

05

О возможности идентификации упругих волн, генерируемых в зоне контакта пары трения

© А.Ю. Смолин, Иг.С. Коноваленко, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: asmolin@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 10 января 2007 г.

Предложена методика оценки параметров упругих волн при моделировании контактного взаимодействия твердых тел. Анализ спектров Фурье зависимостей от времени таких величин, как компоненты скорости, давление и интенсивность напряжений позволил выявить частоты, характерные как для численной модели и геометрии задачи, так и непосредственно для процессов, протекающих в области контакта при трении.

PACS: 46.55.+d

1. Введение. При относительном перемещении сопряженных поверхностей трение скольжения сопровождается упругими колебаниями различной частоты. Их основной причиной считается ниспадающая зависимость коэффициента трения при увеличении скорости скольжения [1] или флуктуирующая сила трения на реальных контактах вследствие их различного локального коэффициента трения [2]. В работе [3] показано, что генерация упругих волн может быть результатом пластического течения в области реального контакта при условии температурной зависимости механических свойств материала. Некоторые авторы рассматривают звук при трении (friction noise) как дополнительную характеристику пары, считая коэффициент трения недостаточным для полного ее описания [4]. Из общих соображений понятно, что этот звук есть результат суперпозиции упругих колебаний, генерируемых на реальных областях контакта (источником может быть адгезионное взаимодействие, а также отделение частиц износа) их резонанса на собственных частотах трибосистемы и т.д. Значит, экспериментально регистрируемый звук (продольные упругие волны в воздухе) является интегральной характеристикой всей системы. Исходные упругие волны,

генерируемые в местах реального контакта, несут больше информации о своих источниках. Отметим, что получение этой информации в динамике до сих пор представляет трудность для экспериментальной трибологии. В данной работе предпринята попытка идентификации упругих волн, отвечающих за процессы, происходящие в области контакта модельной пары трения, с помощью методов компьютерного моделирования.

2. Описание задачи. Рассматриваются численные модели контактного взаимодействия твердых тел, сопровождающегося генерацией и распространением упругих волн. Расчеты проводились в рамках комбинированного дискретно-континуального подхода [5]. Этот подход был протестирован на задачах о распространении упругих волн различных типов в дискретной (описывается методом подвижных клеточных автоматов) и континуальной (уравнения континуума решаются методом конечных разностей) средах и их прохождении через границу совмещения [5]. Ранее авторами теоретически изучалась природа установления стационарного режима деформирования твердых тел, в основе которой также лежат волновые процессы [6]. В этих работах упругие волны исследовались на основе векторных полей скоростей точек среды, а численные параметры этих волн не рассматривались.

На начальном этапе данного исследования были проведены расчеты по „регистрации“ одиночных волн, распространяющихся от точечного импульса на свободной границе, причем как прямых, так и отраженных. Было отмечено, что интенсивность напряжений (в отличие от давления) показывает прохождение как продольной волны, так и поперечной. Поскольку интенсивность напряжений определяется квадратами главных напряжений [7], она является существенно положительной величиной и частота ее колебаний при прохождении волны сжатия в два раза больше, чем частота колебаний давления [8].

На втором этапе работы рассматривался источник с непрерывным сигналом, когда нормальная к поверхности составляющая скорости в точке нагружения во время всего расчета менялась по синусоидальной зависимости от времени. В этом случае от источника постоянно распространяются новые волны, после отражения от границ они накладываются на последующие. Поле векторов скоростей в этом случае напоминает „хаос“, и анализировать его без привлечения специальных математических методов невозможно. Фурье-спектры зависимостей давления и интенсивности напряжений от времени в том же месте, что и

в случае одиночного импульса, показали, что пики, соответствующие основным частотам, стали более узкими. Причем для интенсивности напряжений пик, соответствующий прохождению продольных волн, имеет больший максимум по сравнению с поперечными волнами. Полученный результат позволил надеяться на то, что в случае трения, когда имеется множество источников волн и все они действуют непрерывно, анализ спектров Фурье сможет выявить основную частоту, на которой происходит генерация упругих волн в областях их реальных контактов.

