

ОПИСАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Н.В. Котенева, А.Д. Борисова

В работе представлена методика проведения экспериментальных исследований контактного взаимодействия твердых тел за пределом упругости при нормальном направлении внешней нагрузки к плоскости контактирования. Исследования проводились на оригинальной установке с использованием лазера при фиксации контактных колебаний. Сравнение результатов полученных теоретическим расчетом контактных колебаний при различных видах динамического нагружения с опытными данными, полученными на экспериментальной установке, показало минимальное их расхождение.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, упругопластический контакт, динамическое нагружение.

Механика контактных взаимодействий деформируемых твердых тел постоянно находится в центре внимания исследователей. Это объясняется тем, что все механизмы и конструкции состоят из взаимодействующих деталей, а распределение контактных усилий между этими деталями заранее неизвестно и может быть найдено лишь в результате решения специфических задач, которые называются контактными задачами [1, 2].

Непосредственное воздействие на работу машин, различных конструкций и приборов оказывают динамические нагрузки, в частности ударные и вибрационные. Динамические нагрузки, всегда имеющие место в работе машин, оказывают существенное влияние на контактную жесткость и контактную прочность соприкасающихся поверхностей деталей машин, изменяют свойства трения контактного контакта, скорость протекания реологических процессов, взаимное внедрение поверхностей, площадь контакта и другие характеристики.

Известно, что любой динамический процесс всегда сопровождается механическими колебаниями, которые изменяют форму деформации и поглощают значительную часть энергии ударяющего тела. Независимо от причин, необходимо получить каким-либо образом количественные данные о реакции конструкции для того, чтобы можно было установить ее влияние на эксплуатационные характеристики материалов. В связи с этим исследование механических колебаний, возникающих в сопряжениях при динамическом взаимодействии тел, имеет большое научное и практическое значение.

При анализе контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей огромное значение имеют экспериментальные исследования [3-5]. Анализ приведенных работ показал, что экспериментально - теоретическое исследование контактного взаимодействия деформируемых твердых тел имеет место при условии, что напряжения не выходят за рамки пределы упругости. На практике же, в большинстве случаев, имеет место упругопластический и пластический контакт. Поэтому упругопластическое контактное взаимодействие твердых тел представляется нам крайне важным при создании новых машин и конструкций.

Следует отметить, что решению задач контактного взаимодействия за пределом упругости также посвящено много публикаций ученых и практических инженеров [6-8]. Так в работе [6] излагаются основы нового метода расчета контактной прочности пластически неоднородных твердых тел с поверхностным упрочненным слоем по предельным контактным напряжениям. Кроме этого, рассматривается вопрос о контактной прочности однородных твердых тел в случае контактных площадок, размер которых соизмерим с толщинами контактирующих твердых тел. Установлены основные зависимости предельных контактных напряжений, относительных размеров контактных площадок и величин контактных сил трения. Теоретически и экспериментально изучен вопрос о смене решений, происходящий при проникновении пластической области через все поперечное сечение контактирующего тела. Определены значения параметров процесса, при котором это про-

ОПИСАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

исходит. На наш взгляд очень удачные исследования. Некоторые положения, предложенные автором, использованы нами при оценке контактной прочности взаимодействующих твердых тел. В работе [7] была проведена экспериментальная проверка формулы для вычисления фактической площади упругопластического контакта упругой сферической неровности с плоской поверхностью контрапротивника. Эксперимент проводили на сферических сегментах радиусом 2,5 мм и образцах из армко-железа, сталей 45 и 30ХГСА. Результаты эксперимента с учетом валика оттесненного материала были использованы для сопоставления значений ФПК по предложенной формуле без учета валика вокруг отпечатка. Отмечено, что все экспериментальные значения на 5–8% превышают теоретические. Лучшее соответствие получено для стали 30ХГСА, поскольку в этом случае величина валика вокруг отпечатков была незначительной. Экспериментально было установлено, что граница пластической зоны под отпечатком очень напоминает линию максимальных касательных напряжений [8]. Поэтому пренебрегать упругостью, как первоначально предполагал Прандтль, нельзя даже в случае нагружения относительно нетвердых материалов, и в условиях полупространства материал следует считать упругим и пластическим, а не жестким и пластическим.

При создании методики экспериментальных исследований контактных колебаний в упругопластическом диссипативном контакте при динамическом нагружении нормально-го 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, создана установка и разработана соответствующая методика проведения экспериментальных исследований.

Установка для проведения экспериментальных исследований контактных взаимодействий твердых тел

Для исследования относительных перемещений на контакте в нормальном направлении используется экспериментальная установка, схема которой показана на рисунке 1. Нижний образец (1) в виде втулки крепится

к основанию (2) при помощи накладной обоймы (3) с усилием, исключающим взаимные 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.

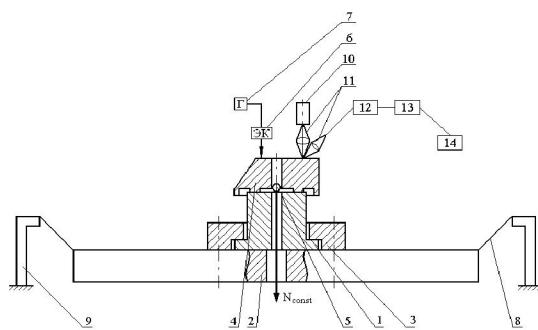


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования контактных колебаний

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 измерителя виброперемещений, построенного по схеме сканисторного фотопотенциометра с компенсирующей положительной обратной связью. Прибор позволяет фиксировать амплитуду колебаний от 0,01 до 100 мкм, что практически невозможно достигнуть применением таких приборов как тензометры, виброщупы, микрометры. Оптоэлектронный датчик виброперемещений обладает рядом преимуществ перед другими измерителями: бесконтактная фиксация параметров; небольшие габариты; удобство установки, наладки и эксплуатации; широкий диапазон измерений, как в статических, так и в динамических условиях; высокая точность измерений и чувствительность.

В качестве излучателя светового потока используется полупроводниковый лазер (10) типа ИЛПН – 102, который через систему линз (11) засвечивает исследуемую поверхность колеблющегося образца (4).

На исследуемый образец крепится зеркало размером не менее 5х5 мм. Если поверхность образца обладает хорошей отражающей способностью (коэффициент отражения $K_{\text{отр}} > 0,8$), то в зеркале нет необходимости.

Отражающая грань образца устанавливается на пересечении условных линий визирования зондирующего пучка и приемного объектива. Угол между отражающей гранью и зондирующим пучком 43–47 град. Расположение грани вертикальное.

Контроль правильного положения отражающей грани производится по двум светодиодам, расположенным на измерительной головке прибора. Равно яркое свечение светодиодов означает правильное расположение отражающей поверхности.

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 амплитуда и частота колебательных процессов, другие параметры вибрации, необходимые при проверке теоретических положений. Питание прибора от сети 220 В.

При изучении свободных затухающих колебаний нормального направления ударное усилие создается при помощи дополнительного устройства типа пружинного удараника.

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

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 наносится на всю кольцевую площадку, а затем образец обтачивается и оставляется только выступ.

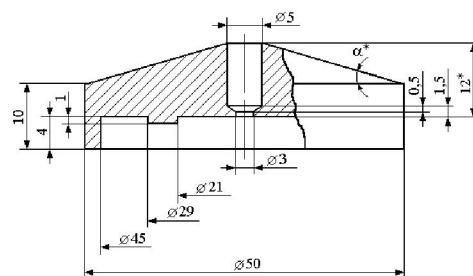


Рисунок 2 – Конструкция верхних образцов для исследования контакта шероховатых поверхностей

Контактная дорожка выполняется 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 составляет $2 \cdot 10^{-4}$ м. Эти размеры обусловлены тем, чтобы исключить явление волнистости контактной дорожки и обеспечить достаточную жесткость стыка.

Необходимая высота микронеровностей достигается при помощи различных видов механической обработки. Допускаемые отклонения от геометрической формы выбирались равными $1,5 \cdot 10^{-6}$ м, правильность которой определялась с помощью измерений на оптическом профилометре Wyko NT9080.

Конструкция нижнего образца, применявшегося для экспериментальных исследований колебаний шероховатой поверхности, приведена на рисунке 3. Образец выполняется из различных материалов. Рабочая поверхность шлифовалась с последующей доводкой алмазной пастой и обладала шероховатостью $R_{\text{max}} = 4 \times 10^{-8}$ 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.

ОПИСАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

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

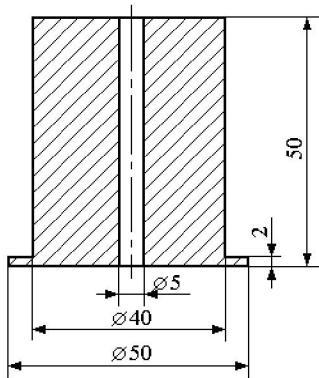


Рисунок 3 – Нижний образец для исследования контактных колебаний шероховатых поверхностей

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

Результаты исследований

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: σ_m – предел текучести материала, μ и E – коэффициент Пуассона и модуль Юнга материала, H – твердость поверхностного слоя;

4) параметры микрогоометрии 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 ($h + x_{max}$) не должно выходить за рамки развитой пластичности;

– сохранялась герметичность стыка,

где h – статическое сближение; x_{max} – максимальная амплитуда активного колебательного процесса.

В качестве примера на рисунке 4 приведен характер поведения рассматриваемой контактной пары при различной нормальной контактной нагрузке.

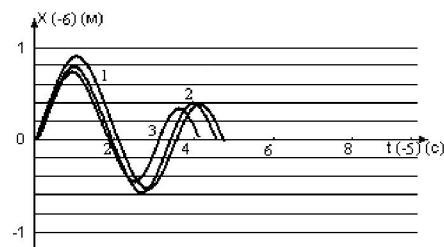


Рисунок 4 – Свободные колебания шероховатого тела в нормальном направлении при различной контактной нагрузке: 1 - $P = 10H$, 2 - $P = 30 H$, 3 - $P = 50H$ Условия контактирования: $R_{max} = 30 \cdot 10^{-6}$ м, $m = 0,2$ кг, $b=v=2$, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu = 0,25$, $H = 920 \cdot 10^6$ Па, $u_0 = 0,02$ 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 $\delta(P)$ в условиях статики объясняется тем, что на начальной стадии сближения в зоне сопряжения преобладает упругая деформация, доля которой в полном сближении в дальнейшем резко уменьшается.

Из анализа графика приведенного на рисунке 4 можно сделать вывод, чем ниже статическая жесткость, тем меньше амплитуда колебаний и большее частота процесса. Причем амплитуда снижается не пропорционально увеличению нагрузки, а медленнее, что, вполне соответствует поведению материала за пределом упругости.

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 подчиняется гармоническому закону $F \sin \omega t$, где F – амплитудное значение внешней вынуждающей нагрузки, ω – циклическая частота процесса, t – время процесса.

Как видно из графика на рисунке 5 в течение определенного промежутка времени колебания имеют сложный негармонический вид. Однако через некоторый промежуток времени амплитуда остается неизменной и результирующие колебания являются гармоническими.

