

Введение

Объект исследования и актуальность темы.

Исследование особенностей контактного взаимодействия твердых тел, безусловно, является актуальной задачей, поскольку оно играет важную роль практически во всех технических системах. Сложность исследования контактного взаимодействия связана, прежде всего, с динамикой и многомасштабностью этого процесса. Следует отметить, что его экспериментальное изучение ограничено, в первую очередь, из-за труднодоступности зоны фактического контакта непосредственно во время взаимодействия. В связи с этим, для исследования динамики контактного взаимодействия в последние годы интенсивно развиваются подходы, основанные на компьютерном моделировании.

Наиболее сложным из контактных взаимодействий является процесс трения. В настоящее время с трением связана одна из острейших проблем машиностроения – износ деталей машин и механизмов. Подавляющее количество машин (85–90 %) выходят из строя из-за износа деталей. Ремонт и техническое обслуживание таких машин в несколько раз превышает их стоимость. Эта проблема имеет и экологический аспект. Так, изношенные двигатели внутреннего сгорания значительно сильнее загрязняют атмосферу отработавшими газами, чем новые. Поэтому повышение износостойкости триботехнических пар является важной проблемой современной трибологии.

В разрушении материалов при трении существенную роль играют акустические колебания, генерируемые в самой трибосистеме. В частности, их учет позволяет объяснить экспериментальные факты о периодичности в расположении мест разрушения поверхностей и дополнить существующие представления о механизмах разрушения материалов при трении. Кроме того, акустические колебания, возникающие при трении, являются своего рода дополнительной «эффективной» нагрузкой на трибосистему. Поэтому демпфирование таких колебаний может приводить к снижению износа [1].

Существует еще одно не менее важное сопутствующее явление при трении – вибрации. Вибрации, или колебания элементов пар трения, порождают своеобразное акустическое поле, воздействие которого может оказывать отрицательное воздействие на человека, особенно, когда колебания совершаются в частотном диапазоне 4–30 Гц [2]. Другое нежелательное последствие вибраций в самых различных частотных диапазонах – повышение вероятности разрушения конструкций и механизмов [3]. Например, в работе [4] сообщается о том, что срок службы деталей узлов трения можно повысить в несколько раз только за счет гашения акустических колебаний демпферами, нанесением поверхностных слоев или за счет подбора геометрии деталей таким образом, чтобы возникающие при трении колебания опасной частоты быстро затухали.

Обычно для моделирования на разных масштабах используют соответствующие специфические методы описания. Например, для исследования макроскопического поведения материала при контактном взаимодействии используются методы механики сплошной среды [5, 6]. Для описания трения на уровне реального контакта можно использовать простую двумерную модель двух твердых тел с регулярным рельефом, в которой неровности на поверхности представляют собой выступы треугольной формы [7]. Эта модель основана на предположении о масштабной инвариантности рельефа поверхности и коэффициента трения на всех масштабных уровнях и учитывает только геометрические и механические факторы. Она позволяет получить зависимость силы трения от скорости скольжения, нормальной нагрузки, а также от угла при вершине неровностей и их размера вдоль направления скольжения. Моделирование контактного взаимодействия на атомном уровне осуществляется методом молекулярной динамики [8, 9]. Существуют также многоуровневые подходы к описанию трения, в которых шероховатость поверхности описывается на нескольких масштабных уровнях [10–16].

Для моделирования поведения материала на мезомасштабном уровне перспективным является использование метода подвижных клеточных автоматов. Преимущество данного метода состоит в том, что он позволяет корректно учитывать такие важные эффекты, как генерация и развитие повреждений, отрыв частиц износа, перемешивание материала в зоне контакта, образование мостиков адгезионного схватывания и т.д. [17–20]. Кроме того, в рамках метода подвижных клеточных автоматов может быть естественным образом учтена многомасштабность такого сложного процесса, как контактное взаимодействие твердых тел. В частности, этот метод позволяет моделировать поведение материала в пятне контакта в динамике, и таким образом детально исследовать механизмы эволюции структуры, отвечающие за те или иные закономерности контактного взаимодействия.

В связи с вышеизложенным, **целью** диссертационной работы является развитие метода подвижных клеточных автоматов для численного исследования особенностей распространения упругих волн, процессов деформации и разрушения в области контактного взаимодействия твердых тел.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были поставлены следующие **задачи**.

1. Развить метод подвижных клеточных автоматов путем многочастичного расчета тангенциального взаимодействия в рамках единой схемы для 2D и 3D задач.
2. Разработать методику корректного описания методом подвижных клеточных автоматов процессов распространения упругих волн в твердых телах со свободной поверхностью.
3. Разработать методику изучения особенностей распространения упругих волн в материалах со свободной поверхностью на основе анализа временных зависимостей компонент скорости, интенсивности напряжений и давления для автомата-свидетеля при моделировании методом подвижных клеточных автоматов.

