

УДК 681.586.773

*В. Н. Седалищев, С. П. Пронин, Е. М. Крючков,  
М. Ю. Ларионов, А. В. Новичихин*

**Высокочувствительный метод исследования  
физико-механических и трибологических характеристик  
поверхностей твердых тел и покрытий  
с использованием связанных колебаний пьезорезонаторов**

*V. N. Sedalishchev, S. P. Pronin, E. M. Kryuchkov,  
M. Yu. Larionov, A. V. Novichikhin*

**Highly Sensitive Method of Researching Physico-mechanical  
and Tribological Characteristics of Surfaces of Firm Bodies  
and Coverings Using the Connected Piezoelectric Oscillations**

Описан метод исследования физико-механических и трибологических характеристик поверхностей твердых тел и покрытий, основанный на использовании связанных колебаний пьезорезонаторов. Главная его особенность заключается в том, что при проведении исследований не требуется использования дополнительных специальных устройств, применяемых в традиционных методах.

**Ключевые слова:** связанные колебания, физико-механические и трибологические характеристики поверхностей твердых тел и покрытий, акустический контакт, статические усилия.

В настоящее время для определения твердости и модуля упругости поверхностных слоев твердых тел широко используют методы непрерывного измерительного идентифицирования [1, 2]. Но для материалов с высокой долей упругой деформации этот метод приводит к завышенным значениям твердости. Высокое упругое восстановление проявляется в уменьшении размеров отпечатка при снятии нагрузки. При малых нагрузках размер отпечатка настолько мал, что часто его невозможно наблюдать в оптический микроскоп, а большие нагрузки вызывают образование трещин. Поэтому для твердых и сверхтвердых покрытий материалов достаточно трудно корректно определять твердость, используя только традиционные методы измерения параметров отпечатка.

В свою очередь, для исследования трибологических характеристик материалов и покрытий используют традиционные методы [3, 4], основанные на оценке степени шероховатости поверхностных слоев (оптические, щуповые, электронно-микроскопические и др.), а также методы, основанные на измерении сил сопротивления относительно движению соприкасающихся тел при трогании с места, скольжении, качении, вращении, в условиях наличия и отсутствия

The article describes the method which researches physico-mechanical and tribological characteristics of firm body surfaces and coatings. It based on using the connected piezoelectric oscillations. Key feature of this method is that at carrying out researches it is not require to use the supplementary special devices applied at traditional methods.

**Key words:** coupled oscillations, physico-mechanical and tribological characteristics of surfaces of firm bodies and coverings, acoustic contact, static forces.

смазки. В области нанотрибологии используют атомную микроскопию трения, что позволяет проводить исследования поверхностей вплоть до атомных масштабов. Но такие методы и средства исследований являются достаточно трудоемкими и дорогостоящими, требуют много времени.

В связи с этим представляет интерес поиск новых методов определения физико-механических характеристик поверхностей твердых тел и покрытий, оценки их трибологических свойств.

Одним из возможных подходов к решению данной проблемы может служить разработка метода измерения, основанного на определении параметров акустического контакта между исследуемыми поверхностями, совершающими согласные и противоположно направленные колебания. Для обеспечения таких режимов работы измерительного устройства предлагается использовать режимы синфазных и противофазных связанных колебаний пьезорезонаторов (ПР). Как показали проведенные исследования, к достоинствам данного метода можно отнести высокую чувствительность и возможность измерения как физико-механических, так и трибологических характеристик твердых материалов и покрытий.

Суть предлагаемого метода заключается в использовании высокочувствительных резонансных режимов связанных колебаний пьезорезонаторов для исследования влияния механических нагрузок и амплитуд колебаний резонаторов на характеристики акустического контакта между твердыми телами.

В качестве взаимодействующих резонаторов использовались два металлических вибратора с согласо-

ванными размерами и закрепленными на их поверхности пьезоэлектрическими трансформаторами (ПЭТ) (рис. 1). Одна система обкладок ПЭТ подключается к генератору электрических колебаний, а вторая — к измерительному прибору. При проведении исследований определялись характеристики акустического контакта между взаимодействующими поверхностями вибраторов.

