

# ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Н.В. Котенева

*Рассматривается методика проведения экспериментальных исследований контактного взаимодействия твердых тел за пределом упругости при нормальном направлении внешней нагрузки к плоскости контактирования. Приводится сопоставление результатов полученных с помощью разработанной методики расчета и результатов, полученных при проведении эксперимента.*

## Метод исследований

### Установка для экспериментальных исследований контактных взаимодействий при различных видах динамического нагружения

При создании методики экспериментальных исследований контактных колебаний в упругопластическом диссипативном контакте при динамическом нагружении нормального направления были выделены факторы, определяющие состояние исследуемого объекта. К основным факторам относятся: физико-механические свойства контактирующих тел, геометрические характеристики поверхностей, внешние условия. С учетом этого осуществлялось моделирование происходящих процессов, модернизирована установка и разработана соответствующая методика проведения экспериментальных исследований.

Для исследования относительных перемещений на контакте в нормальном направлении использовалась экспериментальная установка, принципиальная схема которой показана на рисунке 1

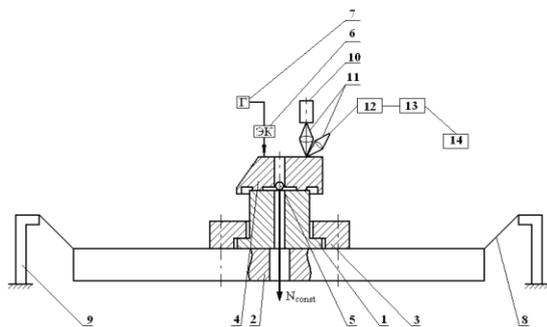


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования контактных колебаний

Нижний образец (1) в виде втулки крепится к основанию (2) при помощи накладной обоймы (3) с усилием, исключающим взаим-

ные контактные колебания нижнего образца (1) и основания (2). На гладкий штамп (1) устанавливается верхний подвижный образец (4). Нормальное статическое нагружение верхнего образца (4) осуществляется через сферу, к которой, в свою очередь через гибкий трос подвешиваются грузы (5), различной массы.

При изучении свободных затухающих колебаний нормального направления ударное усилие создается при помощи дополнительного устройства типа пружинного ударника. Переносной прибор ударного действия обладает необходимыми для проведения эксперимента качествами: малые габариты и масса; отсутствие необходимости в закреплении на исследуемом объекте; способность выполнять свои функции при любом положении в пространстве.

При проведении исследований вынужденных контактных колебаний в нормальном направлении устройство (6) (рисунок 1), включающее в себя электромагнитную катушку, работающую от генератора (7), устанавливают сверху над образцом, чтобы вынуждающее усилие было направлено нормально к плоскости контакта.

Для снижения внешних случайных воздействий установка с массивной плитой (2) подвешивается на гибких нитях (8) на четырех стойках (9), которые в свою очередь, крепятся к неподвижному основанию. Горизонтальное положение плиты (2) достигается установкой по уровню в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Процесс контактных колебаний фиксируется бесконтактным методом, с использованием сканирующего измерителя виброперемещений. Измеритель виброперемещений построен по схеме сканирующей фотопотенциометра с компенсирующей положительной обратной связью. В качестве излучателя светового потока использован полупроводниковый лазер (10) типа ИЛПН – 102, который че-

рез систему линз (11) засвечивает исследуемую поверхность колеблющегося образца (4).

Световой сигнал, отраженный от зеркала, закрепленного на боковой поверхности образца, проходит через систему линз (11) и принимается фотоприемником (12) (типа псевдо-планарного сканистора с одинаковой чувствительностью р-п переходов). Далее, через усилитель (13) (на четырех микросхемах типа 140УД20Л) сигнал подается на экран компьютера(14). Усилитель предназначен для усиления сигналов от сканисторного фотопотенциометра. Полученный на выходе сигнал пропорционален измеряемым деформациям на контакте. По графикам затухающих и вынужденных контактных колебаний, полученным в результате эксперимента определяются амплитуды и частоты колебательных процессов, другие параметры вибрации, необходимые при проверке теоретических положений. Питание прибора от сети 220 В.

#### Материалы и образцы для экспериментальных исследований

При исследовании параметров контактирования шероховатой поверхности с гладкой, образец, представленный на рисунке 2, имеет форму цилиндрического штампа с контактной дорожкой. Шероховатость первоначально наносилась на всю кольцевую площадку, а затем образец обтачивался и оставался только выступ. Необходимая высота микронеровностей достигалась при помощи различных видов механической обработки.

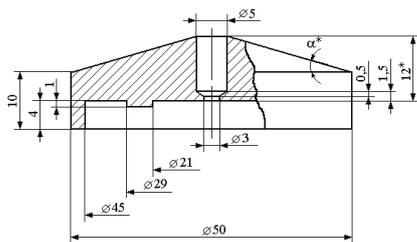


Рисунок 2 – Конструкция верхних образцов для исследования контакта шероховатых поверхностей

Контактная дорожка выполнялась в виде кольца высотой  $1 \cdot 10^{-3}$  м и диаметрами: наружным  $2,9 \cdot 10^{-2}$  м и внутренним  $2,1 \cdot 10^{-2}$  м. Площадь контактной дорожки составила  $2 \cdot 10^{-4}$  м. Эти размеры обусловлены тем, чтобы исключить явление волнистости контактной дорожки и обеспечить достаточную жесткости стыка.

Конструкция нижнего образца, применявшегося для экспериментальных исследований колебаний шероховатой поверхности, приведена на рисунке 3. Рабочая поверхность шлифовалась с последующей доводкой алмазной пастой и обладала шероховатостью  $R_{max} = 4 \times 10^{-8}$  м. Твердость материала подбиралась таким образом, чтобы в контакте имело место внедрение микронеровностей верхнего, колеблющегося тела по поверхности нижнего, неподвижного образца, а не смятие микронеровностей.

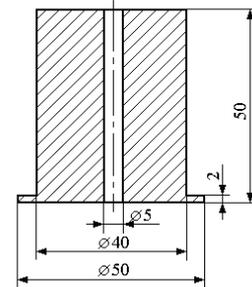


Рисунок 3 – Нижний образец для исследования контактных колебаний шероховатых поверхностей

Для исследования влияния массы подвижного образца на параметры колебаний были изготовлены образцы массой: 0,2; 0,5; 0,75 кг. Высота образцов была выбрана таким образом, чтобы частота волновых процессов превышала частоту контактных колебаний не менее чем на порядок.

Ввиду необходимости проведения исследований в достаточно широком диапазоне физико-механических свойств и геометрических характеристик контактирующих поверхностей, был сделан соответствующий выбор материалов, их состояний, геометрических характеристик образцов.

#### Результаты исследований

В таблице 1 приведено сопоставление экспериментальных и расчетных контактных сближений при динамическом нагружении нормального направления. Расчеты сближений производились по методике, приведенной [1], экспериментальные значения получены по методике, описанной выше. Как видно из данных, содержащихся в таблице, различие экспериментальных и рассчитанных значений контактного динамического сближения, в большинстве случаев, не превышает 5-15%. Факт расхождения можно объяснить, с одной стороны, влиянием наплыва (при определенных условиях нагружения), образующегося вокруг контактной вмятины, что в

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

данном решении не учитывалось. С другой стороны, адгезий, которая также не учитывалась в расчетных выражениях.

Таблица 1 - Экспериментальные и рассчитанные значения динамических сближений ( $x$ ) в сопряжении шероховатый штамп – упругопластическое гладкое контртело при изменении одного параметра нагружения

$X_{max}$ , мкм		R a, мкм	$V_0$ , м/с	P, Н	m, кг	H, МПа	$E \cdot 10^5$ , МПа
Расчет	эксперимент						
0,909	0,989	5	–	–	–		
0,484	0,463	1,25	–	–	–		
0,349	0,298	0,63	–	–	–		
0,518	0,537	–	0,01	–	–		
0,909	0,989	–	0,02	–	–		
1,536	1,488	–	0,05	–	–		
0,909	0,989	–	–	10	–		
0,835	0,729	–	–	30	–		
0,727	0,683	–	–	50	–		
0,909	0,989	–	–	–	0,2		
1,293	1,279	–	–	–	0,5		
1,538	1,508	–	–	–	0,75		
0,977	0,941	–	–	–	–	720	0,7
0,909	0,989	–	–	–	–	920	2
0,902	0,895	–	–	–	–	960	1,1

При исследовании были выбраны следующие изменяемые параметры:

1)  $V_0$  – начальная скорость движения в нормальном направлении (определялась в зависимости от нормального ударного импульса);

2)  $P$  – статическое поджатие верхнего колеблющегося тела;

3) параметры физико-механических свойств материала:  $\sigma_T$  – предел текучести материала,  $\mu$  и  $E$  – коэффициент Пуассона и модуль Юнга материала,  $I$  – твердость поверхностного слоя;

4) параметры микрогеометрии шероховатого тела:  $R_{max}$  – максимальная высота микронеровностей,  $b, v$  – характеристики кривой опорной шероховатой поверхности;

5)  $m$  – масса шероховатого штампа.

При оценке колебаний, имеющих место в рассматриваемом сопряжении необходимо соблюдать следующие условия:

– полное сближение ( $\delta + x_{max}$ ) не должно выходить за рамки развитой пластичности

$$\frac{2,24(1-\mu^2)\sigma_m^2}{E^2} \leq \frac{(\delta + x_{max})}{R} < \frac{53,32(1-\mu^2)^2 H^2}{E^2};$$

– сохранялась герметичность стыка ( $x_3 < \delta$ ).

Характер поведения рассматриваемой контактной пары при различных начальных скоростях движения отражен на рисунке 4.

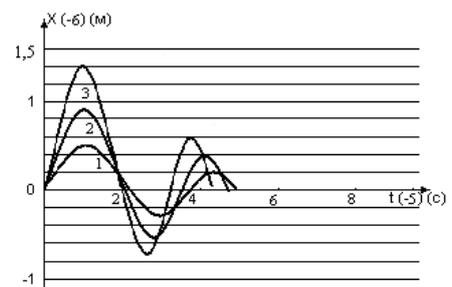


Рисунок 4 – Свободные колебания шероховатого тела в нормальном направлении при различной начальной скорости:

1 -  $u_0 = 0,01$  м/с, 2 -  $u_0 = 0,02$  м/с, 3 -  $u_0 = 0,05$  м/с.

Условия контактирования:  
 $P = 10$  Н,  $R_{max} = 30 \cdot 10^{-6}$  м,  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\mu = 0,25$ ,  $H = 920 \cdot 10^6$  Па

Как видно из графика, увеличение начальной скорости движения в нормальном направлении, влечет за собой рост начальной амплитуды.

Не менее важным является вопрос о характере влияния нормальной контактной нагрузки на колебательные процессы верхнего контактирующего тела в нормальном направлении при одиночном ударном возбуждении.

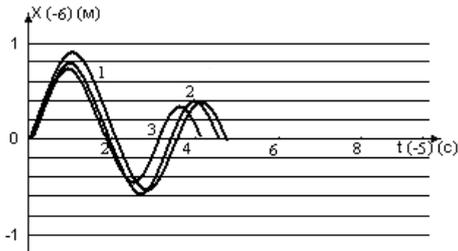


Рисунок 5 – Свободные колебания шероховатого тела в нормальном направлении при различной контактной нагрузке:

1 -  $P = 10\text{ Н}$ , 2 -  $P = 30\text{ Н}$ , 3 -  $P = 50\text{ Н}$

Условия контактирования:

$R_{\text{max}} = 30 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ ,  $m = 0,2\text{ кг}$ ,  $b=v=2$ ,  
 $E = 2 \cdot 10^{11}\text{ Па}$ ,  $\mu = 0,25$ ,  $H = 920 \cdot 10^6\text{ Па}$ ,  
 $u_0 = 0,02\text{ м/с}$

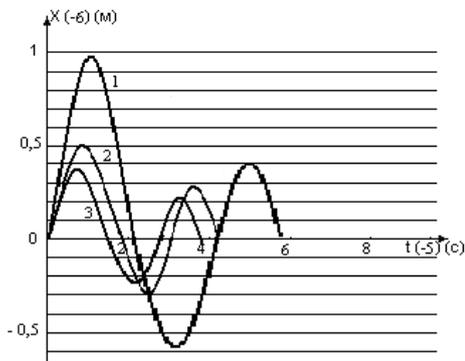


Рисунок 6 – Свободные колебания шероховатого тела в нормальном направлении при различных параметрах микрогеометрии:

1. –  $Ra = 5 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;  $R_{\text{max}} = 30 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;

2. –  $Ra = 1,25 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;  $R_{\text{max}} = 7,5 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;

3. –  $Ra = 0,63 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;  $R_{\text{max}} = 3,78 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ .

Условия контактирования:

$P = 10\text{ Н}$ ,  $m = 0,2\text{ кг}$ ,  $E = 2 \cdot 10^{11}\text{ Па}$ ,  $\mu = 0,25$ ,  
 $H = 920 \cdot 10^6\text{ Па}$ ,  $u_0 = 0,02\text{ м/с}$

В процессе исследований использовались шероховатые штампы одинаковой массы. При росте сжимающего усилия от 10 Н до 50 Н наблюдается заметное увеличение статического сближения. Такая зависимость  $\delta(\delta)$  в условиях статики объясняется тем, что на начальной стадии сближе-

ния в зоне сопряжения преобладает упругая деформация, доля которой в полном сближении в дальнейшем резко уменьшается.

Расчетные зависимости  $x(t)$  при различной нормальной контактной нагрузке приведены на рисунке 5. Из анализа графика можно сделать вывод, чем ниже статическая жесткость, тем меньше амплитуда колебаний и больше частота процесса. Причем амплитуда снижается не пропорционально увеличению нагрузки, а медленнее, что, вполне соответствует поведению материала за пределом упругости.

На рисунке 6 отображена зависимость амплитуды и периода нормальных колебаний от параметров микрогеометрии поверхностного слоя контактирующих поверхностей.