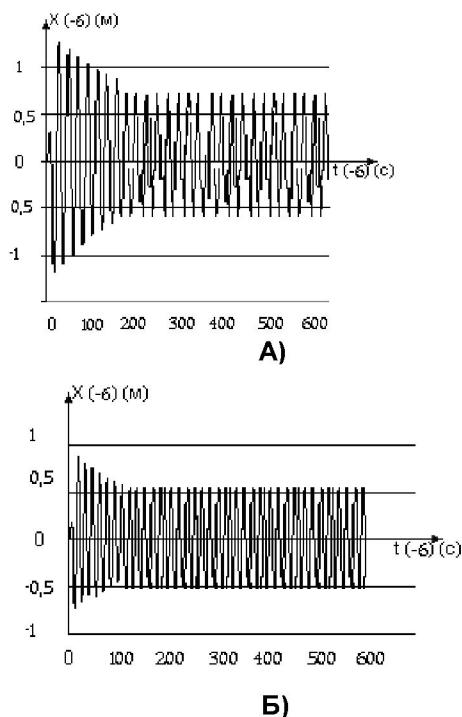


Рисунок 5 – Вынужденные нормальные колебания шероховатого штампа при различной величине статического поджатия: А) – $P = 20$ Н, Б) – $P = 35$ Н. Условия контактирования: $m = 0,2$ кг, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu = 0,25$, $H = 920 \cdot 10^6$ Па, $F = 20$ Н, $\omega = 300$ рад/сек.

Анализ приведенных на рисунке 5 графиков позволил сделать вывод о том, что характер зависимостей с изменением аналогичных параметров контактирования и при свободных затухающих и при вынужденных колебаниях сохраняется.

Теоретические расчеты сближений производились по методике, приведенной в работе [9], экспериментальные значения получены по методике, описанной выше. Различие экспериментальных и рассчитанных значений контактного динамического сближения, в большинстве случаев, не превышает 15%. Факт расхождения можно объяснить, с одной стороны, влиянием наплыва (при определенных условиях нагружения), образующегося

вокруг контактной вмятины, что в теоретическом решении не учитывалось. С другой стороны, адгезий, которая также не учитывалась в расчетных выражениях.

В заключении необходимо отметить, что не учет упругой деформации при вычислении полного упругопластического сближения в контакте занижают его в 1,2-2 раза. Кроме того, выявлен эффект, состоящий в том, что характер зависимостей с изменением различных параметров контактирования при свободных колебаниях сохраняется и при вынужденных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hyun, M. O. Robbins elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and smallwavelengths / M. O. Hyun // Tribology International. – 2007. v. 40. P. 1413–1422.
2. Нахатакян, Ф.Г. Сближение упругих тел конечных размеров при начальном касании по линии / Ф.Г. Нахатакян // Вестник машиностроения. – 2014. №2. – С. 125–129.
3. Sharpe William N. Springer handbook of experimental solid mechanics / William N. Sharpe // Springer Science+Business Media, LLC New York, 2008. XXX – 1098р. 874 illus., 58 illus. in color. – ISBN: 978-0-387-26883-5.
4. Костогрыз, С.Г. Экспериментальное определение амплитудно-частотной характеристики механического контакта в области предварительного смещения / С. Г. Костогрыз, В. В. Ковалевский, Е. А. Збитнев // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, №6. – С. 979–984.
5. Максименко, А.А. Экспериментальный комплекс для исследования контактного взаимодействия в пределах трения покоя / А. А. Максименко, Н. В. Перфильева, Н. В. Котенева // Изв. вузов. Машиностроение. – 2002. – №4. С. 3–7.
6. Третьяков, Е. М. Влияние относительного размера контактных площадок на величины предельных напряжений и контактную прочность твёрдых тел / Е. М. Третьяков // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2005. – №6. – С. 51–61.
7. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
8. Колесников, Ю. В. Механика контактного разрушения / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. – М.: Наука, 2010. – 224 с.
9. 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, кафедра механики и инновации, ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», sopromat116@mail.ru

Борисова А.Д. – к.т.н., доцент, кафедра механики и инновации, ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», sopromat116@mail.ru