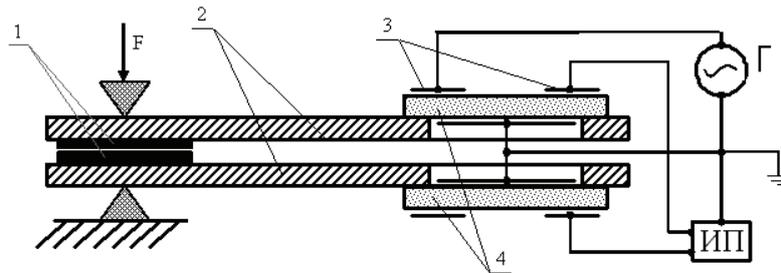


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Г — генератор; ИП — измерительный прибор; 1 — контактирующие поверхности; 2 — звукопроводы; 3 — обкладки пьезорезонаторов; 4 — пьезоэлементы

На рисунке 2 приведены (последовательно) зависимости выходных напряжений ведущего ПЭТ в функции напряжения возбуждающего генератора на первой и второй нормальных частотах синхронизации системы (1НЧС и 2НЧС) при различных значениях усилий сдавливания контакта, а также для второго ПЭТ при изменении напряжения воз-

буждения первого ПЭТ, соответственно, на 1НЧС и 2НЧС.

На рисунке 3 приведены зависимости, отражающие влияние уровня напряжения возбуждения колебаний в системе на коэффициент трансформации первого ПЭТ на 1НЧС и 2НЧС и второго ПЭТ на 1НЧС и 2НЧС соответственно.

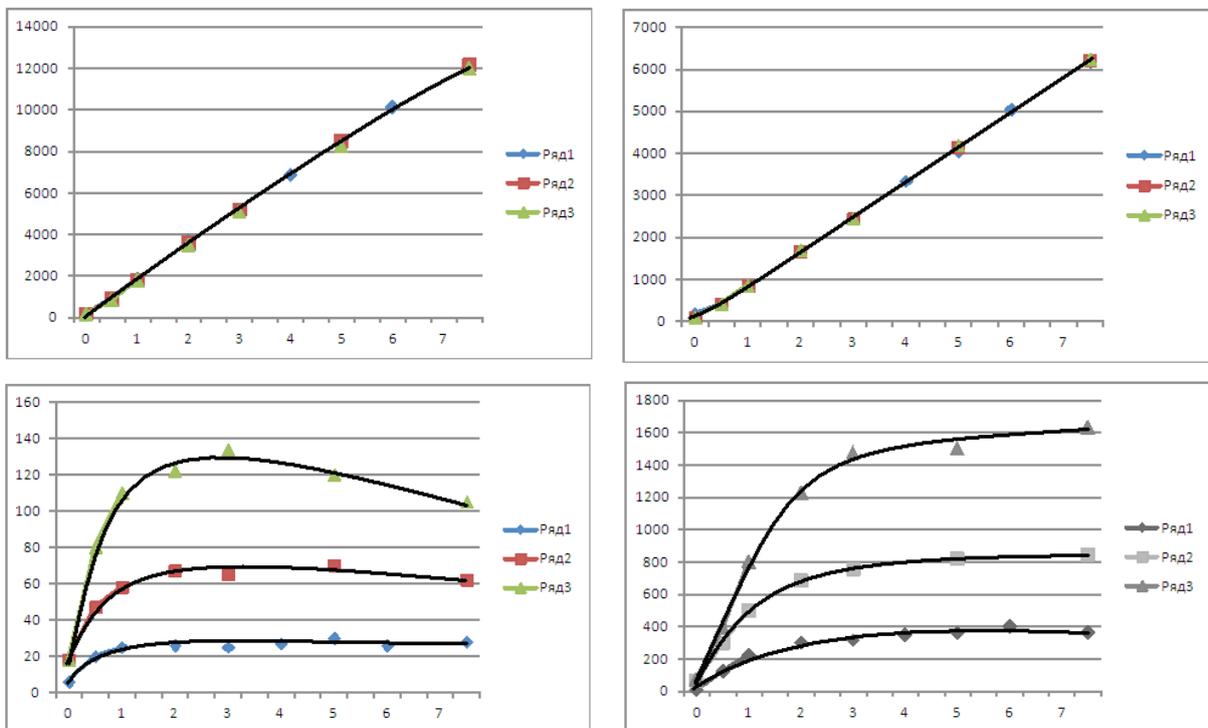


Рис. 2. Зависимости выходных напряжений ПЭТ от уровня напряжения возбуждения и воздействующих усилий сжатия контакта: по оси абсцисс — напряжения возбуждения (в вольтах), по оси ординат — выходное напряжение ПЭТ (в милливольт). Ряды 1, 2, 3 — для нарастающих значений усилия сдавливания контакта