4. Численно исследовать закономерности изменения частотного спектра упругих волн, возникающих при контактном взаимодействии, в зависимости от параметров поверхностного слоя.
5. На основе анализа экспериментальных данных по акустической эмиссии при трении выявить закономерности изменения акустического спектра в зависимости от особенностей процесса изнашивания.
6. Развить метод подвижных клеточных автоматов для 3D-моделирования упругого контактного взаимодействия.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Предложена новая векторная форма записи сил сдвигового взаимодействия подвижных клеточных автоматов, а также сил сопротивления их взаимному повороту, которая позволила реализовать метод подвижных клеточных автоматов для трехмерных задач с учетом вращения элементов.
2. Обоснован способ расчета пространственного вращения подвижных клеточных автоматов, основанный на анализе относительного перемещения их окружения.
3. Показана важность учета вращения подвижных клеточных автоматов для адекватного моделирования процессов деформации твердых тел.
4. Анализ, основанный на вейвлет-преобразовании регистраций упругих волн в модельной паре трения, позволил выявить сложную структуру возникающих колебаний. В частности впервые показано, что изменение профиля трущихся поверхностей приводит к частотной модуляции генерируемых упругих волн.
5. На основе трехмерных расчетов показана возможность идентификации наноскопических пор в приповерхностных слоях материала на основе анализа силы сопротивления трению скольжения наноскопического контртела.

Научная и практическая ценность.

Предложенный в методе подвижных клеточных автоматов учет материального вращения через осредненное движение соседей значительно расширяет возможности метода, в частности позволяет описывать микрополярные среды с независимым поворотом.

Разработанные методики частотно-временного анализа, а также результаты такого анализа спектров упругих волн, полученных при моделировании процессов трения, могут быть полезны при обработке экспериментальных данных по акустической эмиссии с целью получения информации об особенностях процессов деформации и разрушения, протекающих в зоне трения непосредственно во время контактного взаимодействия.

Результаты исследования частотных спектров силы сопротивления трению скольжения наноскопического контртела могут лечь в основу экспериментальных методов изучения тонких поверхностных слоев и покрытий.

Разработанные компьютерные программы и подходы к исследованию процессов трения использовались при работе над проектами Российского фонда фундаментальных исследований № 07-08-00192-а, № 08-08-12055-офи, проектами Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН № 4.13.1 (2006–2008 гг.), № 13.13.3 (2009 г.) и проекта СО РАН № 127, выполняемого совместно со сторонними научными организациями (2009 г.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ расчета тангенциального взаимодействия в методе подвижных клеточных автоматов в рамках единой схемы для 2D и 3D задач.
2. Роль используемой упаковки и учета материального вращения при моделировании методом частиц распространения сдвиговых упругих волн в материалах.
3. Результаты моделирования контактных задач, обосновывающие

возможность экспериментального изучения процессов изнашивания на основе анализа акустических спектров.

4. Корреляция определенных частот акустического спектра, возникающих при трении скольжения, характерным размерам частиц износа, полученная на основе частотно-временного анализа экспериментальных данных.
5. Результаты 3D моделирования, обосновывающие возможность экспериментального изучения особенностей дефектной структуры в приповерхностных слоях материала на основе анализа изменения силы сопротивления движению наноскопического контртела.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. На Всероссийских конференциях молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (г. Томск, 2008, 2009).
2. На Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008, 2009).
3. На Международных конференциях по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (г. Томск, 2008, 2009).
4. На Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам «ВМСППС» (г. Алушта, Украина, 2009).
5. На Международных летних школах «Advanced Problems in Mechanics» (г. Санкт-Петербург, 2008, 2009).
6. На Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 130-летию Томского государственного университета и 40-летию НИИ прикладной математики и механики (г. Томск, 2008).

7. На Всероссийской конференции «Научная сессия ТУСУР 2009» (г. Томск, 2009).
8. На Международной школе-конференции «Физика и химия наноматериалов» (г. Томск, 2009).
9. На Всероссийской конференции «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (г. Новосибирск, 2009).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 печатных работах: 6 в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК (из них 4 в журналах, входящих в перечень ВАК по специальности); 13 в статьях материалов и трудов научных конференций различного уровня; 4 в тезисах конференций; одно регистрационное свидетельство ОФАП на компьютерную программу. Перечень их наименований представлен в списке цитируемой литературы [115–117, 122–128, 132–139, 141–143, 152–154].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и списка использованных источников из 162 наименований. Объем диссертации составляет 130 страниц, в том числе 55 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность исследуемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи работы, перечислены полученные новые результаты, их научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, дана краткая характеристика разделов диссертации.

