

УДК 531.43:621.891

ПРОЦЕССЫ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ МАЛОАМПЛИТУДНОМ ФРЕТТИНГЕ

Ю. И. ШАЛАПКО^а, Т. В. ТАРАСОВА^{б+}

Создана модель динамического взаимодействия при малоамплитудных колебаниях поверхностей соизмеримых с предварительным смещением и первыми актами проскальзывания в условиях осциллирующей тангенциальной нагрузки контакта. Решение системы дифференциальных уравнений силового баланса позволило получить основные характеристики процесса динамики номинально-неподвижного контакта в зависимости от управляющих параметров системы. Определены закономерности для описания характеристики трения при малых скоростях скольжения с учетом явления предварительного смещения, Штрибек-эффекта, параметра пластичности и вязкости трения. Модель позволяет отслеживать эволюцию относительных перемещений, скоростей проскальзывания, рассчитывать фазовые диаграммы, получать характеристику трения, действительные амплитуды проскальзывания, характерные для режима смешанного трения и малоамплитудного фреттинга.

Ключевые слова: номинально-неподвижные соединения, фреттинг, характеристика трения, эволюционная модель, динамика третьих тел.

Введение. Неотъемлемой и важной частью проблемы обеспечения целостности номинально-неподвижных фрикционных соединений (ННФС) является фактор циклических относительных микроперемещений в контакте. Эти явления были объектом специальных исследований многих ученых в области математики, физики, оптики, механики, электромеханики. В начале прошлого века трибологическая сторона этих явлений была выделена в отдельное понятие, называемое фреттингом. Со второй половины двадцатого столетия происходит целенаправленное исследование фреттинга как составной части проблемы повышения долговечности и надежности деталей машин. Основные усилия были направлены на исследование природы и закономерностей таких явлений как природа квазистатистического трения [1, 2], модели перехода от статического трения к кинематическому [3], специфика режима “сцепление — проскальзывание” [4], теория предварительного смещения [5, 6], динамика контактного взаимодействия [7, 8], на качественно новые методы обработки поверхностей [9–12], принципы структурной целостности номинально-неподвижных соединений [13] и др. Понятно, что, в любом случае, относительное смещение контактных тел есть наиболее важный объект исследований во многих вопросах связанных с силовым взаимодействием, трибохимической активацией, временными масштабами и непосредственным износом при малоамплитудном фреттинге.

Цель работы — моделирование относительного движения в осциллирующем контакте с проскальзыванием

Основы физического моделирования малоамплитудного фреттинга. Основной особенностью эволюционных теорий нелинейных динамических систем является неустойчивость движения. С точки зрения фреттинг-процессов, движение системы или ее эволюция легко интерпретируется с помощью определения относительного перемещения двух поверхностей под действием циклической тангенциальной нагрузки. Для малоамплитудного фреттинга характер относительного движения

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

б Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”. Россия, 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: n.tarasova@stankin.ru.

поверхностей довольно сложен, что объясняется влиянием неровностей поверхностей, соразмерными с амплитудами микроперемещений, вспышками адгезионной активности [15], механизмами самоорганизации, структурной динамикой частичного проскальзывания [16], микроизнашиванием [17], пластичностью [18], актами микропроскальзывания [19].

Самой распространенной формой представления динамической (эволюционной) математической модели микроуровня является формулировка краевой задачи для дифференциальных уравнений математической физики. Независимой переменной в таких моделях будет время, а искомые — фазовые переменные, характеризующие состояние системы (в наших исследованиях перемещения и скорости). Основываясь на опыте предыдущих исследований, нами предложена иерархическая модель для номинально-неподвижных соединений с точки зрения потери ими своей структурной целостности.

На рис. 1 представлена четырехуровневая система, обобщающая глобальную проблему целостности ННФС.

Нулевой уровень охватывает атомарный и молекулярный уровень строения материи и ее контактное взаимодействие. В первую очередь это касается межатомных сил Ван-дер-Ваальса, зарождения, размножения и накопления дислокаций, химических реакций и т. д.