На третьем этапе рассматривалась задача трения двух стальных образцов, и проводился анализ спектров основных регистрируемых параметров.

3. Результаты моделирования. Моделировалось трение между двумя стальными образцами. Свойства материалов ($\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $v_P = 5.95 \text{ km/s}$, $v_S = 3.19 \text{ km/s}$) и геометрия задачи (рис. 1) соответствовали работам [9–11]. При этом методом подвижных клеточных автоматов моделировалась только узкая часть образцов вблизи поверхности взаимодействия [10]. На рис. 1 области, моделируемые в рамках континуальной механики, обозначены буквой *a*, в рамках метода подвижных клеточных автоматов — буквой *b*, *c* — квазиджидкий слой в области контакта. К верхней и нижней граням образца прикладывались сжимающие давления *P* и горизонтальные скорости *V*. Размер автоматов составлял 5 nm, запись данных осуществлялась через 10^{-12} s. Датчики располагались в дискретной части ближе к границе совмещения с сеткой. На рис. 2 показаны типичные спектры Фурье для временных зависимостей основных фиксируемых величин. Частота на этих графиках измеряется в единицах, обратных интервалу записей, т. е. 10^{12} Hz. На всех спектрах присутствуют острые пики на частоте 0.004. Она является характеристикой дискретной модели (искусственной шероховатости), а не физического процесса, и определяется выражением V/d , где $V = 20 \text{ m/s}$ — относительная скорость в паре трения, а d — размер автомата. На всех спектрах также присутствует вторая гармоника, обусловленная данной особенностью модели (0.008).

Наиболее четкий пик присутствует на спектре для горизонтальной составляющей скорости, который соответствует частоте ~ 0.003 . Чтобы понять его смысл, определим собственные частоты моделируемой системы. В случае плоского образца мы имеем две полосы, у которых один край закреплен (точнее, движется с заданной скоростью), а второй свободен. Их частоты можно определить по аналогии с балкой,

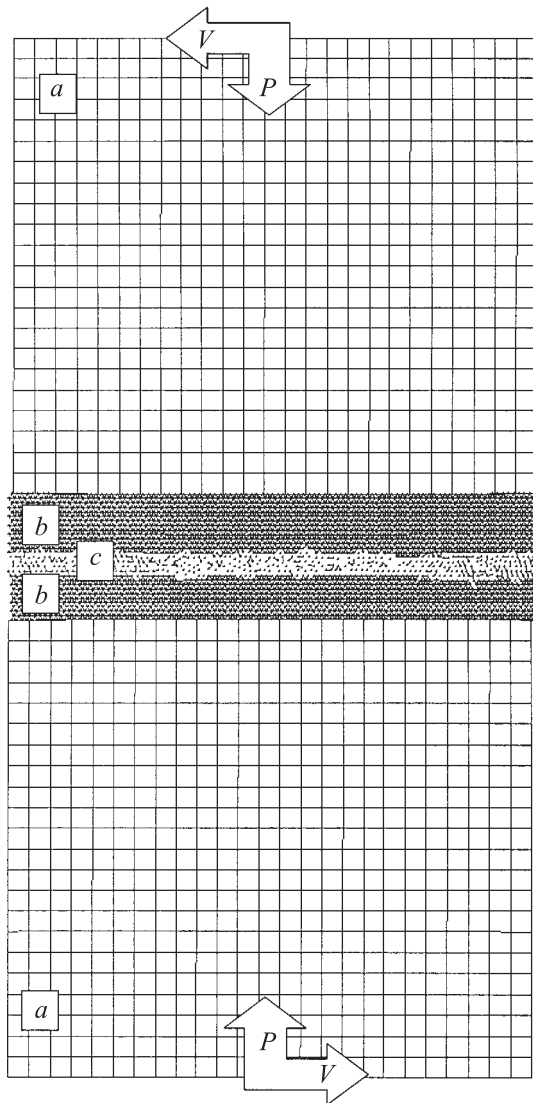


Рис. 1. Образец для моделирования трения в дискретно-континуальном подходе.

