

УДК 531.43:621.891

ДИНАМИЧЕСКАЯ АВТОПОДСТРОЙКА ПОД ВНЕШНЕЕ СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В НОМИНАЛЬНО НЕПОДВИЖНОМ ФРИКЦИОННОМ СОЕДИНЕНИИ

Ю. П. ЗАСПА⁺, М. А. РАЗУВАЕВА, Ю. И. ШАЛАПКО

Экспериментально показано, что внешнее силовое воздействие на номинально неподвижное фрикционное соединение вызывает динамическую автоподстройку трибосистемы под это воздействие. Она идет в направлении минимизации энергетических потерь и уровня относительных сил инерции, действующих в системе, что в условиях переменного силового воздействия соответствует состоянию контактного антирезонанса. Такая автоподстройка обеспечивается инерционно-фрикционными обратными связями с использованием различных степеней свободы у деформируемых твердых тел, приведенных в контакт. Установлено, что фрикционные автоколебания являются естественной формой динамической автоподстройки в условиях значительных инерционных нагрузок, а последующая точная автоподстройка осуществляется в виде малоамплитудного фреттинга, отражающего необходимость динамических контактных смещений для минимизации энергетических потерь в соединении в процессе переменного внешнего силового воздействия.

Ключевые слова: фрикционное соединение, динамическая автоподстройка, контактный антирезонанс, автоколебания, фреттинг.

Введение. Динамическое поведение систем с внешним трением не может быть адекватно описано без учета обратных связей, действующих в трибосистеме, а также между системой и окружением [1—4]. Характер этих связей изучен к настоящему времени недостаточно. В работе [5] при рассмотрении движения тел скольжения и качения по наклонной плоскости в поле силы тяжести была отмечена способность контактной трибосистемы к внутреннему синтезу оптимальных форм движения, обеспечивающих максимальную реализацию внешнего силового воздействия при минимальных энергетических потерях. Такая способность обусловлена действием инерционно-фрикционных обратных связей в динамической системе, включающей подвижный фрикционный контакт.

Цель работы — установление характера обратных связей, действующих в номинально неподвижном фрикционном соединении в условиях внешнего переменного силового воздействия.

Схема эксперимента и оборудование. В работе использована распространенная схема фрикционного привода в колебательное движение условно-неподвижного контактного соединения двух контробразцов (рис. 1). Вращательное движение вала электродвигателя посредством кривошипно-шатунного механизма преобразовывалось в возвратно-поступательное горизонтальное движение ползуна, на котором крепился держатель нижнего образца. Держатель верхнего контробразца крепился посредством болтового накладочного зажима в самоустанавливающейся головке, закрепленной на трех несущих колоннах установки. Нижние более мягкие плоские контробразцы были изготовлены из незакаленной стали 45. Более твердые верхние контробразцы использовались в двух видах: цилиндров внешним \varnothing 9 мм и внутренним \varnothing 5 мм из закаленной стали 45 (HRC 46—48), контактирующих по плоскости поперечного сечения (рис. 1), либо шариков подшипника \varnothing 12,7 мм из стали ШХ-15. Плоские контактные поверхности образцов подвергались шлифованию и последующему полированию с результирующим параметром шероховатости $R_a \approx 0,2 \pm 0,5$ мкм.

Хмельницкий национальный университет. Украина, 29016, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: zaspayuriy@mail.ru.

Крепление цилиндрических контрообразцов в держателях осуществлялось двухсторонними поперечными винтовыми зажимами (рис. 1). Шарики подшипника крепились в верхнем держателе прижимной гайкой с центральным отверстием, имевшим конический профиль контактирующего среза. Измеренная конструкционная тангенциальная жесткость крепления верхних контрообразцов до приведения их в контакт с нижними составляла 20–30 МН/м. Нормальную контактную нагрузку задавали весом сменного груза (15–40 Н), приложенного к верхнему контрообразцу через рычаг, закрепленный на основании установки. Регулируемую амплитуду колебаний контрообразцов измеряли индуктивными датчиками микроперемещений; она составляла 15–25 мкм. Включение электродвигателя переменного тока мощностью 1,5 кВт осуществляли прямой подачей напряжения без использования специальных пусковых устройств, сглаживающих начальные броски вращающего момента. Время работы соединения в колебательном режиме составляло 5–10 с, частота колебаний — 30 Гц. Динамику контактного взаимодействия анализировали по микрофотографиям следов взаимодействия на поверхности нижних образцов.

