

верхностью эллипсоида и проводником. Например (см. рис. 4), при расположении проводника на расстоянии  $0,01\lambda$  от поверхности эллипсоида сечение рассеяния в направлении  $\theta=140^\circ$  равно  $-9$  дБ, а при расположении этого же проводника на расстоянии  $0,1\lambda$  равно  $-19$  дБ (уменьшилось на 10 дБ).

### Выводы

На основе метода вспомогательных источников получено решение задачи рассеяния электромаг-

нитных волн на трехмерном магнитоэлектрическом теле при наличии вблизи него тонкого проводника, расположенного в «зоне тени» и со стороны падения возбуждающего поля. Построенный алгоритм реализован в виде компьютерной программы для расчета характеристик рассеяния структур, отличающихся взаимным расположением входящих в них тел. Исследовано и показано существенное влияние тонких проводников на биостатические сечения рассеяния диэлектрического эллипсоида.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kahnert F.M. Numerical methods in electromagnetic scattering theory // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. — 2003. — V. 79–80. — P. 775–824.
2. Вычислительные методы в электродинамике // Под ред. Р. Митры. Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 485 с.
3. Хижняк Н.А. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. — Киев: Наукова думка, 1986. — 278 с.
4. Еремин Ю.А., Орлов Н.В. Анализ рассеяния волн на нескольких магнитоэлектрических телах методом дискретных источников // Радиотехника и электроника. — 1994. — Т. 39. — № 5. — С. 740–748.
5. Дмитренко А.Г., Колчин В.А. Численный метод анализа электромагнитного рассеяния структурами из конечного числа трехмерных идеально проводящих тел // Радиотехника и электроника. — 2001. — Т. 46. — № 3. — С. 277–282.
6. Еремин Ю.А., Свешников А.Г. Метод дискретных источников в задачах электромагнитной дифракции. — М.: Изд-во МГУ, 1992. — 181 с.

Поступила 16.01.2009 г.

УДК 53.072;531.43;539.62

## ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГЕНЕРАЦИЮ УПРУГИХ ВОЛН ПРИ ТРЕНИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО ПОДХОДА

А.Ю. Смолин<sup>1,3</sup>, С.А. Добрынин<sup>1</sup>, С.Г. Псахье<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, г. Томск

<sup>3</sup>Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: asmolin@ispms.tsc.ru

На основе дискретно-континуального подхода рассмотрена модель механического взаимодействия в пятне контакта при трении скольжения. Проанализирован частотный спектр возникающих упругих волн, показано наличие частот, зависящих от шероховатости профиля взаимодействующих поверхностей. Анализ, выполненный с помощью Фурье- и вейвлет-преобразований, позволил выявить сложную структуру возникающих при трении упругих волн. Сделан вывод о том, что закономерности процесса изнашивания могут быть изучены на основе анализа соответствующих акустических спектров.

### Ключевые слова:

Трение, моделирование, метод частиц, упругие волны, Фурье-анализ, вейвлет-анализ, сигнал.

### Введение

Одна из наиболее острых современных проблем — износ машин и механизмов — связана с трением. Трудности в изучении процессов трения и изнашивания во многом обусловлены тем, что они представляют собой сложное существенно динамическое явление. Так, непрерывное измерение коэффициента трения скольжения показывает, что эта характеристика пары не является постоянной величиной даже при установившемся режиме, а периодически изменяется, достигая максимумов и

минимумов [1, 2]. Проявлением динамической сущности трения является также возникновение акустических колебаний, которые играют важную роль в поведении взаимодействующих тел, в том числе в их изнашивании. Срок службы деталей узлов трения можно существенно повысить только за счет гашения этих колебаний демпферами, нанесением поверхностных слоев или за счет подбора геометрии деталей таким образом, чтобы возникающие при трении колебания опасной частоты быстро затухали [3].

При экспериментальном изучении явлений трения и изнашивания измерения и наблюдения участков материала непосредственно в зоне взаимодействия производят уже после завершения испытания. Поэтому некоторые из результатов таких исследований могут представлять собой следствие не самого процесса, а его прекращения. Использование средств компьютерного моделирования дает возможность изучать процессы, происходящие в динамике.

В работах [4, 5] было показано, что для моделирования трения весьма эффективным является применение комбинированного дискретно-континуального подхода [6], когда узкая зона контакта взаимодействующих тел описывается дискретным методом подвижных клеточных автоматов, а остальной материал, который деформируется упруго, — численными методами континуальной механики.

Целью данной работы является исследование частотно-временных характеристик упругих волн, генерируемых в модельной паре трения, и выявление зависимости между частотами этих волн и шероховатостью взаимодействующих поверхностей.