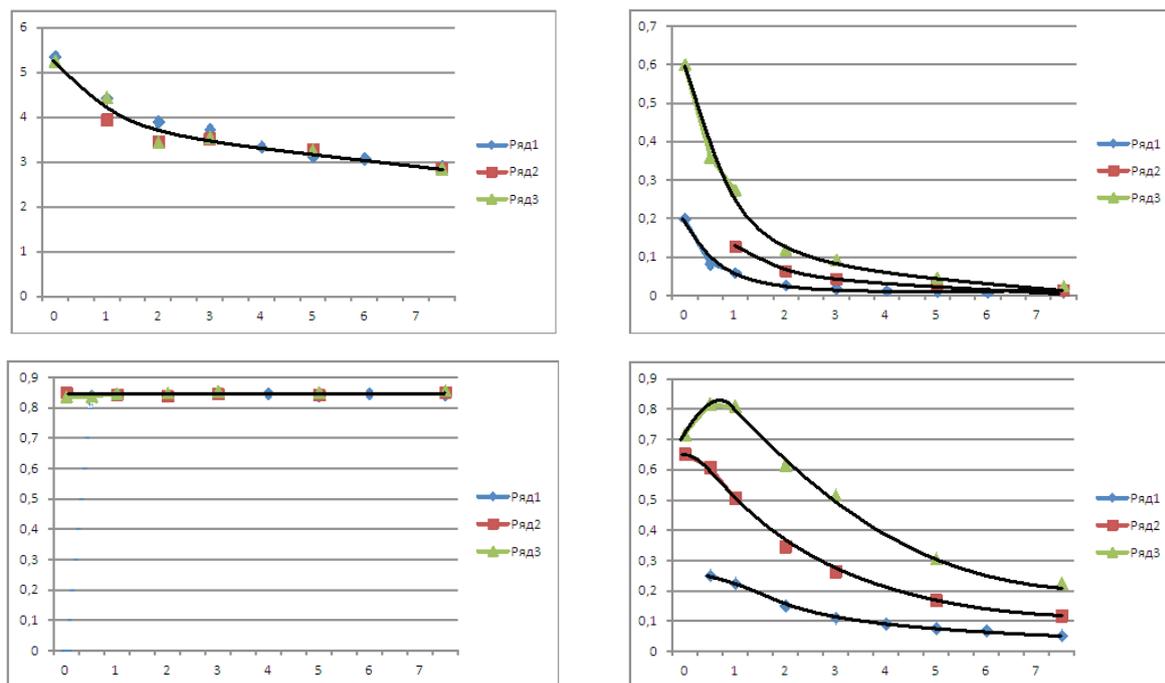


Рис. 3. Влияние уровня напряжения возбуждения колебаний на коэффициенты трансформации ПЭТ при разных усилиях сдвливания контакта

Вид полученных зависимостей определяется влиянием ряда факторов. В частности, снижение коэффициента трансформации первого ПЭТ на НЧС обусловлено не только потерями энергии на трение в пьезоматериале и в месте контакта резонаторов, но также перераспределением энергии колебаний между ними. На 2НЧС коэффициент трансформации первого ПЭТ остается практически неизменным при изменении напряжения возбуждения. Это объясняется тем, что снижение добротности колебательной системы возбуждаемого ПЭТ компенсируется уменьшением оттока энергии во второй ПЭТ.

На частоте синфазных колебаний связь между резонаторами слабая, по физической природе — упругая, внутренняя. Коэффициент связи при этом определяется отношением продольной упругости контакта к упругости материала пьезорезонатора. На частоте противофазных колебаний ПЭТ связь более сильная, чем при синфазных колебаниях резонаторов. Это связано с появлением дополнительной составляющей механизма упругой связи, обусловленной наличием поперечных деформаций микронеровностей в результате противофазных радиальных движений резонаторов. При увеличении усилия сдвливания контакта связь между резонаторами возрастает. Это происходит из-за увеличения фактической площади акустического контакта между пьезорезонаторами. В результате возрастает амплитуда колебаний ведомого ПЭТ, увеличивается отношение выходного напряжения ведомого ПЭТ к выходному напряжению ведущего ПЭТ.

По полученным в результате измерений значениям коэффициента распределения амплитуд колебаний (КРАК) можно определить значения коэффициентов связи для соответствующих частот связанных колебаний осцилляторов, воспользовавшись для этого известным из теории колебаний соотношением [5]:

$$\frac{A}{B} = \frac{1 \pm \sqrt{1 + \sigma^2}}{\sigma}, \quad \sigma \approx \frac{\gamma}{\xi}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — коэффициент связанности;  $\gamma$  — коэффициент связи;  $\xi$  — относительная расстройка парциальных частот осцилляторов;  $A$  и  $B$  — амплитуды колебаний возбуждаемого и ведомого осцилляторов.

