличная от классической неголономной модели (аналог промежуточной модели вакономной механики);
- Модель с первичными связями Дирака, которые возникают в результате вырождения лагранжиана системы при отбрасывании малых обобщенных скоростей. В последнем случае система содержит ряд слагаемых

промежуточной модели вакономной механики, но условие непроскальзывания, как правило, не реализуется.

Ключевые достижения автора в первой главе:

- Разработка модели с аналогом «присоединенной массы» в вакономной механике. Для учета разрушения в лагранжиан системы добавлено дополнительное слагаемое с множителем α (формула (1.11)), учитывающим характеристики поврежденности материала. Это позволяет связать макроскопическую динамику с микроструктурными изменениями. Чем больше разрушен материал, тем больше α, и тем сильнее влияние прослойки.
- Сравнительный анализ точности построенных моделей. Показано, что для системы с разрушением неклассическая модель с первичными связями Дирака (при учете изменения малых обобщенных скоростей) дает более точное решение по сравнению с квазистатической моделью, отвечающей пренебрежению этими изменениями. Тем самым строго обосновано преимущество предложенного неклассического подхода, дополняющего аналог промежуточной модели вакономной механики для случая малых обобщенных скоростей.

Вторая глава посвящена исследованию поведения частиц, образующихся между контактирующими телами при разрушении. Автор рассматривает следующую конфигурацию: два элемента прослойки между перемещающейся вдоль фиксированного направления жесткой плитой и неподвижной подстилающей поверхностью. Изучаются различные условия взаимодействия элементов прослойки с подстилающей поверхностью (микропроскальзывание и скольжение); взаимодействие элементов прослойки с плитой считается происходящим в режиме микропроскальзывания.

Наиболее значимые результаты второй главы:

- Обоснование редукции к формализму Дирака. Найдены достаточные условия, которые позволяют пренебречь ускорениями точек контакта элементов прослойки с плитой и составляющими ускорений центров масс элементов слоя в направлении, ортогональном смещению плиты, т.е. дают возможность моделировать динамику системы в рамках формализма Дирака для систем с вырожденными лагранжианами. Показано, что эти достаточные условия служат условиями реализации связей, запрещающих

проскальзывания элементов слоя относительно плиты в направлении, ортогональном ее смещению. Такой подход позволяет построить модели более высокой точности по сравнению с моделью, запрещающей проскальзывания элементов прослойки относительно плиты.

- Аналитическое описание динамики прослойки. Установлен фундаментальный факт: для рассматриваемых условий движения системы элементы прослойки сближаются. Получены аналитические формулы, описывающие изменение расстояния между их центрами масс в зависимости от пути, пройденного плитой или центром масс одного из элементов послойки в направлении ее смещения (для случая движения элементов прослойки в режиме микропроскальзывания относительно подстилающей поверхности) или от пути, пройденного точкой контакта одного из элементов прослойки с подстилающей поверхностью в направлении смещения плиты (для случая, когда элементы прослойки скользят относительно подстилающей поверхности). Эти формулы имеют самостоятельную ценность для прогнозирования уплотнения разрушенного материала в зазоре.

Научная новизна диссертации не вызывает сомнений и заключается в следующем:

- Впервые предложена и обоснована двухуровневая иерархическая модель системы «тела - разрушенный слой», где поведение макрообъектов и микрочастиц рассматривается в неразрывной связи.
- Разработан оригинальный метод учета продуктов разрушения через модификацию лагранжиана и введение аналога «присоединенной массы» в вакономной механике, что позволяет интегрировать эффекты поврежденности непосредственно в уравнения динамики. Впервые проведен строгий математический анализ точности приближений для систем данного класса и доказано, что использование формализма первичных связей Дирака дает решение на порядок точнее по сравнению с квазистатическим подходом.
- Установлены достаточные условия, позволяющие моделировать динамику элементов прослойки между взаимодействующими телами в рамках формализма Дирака для систем с вырожденными лагранжианами, что открывает возможность построения моделей более высокой точности.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов аналитической механики применительно к системам с трением, разрушением и изменяющейся структурой. Методологическая и вычислительная ценность диссертации заключается в разработке и развитии новых моделей и математического аппарата, требующего нового подхода - в частности, модели с первичными связями Дирака.