Рис. 1. Иерархическая модель структурной целостности номинально-неподвижных соединений

Первый и второй уровень условно можно классифицировать как макроуровень, который содержит в себе фрикционные и динамические явления при фреттинге. Относительное движение двух поверхностей является первопричиной и обязательным условием для инициирования фреттинга. Начальное состояние системы определяется внешними параметрами нагрузки и физико-механическими свойствами поверхностных слоев. Именно процессы циклической нагрузки и фреттинг приводят к эволюции движения динамической системы в направлении ее расшатывания и потери номинальной подвижности — переход на третий уровень глобальной модели.

Относительное перемещение двух деталей определяет картину динамического поведения контакта, а фреттинг-процессы целостность всей конструкции. Из более чем пятидесяти определяющих параметров, описывающих фреттинг [20], динамические параметры относительного проскальзывания являются наиболее информативными с точки зрения критериев работоспособности соединения, возможности математической обработки осциллограмм, диагностики, прогнозирования и самое главное, определения относительного смещения.

Таким образом, фреттинг-процессы являются движущей силой динамического движения системы из двух контактных поверхностей при постоянстве внешних параметров нагрузки. На некотором этапе влияние фреттинга теряется и режим микроперемещений переходит к возвратно-поступательному трению с амплитудой более 50 мкм.

Динамический отклик на вибрационное возбуждение контакта, как обычно, идентифицируется тремя режимами: сцеплением, частичным проскальзыванием (тангенциальный контакт Миндлина) и глобальным скольжением поверхностей. Для контакта без смазки эти три режима описываются анализом трех параметров: тангенциальной силы, нормальной нагрузкой и амплитудой относительного смещения.

Концепция третьего тела моделирования контактных микроперемещений. Точность определения относительных микроперемещений является существенным фактором для идентификации динамики и износостойкости поверхностных слоев в условиях малоамплитудного фреттинга. Упругие и пластические деформации приконтактных областей могут быть соизмеримы со значениями смещения двух тел, которые фиксируют датчики микроперемещений. Однако относительное смещение поверхностей, т. е. трение скольжения, вообще может отсутствовать. Второе важное замечание касается учета механических условий крепления образцов. К сожалению, описание современного оборудования для испытаний не включает характеристику жесткости той детали или образца, перемещение которых берется за амплитуду фреттинга. Измерение перемещений только одного из образцов может пригодиться только для определения сравнительной фреттингостойкости различных материалов. Количественные и эволюционные характеристики контактной пары будут определены ошибочно. К тому же, констатация в исследованиях той или иной амплитуды относительных микроперемещений не сопровождается показом или анализом осциллограмм движения верхнего и нижнего образца. Вот почему наблюдаются большие расхождения в определении амплитудных границ фреттинга и влияния амплитуды на величину износа.

Исследование контакта при малых тангенциальных перемещениях значительно усложняется недоступностью поверхности раздела для непосредственного измерения действительных микроперемещений двух поверхностей. Для измерения доступны только те места, которые находятся на некотором расстоянии от поверхности раздела двух поверхностей. Реальную возможность оценить относительные микроперемещения дает оптическое исследование следов относительного смещения поверхностей после их отделения. Однако, при этом не учитывается упругая составляющая деформации контакта до момента перехода в скольжение.

Согласно глобальной эволюции контакта при фреттинге, контакт постоянно трансформируется при циклической нагрузке от состояния полного сцепления к проскальзыванию с образованием “третьего” тела. Разрушение происходит на периферии контакта и постепенно распространяется к центру (рис. 2). Ресурс посадки исчерпывается за счет износа и окисления, что приводит к переходу от статического трения к трению скольжения. Исследование контактных зон показали, что относительное движение в контакте есть не только абсолютное смещение тел, но и деформационная мобильность приконтактных зон (рис. 3).

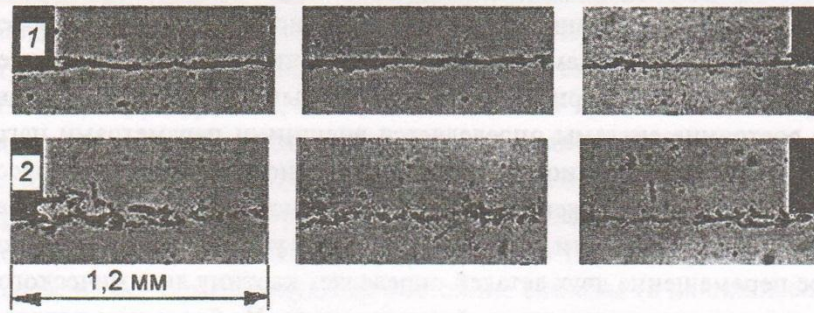


Рис. 2. Дegradация контакта при циклической тангенциальной нагрузке в условиях квазистатического контакта. Номинальное давление 12,6 МПа: 1 — количество циклов $N = 10^5$; 2 — количество циклов $N = 10^7$