При слабой связанности резонаторов на частоте их синфазных колебаний (1НЧС) приближенно можно считать [6, 7]:

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_1 \approx \frac{\sigma_1}{2} \approx \frac{\gamma_1}{2 \cdot \xi}, \quad \gamma_1 \approx 2 \cdot \xi \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)_1, \quad \gamma_1 \approx \frac{C_0}{C_1}, \quad (2)$$

$U$  — выходные напряжения ПЭТ;  $C$  — емкости контуров и элемента связи.

На частоте противофазных колебаний пьезорезонаторов (2НЧС) связанность высокая, поэтому:

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_2 \approx \frac{\sigma_2}{1 - \sigma_2} \approx \frac{\gamma_2}{\xi - \gamma_2}, \quad \gamma_2 \approx \frac{\xi \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)_2}{1 - \left(\frac{U_2}{U_1}\right)_2}, \quad \gamma_2 \approx \frac{C_0}{C_2}. \quad (3)$$

На рисунке 4 приведены зависимости КРАК от величины напряжения возбуждения ПЭТ на первой

и второй НЧС при разных усилиях сдвливания контакта.

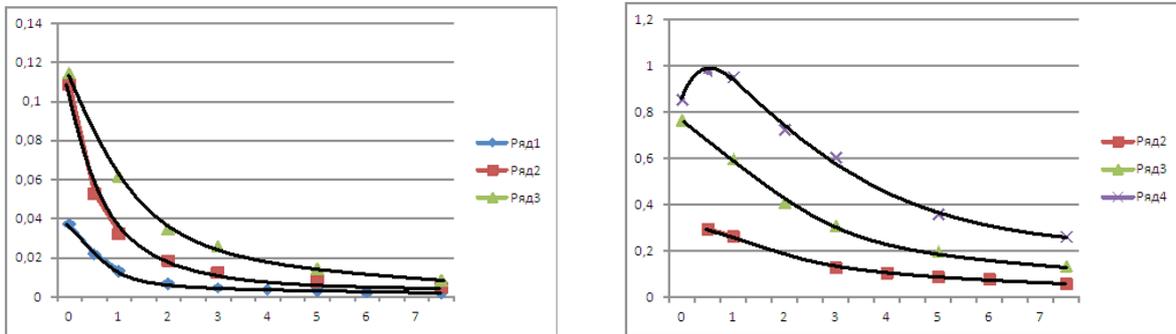


Рис. 4. Зависимости КРАК от величины напряжения возбуждения и усилия сдвливания контакта

Как следует из приведенных графиков, при увеличении сдвливающих усилий максимум графика, отражающего зависимость КРАК от амплитуды колебаний ПЭТ на 2НЧС, смещается вправо, в область больших амплитуд колебаний резонаторов. Это можно объяснить тем, что при увеличении амплитуд противофазных движений резонаторов появляется проскальзывание в месте их контакта. В результате возрастания потерь на трение уменьшается доля энергии, приходящая к ведомому ПЭТ со стороны возбуждаемого.

тра, для регистрации момента появления проскальзывания между контактирующими поверхностями. Зависимость такого критического режима взаимодействия резонаторов от величины напряжения возбуждения колебаний в системе при постоянном усилии сдвливания контактирующих поверхностей может быть использована для определения коэффициента трения трогания материалов.

На основании полученных зависимостей можно сделать вывод о возможности использования отношения выходных напряжений на частоту противофазных колебаний ПЭТ в качестве информативного параметра,

Появление проскальзывания контактирующих поверхностей приводит также к существенному снижению коэффициента связи на частоте противофазных колебаний резонаторов. На рисунке 5 приведены зависимости коэффициентов связи от величины входного напряжения для первой НЧС и второй НЧС.