Первый раздел диссертационной работы носит обзорный характер и посвящен анализу особенностей контактного взаимодействия твердых тел и методам их моделирования.

В начале раздела приведены основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей. Рассмотрена структура площади фактического контакта, состоящая из пятен касания и составляющая несколько процентов от площади номинального контакта. Описаны динамические явления при трении, такие как вибрация и генерация акустических колебаний.

Затем кратко изложены современные методы моделирования трения на макро-, мезо- и микро-масштабных уровнях, в том числе многомасштабные модели и модели, позволяющие учитывать динамику трения. Обоснован выбор используемого в дальнейшем метода подвижных клеточных автоматов.

Далее подробно рассмотрен метод подвижных клеточных автоматов, а также методика его совмещения с континуальными методами (дискретно-континуальный подход). Отмечается, что использование рассмотренных методов позволяет эффективно моделировать контактные задачи с учетом разрушения и перемешивания вещества в зоне контакта в динамике.

Во втором разделе изучены вопросы, связанные с частотным и частотно-временным анализом регистраций упругих волн, возникающих при трении.

В начале раздела рассмотрены особенности частотного анализа упругих волн, реализующихся в материалах в результате различных динамических воздействий, при моделировании методом подвижных клеточных автоматов. В частности проанализированы Фурье-спектры сигналов, соответствующих регистрациям таких величин, как компоненты скорости, давление и интенсивность напряжений в определенных точках тела при точечном воздействии на его свободной поверхности. Частотные спектры полученных регистраций сравнивались с характеристиками исходных воздействий, как импульсных, так и периодических во времени. Показано, что даже при многократном отражении упругих волн в конечных образцах основные частоты регистрируемых сигналов достаточно четко отражают характеристики внешнего источника. Полученные результаты говорят о возможности изучения сложных процессов, например, трения, в которых имеется множество источников упругих волн, действующих непрерывно, на основе анализа рассмотренных сигналов, поскольку такой анализ позволяет выявлять основную частоту, соответствующую природе этих процессов.

Далее исследованы закономерности генерации и распространения упругих волн в зоне модельного трибологического контакта. Моделирование трения проводилось на основе дискретно-континуального подхода. Зона трибоконтакта описывалась в рамках метода подвижных клеточных автоматов, остальная часть взаимодействующих тел описывалась методом механики сплошной среды. Анализ частотного спектра регистраций компонент скорости, давления и интенсивности напряжений в определенной области модели показал, что наиболее интенсивные пики на спектрах соответствуют собственным частотам системы. Небольшой размытый пик на спектрах вертикальной компоненты скорости и интенсивности напряжений соответствует среднему времени существования «связанных» пар автоматов в «квазижидком» слое, разделяющим взаимодействующие поверхности. Положение этого пика изменяется при изменении параметров, отвечающих за переход пар автоматов из состояния «несвязанные» в состояние «связанные». Соответствующую этому пику частоту можно интерпретировать как характеристику колебательного движения на микроуровне в режиме «stick-slip».

Для идентификации остальных пиков был проведен анализ профиля поверхности, разделяющей «квазижидкий» слой и «твердую» часть образцов. Показано, что периодичность в профилях взаимодействующих поверхностей проявляется в соответствующих частотах упругих волн, возникающих при их относительном перемещении, и соответствующих неидентифицированным ранее пикам на частотном спектре модельной системы.

В то же время размытость пиков на спектрах, а также динамический характер взаимодействующих поверхностей побудили провести частотно-временной анализ соответствующих регистраций с помощью вейвлет-преобразований. В качестве вейвлетов использовались функции Морле и «мексиканская шляпа». Из проведенного анализа следует, что упругие волны в модельной паре трения являются частотно- и амплитудно-модулированными. Было показано, что, не смотря на, казалось бы,

случайных характер элементарных актов отделения «частиц износа» и их следующего «приваривания» в зоне трения, изменение профиля трущихся поверхностей приводит к изменению характерных размеров блоков и, следовательно, частотной модуляции возникающих упругих волн. Амплитудная модуляция регистрируемых сигналов может быть объяснена соответствующими колебаниями силы взаимодействия верхнего и нижнего блоков. Из полученных результатов следует, что некоторые закономерности процесса изнашивания могут быть изучены на основе анализа соответствующих акустических спектров.