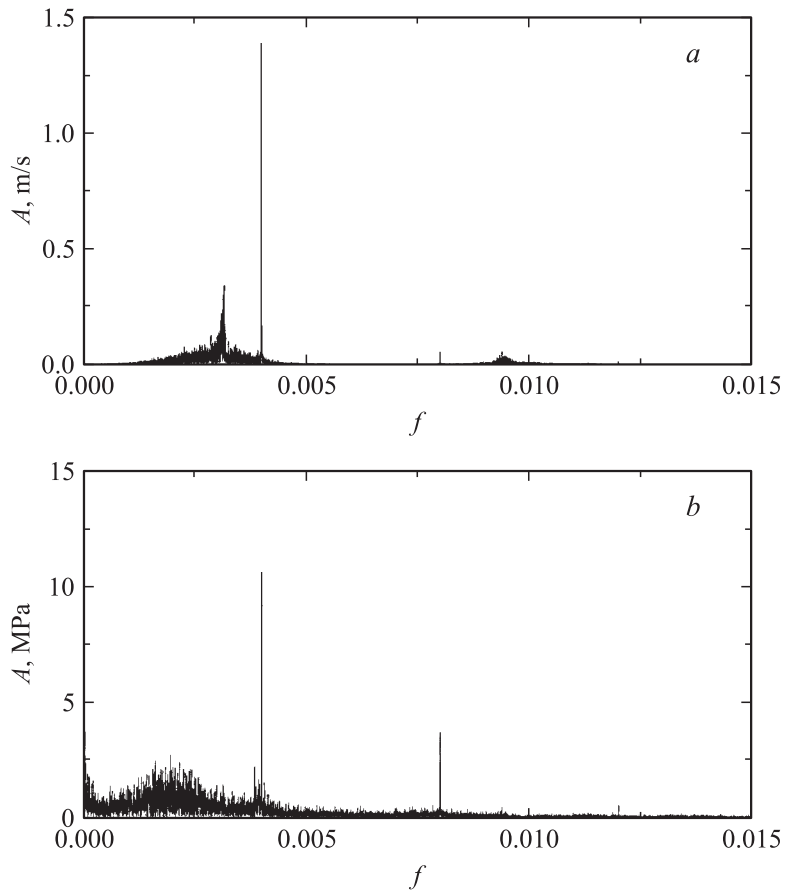


Рис. 2. Фурье-спектры регистрации x -компоненты скорости (a) и интенсивности напряжений (b) при трении.

закрепленной на одном конце [9], т.е. $p_k = v(k - 0.5)/2l$, где v — скорость волны, а l — высота полосы, равная половине высоты полной сборки. Скорость поперечного звука $v_s = 3.19$ km/s, высота образца $5.156 \cdot 10^{-7}$ m. Следовательно, первая гармоника соответствует 3 GHz. В используемых единицах это 0.003, а вторая гармоника соответственно 0.009. Именно их мы и видим на спектре горизонтальной