#### 1. Частотно-временной анализ упругих волн в модельной паре трения

Известно, что области реального контакта составляют всего несколько процентов от номинальной поверхности взаимодействующих тел [7]. На рис. 1, а, представлено схематическое изображение зоны контакта при трении двух поверхностей; области реального контакта здесь выделены квадратами. В данной работе проводилось моделиро-

вание некоторой части такого контакта, находящейся между вертикальными линиями, показанными в правой части рис. 1, а, и относящейся к наноскопическому масштабному уровню. Такой выбор области исследования позволил применить периодические граничные условия вдоль направления движения трущихся тел и несколько упростить задачу моделирования.

Моделирование трения производилось по схеме, предложенной в [8] (рис. 1, б). Зона трения описывалась в рамках метода подвижных клеточных автоматов (область I на рис. 1, б), остальная часть взаимодействующих тел (с целью уменьшения требуемых вычислительных ресурсов) описывалась методом механики сплошной среды (область II на рис. 1, б). Кружком в области I показано положение «датчика» для регистрации упругих волн. На внешних поверхностях блоков (соответственно, верхней для верхнего блока и нижней для нижнего) задавалась горизонтальная скорость  $V$ , постепенно наращиваемая от 0 до  $V_m = 10$  м/с (рис. 1, в). Одновременно на верхнюю поверхность действовало давление  $P$ , наращиваемое со временем  $t$  до максимальной величины  $P_m = 127,5$  МПа. Нижняя поверхность была зафиксирована по оси. В горизонтальном направлении задавались периодические граничные условия. Диаметр автомата равен 2,5 нм, шаг сетки — 10 нм. Подробная процедура совмещения методов механики сплошных сред с дискретным методом подвижных клеточных автоматов представлена в [6].

Первоначально в области контакта задавалась некоторая шероховатость взаимодействующих поверхностей. На рис. 2 представлены три характерных образца исследуемых пар трения. Образцы (а)

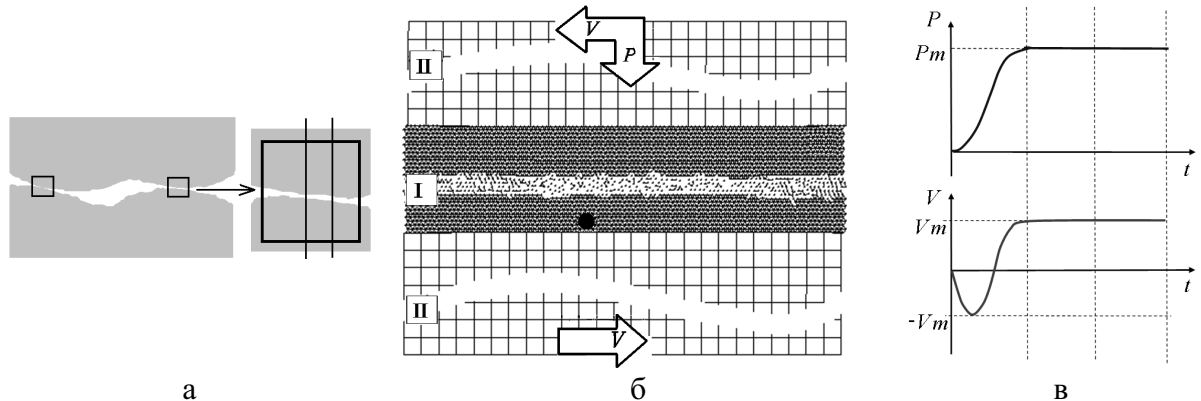


Рис. 1. Зона контакта при трении и область исследования (а); общая структура моделируемой пары трения (б); схема ее нагружения (в)

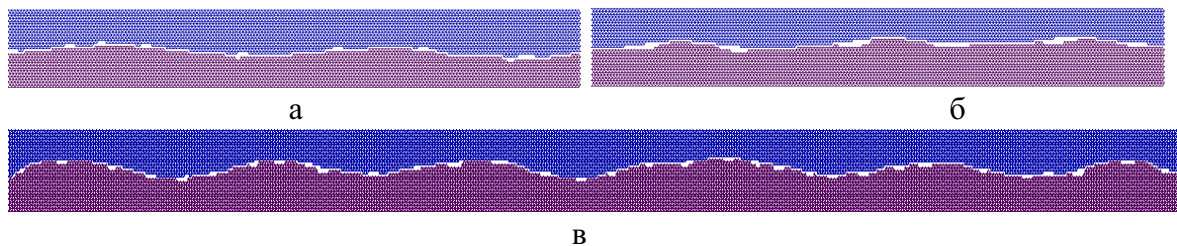


Рис. 2. Исходные образцы пар трения (показана только область, описываемая дискретным методом подвижных клеточных автоматов)

и (б) имели одинаковую ширину 450 нм, но разный исходный профиль взаимодействующих поверхностей. Основное отличие состояло в том, что в одном образце неровности имели два максимума и два минимума (а), а в другом таких неровностей было три, при этом их высота была меньше (образец б). Третий образец (в) по ширине был в два раза больше первых двух и имел профиль поверхности, соответствующий образцу (б). Функция, описывающая профиль взаимодействующих поверхностей, задавалась псевдослучайным образом.