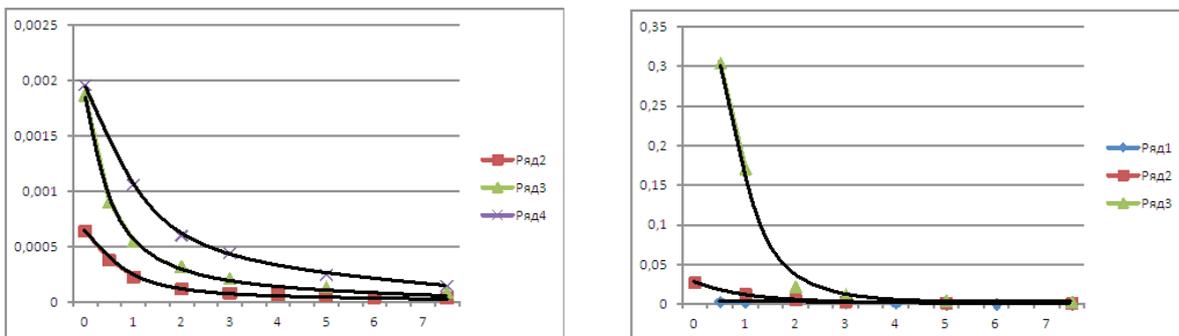


Рис. 5. Зависимости коэффициентов связи от величины входного напряжения при различных усилиях сдвливания контакта

На рисунке 6 приведены графики изменения отношения коэффициентов связи противофазных и синфазных колебаний резонаторов в функции напряжения возбуждения колебаний в системе при разных усилиях сдвливания контакта между резонаторами.

больших усилиях сдвливания контакта между резонаторами и малых амплитудах противофазных колебаний резонаторов. При появлении проскальзывания между резонаторами отношение коэффициентов связи на частотах синфазных и противофазных колебаний практически не зависит от напряжения возбуждающего генератора. Очевидно, это связано с тем, что при этом реализуются одинаковые механизмы взаимодействия между контактирующими поверхностями.

На основании полученных зависимостей можно сделать вывод о том, что при противофазных колебаниях связь между резонаторами намного больше, чем при их синфазных колебаниях. Особенно сильно такое различие в механизмах взаимодействия контактирующих поверхностей проявляется при достаточно

Таким образом, изменяя усилия сжатия контакта между резонаторами, напряжение возбуждения

ПЭТ, режимы связанных колебаний в системе, можно реализовать различные механизмы взаимодействия контактирующих поверхностей. Изменяя выходные параметры взаимодействующих пьезорезонаторов (например, выходные напряжения и резонансные частоты связанных колебаний ПЭТ), можно определить физико-механические и трибологические характеристики исследуемых материалов.

К достоинствам предложенного метода измерения физико-механических и трибологических характеристик твердых тел можно отнести следующие факторы:

- метод контроля является неразрушающим;
- метод может использоваться для исследования характеристик тонких покрытий (в том числе микро- и нанопокровтий);
- при исследовании различных характеристик материалов не требуется смены измерительных приспособлений;

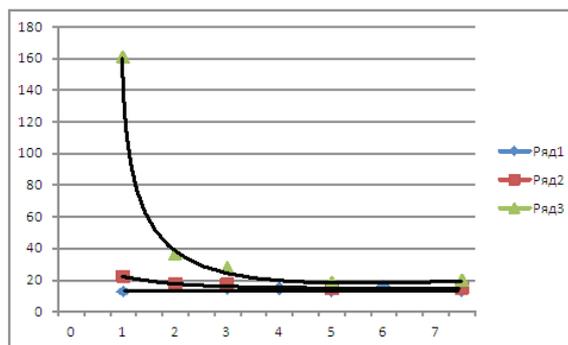


Рис. 6. Изменения отношения коэффициентов связи в функции напряжения возбуждения ПЭТ и усилия сжатия контактов

- измерительное устройство может быть выполнено компактным, малогабаритным, недорогим, потребляющим мало энергии, удобным в эксплуатации и обслуживании.

## Библиографический список

1. Булычев С. И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием. — М., 1990.
2. Гуткин М. Ю., Овидько И. А. Физическая механика деформируемых наноструктур. — СПб., 2003. — Т. 1.
3. Горячева И. Г., Добычин М. Н. Контактные задачи в трибологии. — М., 1988.
4. Джонсон Д. Механика контактного взаимодействия. — М., 1989.
5. Андронов А. А., Хайкин С. Э., Витт А. А. Теория колебаний. — М., 1981.
6. Седалищев В. Н., Хомутов О. И. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации. — Барнаул, 2006.
7. Седалищев В. Н., Крючков Е. М., Ларионов М. Ю., Новичихин А. В. Использование связанных колебаний пьезорезонаторов для исследования физико-механических и трибологических характеристик поверхностей твердых тел // Ползуновский альманах. — 2012. — № 2.