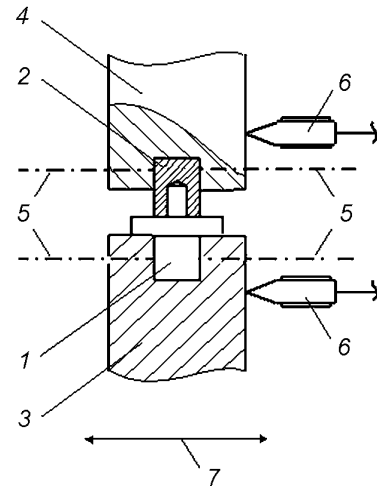


Рис. 1. Схема номинально неподвижного контактного соединения контрообразцов в условиях фрикционного привода в колебательном движении: 1, 2 — нижний и верхний контрообразцы; 3, 4 — держатели образцов; 5 — винтовые зажимы; 6 — индуктивные датчики микроперемещений; 7 — направления движения привода

Расчет динамических режимов работы соединения. Наличие многих степеней свободы у контактирующих деформируемых тел крайне усложняет моделирование динамических систем с внешним трением. Поэтому в данной работе основное внимание уделено экспериментальным исследованиям, а приведенная ниже упрощенная схема расчета служит лишь некоторой иллюстрацией наблюдаемых явлений. Реальное фрикционное соединение с распределенными параметрами заменяем одномассовой моделью с сосредоточенными параметрами. Инерционно-фрикционная связь учитывается лишь в виде возможной динамической вариации параметров задачи.

Упрощенная расчетная схема показана на рис. 2. Фрикционное соединение образовано между основой, движущейся по заданному гармоническому закону $x_1(t) = A \sin \omega t$ (A, ω — амплитуда и циклическая частота, соответственно), и контртелом массой m , конструктивно соединенным с установкой посредством жесткости c .

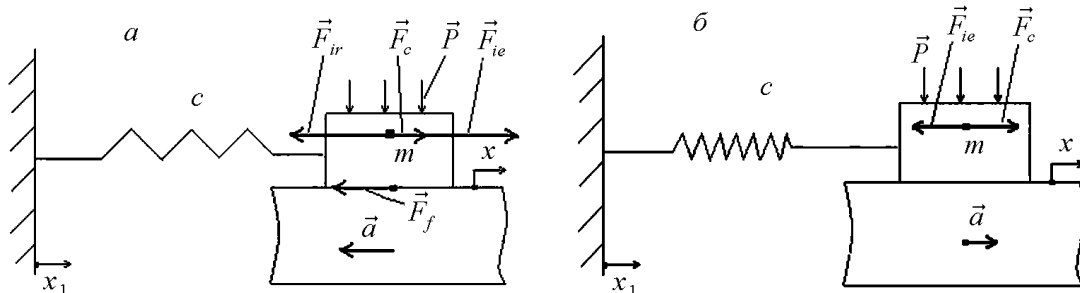


Рис. 2. Упрощенная динамическая схема работы фрикционного соединения в пусковом режиме (а) и в режиме установившихся движений (б). В режиме б сила трения и относительная сила инерции не показаны ввиду их малости

Уравнения движения массы m относительно основания целесообразно составлять в неинерциальной системе отсчета, движущейся с ускорением $\vec{a}(t)$ вместе с основанием. В этой системе отсчета на контртело действует переносная сила инерции $\vec{F}_{ie} = -m\vec{a}$, а также силы упругости \vec{F}_c и трения \vec{F}_f . Последняя нелинейно зависит от первых двух как сила реакции фрикционной связи. Упрощенно представляем силы трения в виде амплитудно-зависимых

гистерезисных сил смешанного типа [6]. Даже в рамках таких упрощений эти силы одновременно определяют как частотные, так и декрементные свойства системы, а разделение этих свойств можно осуществить лишь формально: $F_f^x = F_{fd}^x(x, x_{\max}) - c_k(x_{\max})x$, где $F_{fd}^x(x, x_{\max})$ — проекция на ось x (рис. 2) диссипативной составляющей силы трения; $c_k(x_{\max})$ — нелинейная контактная жесткость, зависящие от амплитуды относительного смещения x_{\max} . Учитывая, что $F_{ie}^x = -mx_1'' = mA\omega^2 \sin \omega t$; $F_c^x = -c(x_1 + x) = -c(A \sin \omega t + x)$, запишем уравнение движения контртела относительно основания в следующем виде:

$$mx'' = F_f^x + F_c^x + F_{ie}^x = F_{fd}^x(x, x_{\max}) - c_k(x_{\max})x - c(A \sin \omega t + x) + mA\omega^2 \sin \omega t. \quad (1)$$