В заключение раздела приведены результаты частотного и частотно-временного анализа экспериментальных данных по акустической эмиссии при трении скольжении стали Гадфильда по схеме «вал–втулка». Отмечается, что исследуемый сигнал состоит из квазипериодических всплесков интенсивности колебаний. Для детального исследования динамики изучаемого процесса кроме обычного преобразования Фурье были построены оконное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование с базовой функцией Морле. Частотно-временной анализ показал, что всплески интенсивности акустических колебаний происходят на фоне некоторого постоянного сигнала, который имеет однородную структуру. Воспользовавшись связью между собственными частотами и размерами простых тел, можно заключить, что фоновый сигнал соответствует колебаниям деталей здания, а указанные всплески интенсивности соответствуют колебаниям таких элементов экспериментальной установки, как держатель втулки и вал с контртелом. Учитывая, что частицы износа имеют характерные размеры 3–50 мкм, а скорость относительного движения в точке контакта есть 0,067 м/с, можно заключить, что возбуждение собственных колебаний упомянутых элементов установки вызвано процессами формирования частиц износа. Таким образом, предложенная в работе методика, основанная на частотно-временном анализе акустических колебаний, позволила на примере стали Гадфильда установить связь между

появлением квазипериодических всплесков интенсивности акустической эмиссии при трении скольжения с процессами, отвечающими за формирование частиц износа.

В третьем разделе рассмотрено развитие метода для подвижных клеточных автоматов для решения трехмерных задач.

В начале раздела изложены особенности расчета сил межавтоматного взаимодействия и параметров, зависящих от упаковки автоматов, в трехмерной постановке.

Далее рассмотрены два способа описания вращений при моделировании методом частиц: первый – с явным учетом поворотов каждого автомата, который ведет к увеличению размерности фазового пространства, а второй – опосредованный, то есть реализующийся в форме коллективного поведения элементов, составляющих моделируемую среду. Рассмотрены особенности каждого способа для трехмерных задач. Недостатком опосредованного способа является неоднозначность при пересчете поворота как среднего в случае разрыва одной или нескольких связей или образования новой связи между частицами, которые могут происходить при интенсивных деформациях.

Поскольку в трехмерных расчетах большое значение имеет оптимизация вычислительных ресурсов, в том числе за счет экономии на вычислении несущественных параметров, то был рассмотрен вопрос о важности учета вращения при моделировании методом подвижных клеточных автоматов. Проведенные исследования показали, что учет поворота либо как самостоятельной степени свободы автоматов, либо через вращение окружения обязателен для корректного описания классической сплошной среды на основе метода подвижных клеточных автоматов. Для того чтобы описывать более сложные среды, например, среду Коссера, нужно сохранить в методе оба способа учета поворота, при этом самостоятельную степень свободы рассматривать как независимый поворот.

Далее приведены результаты трехмерного моделирования скольжения наноскопического контртела по поверхности керамического образца. Изучалась возможность оценки плотности нанодефектов в покрытии на основе спектрального анализа временной зависимости силы сопротивления трению скольжения такого контртела. Показано, что основные пики на спектрах соответствуют собственным частотам образца. Кроме того, на них присутствуют пики, соответствующие характерному размеру искусственной шероховатости контактирующих тел (т.е. размеру автомата). В случае присутствия в покрытии периодически расположенных нанопор в низкочастотной области спектра появляются пики, соответствующие расстоянию между этими порами. Таким образом, было показано, что трибоспектральный анализ позволяет сделать оценку расстояния между нанопорами в покрытиях.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертации.

Данная диссертационная работа была выполнена в рамках проекта № RUX0-016-ТО-06 (гранта Министерства образования и науки РФ и CRDF в рамках программы BRNE), проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 07-08-00192-а, 07-08-12179-офи, 08-08-12055-офи), проекта №1 Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН № 4.13 (2006–2008 гг.), проекта №3 Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения и процессов управления РАН № 13.13 (2009 г) и проекта СО РАН №127, выполняемого совместно со сторонними научными организациями (2009 г).

Автор считает необходимым выразить благодарность своим научным руководителям С.Г. Псахье и А.Ю. Смолину за переданный опыт и огромную поддержку, которая была ими оказана при выполнении данной работы. Автор также признателен своим коллегам Е.В. Шилько, А.И. Дмитриеву, К.П. Зольникову, С.Ю. Коростелеву, А.В. Димаки, Д.С. Крыжевичу, А.В. Абдрашитову, Иг.С. Коноваленко, Ив.С. Коноваленко, В.В. Сергееву,

Н.В. Роману, П.В. Макарову, И.Ю. Смолину за полезные дискуссии, помощь и внимание к работе. Автор считает своим долгом поблагодарить своих родителей Александра Ивановича и Людмилу Викторовну, а также супругу Елену за постоянное внимание и поддержку.