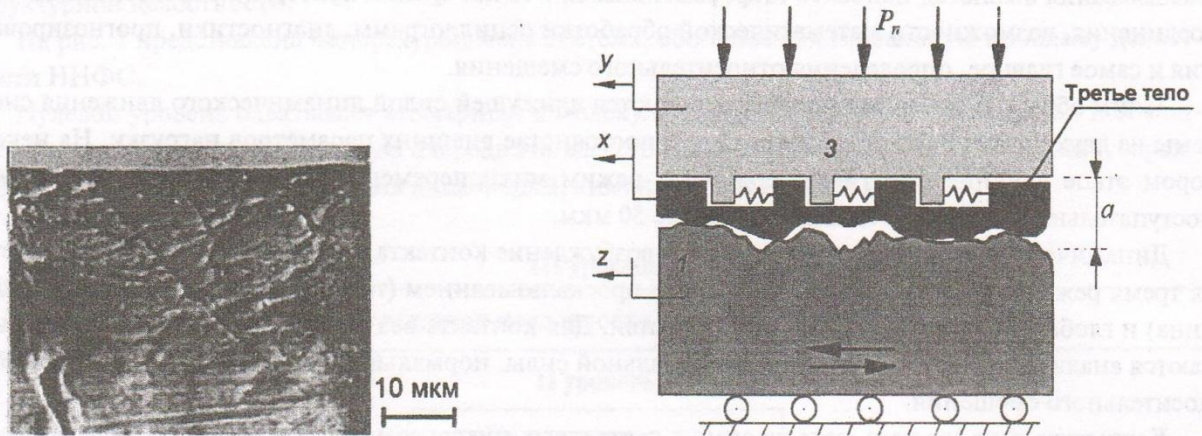


Рис. 3. Фрагментация и образование подвижного поверхностного слоя при малоамплитудном фреттинге стали 45: нормальное давление 4 МПа, конечная амплитуда проскальзывания 16,5 мкм

Рис. 4. Концепция номинально-недвижимого фрикционного контакта для динамической модели малоамплитудного фреттинга

Различия контактной области и материала основы заключаются в значениях модуля упругости, микротвердости, массе и тангенциальной жесткости, которые обычно не отражают свойств всей детали в целом. С точки зрения динамического моделирования следует акцентировать внимание на микросмещении приконтактной зоны относительно контртела в случае проскальзывания, с одной стороны, и циклической деформации относительно внутреннего объема всей детали, с другой. Такая концепция схематически показана на рис. 4.

Математическое моделирование. Представим динамическую модель номинально-неподвижного фрикционного контакта (ННФК) как систему двух подвижных масс m и M (рис. 5). Масса m представляет собой тонкий поверхностный слой, который циклически деформируется за счет сил трения от взаимодействия с основанием 1 . Основа 1 гармонически колеблется в тангенциальном направлении и является источником кинематического возмущения всей системы.

Определив уравнения движения всех составляющих модели $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ и их скорости, $\dot{x}(t)$, $\dot{y}(t)$, $\dot{z}(t)$ можно определить условия фактического проскальзывания между поверхностью 1 и телом 3 массой M .

Макроскопические свойства третьего тела должны характеризовать все возможные микроскопические явления контакта. Третье тело интерпретировано как целое, без уточнения его внутренней структуры. В связи с этим, математическое описание контакта и состояние системы может описываться небольшим количеством параметров.

В отличие от динамического возмущения одного из тел гармонической силой, что традиционно рассматривается в задачах по определению уравнений движения динамической системы, наша задача усложняется неопределенностью источника возмущения, т. е. закона по которому изменяется

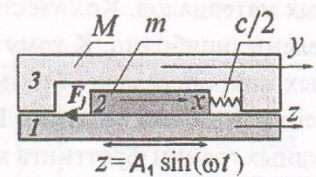


Рис. 5. Принципиальная схема контактного взаимодействия и баланс сил действующих на составляющие контактной пары тела 2 и 3 при тангенциальном циклическом возмущении основания 1

сила трения. Однако для фреттинг-процесса кинематическое возмущение является принципиальным с точки зрения его классического определения, как трибологического явления, связанного с относительными циклическими микроперемещениями в контакте двух тел.