Регистрация упругих волн проводилась в «датчике» (на рис. 1, б, изображен черной точкой), представляющем собой пару автоматов, для которых записывались такие данные, как  $V_x$  и  $V_y$  — составляющие скоростей вдоль осей  $X$  и  $Y$ ,  $I$  — интенсивность тензора напряжений и  $P$  — давление. Подробно работа с данными «датчиков» и методика их анализа изложена в [8]. В частности, в [8] было показано, чем определяются собственные частоты рассматриваемой системы, и отмечено, что пики в спектрах Фурье, соответствующие этим частотам, присутствуют для всех регистрируемых данных. Также отмечалось, что внешний вид спектров Фурье, построенных в различные интервалы времени, изменяется (пики меняют свою амплитуду и положение). Как известно, для анализа изменения частоты во времени используются такие методы обработки сигналов, как оконный метод Фурье и вейвлет-преобразование [9].

В данной работе применялось вейвлет-преобразование изучаемых сигналов. Для этого использовался свободно распространяемый пакет обработки сигналов «Last Wave» [10]. В качестве вейвлетов выбирались наиболее распространенные функции — «мексиканская шляпа» и Морле. Для того, чтобы лучше понять полученные результаты, проанализируем с помощью выбранных вейвлетов два простых сигнала, а именно, амплитудно- и частотно-моделированные синусоидальные сигналы.

Ось ординат на вейвлет-изображениях представлена в безразмерных величинах, называемых масштабом  $a$ , обратно пропорциональных частоте  $f$ . Поэтому, на приведенных изображениях область низких частот находится сверху, а высоких — внизу. Ось абсцисс соответствует времени (номеру записи дискретного сигнала). Отметим, что вейвлет-изображения явно показывают сущность изменения сигналов во времени, соответственно, по частоте для частотной модуляции и по амплитуде для амплитудной модуляции. Преобразование Фурье не позволяет выявить такую особенность рассматриваемых сигналов. В верхних углах изображений, соответствующих началу и концу сигнала, иногда можно видеть полосы (рис. 3). Это артефакты (наводки), вызванные конечностью сигнала, подобно «лепесткам» на спектре Фурье для синусоидального сигнала конечной длины.

Математически частотно-модулированный сигнал записывается как  $\sin[\omega x + d(x)]$ , где  $\omega$  — несущая

частота,  $d$  — функция, модулирующая сигнал,  $x$  — время. В данной работе  $\omega = 64\pi$ ,  $d(x) = 8\sin(\omega x)$ , где  $\omega$  — модулирующая частота. На рис. 3 представлены вейвлет-преобразования функцией «мексиканская шляпа» частотно-модулированных сигналов с различными модулирующими частотами  $\omega = 4k\pi$ . Видно, что с увеличением модулирующей частоты внешний вид получаемых вейвлет-изображений значительно изменяется. Следует отметить, что преобразование функцией Морле при этом сохраняет зигзагообразный вид, характерный для частотно-модулированных сигналов.

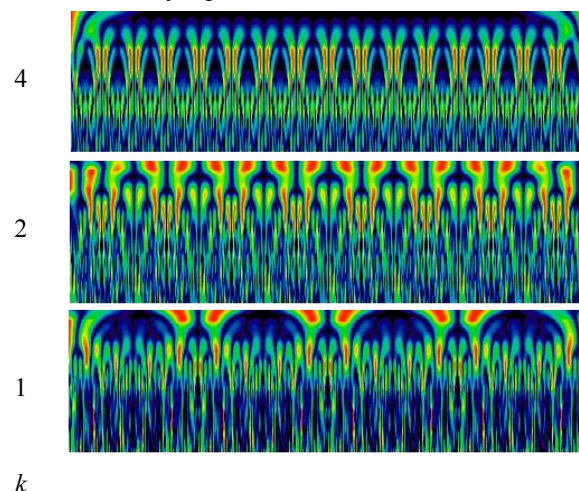


Рис. 3. Вейвлет-преобразование сигналов с различными модулирующими частотами

Теперь рассмотрим результаты вейвлет-преобразования регистраций, полученных при моделировании трения (рис. 4). Сравнивая их с данными, приведенными на рис. 3, можно предположить, что упругие волны, генерируемые при трении, можно характеризовать как частотно- и амплитудно-модулированные.

Действительно, как было показано в [8], собственные частоты рассматриваемой системы зависят от высоты блоков, а эта высота во время трения (даже при установившемся режиме) стохастически изменяется вследствие как отделения некоторых частиц от трущихся поверхностей («износ»), так и налипания на них других частиц из зоны трения («микросварка»). На данных моделирования изменение соответствующих частот видно достаточно четко вследствие малых размеров блоков, так что небольшие изменения в толщине «квазжидкого» слоя трения (т. е. области интенсивного перемешивания вещества, где подвижные клеточные автоматы в основном находятся в несвязанном состоянии [4]) ошутимо сказываются на собственных частотах. В случае больших размеров образца этот эффект будет менее заметен.

Амплитуда возникающих упругих волн, очевидно, определяется силой взаимодействия верхнего и нижнего блоков. Как отмечалось выше, коэффициент трения, который является отношением силы сопротивления движению трущихся тел к силе,



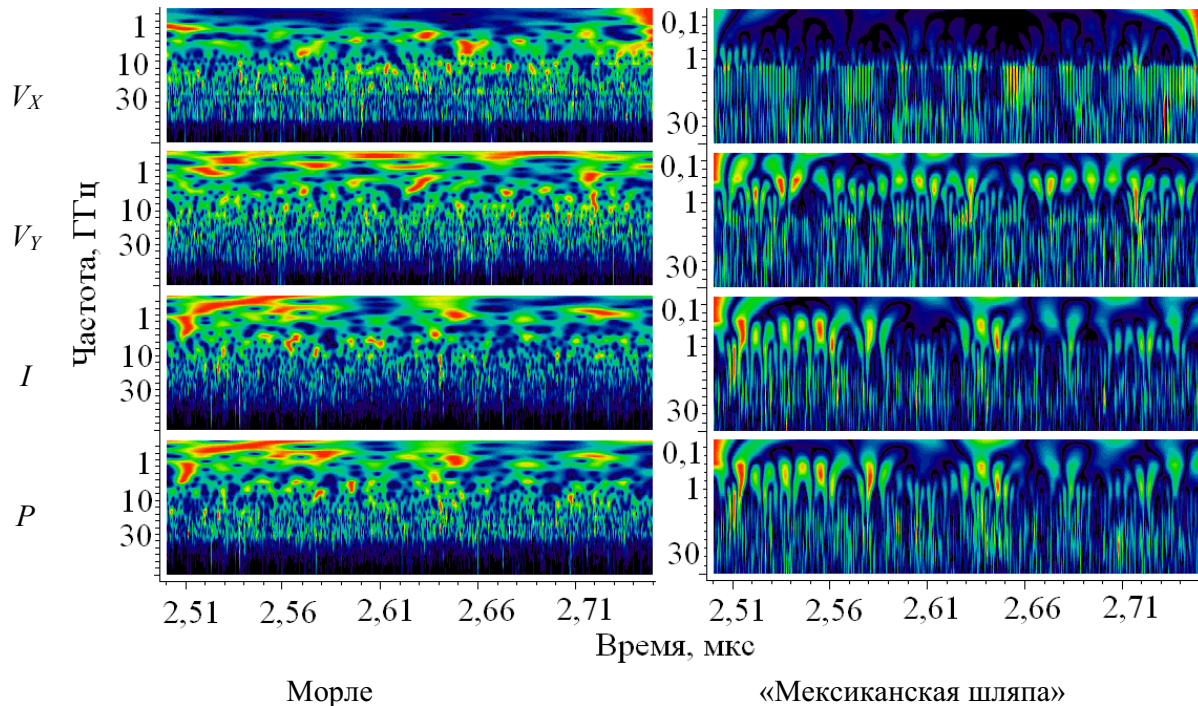


Рис. 4. Вейвлет-преобразования данных для образца (б) на рис. 2

прижимающей эти тела, постоянно изменяется даже при установившемся режиме трения. Это наблюдается как на практике [1, 2], так и в расчетах. Таким образом, периодически изменяющийся коэффициент трения обуславливает амплитудную модуляцию регистрируемых сигналов.

## 2. Влияние шероховатости поверхностей на упругие колебания в паре трения

В работе [8] было показано, что на спектрах величин, регистрирующих прохождение упругих волн, генерируемых в процессе трения, присутствуют как собственные частоты системы, так и частоты, обусловленные характерными размерами модели (ширина расчетной области и размер автомата) и скоростью относительного движения блоков. Также отмечалось наличие неидентифицированных пиков в низкочастотной части спектров, положение и высота которых изменяются со временем (рис. 5).

Дополнительный анализ результатов моделирования показал, что в процессе трения изменяется профиль поверхности, разделяющей «квазизидкий» слой и «твердую» часть образцов. Это позволило предположить, что наличие таких пиков может быть обусловлено характерным размером шероховатостей таких профилей.

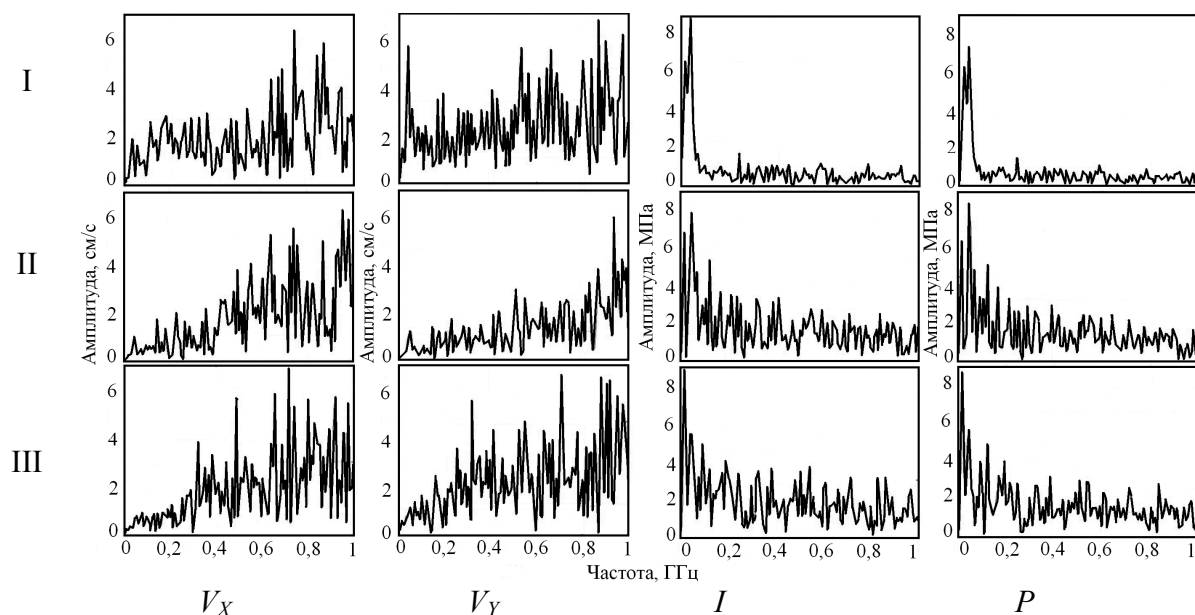
За основу алгоритма построения профиля поверхности, разделяющей «квазизидкий» слой и «твердую» часть образцов, брался алгоритм, предложенный в [11], однако он был изменен таким образом, чтобы отсеять «высокочастотные» составляющие, связанные с дискретностью представления. На рис. 6 показаны функции, описывающие

профиль нижней поверхности модельной пары трибосопряжения, построенные по разным алгоритмам. На рис. 6, а, показана функция, построенная по алгоритму работы [11], а на рис. 6, б, — результат работы алгоритма, используемого в данной работе. Функция на рис. 6, б, сглаживает вступающие из твердой поверхности цепочки межавтоматных связей, поскольку считается, что они представляют собой часть «квазизидкого» слоя.

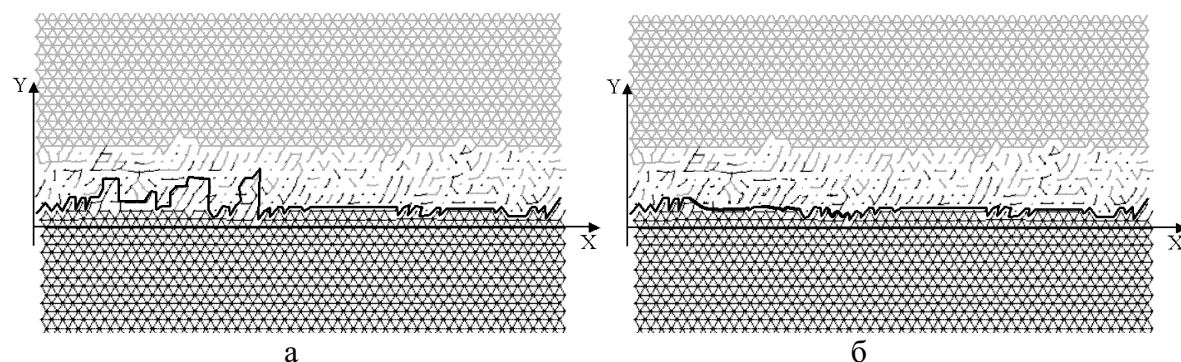
Схема дискретного представления искомой функции  $h(x)$  показана на рис. 7. Величина шага дискретизации  $\delta$  соответствует радиусу автомата (минимальное расстояние между вертикальными проекциями центров автоматов в плотной упаковке).

На рис. 8 представлены профили поверхностей рассматриваемых пар трения, построенные в различные моменты времени. Обозначения колонок соответствуют образцам, представленным на рис. 2. Видно, что с увеличением времени взаимодействия толщина слоя трения увеличивается, а поверхности блоков становятся более гладкими.

Наличие периодичности в профилях взаимодействующих поверхностей должно проявляться в соответствующих частотах упругих волн, возникающих при их относительном перемещении. Ожидаемая частота соответствующего сигнала рассчитывается по формуле  $f=v/l$ , где  $v$  — скорость движения блоков относительно друг друга,  $l$  — расстояние между выступами шероховатости поверхности. На основе полученных профилей поверхностей были построены спектры Фурье ожидаемых сигналов, они представлены на рис. 9. Поскольку в работе использовалось быстрое преобразование Фурье, то для анализа нужно было иметь выборку данных

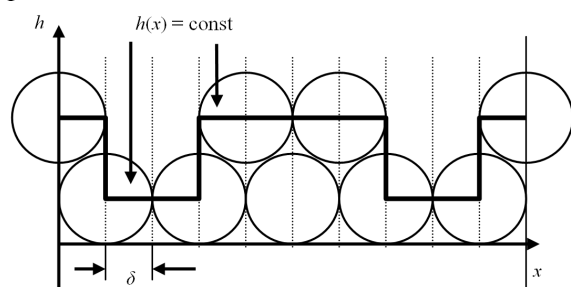


**Рис. 5.** Спектры Фурье регистрационных данных взаимодействия для образца, рис. 2, б, в различные интервалы времени: I) 0,025...1,33; II) 1,33...2,64 и III) 2,64...3,95 мкс



**Рис. 6.** Примеры функций, описывающих профиль нижней поверхности модельной пары трибосопряжения

размером, кратным степени 2. Данные, описывающие профиль поверхности, имели размер, отличный от степени 2, поэтому, в силу периодических граничных условий модели, имеющаяся выборка дополнялась до необходимого размера за счет периодического использования исходных данных.



**Рис. 7.** Схема дискретизации функции, описывающей профиль поверхности

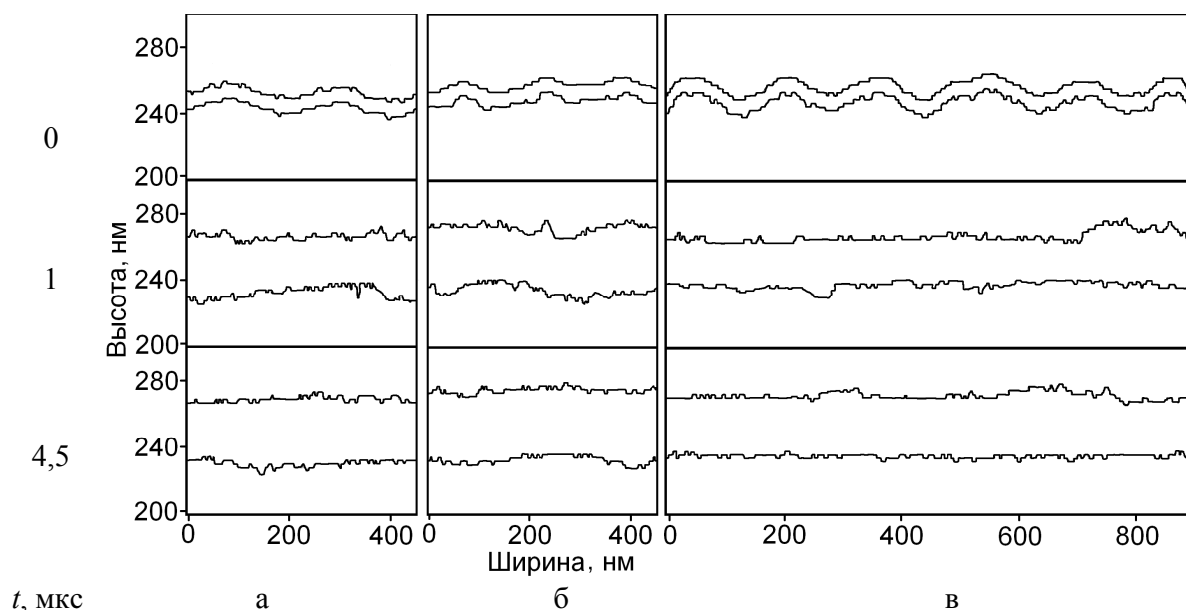
Как видно из представленных спектров, в разные моменты времени для таких профилей более интенсивно должны проявляться то одни, то другие частоты. Кроме того были обнаружены пики, которые незначительно изменяют свое положение

(частоту), и пики, которые незначительно изменяют свою амплитуду.

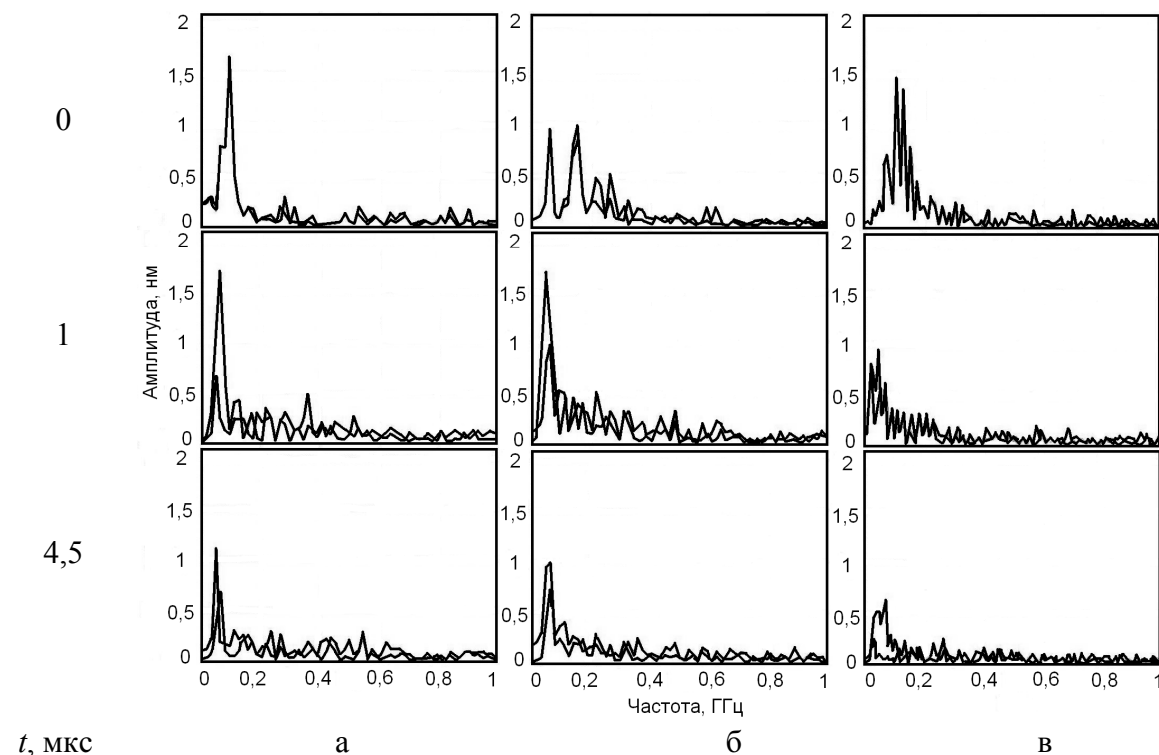
На спектрах ожидаемых сигналов наиболее явно выделяются частоты, равные 70, 90, 110 и 160 МГц. Эти же частоты были обнаружены в спектрах данных датчиков модельных пар трения, представленных на рис. 5. Причем соответствие было более четким для регистраций давления и интенсивности напряжений. В силу изменчивости коэффициента трения в процессе взаимодействия следует ожидать, что возникающие колебания могут быть амплитудно-модулированы.

#### Заключение

Анализ полученных результатов показал, что кроме собственных частот образца, а также частот, определяемых геометрическими размерами модели и скоростью движения блоков относительно друг друга, в спектрах упругих волн, генерируемых при трении, присутствуют частоты, зависящие от шероховатости поверхностей раздела «квазижидкого» слоя трения и взаимодействующих твердых тел. Кроме того, частотно-спектральный и частотно-



**Рис. 8.** Профили поверхностей верхнего и нижнего блоков для образцов (а-в) на рис. 2 в различные моменты времени  $t$



**Рис. 9.** Спектры ожидаемых сигналов в различные моменты времени  $t$

временной анализ, выполненный на основе Фурье- и вейвлет-преобразований, позволяют выявлять сложную структуру возникающих при трении колебаний. В частности показано, что несмотря на казалось бы случайный характер элементарных актов отделения частиц износа и их последующего приваривания в зоне трения, изменение профиля трущихся поверхностей приводит к частотной модуляции возникающих упругих волн. Амплитудная модуляция регистрируемых сигналов может быть объяснена соответствующими колебаниями силы

взаимодействия верхнего и нижнего блоков и, соответственно, коэффициента трения. Это говорит о том, что процессы изнашивания происходят в соответствии с некоторыми закономерностями, которые могут быть изучены на основе анализа акустических спектров.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-08-00192), а также проекта 4.13.1 Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения и процессов управления РАН № 4.13.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарицкая М.Ю., Мамаев О.А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. — 262 с.
2. Gardos M.N., Gabelich S.A. Atmospheric effects of friction, friction noise and wear with silicon and diamond. P. I. Test methodology // Tribology Letters. — 1999. — № 6. — P. 79–86.
3. Гриценко Б.П. Роль акустических колебаний, генерируемых при трении, в разрушении материалов трибосистем // Трение и износ. — 2005. — Т. 26. — № 5. — С. 481–488.
4. Дмитриев А.И., Смолин А.Ю., Попов В.Л., Псахье С.Г. Многоуровневое моделирование процессов трения и износа на основе численных методов дискретной механики и феноменологической теории // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 4. — С. 15–24.
5. Смолин А.Ю., Коноваленко Иг.С. О генерации и распространении упругих волн при трении. Компьютерное моделирование // Физическая мезомеханика. — 2006. — Т. 9. — Спец. вып. — С. 45–48.
6. Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Стефанов Ю.П., Макаров П.В., Шилько Е.В., Чертов М.А., Евтушенко Е.П. Моделирование поведения сложных сред на основе комбинированного дискретно-континуального подхода // Физическая мезомеханика. — 2003. — Т. 6. — № 6. — С. 11–21.
7. Persson B.N. J. Sliding Friction. Physical Principles and Applications. 2<sup>nd</sup> ed. — Berlin: Springer, 2000. — 515 p.
8. Smolin A.Yu., Dobrynin S.A. Identification of elastic waves generated in friction zone. Computer simulation // Advanced problems in mechanics (APM' 2008): Proc. of the XXXVI Summer School. St. Petersburg (Repino), July 6–10, 2008; Editors: D.A. Indeitsev, A.M. Krivtsov. — St. Petersburg: Institute for problems in mechanical engineering, 2008. — P. 614–620.
9. Мала С. Вэйвлеты в обработке сигналов. Пер. с англ. — М.: Мир, 2005. — 671 с.
10. Welcome to LastWave's Home Page [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.cmap.polytechnique.fr/~lastwave/>. — 03.11.2008.
11. Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Коростелев С.Ю., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Алексеев С.В. Об особенностях установления стационарного режима деформирования твердых тел // Журнал технической физики. — 1997. — Т. 67. — № 9. — С. 34–37.

Поступила 18.11.2008 г.

УДК 539.21

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ БИСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНОГО ФАКТОРА

С.Г. Псахье, К.П. Зольников, Г.Е. Руденский, А.И. Дмитриев, Ив.С. Коноваленко,  
А.В. Железняков, Т.В. Меньщикова, С.Ю. Коростелев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск  
E-mail: sp@ms.tsc.ru

*В рамках метода молекулярной динамики исследовано поведение незамкнутых наноструктур, сформированных на основе двухслойных кристаллических пленок Ni и Cu. Межатомное взаимодействие описывалось в рамках метода погруженного атома. Исследована зависимость амплитуды колебаний от размеров исходной пленки и определены геометрические параметры, при которых наноструктура совершает колебания с максимально возможной амплитудой. Полученные результаты представляют интерес для разработки компонентов наностроительств различного функционального назначения.*

**Ключевые слова:**

### 1. Введение

Вопросам разработки, создания и изучения особенностей поведения наноразмерных структур, являющихся компонентами наностроительств, в последние годы уделяется пристальное внимание [1–4]. Среди изучаемых наноразмерных объектов можно выделить структуры, получаемые на основе сверхтонких многослойных пленок, имеющих кристаллическую решетку. Свойства таких наноструктур определяются не только их химическим составом, но и геометрическими размерами. Поэтому при разработке наностроительств различного функционального назначения важно с высокой точностью подобрать геометрические размеры компонентов. В последние годы в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск) успешно развивается уникальная технология формирования

различных типов наноразмерных структур [5, 6]. Данная технология позволяет получать наноразмерные объекты с прецизионно воспроизводимой геометрией. Суть технологии заключается в том, что на подложку осаждают так называемый «жертвенный слой», а на него бислой из различных материалов. Затем селективным травлением удаляют «жертвенный слой», при этом свободный край «бислойки» вследствие упругих сил, вызванных несоответствием параметров решеток слоев пленки, поднимается вверх и закручивается. Таким образом могут быть получены нанотрубки, спирали, кантеливеры и другие наноразмерные структуры различной формы, обладающие уникальными физикомеханическими свойствами [4–6].

Отметим, что экспериментальные исследования в данном направлении сталкиваются с вполне