Группируя подобные члены в правой части (1), получим

$$mx'' = F_{fd}^x(x, x_{\max}) - (c_k(x_{\max}) + c)x + cA\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right)\sin \omega t. \quad (2)$$

Здесь $\omega_0 = (c/m)^{1/2}$ — характерная циклическая частота колебаний. При совпадении частоты возбуждения с ω_0 в отсутствие внешних потерь в рамках данной модели переменная во времени составляющая возбуждения относительных контактных движений становится равной нулю и в системе происходят затухающие колебания контртела относительно основания с изменяющейся (возрастающей) циклической частотой $\omega_1 = ((c_k(x_{\max}) + c)/m)^{1/2}$, ведущие к остановке контактных движений. Это состояние системы соответствует условию контактного антирезонанса, когда сила упругости \vec{F}_c , приложенная к контртелу, полностью скомпенсирована возбуждающей переменной силой инерции \vec{F}_{ie} . В этом идеализированном случае (рис. 2, б) в лабораторной системе отсчета наблюдались бы гармонические колебания контртела и основания как единого целого даже при отсутствии силы трения. Наоборот, в пусковых режимах работы соединения (рис. 2, а), а также при несоблюдении условия $\omega = \omega_0$, сила упругости не компенсирует действие переносной силы инерции на контртело, и энергетические потери велики. В пусковом режиме сила конструкционной упругости \vec{F}_c мала (жесткость c деформирована слабо, на рис. 2 более сжато состоянию конструкционной жесткости соответствует случай б), а относительная сила инерции \vec{F}_{ir} ($F_{ir}^x = -mx''$) и сила трения \vec{F}_f значительны.

До сих пор задача рассматривалась в рамках упрощенной одномассовой модели без введения инерционно-фрикционных обратных связей. Ограниченность такого подхода очевидна уже ввиду неопределенности в значении инертной массы m , которая заменяет распределенную массу соединения и входит в выражение для частоты ω_0 . Однако полученное на модели условие минимизации энергетических потерь в соединении посредством подбора жесткости c и массы m позволяет спрогнозировать возможность динамической автоподстройки в системе под антирезонансный минимум потерь и объяснить таким образом приведенные ниже экспериментальные результаты. Сразу стоит уточнить, что наблюдаемая автоподстройка никак не является следствием, вытекающим из данной упрощенной модели. Она обусловлена общими закономерностями динамических и энергетических процессов в системах с внешним трением.

Эквивалентная жесткость фрикционного соединения определяется последовательным соединением контактной и конструкционной жесткостей. Первая может изменяться от нуля (в режиме скольжения) до $c_k^0 = \gamma fN / \delta_s$ в пределе бесконечно малых контактных смещений. Здесь γ — показатель степенной аппроксимации нелинейной зависимости нормального контактного усилия N от сближения; f — коэффициент трения скольжения; δ_s — предельное предварительное контактное смещение [6]. При последовательном соединении общая жесткость определяется минимальной из составляющих. Поэтому изменение контактного смещения силами инерции вплоть до скольжения может полностью модулировать частотные свойства системы, подстраивая их под антирезонансный минимум энергетических потерь.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 3 приведены микрофотографии следов динамического контактного взаимодействия на поверхности нижних более мягких образцов. Они отражают переход системы из пускового режима (схема рис. 2, *а*) в режим установившихся движений (рис. 2, *б*). Фото на рис. 3, *а* фиксирует контактное движение торца цилиндрического верхнего контробразца по поверхности нижнего при включении установки. Рисунок 3, *б* соответствует установлению движений в условиях множественного контакта плоскости поперечного сечения цилиндра с плоскостью основания. Фотография 3, *в* отражает динамику контактного взаимодействия в схеме шар—плоскость как в процессе включения установки, так и при ее выключении. Несмотря на разнообразие контактных схем, все фотографии фиксируют общий процесс динамической автоподстройки фрикционного соединения под внешнее силовое воздействие. Во всех режимах эта автоподстройка ведет к резкому уменьшению относительных сил инерции \vec{F}_{ir} , действующих на контртело, и переходу от скачкообразного автоколебательного режима в режим малоамплитудного фреттинга. Последний зафиксирован в виде более темных участков в конце дорожек-следов автоколебаний. Динамический процесс автоподстройки проходит довольно быстро — в основном за один (рис. 3, *а, б*) или два (рис. 3, *в*) цикла внешнего воздействия, т. е. за $\approx 0,03$ – $0,06$ с. В этом процессе контактная система задействует широкий набор имеющихся степеней свободы. На рис. 3, *а* преобладают скачки под изменяющимся углом к поверхности контакта с боковым смещением и верчением. Рисунок 3, *б* фиксирует следы боковых угловых колебаний в комбинации с поступательным движением и боковыми смещениями. На рис. 3, *в* видна сложная система контактных автоколебаний разного периода — в зависимости от фазы цикла возбуждения, которая сменяет начальное пластическое скольжение. Это же скольжение фиксируется сразу после выключения установки, когда установившееся движение снова нарушается возникающими относительными силами инерции.