На рис. 5 приняты следующие обозначения: x, y, z — перемещения соответственно тел 1, 2, с массами m, M и основы 1 в неподвижной системе координат; c — тангенциальная жесткость; $F_j = \mu N$ — сила трения в момент времени j ; N — нормальная сила, действующая между деталями 1–2; ω — круговая частота колебаний детали 1; M — масса детали 3; m — масса детали 2; A_1 — амплитуда перемещения детали 1; $z = A_1 \sin(\omega t)$ — кинематическое возмущение основы.

Ставится задача определения закона движения массы m и массы M . Разделим весь интервал реального времени от начала движения на равные промежутки длительностью: $\Delta t = t_j - t_{j-1}$, где $t_j = t_0 + j\Delta t$ ($j = 1, 2, 3, \dots$). Принимаем интервалы времени Δt настолько малыми, чтобы силу трения на каждом из интервалов можно было считать постоянной. Обозначим силу трения, которая действует на j -м интервале времени $[t_{j-1}; t_j]$ как F_j . Тогда дифференциальное уравнение, описывающее движение составных ННФК выглядит следующим образом

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -c(x - y) + F_j; \\ M\ddot{y} = c(x - y). \end{cases}$$

Решение данного уравнения — задача довольно сложная и не выносится в данной статье. Остановимся более подробно на характеристике трения, как наиболее важном элементом в теории динамического проскальзывания.

Математическое описание характеристик трения. Существует несколько интерполяционных функций характеристик трения, которые, в целом, не имеют принципиальных отличий с математической точки зрения, хотя имеют разный вид [21, 22]. В связи с особенностями относительного движения поверхностей при малоамплитудном фреттинге была поставлена задача воспроизведения в аналитической зависимости таких особенностей характеристик трения, которые не были учтены в предыдущих исследованиях [23] (рис. 6).



Рис. 6. Характеристики силы трения с учетом упругой тангенциальной деформации, предварительного смещения, Штрибек-эффекта и вязкости трения (а). Графическое пояснение параметров характеристик трения (б): 1 — область сцепления; 2 — область скольжения

Понятие параметра пластичности было введено Костогрызом С. Г. [24]. Параметр пластичности определяет пластическую часть предельного значения относительной деформации контакта при прямой тангенциальной нагрузке от $F = 0$ до $F = \mu N$.

Следует обратить внимание на то, что понятие относительной деформации несколько иное, чем в теории упругости. Оно определяется как отношение мгновенной деформации в контакте к упругой части полного предварительного смещения. При этом он определяет пластическую долю полного предварительного смещения. Характеристики трения приобретают вид, представленный на рис. 7, в соответствии со следующими аналитическими выражениями.