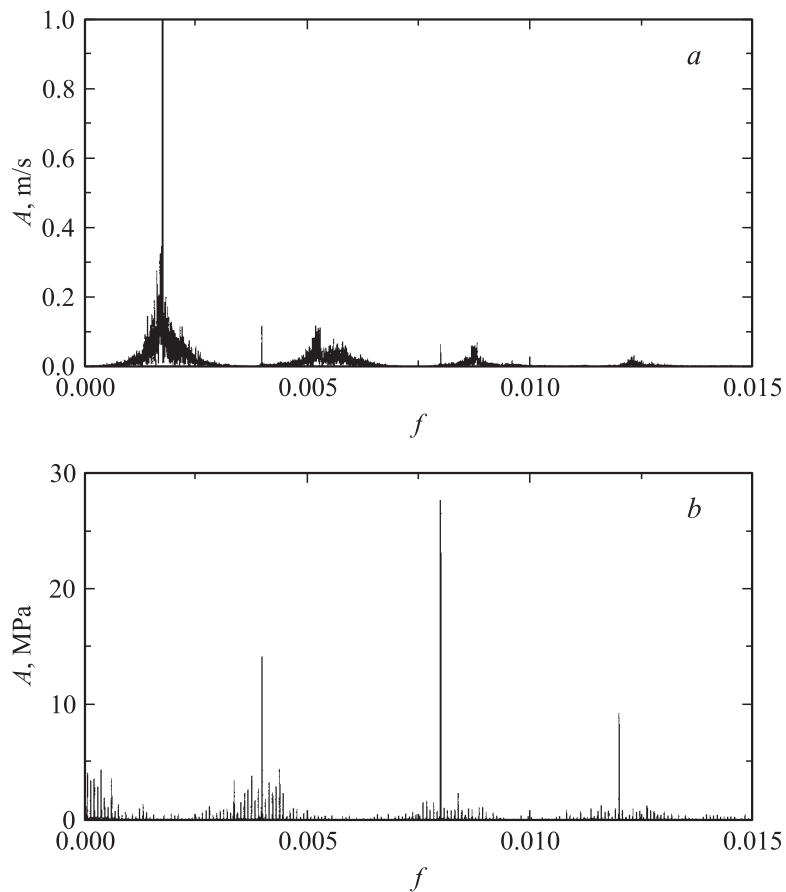


Рис. 3. Фурье-спектры регистраций x -компоненты скорости для образца с увеличенной в два раза высотой (a) и интенсивности напряжений для образца с уменьшенным критерием восстановления связи межавтоматных пар (b).

составляющей скорости. При изменении высоты образца эти частоты соответствующим образом меняются (рис. 3, a). Вследствие применения периодических граничных условий по горизонтальной оси на спектрах вертикальной составляющей скорости не наблюдается подобных пиков, и этот спектр не меняется при увеличении ширины образца.

При изменении размеров автоматов изменяются только пики, соответствующие искусственной шероховатости. Единственный пик (размытый), который не меняется при изменении размеров образца и автоматов, соответствует частоте 0.002 и присутствует на спектрах давления и интенсивности напряжений, а также вертикальной компоненты скорости. Эта частота характеризует среднее время существования „связанных“ пар автоматов в „квазидидком“ слое вблизи взаимодействующих поверхностей. Ее можно интерпретировать как характерную частоту движения на микроуровне в прерывистом режиме („stick-slip“). Эта частота меняется при изменении критерия восстановления связи между несвязанными автоматами (рис. 3, *b*), что может быть вызвано, например, повышением температуры в зоне контакта.

4. Заключение. Рассмотрено численное моделирование динамических контактных задач, сопровождаемых генерацией и распространением упругих волн. Анализировались спектры Фурье зависимостей от времени таких величин, как компоненты скорости, давление и интенсивность напряжений в некоторой точке тела. Рассмотрено и проанализировано изменение в спектрах при отражении и наложении одиночных волн, а также волн от непрерывного источника. Полученный опыт был применен к анализу упругих волн, распространяющихся в модельной паре трения. В результате были выделены частоты, характерные для модели, геометрии задачи, а также непосредственно процессов в зоне контакта.

Таким образом, в работе показана возможность идентификации процессов, происходящих в областях реального контакта, путем анализа упругих волн, наблюдаемых в паре трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН № 4.12 (проект № 1) и РФФИ (проект № 05-08-33530-а).

Список литературы

- [1] *Основы трибологии (трение, износ, смазка)* / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. 778 с.
- [2] *Jibiki T., Shima M., Akita H., Tamura M.* // *Wear*. 2001. N 251. P. 1492–1503.
- [3] *Рубцов В.Е., Колубаев А.В.* // *ЖТФ*. 2004. Т. 74. В. 11. С. 63–69.
- [4] *Gardos M.N., Gabelich S.A.* // *Tribology Letters*. 1999. N 6. P. 79–86.

- [5] Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Стефанов Ю.П., Макаров П.В., Чертов М.А. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 17. С. 7–13.
- [6] Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Коростелев С.Ю., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Алексеев С.В. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 9. С. 34–37.
- [7] Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
- [8] Уайт Дж.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986. 261 с.
- [9] Pоров VL, Psakhie S.G., Dmitriev A., Shilko E. // Wear. 2003. V. 254. P. 901–906.
- [10] Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Стефанов Ю.П., Коноваленко Иг.С. // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. Спец. вып. С. 9–12.
- [11] Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высш. школа, 1980. 408 с.