Было выявлено, что снижение параметров микрогеометрии приводит к уменьшению амплитуды нормальных колебаний при росте частоты процесса.

Так при параметре микрогеометрии  $Ra = 0,63 \cdot 10^{-6}\text{ м}$  теоретическое значение максимальной амплитуды нормальных колебаний составило  $X = 0,349 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ .

При расчете колебаний нормального направления, возникающих в сопряжении твердых тел в результате действия вынуждающих нагрузок, изменяемыми параметрами контактирования были приняты те же величины, что и при исследовании свободных затухающих колебаний. Динамическое воздействие принято подчиняющимся гармоническому закону  $F \sin \omega t$ , где  $F$  – амплитудное значение внешней вынуждающей нагрузки,  $\omega$  – циклическая частота процесса,  $t$  – время процесса.

На рисунке 7 приведены зависимости нормального колебательного процесса при изменении одного из параметров контактирования при прочих равных условиях.

Как видно из графиков, в течение определенного промежутка времени колебания имеют сложный негармонический вид. Однако через некоторый промежуток времени амплитуда остается неизменной и результирующие колебания являются гармоническими.

Анализ приведенных на рисунке 7 графиков позволил сделать вывод о том, что характер зависимостей с изменением аналогичных параметров контактирования и при свободных затухающих и при вынужденных колебаниях сохраняется. Это свидетельствует об адекватности предлагаемой модели для описания различных коле-

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

бательных процессов, протекающих в контакте.

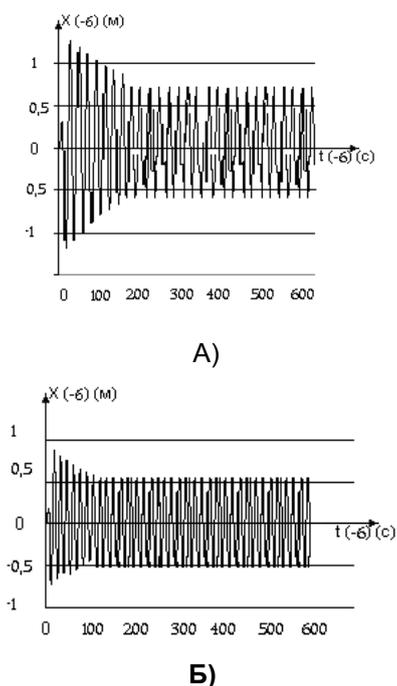


Рисунок 11 – Вынужденные нормальные колебания шероховатого штампа при различной величине статического поджатия:  $m = 0,2$  кг,  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\mu = 0,25$ ,  $H = 920 \cdot 10^6$  Па,  $F = 20$  Н,  $\omega = 300$  рад/сек.  
А) –  $P = 20$  Н, Б) –  $P = 35$  Н.

### Выводы

Теоретический и экспериментальный анализ полученных зависимостей позволил выявить некоторые закономерности.

1. Увеличение нормальной статической силы поджатия  $P_{const}$  приводит к возрастанию динамической жесткости. Такую закономерность в поведении контактных пар при увеличении силы поджатия можно объяснить упрочнением материала за пределом упругости.

2. Полная продолжительность динамического взаимодействия складывается из этапа активного нагружения и следующего за ним этапа упругой разгрузки. Снижение активного периода динамического взаимодействия с ростом начальной скорости является общей закономерностью, которая

проявляется не только при чисто упругом взаимодействии, но и при наличии контактного пластического сближения. Это значит, что появление локальной пластической деформации в зоне контакта существенно не изменяет характер зависимости  $t^*(v_0)$ , относящийся к чисто упругому контактному взаимодействию.

3. Рост начальной скорости нагружения вызывает снижение динамической жесткости контакта. В области до 0,05 м/с, наблюдается рост частоты нормального колебательного процесса, которая по мере увеличения скорости стабилизируется и затем остается неизменной.

4. Чем выше чистота рабочей поверхности (уменьшение  $R_a$ ), тем динамическая контактная жесткость выше. Частота колебательного процесса при этом возрастает.

5. Расчеты показывают, что не учет упругой деформации при вычислении полного упругопластического сближения в контакте занижают его в 1,2-2 раза.

6. Выявлен эффект, состоящий в том, что характер зависимостей с изменением различных параметров контактирования при свободных колебаниях сохраняется и при вынужденных.

7. Выполненная экспериментальная проверка подтвердила вполне удовлетворительную точность расчетных значений, что свидетельствует об адекватности предлагаемой модели используемой для описания различных колебательных процессов, протекающих в упругопластическом контакте.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котенева, Н.В. Упругопластический динамический контакт твердых тел: монография / Н. В. Котенева. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – 127с

**Котенева Н.В.**, к.т.н., доцент кафедры ПМ, e-mail: [kot178@yandex.ru](mailto:kot178@yandex.ru),  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»