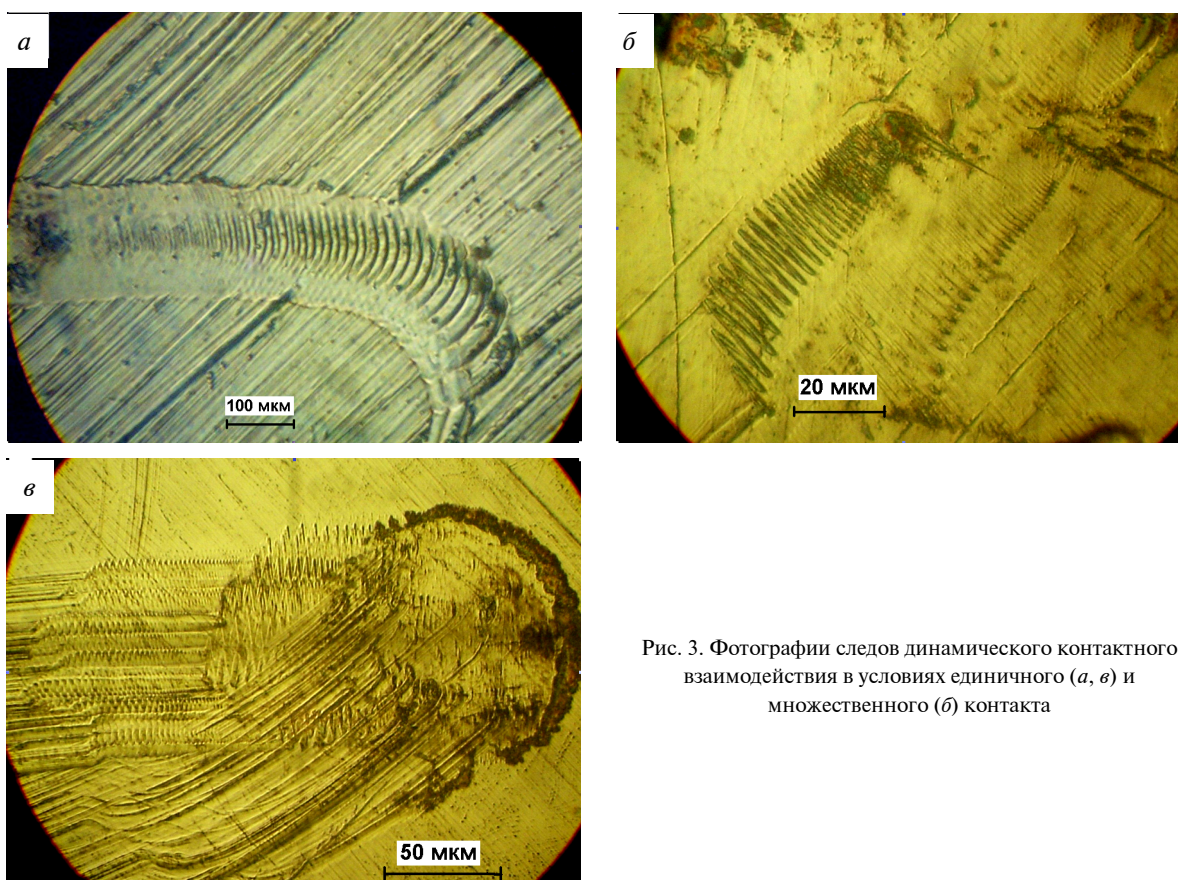


Рис. 3. Фотографии следов динамического контактного взаимодействия в условиях единичного (*а, в*) и множественного (*б*) контакта

Обращает на себя внимание различие в периодах следов автоколебаний на отдельных участках множественного фактического контакта в схеме плоскость—плоскость (рис. 3, б), а также разбиение общего следа контактирования в схеме шар—плоскость на отдельные дорожки автоколебаний (рис. 3, в). Это свидетельствует о том, что движение контртел трения формируется в результате динамического контактного взаимодействия на отдельных участках касания, имеющих различную жесткость. Тем не менее, общий характер движения прослеживается на всех участках фактического контакта.

Полученные экспериментальные результаты заставляют по-новому оценить роль фрикционных автоколебаний и явления фреттинга в контактной трибодинамике. Первые являются естественной и необходимой формой быстрой динамической автоподстройки контактной трибосистемы под внешнее силовое воздействие. Несмотря на заметные сопутствующие пластические деформации, эта форма движения позволяет избежать еще больших энергетических потерь в условиях значительных инерционных нагрузок. Фреттинг же отражает наличие контактных смещений, абсолютно необходимых для точной подстройки частоты контактного антирезонанса под частоту внешнего воздействия, и все то же естественное стремление трибосистемы избежать более значительных энергетических потерь. Об эффективности рассмотренного механизма динамической автоподстройки свидетельствует тот факт, что следы фреттинг-коррозии (рис. 3), образовавшиеся за несколько сотен циклов нагружения, меньше следов пластических деформаций, полученных за один первый цикл нагружения.

Заключение. Внешнее переменное силовое воздействие на номинально неподвижное фрикционное соединение сопровождается процессом динамической автоподстройки трибосистемы под это воздействие, ведущей к минимизации энергетических потерь и уровня относительных сил инерции, действующих в системе. Такая автоподстройка осуществляется посредством инерционно-фрикционных обратных связей с использованием различных степеней свободы деформируемых твердых тел, приведенных в контакт. Процесс автоподстройки, начинаясь в виде фрикционных автоколебаний, приводит к малоамплитудному фреттингу, отражающему наличие контактных движений, необходимых для точной и эффективной автоподстройки под внешнее переменное силовое воздействие.

Обозначения

$\vec{F}_{ie}, \vec{F}_{ir}$ — соответственно, переносная и относительная силы инерции; $\vec{F}_f, \vec{F}_c, \vec{P}, \vec{N}$ — силы трения и упругости, прижимное усилие и нормальная контактная реакция; \vec{a} — ускорение основания; t — время; c — конструкционная жесткость соединения; x, x_{\max} — смещение контртела относительно основания и его амплитуда; x_1 — смещение основания в лабораторной системе координат; A, ω — амплитуда и циклическая частота основания; x'', m — проекция относительного ускорения и модельная масса контртела; $F_{ie}^x, F_{ir}^x, F_c^x, F_f^x, F_{fd}^x$ — проекции на ось x , соответственно, переносной и относительной сил инерции, силы упругости, силы трения и диссипативной составляющей последней; c_k, c_k^0 — нелинейная тангенциальная контактная жесткость и ее начальное значение; γ — показатель степенной аппроксимации нелинейной зависимости нормального контактного усилия от сближения; f — коэффициент трения скольжения; δ_s — предельное предварительное смещение; ω_0 — модельная циклическая частота контактного антирезонанса; ω_1 — циклическая частота затухающих контактных колебаний.

Литература

1. **Кудинов В. А.** Динамика станков. — М.: Машиностроение. — 1967
2. **Кудинов В. А., Толстой Д. М.** Трение и колебания // В кн. “Трение, изнашивание и смазка”. Справочн. в 2 т. Т. 2 / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисына. — М.: Машиностроение. — 1979, 11—22

3. **Шилько С. В.** Трение аномально упругих тел. Отрицательный коэффициент Пуассона. Ч. 1. Реализация эффекта самостопорения // Трение и износ. — 1995 (**16**), № 3, 429—437
4. **Шилько С. В., Кухорев Л. П.** Методика и результаты исследования металлополимерного контактного сопряжения в условиях предварительного смещения // Трение и износ. — 2007 (**28**), № 1, 101—109
5. **Заспа Ю. П.** Внутренний синтез движений и динамические характеристики внешнего трения // Трение и износ. — 2011 (**32**), № 3, 233—247
6. **Заспа Ю. П.** Нелинейные формы установившихся виброколебаний механического контакта. Симметричные тангенциальные колебания // Трение и износ. — 2007 (**28**), № 1, 85—100

Поступила в редакцию 11.03.11.

No

The of.

Keywords: hol.