Результаты диссертации имеют четко выраженную **практическую направленность**. Они могут быть использованы:

- В машиностроении - для проектирования узлов трения с прогнозируемым ресурсом работы, где цена недооценки разрушения чрезвычайно высока;
- В геомеханике - для моделирования подвижек блоков горных пород по ослабленным прослойкам (зонам дробления);
- В технологиях обработки материалов - для понимания процессов, происходящих в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью;
- В трибологии - для описания процессов износа и эволюции поверхностей трения.

Развитие возможностей эксперимента и подходов к описанию динамики систем с трением и разрушением позволяет обсудить пределы применимости результатов, полученных при помощи формально-аксиоматических методов теоретической механики.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- Корректным использованием математического аппарата аналитической механики, теории колебаний, теории сингулярно возмущенных систем и механики разрушения;
- Строгостью аналитических выкладок и доказательств (в частности, теорем о точности приближений);
- Внутренней непротиворечивостью модели и согласованностью результатов первой и второй глав (переход от микро- к макроописанию).

Автореферат диссертации Э.И. Макиевой составлен в соответствии с требованиями МГУ и ВАК и полностью отражает основное содержание диссертационной работы. Структура автореферата логична и включает все необходимые разделы: общую характеристику работы, содержание глав,

основные результаты и выводы, список публикаций автора. В автореферате достаточно подробно представлены постановки задач первой и второй глав, что позволяет составить четкое представление о логике исследования. Приведены ключевые формулы, в том числе выражение для лагранжиана с аналогом «присоединенной массы» и формулировки теорем о точности приближений. Основные выводы по каждой главе сформулированы строго и лаконично, что облегчает восприятие научной новизны работы.

Несмотря на высокий уровень представленного исследования, можно высказать следующие **замечания и пожелания**:

1. Эволюция параметров поврежденности. Параметры p и p_k (число трещиноподобных полостей, содержащих одиночный элемент прослойки и число трещиноподобных полостей, содержащих цепочку из k элементов прослойки) входят в выражение для α как заданные величины. Из текста не ясно, являются ли они константами для данного процесса или же подчиняются собственным кинетическим уравнениям (накапливаются со временем). Для полноты модели следовало бы либо указать, что они постоянны для данного цикла нагружения, либо привести уравнения их эволюции.
2. Область применимости условия $E_{1x} \ll E_{\infty z}$ для случая вязкоупругих материалов тел (стр. 21) (E_{1x} – мгновенный модуль упругости материалов тел в касательном направлении, $E_{\infty z}$ – длительный модуль упругости тел в нормальном направлении). Помимо условия равных модулей упругости взаимодействующих тел (для случая, когда материалы тел близки к упругим) автор постулирует сильное неравенство между модулями упругости в случае их вязкоупругости. Желательно более детально обсудить, для каких именно классов материалов это условие выполняется.
3. Анализ размерностей. Из формулы (1.11) для α видно, что параметр имеет размерность, обеспечивающую аддитивность с лагранжианом. Хорошо было бы явно указать на то, что вся конструкция $\alpha\zeta^2/(2\varepsilon)$ имеет размерность энергии, что подтверждает корректность ее вклада в функцию Лагранжа.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, представляющей собой завершенное научное исследование высокого уровня.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Макиева Элина Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории по математическому обеспечению имитационных динамических систем Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Магомедов Магомед Хабибович

Контактные данные:
тел.: +7(495) 9393383, +7(495) 9392800, e-mail: mxsauno@mail.ru
Специальность, по которой М.Х. Магомедовым защищена диссертация:
01.02.01 Теоретическая механика

Адрес места работы:
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, Главное здание, механико-математический факультет, лаборатория по математическому обеспечению имитационных динамических систем
Тел.: +7(495) 9393383, +7(495) 9392800, e-mail: mxsauno@mail.ru

Подпись старшего научного сотрудника лаборатории по математическому обеспечению имитационных динамических систем Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова удостоверяю: