

УДК 53.072, 531.43, 539.62

Изучение поведения и диагностика свойств поверхностного слоя твёрдого тела на основе спектрального анализа. Нанотрибоспектроскопия

С.Г. Псахье^{1,2,3}, В.Л. Попов^{1,4}, Е.В. Шилько^{1,2}, А.Ю. Смолин^{1,2}, А.И. Дмитриев^{1,2}¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия² Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия³ Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия⁴ Берлинский технический университет, Берлин, D-10623, Германия

В работе показана возможность изучения закономерностей поведения и диагностики структуры и свойств поверхностных слоев и покрытий на основе спектрального анализа акустических колебаний и силы сопротивления при трении. Исследования проведены на наноскопическом масштабе с использованием численного моделирования методом подвижных клеточных автоматов. Развита методика анализа упругих волн на основе обработки зависимостей от времени таких величин, как компоненты скорости, давление и интенсивность напряжений, регистрируемых в определенной точке поверхности контртела. Идентифицированы основные пики на спектрах регистрируемых данных, обусловленные собственными частотами системы, геометрическими и адгезионными параметрами модели, а также шероховатостью взаимодействующих поверхностей. Показано, что спектры изменения давления в модели качественно подобны акустическим спектрам записи звука в реальном эксперименте. Теоретически обосновывается возможность применения трибоспектрального анализа на основе вычисления силы трения для диагностики неоднородностей и несплошностей наноскопического масштаба в поверхностном слое толщиной до 100 нм. Результаты изучения показали возможность оценки ряда параметров наноскопических несплошностей, таких как характерный пространственный период их расположения и линейные размеры. Обсуждаются области применения предложенного подхода как перспективного неразрушающего метода исследования поведения и диагностики структуры и поврежденности покрытий и поверхностных слоев наноскопической толщины.

Ключевые слова: трибоспектроскопия, поверхностный слой, наноповреждения, трение, акустическая эмиссия, компьютерное моделирование

Spectral analysis of the behavior and properties of solid surface layers. Nanotribospectroscopy

S.G. Psakhie^{1,2,3}, V.L. Popov^{1,4}, E.V. Shilko^{1,2}, A.Yu. Smolin^{1,2} and A.I. Dmitriev^{1,2}¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia² Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia³ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia⁴ Technische Universität Berlin, Berlin, D-10623, Germany

The paper demonstrates the feasibility of spectral analysis of acoustic vibrations and friction resisting force for studying the behavior, structure and properties of surface layers and coatings. The study was performed on the nanoscopic scale with the use of the movable cellular automaton method. A method of analysis of elastic waves based on time dependences of velocity components, pressure and stress intensity at a certain point of the counterbody surface is proposed. The main peaks due to eigenfrequencies of the system, geometric and adhesive parameters of the model, and roughness of the interacting surfaces are identified in the obtained spectra. It is shown that the pressure spectra in the model are qualitatively similar to acoustic spectra in a real experiment. The feasibility of tribospectroscopic analysis based on calculation of the friction force for diagnostics of nanoscopic heterogeneities and discontinuities in a surface layer of thickness up to 100 nm is given theoretical grounds. The results of studies demonstrate the possibility of estimating certain parameters of nanoscopic discontinuities such as the characteristic spatial period of their arrangement and linear dimensions. The application of the proposed method as a promising nondestructive technique for studies of the behavior and diagnostics of the structure and damages in coatings and surface layers of nanoscopic thickness is discussed.

Keywords: tribospectroscopy, surface layer, nanodamages, friction, acoustic emission, computer modeling

1. Введение

Согласно представлениям физической мезомеханики поверхностный слой в деформированном твердом теле является самостоятельным мезоскопическим структурным уровнем, который во многом определяет механическое поведение нагруженного материала в целом [1, 2]. Это объясняется не только особенностями поверхностных свойств (изначальной дефектностью и анизотропией поверхности и др.), но и возможностью реализации в приповерхностной области различных, в том числе недислокационных механизмов деформации [2–5]. В последние годы широкое распространение получили новые электронно-ионно-плазменные технологии упрочнения поверхности. Эти технологии позволяют формировать наноструктурные покрытия, характеризующиеся высокими (до 70 ГПа) значениями твердости [3, 6, 7]. Как правило, такие покрытия предназначены для работы в ответственных узлах механизмов и машин, и к их структуре и служебным характеристикам предъявляются повышенные требования. В связи с этим особое значение приобретает углубление знаний об особенностях процессов деформирования и разрушения в поверхностных слоях в условиях внешних воздействий, в частности при контактном взаимодействии [4, 5, 8, 9]. Несмотря на значительные достижения в развитии современных экспериментальных методов материаловедения [3, 8] зона фактического контакта взаимодействующих поверхностей по-прежнему остается труднодоступным объектом наблюдения. В значительной степени это справедливо для процесса трения, которое представляет собой сложное и многомасштабное динамическое явление.

Одним из проявлений динамической сущности трения является генерация акустических колебаний, которые осуществляют отток энергии из тонких поверхностных слоев в объем материала. В то же время акустические колебания могут быть использованы для получения информации как об особенностях исходного состояния контактирующих тел (структурно-фазовое состояние, дефектность, поврежденность и др.), так и о его изменении в процессе деформации, в частности при трении. В настоящее время активно развиваются методы неразрушающего контроля и технической диагностики состояния и свойств поверхностных слоев твердых тел, базирующиеся на принципах акустической эмиссии [10, 11]. В работах [12, 13] предлагается исследование виброакустических параметров конструкций машин с помощью методов голографической интерферометрии. Основным преимуществом данного подхода является возможность бесконтактного получения картины вибрационного поля исследуемого объекта. Однако результаты таких исследований доступны только после длительного фотохимического процесса обработки голограмм. Другим подходом является использование мето-

дов электронной спекл-интерферометрии с компьютерной регистрацией интерферограмм [14], что позволяет в реальном времени наблюдать спекл-изображение вибрирующего объекта. Подобные методы макроскопического анализа позволяют оперативно и с минимальными затратами выявлять влияние структуры и геометрии узлов трения в целом с целью их оптимизации для увеличения эксплуатационного цикла. Однако они не дают необходимой информации о структуре и свойствах непосредственно поверхностных слоев, в которых и локализованы процессы трения и износа.

В последние годы в работах [15–17] активно развивается новое направление — нанотрибоспектроскопия, позволяющее на основе спектрального анализа различных параметров отклика поверхностных слоев в процессе трения исследовать процессы, протекающие на характерных масштабах, определяющих природу трения. Такими параметрами являются, например, мгновенные значения и динамика изменения силы трения, локальные значения скоростей смещений и давления и т.д. В частности, как следует из работ [16, 17], спектральный анализ результатов высокоточного измерения силы трения одного из «трибопартнеров» позволяет определять особенности микроскопических взаимодействий в трибологическом контакте.

Эффективным подходом к решению проблем, возникающих при развитии трибоспектроскопических методов анализа поверхностных слоев в триботехнических системах, может стать использование компьютерного моделирования. Возможности численного моделирования позволяют детально исследовать процессы, протекающие в отдельных пятнах контакта, и анализировать влияние различных факторов (физико-механических параметров системы, условий нагружения и т.д.) на спектральный состав излучаемых упругих волн, силы сопротивления относительному перемещению поверхностей и других характеристик трения. Кроме того, использование методов численного эксперимента дает возможность изучать эти сложные процессы непосредственно в динамике.

Настоящая работа посвящена теоретическому анализу возможности применения трибоспектрального анализа для изучения поведения и диагностики структуры и свойств поверхностных слоев и покрытий наноскопической толщины. Исследование проводилось с использованием компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов [18–20]. Данный метод уже на протяжении ряда лет успешно используется для решения сложных триботехнических задач, в числе которых можно выделить моделирование особенностей взаимодействия поверхностных слоев стенок цилиндра и поршня в двигателях внутреннего сгорания [19], поверхностную модификацию топографии поверхности в результате трения и износа [20] и др.

2. Описание математической модели поведения упругопластических материалов

Метод подвижных клеточных автоматов базируется на классической концепции клеточных автоматов (представлении среды ансамблем взаимодействующих дискретных объектов — клеточных автоматов) и является результатом ее развития путем заимствования базовых постулатов и соотношений подхода дискретных элементов [18, 21]. Подвижный клеточный автомат является объектом конечного размера, обладающим трансляционными и ротационными степенями свободы. В качестве соответствующих уравнений движения используются уравнения Ньютона–Эйлера [18].

Взаимодействие автоматов определяется нормальными (действующими по линии, соединяющей центры масс) и тангенциальными силами, каждая из которых представляется в виде суммы соответствующей потенциальной и диссипативной составляющей [18]. Основной проблемой при моделировании методом подвижных клеточных автоматов (как и методом дискретных элементов) конкретного материала или среды является задание нормальной F_n и тангенциальной F_t потенциальных сил взаимодействия автоматов. Конкретные выражения определяются используемой моделью среды.

Проведенные в данной работе расчеты выполнены с использованием двумерной модели изотропной упругопластической среды, построенной на основе деформационной теории пластичности с разгрузкой по упругому закону [22, 23]. Реализация данной модели базируется на следующих приближениях.

1. В системе координат, связанной с рассматриваемой парой автоматов i и j (рис. 1), локальные значения компонент ϵ_{yy} и ϵ_{xy} тензора деформаций ассоциируются с относительными величинами нормального ϵ_{ij} и сдвигового γ_{ij} относительных смещений автоматов в паре. Смещения рассчитываются в приращениях:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_{ij} = \frac{\Delta r_{ij}}{(d_i + d_j)/2} = \frac{\Delta q_{ij} - d_i/2}{d_i/2} + \\ + \frac{\Delta q_{ji} - d_j/2}{d_j/2} = \Delta\epsilon_{i(j)} + \Delta\epsilon_{j(i)}, \\ \Delta\gamma_{ij} = \frac{V_{sh}^{ij} \Delta t}{r_{ij}} = \Delta\gamma_{i(j)} + \Delta\gamma_{j(i)}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь и далее символ Δ обозначает приращение соответствующей переменной за шаг по времени Δt ; r_{ij} — текущее расстояние между центрами масс взаимодействующих автоматов i и j ; q_{ij} и q_{ji} — соответствующие расстояния от центров масс автоматов до поверхности их взаимодействия ($q_{ij} + q_{ji} = r_{ij}$) [21]; d — размер автомата; $\epsilon_{i(j)}$ и $\epsilon_{j(i)}$ — «вклады» автоматов i и j в общую нормальную деформацию пары ϵ_{ij} ; $\Delta\gamma_{i(j)}$ и $\Delta\gamma_{j(i)}$ —

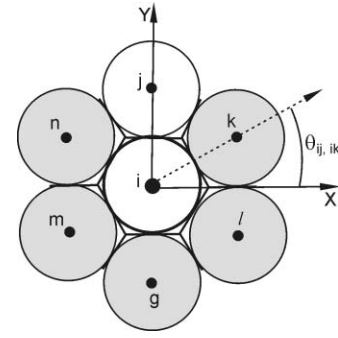


Рис. 1. Локальная система координат, связанная с парой взаимодействующих автоматов i и j

соответствующие вклады автоматов в приращение сдвиговой деформации пары $\Delta\gamma_{ij}$; V_{sh}^{ij} — скорость относительного сдвигового смещения автоматов пары.

2. В локальной системе координат пары i – j (рис. 1) локальные значения компонент σ_{yy} и σ_{xy} тензора напряжений ассоциируются с удельными величинами нормальной σ_{ij} и тангенциальной/сдвиговой τ_{ij} потенциальных сил взаимодействия:

$$\begin{cases} F_n^{ij} = \sigma_{ij} S_{ij}, \\ F_t^{ij} = \tau_{ij} S_{ij}, \end{cases} \quad (2)$$

где S_{ij} — площадь поверхности взаимодействия (контакта) автоматов.

3. Дискретный аналог локального значения компоненты σ_{xx} не может быть найден без учета окружения взаимодействующих автоматов i и j . В настоящей работе использовалось следующее определение аналога σ_{xx} [24]:

$$\sigma_{xx}^{i(j)} = \frac{\sum_{k \neq j} \sigma_{ik} \cos \theta_{ij,ik}}{T_x}, \quad (3)$$

где T_x — коэффициент, определяемый упаковкой автоматов на плоскости ($T_x = 2\sqrt{3}$ для плотной упаковки элементов одинакового размера [24]). В общем случае $\sigma_{xx}^{i(j)} \neq \sigma_{xx}^{j(i)}$.

4. Используется аналог приближения плосконапряженного состояния: для всех взаимодействующих пар автоматов аналоги компонент σ_{xz} , σ_{yz} и σ_{zz} тензора напряжений полагаются равными нулю: $\sigma_{xz}^{i(j)} = \sigma_{yz}^{i(j)} = \sigma_{zz}^{i(j)} = 0$.

Описанные приближения позволяют записать соответствующие определяющие соотношения используемой модели упругопластического отклика среды в терминах потенциальных сил взаимодействия клеточных автоматов и соответствующих относительных перемещений их центров масс. В случае деформационной теории пластичности [22, 23] приращения нормальной и тангенциальной сил формально записываются с использованием обобщенного закона Гука для диагональ-

ных ($\sigma_{yy} = \sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) и недиагональных ($\sigma_{xy} = \tau_{ij} = \tau_{ji}$) компонент тензора напряжений:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{ij} = \varphi_{i(j)}\Delta\varepsilon_{i(j)} + \left(1 - \frac{\varphi_{i(j)}}{K_i}\right)\Delta\sigma_m^{i(j)} = \\ = \varphi_{j(i)}\Delta\varepsilon_{j(i)} + \left(1 - \frac{\varphi_{j(i)}}{K_j}\right)\Delta\sigma_m^{j(i)}, \\ \Delta\tau_{ij} = \varphi_{i(j)}\Delta\gamma_{i(j)} = \varphi_{j(i)}\Delta\gamma_{j(i)}, \end{cases} \quad (4)$$

где K_i — модуль всестороннего сжатия материала автомата i ; $\Delta\sigma_m^{i(j)}$ и $\Delta\sigma_m^{j(i)}$ — приращения средних напряжений автоматов i и j соответственно в паре $i-j$ ($\sigma_m^{i(j)} = (\sigma_{ij} + \sigma_{xx}^{i(j)} + \sigma_{zz}^{i(j)})/3$, $\sigma_m^{j(i)}$ рассчитывается аналогично). Приращения нормальных и сдвиговых деформаций автоматов в паре рассчитываются согласно (1). Модуль $\varphi_{i(j)}$, в отличие от линейной теории упругости, не является константой и определяется «единой» кривой упрочнения $\sigma_{\text{int}} = \Phi(\varepsilon_{\text{int}})$ для материала автомата i (задаваемая для клеточного автомата зависимость $\sigma_{\text{int}}(\varepsilon_{\text{int}})$ также носит название функции отклика автомата) [22, 23]:

$$\varphi_{i(j)} = \begin{cases} \frac{2}{3} \frac{\Delta(\sigma_{\text{int}}^{i(j)}(\varepsilon_{\text{int}}^{i(j)}))}{\Delta\varepsilon_{\text{int}}^{i(j)}} & \text{на поверхности нагружения,} \\ 2G & \text{в упругой области или области разгрузки,} \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\sigma_{\text{int}}^{i(j)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{xx}^{i(j)} - \sigma_{ij})^2 + (\sigma_{ij} - \sigma_{zz}^{i(j)})^2 + (\sigma_{zz}^{i(j)} - \sigma_{xx}^{i(j)})^2 + 6\tau_{ij}^2 \right]^{1/2}.$$

Представленные соотношения справедливы для химически связанных пар подвижных клеточных автоматов [18, 21]. Переключение состояния пары автоматов из связанного в несвязанное (что физически интерпретируется как разрушение, сопровождающееся разделением пары на два независимых автомата) приводит к изменению характера взаимодействия. В частности, пара несвязанных автоматов может испытывать только сжатие ($\sigma_{ij} \leq 0$). Сдвиговое взаимодействие в несвязанных парах отсутствует.

Численное интегрирование уравнений движения подвижных клеточных автоматов осуществлялось с использованием скоростной схемы Верле [25], модифицированной введением дополнительного предикторного шага для расчета средних напряжений автоматов во взаимодействующих парах.

В соответствии с используемой моделью пластичности в качестве критерия разрушения (переключения состояния пары автоматов из связанного в несвязанное) в работе использовался критерий Губера–Мизеса. Усло-

вие разрушения в паре $i-j$ в этом случае записывалось в виде:

$$\sigma_{\text{int}}^{i(j)} > \sigma_s^i \text{ или } \sigma_{\text{int}}^{j(i)} > \sigma_s^j, \quad (6)$$

где σ_s^i — прочность материала автомата i .

Обратное переключение состояния пары из несвязанного в связанное интерпретируется как формирование новой или восстановление ранее разрушенной химической связи между автоматами [18]. В качестве критерия формирования связи в работе использовалась величина нормального напряжения в паре:

$$|\sigma_{ij}| > \sigma_u^{ij}, \quad (7)$$

где σ_u^{ij} — пороговое значение для рассматриваемой несвязанной пары $i-j$.

3. Возможности спектрального анализа упругих волн для идентификации процессов в пятнах контакта при трении

Акустические колебания, генерируемые при трении, несут информацию о сложных разномасштабных процессах, протекающих в поверхностных слоях контактирующих тел. Источниками возникновения акустических волн при трении считаются упругие взаимодействия областей локального контакта [26], пластическая деформация и разрушение в областях взаимодействия микрощероховатостей [27, 28], образование и отделение частиц износа [29] и т.д. Таким образом, спектр акустических колебаний чрезвычайно разнообразен и труден для анализа. Преимуществом используемого метода компьютерного моделирования является возможность выявления и анализа роли отдельных факторов, приводящих к возникновению упругих волн, и сопоставления с ними тех или иных пиков на получаемых акустических спектрах.

Очевидно, что наиболее важные процессы, отражающие механизмы реализации трения скольжения, происходят в пятнах фактического контакта. Поэтому с точки зрения развиваемого подхода первостепенным является рассмотрение и анализ процессов, происходящих в этих областях.

3.1. Модель механического взаимодействия в пятне контакта

Моделирование трения скольжения на уровне пятна реального контакта производилось по схеме, предложенной в [30]. На рис. 2, а представлено схематическое изображение зоны трения. Области реального контакта, которые составляют несколько процентов от номинальной поверхности взаимодействующих тел, обведены пунктирными линиями. В работах [30, 31] было показано, что для моделирования контактного взаимодействия весьма эффективным является применение комбинированного дискретно-континуального подхода [32], когда узкая зона контакта взаимодействующих тел описы-

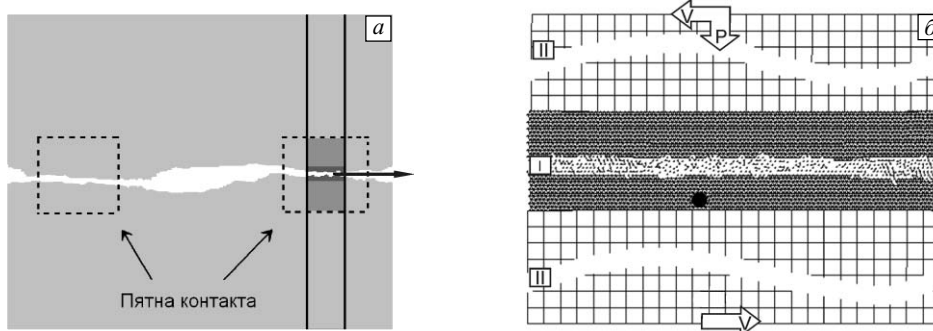


Рис. 2. Схематическое изображение зоны трения (а) и фрагмент центральной области моделируемого образца (б)

валяется дискретным методом подвижных клеточных автоматов, а остальной материал, который деформируется упруго, — численными методами континуальной механики. В рамках такого подхода моделировалась часть фактического пятна контакта, находящаяся между вертикальными линиями, показанными на рис. 2, а. Принимая во внимание характерный масштаб, на котором в поверхностных слоях контактирующих стальных образцов развиваются механизмы, определяющие процессы трения и износа, был выбран размер расчетной области — 450 нм по горизонтали и 500 нм по вертикали. При этом диаметр подвижных клеточных автоматов составлял 2.5 нм, шаг сетки — 10 нм. Подробная процедура совмещения методов механики сплошных сред с дискретным методом подвижных клеточных автоматов представлена в [32]. Фрагмент структуры расчетной области представлен на рис. 2, б. Здесь область I моделировалась дискретным методом подвижных клеточных автоматов, а для областей II методом конечных разностей решались динамические уравнения механики деформируемого твердого тела. Для уменьшения вертикальных размеров рисунка показана только часть разностной сетки. На внешних поверхностях блоков (соответственно верхней для верхнего блока и нижней для нижнего) задавалась горизонтальная скорость V , постепенно возрастающая со временем t от 0 до $V_m = 10$ м/с. Одновременно на верхнюю поверхность действовало давление P , наращиваемое до максимальной величины

$P_m = 127.5$ МПа. Нижняя поверхность была зафиксирована по оси Y . На боковых границах в горизонтальном направлении использовались периодические граничные условия, приводящие к специфическому повторению моделируемой сборки таким образом, чтобы автомат, покидающий моделируемую сборку, например, со стороны правой границы, мгновенно переносился влево на ширину сборки и попадал в систему уже со стороны левой границы. Параметры модельного материала представлены в табл. 1.

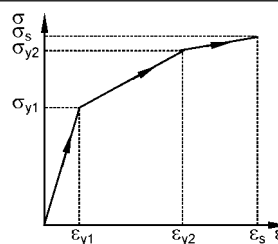
При моделировании учитывалась возможность не только разрушения существующих связей между автоматами, но и формирование новых в соответствии с соотношением (7). Этот переход позволяет моделировать развитие процессов адгезии в пятнах контакта. Начальная шероховатость моделируемых поверхностей задавалась в явном виде (рис. 3).

3.2. Анализ упругих волн, генерируемых модельным пятном контакта в процессе трения

Для регистрации упругих волн в качестве датчика при моделировании использовался выделенный автомат-«свидетель», положение которого показано черной точкой на рис. 2, б. Анализировались такие характеристики данного автомата, как V_X и V_Y — составляющие скорости вдоль осей X и Y соответственно, I — интенсивность напряжений и P — давление. При построении преобразования Фурье из выборки исключались первые

Таблица 1

Параметры модельного материала	
Плотность ρ , кг/м ³	7 800
Модуль Юнга E , ГПа	206
Коэффициент Пуассона ν	0.3
Предел упругости σ_{y1} , МПа	510
Предел текучести σ_{y2} , МПа	800
Прочность σ_s , МПа	920
Деформация при пределе текучести ε_{y2}	0.04
Предельная деформация на разрыв ε_s	0.112



Схематическое изображение функции отклика модельного материала

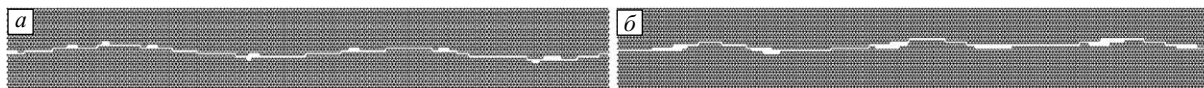


Рис. 3. Примеры исходных образцов пар трения (показана только область, моделируемая подвижными клеточными автоматами)

50000 записей, соответствующие установлению режима нагружения. На этом этапе также происходила «притирка» контактирующих поверхностей, сопровождающаяся значительным шумом, регистрируемым датчиком. Спектры Фурье регистрируемых величин, характерные для образцов, представленных на рис. 3, приведены на рис. 4, а.

На рис. 4, б показано фурье-преобразование звукового сигнала, полученного на экспериментальной установке [33]. Проводя сравнение данных на рис. 4 можно сделать вывод, что спектр экспериментально полученного звукового сигнала качественно соответствует спектру регистрации давления, полученному в ходе модельных расчетов. Заметим, что в указанных экспериментах микрофон регистрирует звуковые волны в воздухе, которые фактически являются колебаниями давления (продольными волнами). Количественно эти спектры соответствуют различным диапазонам частот. Если для экспериментальных данных это диапазон до 20 кГц, то данные компьютерного моделирования имеют частоты до 500 кГц. Столь высокие расчетные значения обусловлены малыми размерами моделируемого пятна контакта. Отметим, что наблюдаемое качественное согласие в полученных результатах говорит о воз-

можном подобии процессов, протекающих на различных масштабах и ответственных за генерацию соответствующих упругих волн. Косвенным подтверждением этого является широко используемое и экспериментально подтвержденное представление о самоподобии (фрактальности) шероховатой поверхности твердых тел на различных масштабах [34].

Для детального анализа полученных спектров сначала определим собственные частоты моделируемой системы. В случае плоского образца мы фактически имеем две «полосы», у которых один край движется с постоянной скоростью, а второй свободен. Частоту нижней полосы, имеющей закрепление по оси Y , можно определить по аналогии с балкой с закрепленным концом по формуле $p_k = v(k - 0.5)/(2l)$, где v — скорость волны, а l — высота «полосы» [35]. Скорость звука поперечной волны $v_s = 3.19$ км/с, высота $l = 2.578 \cdot 10^{-7}$ м. Следовательно, первая гармоника соответствует 3.09 ГГц, вторая — 9.28 ГГц и третья — 15.47 ГГц. Именно они видны на спектре горизонтальной составляющей скорости.

В образце также распространяются продольные упругие волны. Скорость распространения продольных волн $v_p = 5.81$ км/с. Следовательно, для таких волн первая

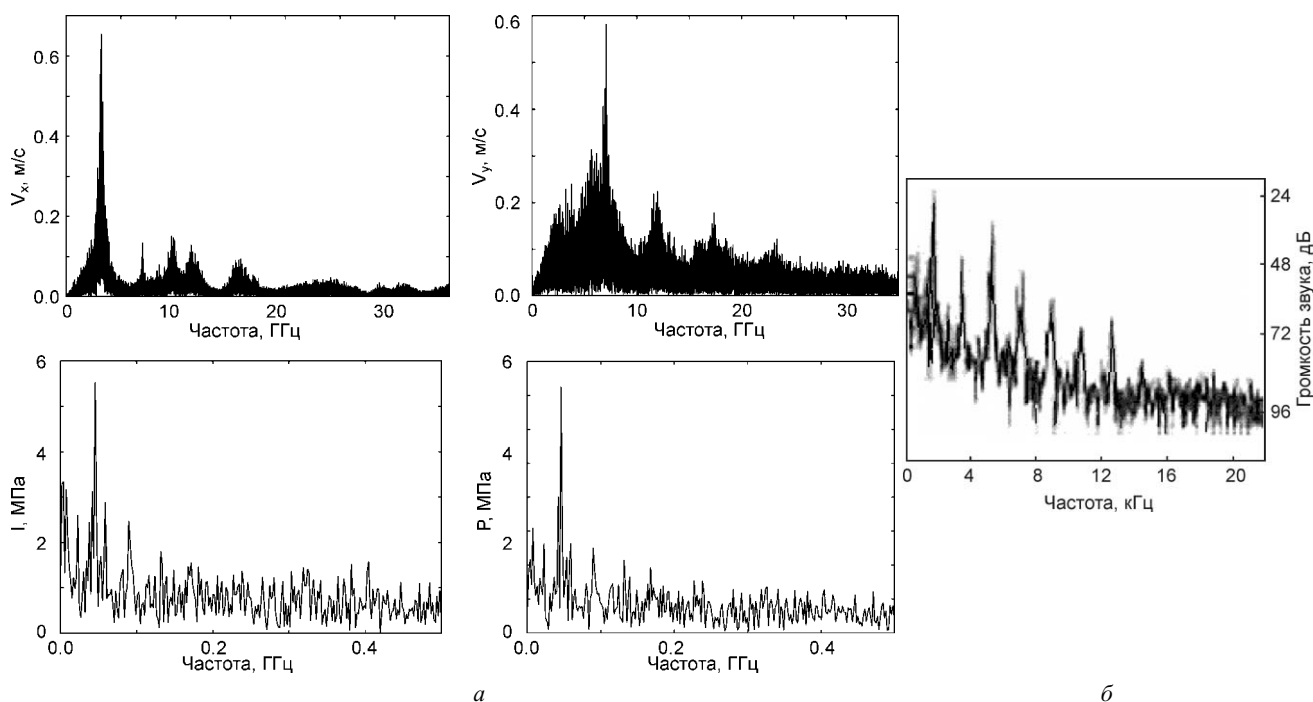


Рис. 4. Фурье-преобразования расчетных (а) и экспериментальных (б) данных (см. в тексте). Экспериментальные данные взяты из работы [33]

гармоника соответствует 5.63 ГГц, вторая — 16.9 ГГц и третья — 28.17 ГГц. На этих частотах находятся пики спектра вертикальной составляющей скорости.

Поскольку на внешней поверхности верхнего блока задано только давление и для нее нет жесткого закрепления по оси Y , то собственные частоты для такой «полосы» определяются по аналогии со свободной балкой по формуле $p_k = vk/(2l)$ [35]. Следовательно, для продольных волн первая собственная частота составляет 11.27 ГГц, вторая — 22.54 ГГц и третья — 33.81 ГГц. Гармоники более высоких порядков имеют маленькую амплитуду и слабо идентифицируются на фоне шума. Отметим, что пики на представленных спектрах не точно совпадают с расчетными значениями, поскольку трущиеся образцы «изнашиваются» (изменяется толщина «квазизжидкого» слоя [20], представляющая собой область автоматов, не связанных ни с одним из блоков) и, следовательно, изменяются их геометрические размеры.

При изменении размеров образца собственные частоты будут соответствующим образом меняться, что подтверждается расчетами, проведенными в работе [30]. При изменении размеров автоматов изменяются только пики, соответствующие искусственной шероховатости (размеру автомата). Единственный пик (размытый), который не меняется при изменении размеров образца и автоматов, приблизительно соответствует частоте 2 ГГц и присутствует на спектрах давления, интенсивности напряжений, а также вертикальной компоненты скорости. Как показал дополнительный анализ, эта частота характеризует среднее время существования связанных пар автоматов в «квазизжидком» слое вблизи взаимодействующих поверхностей. Ее можно интерпретировать как характерную частоту движения на мик-

роуровне в прерывистом режиме. Эта частота меняется при изменении величины критерия восстановления связи между несвязанными автоматами и, следовательно, определяется адгезионными процессами взаимодействующих поверхностей в пятнах контакта.

Вообще говоря, приведенные на рис. 4 спектры дают некоторые средние характеристики по всей выборке регистрируемых сигналов. Для анализа изменения частот во времени, как правило, используются такие методы, как оконный метод Фурье и вейвлет-преобразование [36]. В настоящей работе для этой цели использовано вейвлет-преобразование (пакет обработки сигналов Last Wave [37]). В качестве вейвлетов были выбраны наиболее распространенные функции — «мексиканская шляпа» и Морле [36].

Рассмотрим результаты вейвлет-преобразования регистрируемых данных, полученных при моделировании трения (рис. 5). Ось ординат на вейвлет-изображениях представлена в безразмерных величинах, называемых масштабом, обратно пропорциональных частоте. Поэтому на приведенных изображениях область низких частот находится сверху, а высоких — внизу. Ось абсцисс соответствует времени (номеру записи дискретного сигнала). На основе данных, приведенных на рис. 5, можно сделать вывод, что упругие волны, генерируемые при трении, являются частотно- и амплитудно-модулированными.

Действительно, как было показано ранее, собственные частоты рассматриваемой системы зависят от высоты блоков, а эта высота при трении (даже при установившемся режиме) стохастически изменяется в силу «износа» трущихся поверхностей и налипания на них частиц (процессы адгезии). В рассматриваемом случае это до-

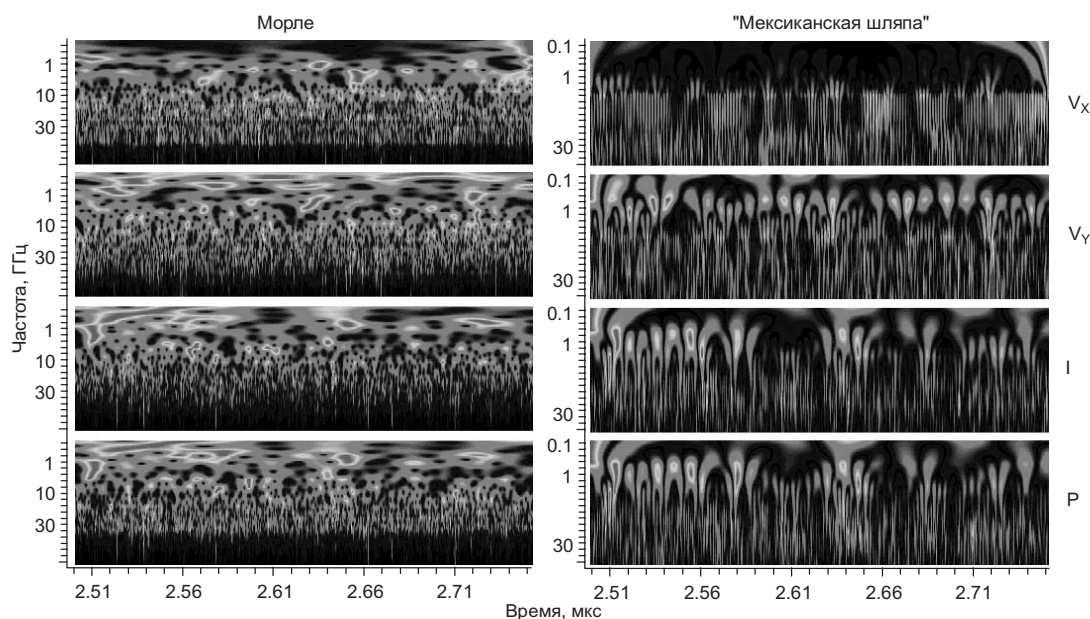


Рис. 5. Вейвлет-преобразования регистрируемых данных для образца на рис. 3, б

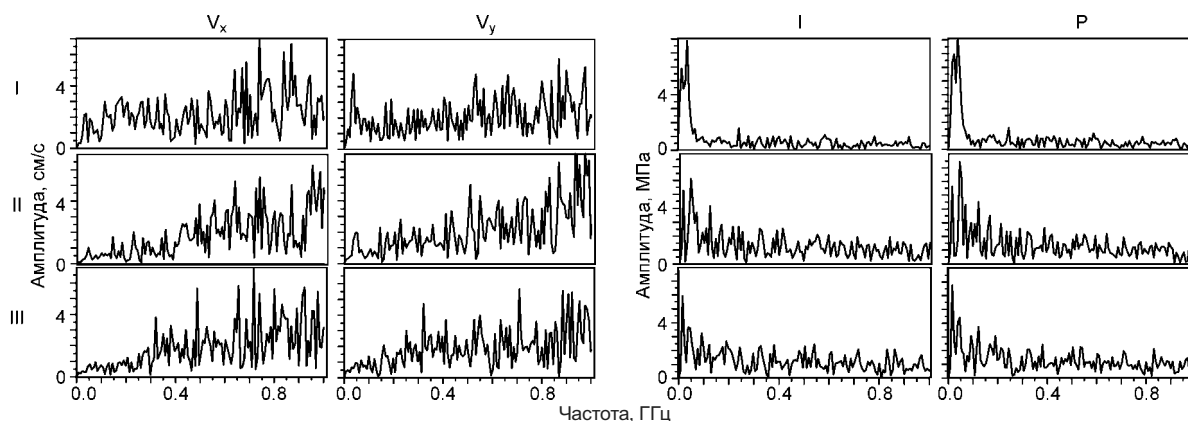


Рис. 6. Спектры Фурье регистрируемых данных взаимодействия для образца на рис. 3, б в различные интервалы времени: 0.025–1.33 (I), 1.33–2.64 (II) и 2.64–3.95 мкс (III)

статочно четко проявляется вследствие малых размеров блоков, так что небольшие изменения в толщине квазизжидкого слоя заметно сказываются на собственных частотах. При увеличении размеров образца этот эффект будет проявляться слабее.

Амплитуда возникающих упругих волн связана со скоростью и амплитудой изменения силы взаимодействия верхнего и нижнего блоков. Как отмечалось выше, коэффициент трения, который определяется через отношение силы сопротивления движению трущихся тел к силе, прижимающей эти тела, постоянно изменяется даже при установившемся режиме трения (это наблюдается как на практике [38], так и в проведенных расчетах). Таким образом, и периодически изменяющийся коэффициент трения, и амплитудная модуляция регистрируемых сигналов при заданных условиях нагружения обусловлены одними и теми же свойствами рассматриваемой трибосистемы, а именно упругими, прочностными и адгезионными характеристиками и профилем поверхностей в пятне контакта.

Проведенное рассмотрение позволило идентифицировать высокочастотную составляющую спектра как соответствующую собственным частотам системы. Анализ низкочастотной части спектра показал, что положение и высота определенных пиков в ней значительно изменяются со временем (рис. 6). Дополнительный анализ результатов моделирования показал, что в процессе трения изменяется профиль поверхности, разделяющей «квазизжидкий» слой и «твердую» часть образцов. Это позволило предположить, что наличие таких пиков может быть обусловлено характерными параметрами текущей шероховатости взаимодействующих поверхностей.

При определении текущего профиля поверхности использовался алгоритм, предложенный в [31] и модифицированный таким образом, чтобы отсечь «высокочастотные» составляющие, связанные с дискретностью моделируемой системы. На рис. 7 показан профиль

нижней поверхности модельной пары трибосопряжения в некоторый момент времени.

На рис. 8 представлены функции, описывающие профили поверхностей рассматриваемых пар трения в различные моменты времени, построенные по указанному выше алгоритму. Видно, что со временем взаимодействия толщина слоя трения в пятне контакта увеличивается, а поверхности сглаживаются. Возникает естественный вопрос, можно ли изменение параметров шероховатости поверхностей в процессе трения выявить на основе спектрального анализа?

Наличие периодичности в профилях взаимодействующих поверхностей должно найти свое отражение в частотном спектре упругих волн, возникающих при относительном перемещении тел. Введем понятие ожидаемой частоты f сигнала (например, некоторой характеристики упругой волны), связанной с прохождением в результате относительного перемещения поверхностей расстояния, равного определенному периоду шероховатости l . Эту частоту можно оценить как $f = v/l$, где v — скорость относительного смещения поверхностей (для рассматриваемой системы $v = 2V_m$). Проводя фурье-преобразование функций, описывающих профиль поверхности, по пространственной переменной

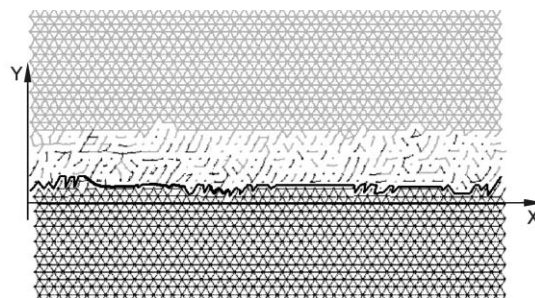


Рис. 7. Пример текущего профиля нижней поверхности модельной пары трибосопряжения

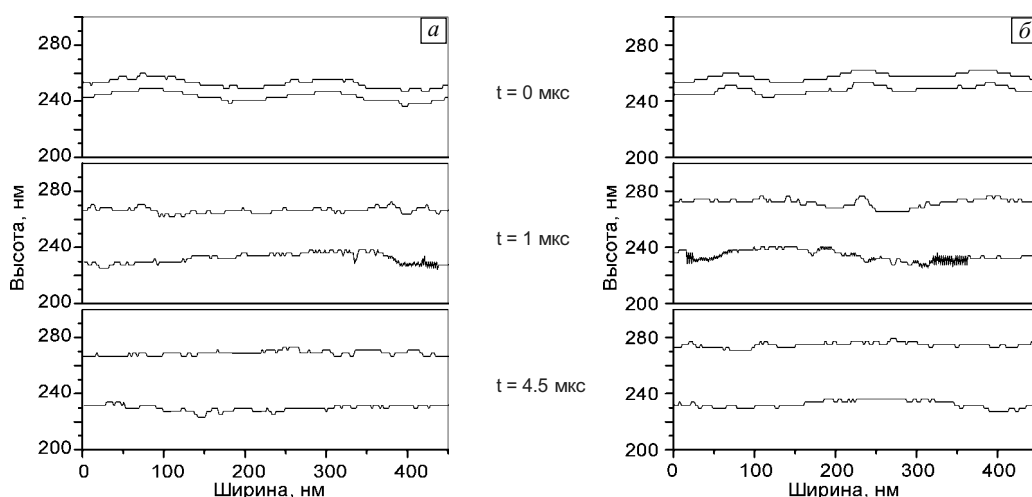


Рис. 8. Профили поверхностей верхнего и нижнего блоков в различные моменты времени. Профили (а) и (б) соответствуют образцам, представленным на рис. 3

и выразив результат преобразования в терминах v/l , можно получить спектр ожидаемых частот, обусловленных текущей шероховатостью поверхностей. На рис. 9 приведены спектры, соответствующие профилям поверхности, показанным на рис. 8, б.

На представленных спектрах (рис. 9) наиболее интенсивно проявляется «доминирующая» периодическая составляющая профиля поверхности. Она соответствует сигналу с частотой 70 МГц, обусловленному характерным периодом исходной шероховатости ~ 280 нм (рис. 3, б и 8, б при $t = 0$ мкс). В процессе тре-

ния, сопровождающегося перестройкой профиля и сглаживанием шероховатости исходных поверхностей, преобладающий вклад сигнала с частотой 70 МГц в спектре сохраняется на всем рассматриваемом интервале времени. При этом высота пика может меняться, а в некоторых случаях на этапе притирки даже превосходить исходную величину, как показано на рис. 9 при $t = 0.3$ мкс. Однако с завершением этапа притирки взаимодействующих поверхностей вклад «доминирующей» периодической составляющей профиля поверхности уменьшается (рис. 9 при $t = 4.5$ мкс), а вклад высокочастотных со-

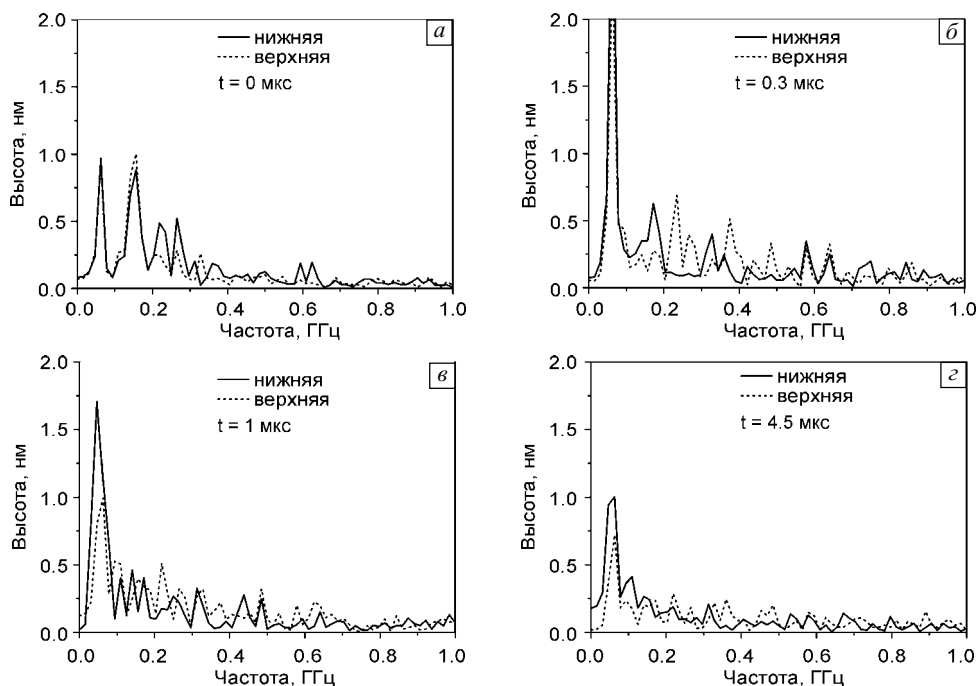


Рис. 9. Спектры сигналов, соответствующие профилям поверхности образца на рис. 3, б в различные моменты времени t

ставляющих выравнивается и по сравнению с «доминирующим» становится незначительным. Это свидетельствует о достижении установившегося режима трения и формировании профиля взаимодействующих поверхностей, спектральный состав которого со временем меняется незначительно.

Возвращаясь к спектрам регистраций упругих волн, представленных на рис. 6, можно сделать вывод, что наиболее заметно «доминирующая» частота проявляется для регистраций давления и интенсивности напряжений. Таким образом, полученные результаты говорят о том, что, зная исходную шероховатость и соответствующие ожидаемые частоты, по акустическим спектрам можно анализировать динамику изменения шероховатости.

4. Применение спектрального анализа для диагностики поврежденности поверхностного слоя

Как отмечалось во введении, структура поверхностного слоя во многом определяет механические свойства твердого тела в целом. В полной мере это относится к наноструктурным покрытиям, нанесение которых позволяет добиваться значительного повышения эксплуатационных характеристик элементов машин, механизмов и конструкций. Важным фактором, в значительной степени определяющим поведение таких покрытий, является содержание в них повреждений наноразмерного масштаба. Критическими в этом отношении являются нарушения сплошности интерфейсной области (нанотрещины на границе раздела покрытия и подложки), поскольку даже в условиях отсутствия механических и термических нагрузок эта область, согласно результатам [2, 39], находится в сложных условиях чередующихся сжимающих и растягивающих напряжений.

Сказанное делает актуальным развитие научных основ новых диагностических методов, обеспечивающих необходимое (вплоть до наноуровня) разрешение и высокую производительность. Перспективным подходом к оценке дефектной структуры тонких поверхностных слоев в твердом теле (в том числе наноструктурных покрытий) представляется подход, связанный с использованием силы трения в качестве измеряемого и анализируемого параметра макроскопического отклика системы. Поэтому в работе на примере высокопрочных керамических нанопокровов изучены возможности приме-

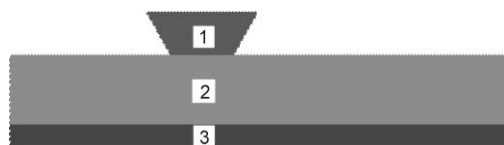


Рис. 10. Моделируемая система: 1 — контртело, 2 — керамическое покрытие, 3 — стальная подложка

нения трибоспектрального анализа как неразрушающего метода контроля качества поверхностного слоя.

4.1. Методика проведения и анализа результатов численного эксперимента

В соответствии с используемой методологией в работе измерялась и анализировалась сила трения скольжения тестирующего контртела по поверхности образца. Моделировался стальной образец с керамическим покрытием (рис. 10). Толщина покрытия была выбрана равной $H = 60$ нм, размер дискретного элемента структуры (подвижного клеточного автомата) d составлял 3 нм, длина образца $L \approx 1$ мкм. В рамках используемого приближения покрытие считалось однородным и изотропным (наличие анизотропных наноскопических зерен и границ раздела с особыми свойствами не учитывалось). Механические свойства подложки соответствовали макроскопическим характеристикам рельсовой стали, механические свойства покрытия — беспористой керамике ZrO_2 (соответствующие функции отклика автоматов покрытия и подложки приведены на рис. 11 и в табл. 1). Прочность сцепления автоматов в интерфейсной зоне контакта «сталь — керамика» определялась прочностью стали.

Контртело имело трапециевидную форму с длиной меньшего основания ~ 60 нм, его движение моделировалось заданием автоматам верхней поверхности контртела постоянной скорости $V_T = 1.5$ м/с в горизонтальном направлении. При этом нижняя поверхность образца была неподвижной, а его боковые поверхности свободными. При моделировании движения контртела проводился расчет силы сопротивления его скольжению по поверхности образца F_{fr} , ассоциируемой с силой трения.

Анализ временной зависимости силы трения $F_{fr}(t)$ осуществлялся с использованием дискретного преобразования Фурье [40] с последующим изучением зависимости спектра $F_{fr}(\nu)$, где ν — частота. Хорошо известно, что при планировании реального или численного эксперимента по определению выборки значений

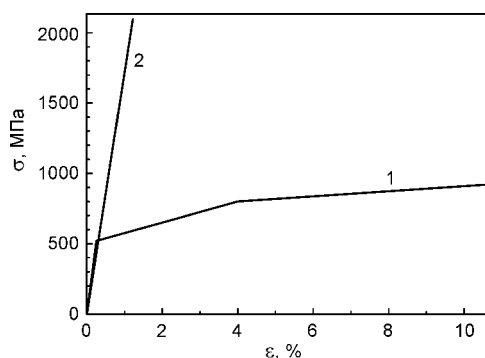


Рис. 11. Функции отклика подвижных клеточных автоматов, моделирующих керамическое покрытие (1) и стальную подложку (2)

некоторой величины X с заданным шагом аргумента Δt и последующем анализе этой выборки на основе дискретного преобразования Фурье необходимо принимать во внимание следующее.

1. Область определения функции $X(v)$ ограничена величиной v_{\max} , определяемой как

$$v_{\max} = 1/(2\Delta t), \quad (8)$$

где Δt — временной интервал записи величины X (при численном моделировании минимальным возможным временным интервалом определения величины X является шаг по времени $\Delta t'$ схемы численного интегрирования). Для повышения точности анализа также необходимо соблюдать требование $\Delta t = \text{const}$ на протяжении всего расчета или реального эксперимента.

2. В результате дискретного преобразования Фурье получается дискретный набор значений $X(i\Delta v)$, где шаг по частоте Δv определяется как

$$\Delta v = v_{\min} = \frac{1}{t_{\max}} = \frac{1}{N_{\max}\Delta t}, \quad (9)$$

где t_{\max} — модельное время расчета или время реального эксперимента; N_{\max} — полное число элементов выборки; i — номер элемента ($i = 1, 2, \dots$).

Таким образом, фурье-спектр величины X ограничен как сверху (частотой v_{\max}) так и снизу (частотой v_{\min}). Указанные ограничения вызваны тем, что при уменьшении периода сохранения данных появляется возможность выявлять периодические составляющие с меньшим временным периодом. В случае скольжения контртела с постоянной скоростью это эквивалентно возможности идентификации структур (дефектов, неоднородностей и т.д.) с меньшим пространственным периодом. В то же время при увеличении времени расчета появляется возможность идентифицировать структуры с большим временным (или пространственным) периодом, то есть с меньшей частотой. При этом возможно идентифицировать периодические составляющие функции $X(t)$ с периодом, не превышающим $t_{\max}/2$ (с уверенностью можно говорить об идентификации составляющих с периодом не больше $t_{\max}/3$ или даже $t_{\max}/4$). Аналогичное заключение справедливо и для связи пространственного периода неоднородностей с длиной пути контртела при его скольжении по поверхности с постоянной скоростью.



Рис. 12. Моделируемая система с дефектной структурой интерфейсной зоны: длина нанотрещин — 24 нм, ширина — 2.5 нм, среднее значение периода — 90 нм

В связи с указанными ограничениями при создании модели и определении характерных размеров образца, а также размеров и периода неоднородностей в поверхностном слое необходимо использовать период записи величины F_{fr} достаточно малый, для того чтобы частотный спектр $F_{\text{fr}}(v)$ включал в себя все частоты, ожидаемые для исследуемой системы; определить длину пути контртела такой, чтобы в нее укладывалось не менее 3-4 характерных расстояний между дефектами/повреждениями нанопокртия.

Отметим, что указанные требования справедливы и для реального эксперимента.

Поврежденность поверхностного слоя моделировалась генерацией наноскопических нарушений сплошности покрытия. Анализировались протяженные повреждения — нанотрещины, расположенные на границе раздела покрытия и подложки (рис. 12). Рассматривалось квазипериодическое распределение наноповреждений с характерным расстоянием $P_{\text{icr}} = 90$ нм, удовлетворяющим ограничению (9). Длина трещин l_{icr} варьировалась от 12 до 36 нм, а ширина h_{icr} составляла 2.5 нм.

В работе анализировалась возможность определения таких характеристик дефектной структуры нанопокртий, как средний размер нанотрещин и характерное расстояние между ними.

4.2. Результаты моделирования и возможности реализации нанотрибоспектроскопии

В качестве базового рассмотрен образец с идеальной (неповрежденной) границей раздела «образец — подложка». Для этого случая на рис. 13 приведена фурье-оценка $F_{\text{fr}}(v)$ спектральной плотности временной зависимости силы трения скольжения, полученная в результате дискретного преобразования Фурье. На кривой $F_{\text{fr}}(v)$ доминирующим является пик, соответствующий периодической составляющей искусственной шероховатости поверхности образца (искусственная шероховатость связана с дискретностью структурных элемен-

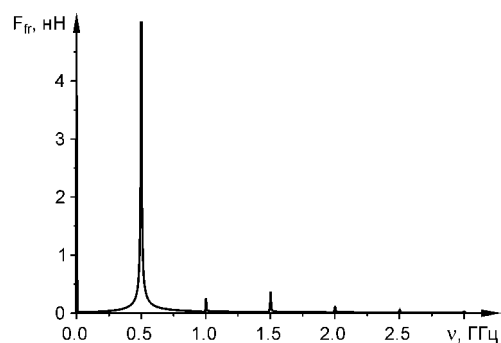


Рис. 13. Фурье-оценка спектральной плотности временной зависимости силы трения скольжения для образца с идеальной (неповрежденной) интерфейсной областью

тов — клеточных автоматов) и отвечающий частоте $\nu_d = V_r/d = 5 \cdot 10^8$ Гц. На графике зависимости $F_{fr}(\nu)$ также хорошо видны пики, соответствующие частотам $n\nu_d$ (n — целое число). Амплитуда этих пиков убывает с ростом n . В области $\nu < \nu_d$ кривая является гладкой и какие-либо пики, соответствующие проявлению периодических составляющих, отсутствуют. Отметим, что значения амплитуды ~ 0.4 нм и периода 3 нм искусственных неровностей качественно соответствуют экспериментально измеряемым параметрам шероховатости поверхностей на наноскопическом масштабе [41].

Наличие квазипериодически расположенных на границе раздела покрытия и подложки нанотрещин приводит к появлению выраженного низкочастотного пика на кривой $F_{fr}(\nu)$ (рис. 14, пик отмечен стрелкой). Частота этого пика $\nu_{icr} = 1.8 \cdot 10^7$ Гц с хорошей точностью соответствует среднему интервалу квазипериодической пространственной структуры, образованной интерфейсными повреждениями ($V_r/P_{icr} \approx 1.7 \cdot 10^7$ Гц). Таким образом, фурье-анализ результатов высокоточного измерения силы сопротивления скольжению наноскопического контртела позволяет оценивать среднее расстояние между нанотрещинами в покрытии. В рассмотренном случае оценка составила 82 нм, что с точностью $\sim 90\%$ соответствует заданному среднему значению $P_{icr} = 90$ нм.

Изменение вида функции $F_{fr}(\nu)$ в соответственном частотном интервале (рис. 14) свидетельствует о возможности диагностирования наноповреждений в покрытии, в том числе интерфейсных нанотрещин. Для исследования вопроса о возможности оценки размера нанотрещин рассматривались образцы с нанотрещинами различной длины, но с сохранением среднего расстояния между их центрами ($P_{icr} = 90$ нм).

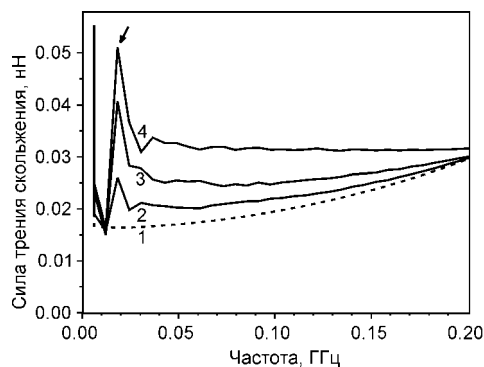


Рис. 14. Фурье-оценка спектральной плотности временной зависимости силы трения скольжения для образца с идеальной интерфейсной областью (1), а также образцов с покрытием, содержащим квазипериодически расположенные вдоль границы раздела с подложкой нанотрещины длиной $l_{icr} = 12$ (2), 24 (3), 36 нм (4). Стрелкой указан пик, отвечающий характерному периоду следования нанотрещин 82 нм

Результаты анализа спектральной плотности силы трения скольжения контртела при изучении влияния длины квазипериодически расположенных интерфейсных нанотрещин показали, что увеличение l_{icr} с 12 до 36 нм приводит к более чем двукратному увеличению амплитуды (абсолютной и относительной) пика, соответствующего квазипериодической пространственной структуре, образованной интерфейсными нанотрещинами ($\nu_{icr} = 1.83 \cdot 10^7$ Гц), и к возрастанию (почти в 1.5 раза) «фоновому уровню» на кривой $F_{fr}(\nu)$ в окрестности ν_{icr} , то есть к возрастанию энергии сигнала в области частот, близких к ν_{icr} .

Кроме того, как видно из рис. 14 (кривые 2–4), величина ν_{icr} во всех расчетах практически не меняется и соответствует среднему расстоянию 82 нм. Это связано с тем, что при создании образцов с «поврежденными» покрытиями положения центров нанотрещин задавались одинаковыми для всех значений l_{icr} . Следовательно, линейные размеры наноповреждений не оказывают заметного влияния на точность определения среднего расстояния между ними, то есть их плотности. Так, даже при небольшой длине пути контртела (4–5 значений P_{icr}) она составляет $\sim 90\%$.

Выявленный эффект влияния наноповреждений в покрытии на силу трения скольжения, очевидно, связан с прогибом покрытия при прохождении наноиндентора над повреждениями [42]. В этой связи возникают как минимум два аспекта проблемы, актуальные для развития подхода к диагностике дефектной структуры поверхностных слоев твердых тел:

- 1) влияние ширины (исходного раскрытия) повреждений h_{icr} ,
- 2) влияние «глубины залегания» дефектов/повреждений H_{icr} (речь в данном случае идет об оценке толщины поверхностного слоя, для которого может быть использован рассматриваемый спектроскопический подход).

Как показали результаты расчетов, изменение ширины/раскрытия интерфейсных нанотрещин h_{icr} в несколько раз не приводит к заметному изменению распределения спектральной плотности зависимости $F_{fr}(t)$. В частности, на рис. 15 приведены соответствующие кривые для наноповреждений шириной 2.5 и 5 нм ($l_{icr} = 24$ нм, $P_{icr} = 90$ нм). Можно видеть, что двукратное увеличение h_{icr} не вызвало существенного изменения ни амплитуды пика, ни «фоновому уровню» кривой $F_{fr}(\nu)$ в окрестности ν_{icr} . Следует отметить, что область значений h_{icr} , в которой справедливо утверждение об отсутствии влияния ширины наноповреждений на распределение спектральной плотности временной зависимости силы трения, ограничена сверху порогом $h_{cr} \sim H_{cr}$, а снизу — малыми значениями, при которых в результате прогибания покрытия будет происходить закрытие повреждений. Действительно, как показывают

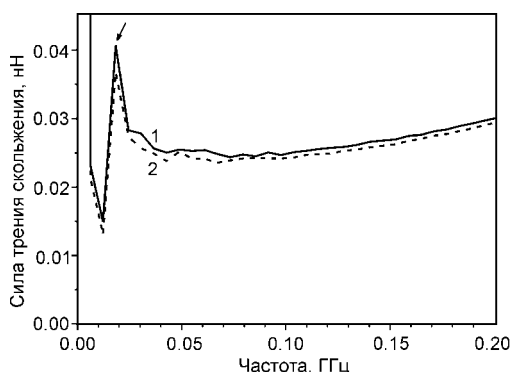


Рис. 15. Фурье-оценка спектральной плотности временной зависимости силы трения скольжения для образцов с покрытием, содержащим квазипериодически расположенные вдоль границы раздела с подложкой нанотрещины ($l_{\text{icr}} = 24$ нм, $P_{\text{icr}} = 90$ нм) шириной $h_{\text{icr}} = 2.5$ (1) и 5 нм (2). Стрелкой указан пик, отвечающий характерному периоду следования нанотрещин 82 нм

контрольные расчеты, повреждения с шириной $h_{\text{icr}} \rightarrow 0$ (в расчетах они моделировались заданием несвязанных пар подвижных клеточных автоматов на границе раздела «покрытие – подложка»; раскрытие таких повреждений в ненагруженном образце равно нулю) не идентифицируются описанным выше способом. В частности, соответствующий пик на частоте ν_{icr} отсутствует и в целом кривая $F_{\text{fr}}(\nu)$ для таких образцов практически не отличается от кривой для образца с бездефектным покрытием.

Результаты исследования влияния глубины «залегания» наноповреждений показали, что существует ее предельное значение (назовем его $H_{\text{cr}}^{\text{max}}$), в пределах которого изменение H_{cr} слабо отражается на положении и характеристиках пиков на кривой $F_{\text{fr}}(\nu)$. Для рассматриваемой системы квазипериодически расположенных нанотрещин это может быть проиллюстрировано сравнением кривых $F_{\text{fr}}(\nu)$, соответствующих образцам с интерфейсными повреждениями (рис. 12) и такими же повреждениями в срединном слое покрытия (рис. 16). Как можно видеть из рис. 17, двукратное уменьшение H_{cr} не привело к изменению амплитуды пика, соответствующего периоду дефектной структуры (указан стрелкой на рис. 17). Полученный результат



Рис. 16. Моделируемая система с нанотрещинами, расположенными квазипериодически в средней части покрытия ($l_{\text{icr}} = 24$ нм, $h_{\text{icr}} = 2.5$ нм, $P_{\text{icr}} = 90$ нм). Размещение трещин в горизонтальной плоскости то же, что и для образца с интерфейсными повреждениями (рис. 12)

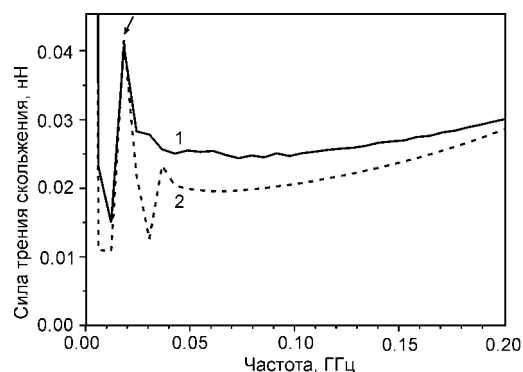


Рис. 17. Фурье-оценка спектральной плотности временной зависимости силы трения скольжения для образцов с покрытием, содержащим квазипериодически расположенные нанотрещины ($l_{\text{icr}} = 24$ нм, $h_{\text{icr}} = 2.5$ нм, $P_{\text{icr}} = 90$ нм) на глубине 60 (1) и 30 нм (2). Стрелкой указан пик, отвечающий характерному периоду следования нанотрещин 82 нм

представляется важным, поскольку позволяет однозначно связать изменение амплитуды пиков частотной зависимости $F_{\text{fr}}(\nu)$ с изменением размеров дефектов. Следует также отметить, что с уменьшением H_{cr} снижается «фоновый уровень» на кривой $F_{\text{fr}}(\nu)$ в окрестности ν_{icr} , то есть увеличивается «контрастность» данного пика. Тем не менее, как показывает анализ результатов, возможности использования спектрального анализа силы трения для оценки характерной глубины концентрации дефектов/повреждений в интервале $H_{\text{cr}} < H_{\text{cr}}^{\text{max}}$ являются весьма ограниченными. В области $H_{\text{cr}} > H_{\text{cr}}^{\text{max}}$ амплитуда пика, соответствующего характерному периоду расположения наноповреждений, быстро падает до нуля. Оценки величины $H_{\text{cr}}^{\text{max}}$, полученные различными способами, дают значение 70–80 нм. Это определяет предельную глубину поверхностного слоя, для которого может эффективно применяться рассматриваемый способ оценки характеристик дефектной структуры с использованием наноскопического контртела.

Отметим, что размер зоны контакта модельного контртела с поверхностью (60 нм) соответствует часто используемым наноскопическим инденторам и контртелам. В этой связи возникает вопрос о «разрешающей способности» таких «сканеров», то есть о минимальных линейных размерах наноповреждений $l_{\text{cr}}^{\text{max}}$, которые могут быть идентифицированы. Как показали проводимые расчеты, величина $l_{\text{cr}}^{\text{max}}$, по-видимому, составляет не менее 5–6 нм. Повреждения меньшего размера, в принципе, могут быть идентифицированы, однако контрастность соответствующих им пиков на кривой $F_{\text{fr}}(\nu)$ является низкой. Это может быть проиллюстрировано на примере образца с покрытием, содержащим стохастически распределенные в его объеме наноскопические несплошности размером 3 нм (далее будем называть их также нанопорами, рис. 18). Концентрация нанопор



Рис. 18. Моделируемая система с нанопорами диаметром 3 нм, стохастически расположенными в покрытии. Объемная концентрация нанопор в покрытии составляет 1 %

в покрытии составляла 1 %. Наличие нанопор в покрытии проявилось в появлении на кривой $F_{fr}(v)$ фурье-оценки нескольких расположенных рядом «низко-частотных» пиков (рис. 19). Частота наиболее выраженного пика ($v_{np} \approx 6.1 \cdot 10^7$ Гц), отмеченного на рис. 19 стрелкой, связана с характерным расстоянием P между нанопорами в плоскости скольжения контртела ($P \approx V_r/v_{np} \approx 25$ нм). В то же время отметим, что амплитуда данного пика является крайне низкой (около 10 % относительно «фоновому уровню» кривой вблизи v_{np}). Очевидно, что ввиду значительной зашумленности экспериментально измеряемых кривых $F_{fr}(t)$ идентификация столь слабо выраженных пиков является крайне сложной, хотя и разрешимой в ряде случаев, задачей.

Полученные результаты дают основания полагать, что неоднородности с масштабом порядка 10–100 нм могут быть идентифицированы в реальных экспериментах на основе анализа спектральной плотности силы трения скольжения. В этом же масштабе должна лежать и чувствительность экспериментальной установки. Системы с разрешением порядка 10 нм мы будем называть нанотрибоспектрометрами. В основу такой системы может быть положена экспериментальная реализация трибоспектрометра, предложенная в [43]. Идея установки проста, но отнюдь нетривиальна в реализации: контртело, лежащее на исследуемом образце, приводится в движение, при этом с высокой точностью измеряются как перемещение контртела, так и действующая на него сила.

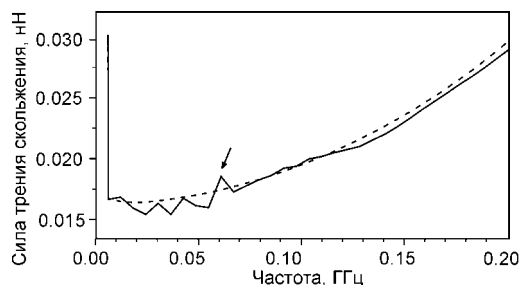


Рис. 19. Фурье-оценка спектральной плотности временной зависимости силы трения скольжения для образцов с покрытием, содержащим стохастически распределенные наноповреждения (нанопоры) размером 3 нм (сплошная линия), и бездефектным покрытием (пунктирная линия). Стрелкой указан пик, отвечающий характерному расстоянию между нанопорами 25 нм

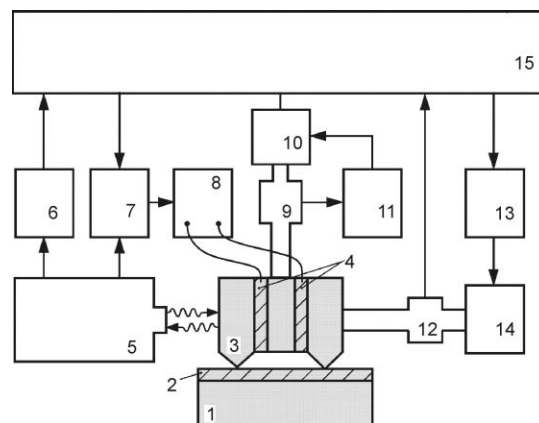


Рис. 20. Блок-схема прибора: 1 — образец, 2 — покрытие, 3 — головка трибоспектрометра, 4 — встроенные пьезоэлементы, 5 — лазерный виброметр с тактовой частотой 1 МГц, 6 — быстрый накопитель информации (промежуточная память), 7 — контроллер генератора переменного напряжения, 8 — генератор переменного напряжения, 9 — силовой сенсор для нормальной силы, 10 — шаговый мотор для вертикального перемещения, 11 — контроллер шагового мотора для вертикальных передвижений, 12 — силовой сенсор для тангенциальной силы, 13 — контроллер шагового мотора для горизонтальных перемещений, 14 — шаговый мотор для горизонтальных перемещений, 15 — компьютерный измерительный и управляющий комплекс

Схема реализованного нанотрибоспектрометра приведена на рис. 20. Основным элементом системы является трибологический контакт между покрытием 2 и измерительной головкой трибоспектрометра 3. Последняя может быть выполнена в вариантах с одиночным контактом и двойным контактом (как показано на рис. 20). Головка трибоспектрометра прижимается к покрытию мотором 10 через силовой сенсор 9, причем сила поддерживается постоянной системой обратной связи 11. Головка трибоспектрометра приводится в движение в горизонтальном направлении мотором 14. Действующая на нее сила измеряется сенсором 12 и ее значение передается на компьютерный измерительный комплекс 15.

Смещения головки трибоспектрометра измеряются лазерным виброметром 5 с тактовой частотой 1 МГц (используются независимые каналы для координаты и скорости). Через системы обратной связи смещения регулируются по заданной программе. Запись большого объема информации в течение короткого времени требует использования специальной скоростной памяти 6, с которой после окончания измерений информация считывается в компьютерный комплекс 15 для последующей обработки. Используя нанотрибоспектрометр при скорости скольжения 10 мм/с, возможно проводить анализ фурье-образа зависимости $F_{fr}(t)$ на макроскопическом масштабе (10 мм) с точностью, соответствующей нанометровому масштабу (8 нм). Таким образом, спектроскопический анализ силы трения может рассматриваться в качестве основы новых перспективных нераз-

рушающих методов контроля поврежденности нанопокрывтий и поверхностных слоев твердого тела наноскопической толщины.

5. Заключение

Полученные в работе результаты обосновывают применимость спектрального анализа макроскопических характеристик трения для анализа дефектной структуры и механических свойств поверхностного слоя наноскопической толщины (до 100 нм) в твердом теле (такой анализ называют также трибоспектральным). Основные отличия трибоспектроскопии от других акустических и вибрационных методов анализа структуры и свойств твердых тел связаны с тем, что в данном случае основные источники «сигналов», регистрируемых и подвергаемых затем спектральному анализу, локализованы в тонком поверхностном слое. Это определяется тем, что генерация данных «сигналов» происходит вследствие процессов трения и, с одной стороны, обеспечивает высокую «разрешающую» способность метода (то есть способность обнаруживать дефекты/повреждения размером до нескольких нм), а с другой — ограничивает толщину анализируемой поверхностной зоны субмикронным масштабным диапазоном.

В работе показано, что существуют, как минимум, два класса проблем, при решении которых информативным является применение трибоспектрального анализа. Первый из них связан с изучением процессов в микроскопических пятнах контакта поверхностей при трении. При этом выделен ряд параметров отклика материала («сигналов»), спектральный анализ которых позволяет оценивать характеристики взаимодействующих поверхностей и их изменение в процессе трения, характерную толщину поверхностного слоя материала, испытывающего значительные изменения, условия адгезионного сцепления поверхностей на субмикромасштабном уровне и т.д. К таким параметрам относятся локальные значения компонент скорости, давления и интенсивности напряжений, регистрируемых в определенной точке тела вблизи трущейся поверхности, а также непосредственно сила трения. Второй класс задач связан с неразрушающей диагностикой поврежденности поверхностных слоев материала (в том числе покрытий) наноскопической толщины. В этом случае исследование осуществляется на основе регистрации силы сопротивления скольжению тестирующего контртела и последующего анализа ее частотного спектра. Как показали результаты, возможности трибоспектроскопии позволяют оценивать характерный период расположения и линейные размеры наноповреждений в поверхностном слое толщиной до 70–80 нм. Вместе с тем, поскольку спектроскопические методы не дают однозначного ответа на вопросы о структуре дефектов и глубине их расположения, для получения более полной информа-

ции необходимо дальнейшее развитие трибоспектроскопии, в том числе в сочетании с другими неразрушающими методами контроля.

Таким образом, проведенные исследования позволяют авторам предложить подход к изучению поверхностных слоев наноскопической толщины, основанный на спектральном анализе макроскопических характеристик взаимодействия тел при трении. Данный подход получил название нанотрибоспектроскопии. Технические возможности, параметры и чувствительность нанотрибоспектроскопии позволяют использовать ее для широкого круга измерительных или диагностических целей, среди которых: оценка пористости/поврежденности нанопокрывтий, определение характерных масштабов, на которых протекают процессы трения, определение статистики неустойчивостей в процессе трения и исследование условий подавления неустойчивостей трения (типа stick-slip).

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН № 3.6.2, Программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (проект 13.13.3), интеграционного проекта СО РАН № 127 со сторонними организациями, гранта РФФИ № 07-08-00192-а и Фонда содействия отечественной науке.

Литература

1. Панин В.Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // Физ. мезомех. — 1999. — Т. 2. — № 6. — С. 5–23.
2. Панин В.Е., Фомин В.М., Тумов В.М. Физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. — 2003. — Т. 6. — № 2. — С. 5–14.
3. Veprek S., Jilek M. Superhard nanocomposite coatings. From basic science toward industrialization // Pure Appl. Chem. — 2002. — V. 74. — No. 3. — P. 475–481.
4. Крагельский И.В. Трение и износ. — М.: Машгиз, 1962. — 384 с.
5. Rozman M.G., Urbakh M., Klafter J. Stick-slip dynamics of interfacial friction // Physica A. — 1998. — V. 249. — P. 184–189.
6. Lee Eung Alu, Kim Kwang Ko. Deposition and mechanical properties of Ti–Si–N coated layer on WC–Co by RF inductively coupled plasma-enhanced chemical vapor deposition // Thin Solid Films. — 2002. — V. 420–421. — P. 371–376.
7. Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Пинжсин Ю.П., Овчинников С.В., Коваль Н.Н., Гончаренко И.М. Сверхтвердые нанокристаллические покрытия // Физ. мезомех. — 2004. — Т. 7. — Спец. вып. — Ч. 2. — С. 3–7.
8. Schöfer J., Santner E. Quantitative wear analysis using atomic force microscopy // Wear. — 1998. — No. 222. — P. 74–83.
9. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. — М.: Наука, 2001. — 478 с.
10. Botten R., Wu X., Hu D., Loretto M.H. The significance of acoustic emission during stressing of TiAl-based alloys. Part I: Detection of cracking during loading up in tension // Acta Mater. — 2001. — V. 49. — P. 1687–1691.
11. Hashida T., Takahashi H. Significance of AE crack monitoring in fracture toughness evaluation and non-linear rock fracture mechanics // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. — 1993. — V. 30. — No. 1. — P. 47–60.

12. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
13. Оптическая голография. Т. 2 / Под ред. Г.М. Колфилда. – М.: Мир, 1982. – 733 с.
14. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Исследование процессов звукоизлучения конструкций методами электронной спекл-интерферометрии // Изв. Сибирского РАН. – 2001. – Т. 3. – № 2. – С. 232–237.
15. Псахье С.Г., Шилько Е.В., Попов В.Л., Старчевич Я., Татен И., Астафуров С.В., Димаки А.В. О возможности диагностики дефектности керамических наноструктурных покрытий. Нанотрибоспектроскопия // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 4. – С. 45–49.
16. Попов В.Л., Дудко О.К. Трибоспектроскопия фрактальных поверхностей // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 4. – С. 103–110.
17. Dudko O.K., Popov V.L., Putzar G. Tribospectroscopy of randomly rough surfaces // Tribology Int. – 2006. – V. 39. – No. 5. – P. 456–460.
18. Псахье С.Г., Остермайер Г.-П., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Смолин А.Ю., Коростелев С.Ю. Метод подвижных клеточных автоматов как новое направление дискретной вычислительной механики. I. Теоретическое описание // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3. – № 2. – С. 5–13.
19. Попов В.Л., Псахье С.Г., Жерве А., Кервальд Б., Шилько Е.В., Дмитриев А.И. Износ в двигателях внутреннего сгорания: эксперимент и моделирование методом подвижных клеточных автоматов // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 4. – С. 73–83.
20. Dmitriev A.I., Popov V.L., Psakhie S.G. Simulation of surface topography with the method of movable cellular automata // Tribology Int. – 2006. – V. 39. – No. 5. – P. 444–449.
21. Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Коростелев С.Ю., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Астафуров С.В. Метод подвижных клеточных автоматов и его применение при моделировании на разных масштабах // Механика — от дискретного к сплошному / Под ред. В.М. Фомина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 88–128.
22. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
23. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 2002. – 400 с.
24. Псахье С.Г., Чертов М.А., Шилько Е.В. Интерпретация параметров метода подвижных клеточных автоматов на основе перехода к континуальному описанию // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3. – № 3. – С. 93–96.
25. Рит М. Наноконструирование в науке и технике. Введение в мир нанорасчета. – Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 160 с.
26. Бородин Ф.М., Крюкова И.В. Фрикционные колебания, обусловленные деформированием шероховатостей контактирующих поверхностей // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23. – Вып. 6. – С. 67–73.
27. Рубцов В.Е., Колубаев А.В. Пластическая деформация и квазипериодические колебания в трибологической системе // ЖТФ. – 2004. – Т. 74. – Вып. 11. – С. 63–69.
28. Chen G.X., Zhou Z.R., Kapsa Ph., Vincent L. Effect of surface topography on formation of squeal under reciprocating sliding // Wear. – 2002. – V. 253. – P. 411–423.
29. Jibiki T., Shima M., Akita H., Tamura M. A basic study of friction noise caused by fretting // Wear. – 2001. – V. 251. – P. 1492–1503.
30. Смолин А.Ю., Коноваленко И.С. О генерации и распространении упругих волн при трении. Компьютерное моделирование // Физ. мезомех. – 2006. – Т. 9. – Спец. вып. – С. 45–48.
31. 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 // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 4. – С. 15–24.
32. 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 // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 6. – С. 11–21.
33. Колубаев Е.А. Деформирование поверхностных слоев при трении и факторы, влияющие на трибологические свойства металлов / Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2005. – 139 с.
34. Blackmore D., Zhou J. A general fractal distribution function for rough surface profiles. – SIAM J. Appl. Math. – 1996. – V. 56. – No. 6. – P. 1694–1719.
35. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
36. Мала С. Вейвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
37. <http://www.cmap.polytechnique.fr/~lastwave>.
38. Gardos M.N., Gabelich S.A. Atmospheric effects of friction, friction noise and wear with silicon and diamond. Part I. Test methodology // Tribology Lett. – 1999. – No. 6. – P. 79–86.
39. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7–15.
40. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
41. Österle W., Kloß H., Urban I., Dmitriev A. Towards a better understanding of brake friction materials // Wear. – 2007. – V. 263. – P. 1189–1201.
42. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 2001. – 560 с.
43. Popov V.L., Starcevic J., Filippov A.E. Reconstruction of potential from dynamic experiments // Phys. Rev. E. – 2007. – V. 75. – No. 6. – P. 066104-1–066104-6.

Поступила в редакцию
25.06.2009 г.

Сведения об авторах

Псахье Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н., профессор, директор ИФПМ СО РАН, профессор ТГУ, зав. кафедрой ТПУ, sp@ispms.tsc.ru
 Попов Валентин Леонидович, д.ф.-м.н., профессор, внс ИФПМ СО РАН, профессор Берлинского технического университета, v.popov@tu-berlin.de
 Шилько Евгений Викторович, д.ф.-м.н., внс ИФПМ СО РАН, доцент ТГУ, shilko@ispms.tsc.ru
 Смолин Алексей Юрьевич, к.ф.-м.н., доцент, снс ИФПМ СО РАН, доцент ТГУ, asmolin@ispms.tsc.ru
 Дмитриев Андрей Иванович, д.ф.-м.н., доцент, внс ИФПМ СО РАН, профессор ТГУ, dmitr@ispms.tsc.ru