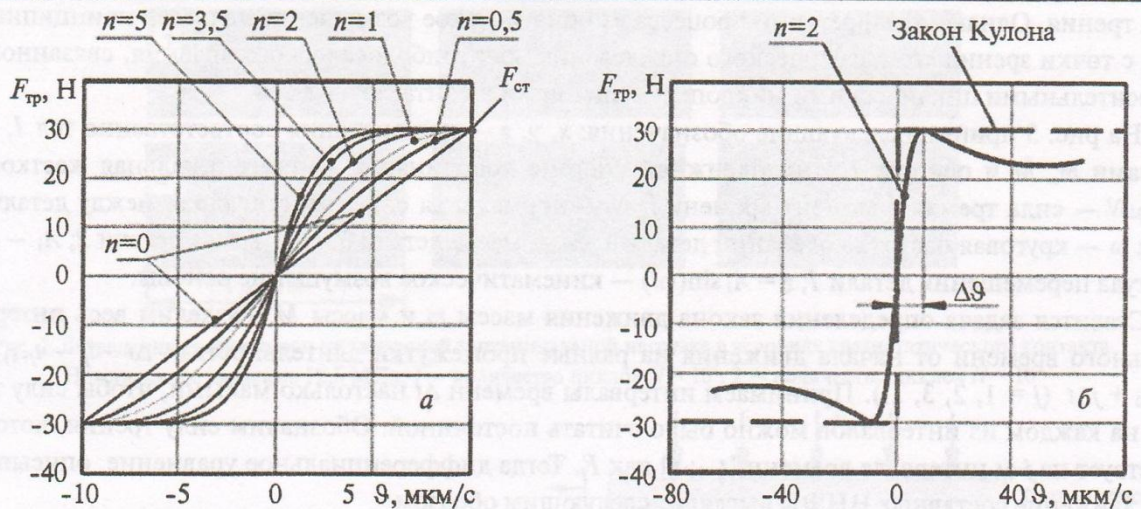


Рис. 7. Характеристики трения в пределах предварительного смещения при различных значениях параметра пластичности (а). Общий вид силы трения в зависимости от относительной скорости смещения и проскальзывания поверхностей (б) при $\Delta\vartheta = 10$ мкм/с, $F_{ст} = 50$ Н, $n = 2$, $a = 0,004$, $b = -0,4$

$$F(\vartheta) = \begin{cases} F_{ст} \left[1 - \frac{\Delta\vartheta - \vartheta}{\Delta\vartheta} \right]^{\sqrt{n+1}}, & \text{при } -\Delta\vartheta < \vartheta < 0, \text{ режим предварительного смещения,} \\ -F_{ст} \left[1 - \frac{\Delta\vartheta - \vartheta}{\Delta\vartheta} \right]^{\sqrt{n+1}}, & \text{при } -\Delta\vartheta < \vartheta < 0, \text{ режим предварительного смещения,} \\ \frac{F_{ст}(a\vartheta^2 + b|\vartheta| + F_{ст})}{a(\Delta\vartheta)^2 + b|\vartheta| + F_{ст}}, & \text{при } \vartheta \geq \Delta\vartheta, \text{ режим проскальзывания,} \end{cases}$$

где a — постоянная, которая отражает возрастающий участок вязкого трения; b — постоянная, отражающая падающий участок Штрибек-эффекта; $F_{ст}$ — максимальная сила статического трения; $\Delta\vartheta$ — значение скорости относительного смещения, ниже которой проскальзывание отсутствует; n — параметр пластичности.

В работах [25] авторы определяют границу “малой” скорости $\Delta\vartheta$ в 0,1...100 мкм /с. Параметр $\Delta\vartheta$ зависит от качества поверхности и составляет отдельную задачу исследований.

Результаты моделирования. Управляющими параметрами модели динамического движения в контакте были приняты: тангенциальная жесткость c — определяет изменение физико-механических свойств материала и процессы деградации поверхностного слоя, масса m — определяет изменение массы поверхностного слоя, которая циклически деформируется в тангенциальном направлении и, что важно, моделирует процесс изнашивания, сила трения, параметр пластичности n , частота ω и амплитуда возбуждения A_1 . Модель позволяет задавать соответствующие законы изменения параметров во времени, что моделирует стадийность фреттинг-процесса.

Исследуем влияние характеристики трения на картину динамического движения в ННФК, а именно: влияние Штрибек-эффекта и параметра пластичности. Для закона Кулона-Амонтона характеристики трения имеют коэффициенты $a = 0$, $b = 0$ и параметр пластичности $n = 0$ (рис. 8).

В случае вязкого трения характеристики трения имеют только восходящий участок. При этом виброактивность падает, максимальная скорость проскальзывания уменьшается почти в два раза (рис. 9, з). Присутствие Штрибек-эффекта является наиболее вероятным для характеристик трения при переходе в проскальзывание и более влиятельным на относительную скорость скольжения, а значит и на износ поверхностей (рис. 10).

Понятно, что добавление одного-двух актов микропроскальзывания в одном периоде колебаний повышает фрикционную составляющую режима “сцепления — проскальзывания”, которая влияет на фреттингостойкость контактной пары и ее относительную подвижность. Было установлено, что увеличение параметра пластичности приводит к возникновению дополнительных гармоник в микроперемещениях. Для соответствующих условий контактирования возможно опреде-

ление момента перехода к общему скольжению в зависимости от параметров процесса, например, моделирования естественного уменьшения силы трения в контакте (рис. 11).

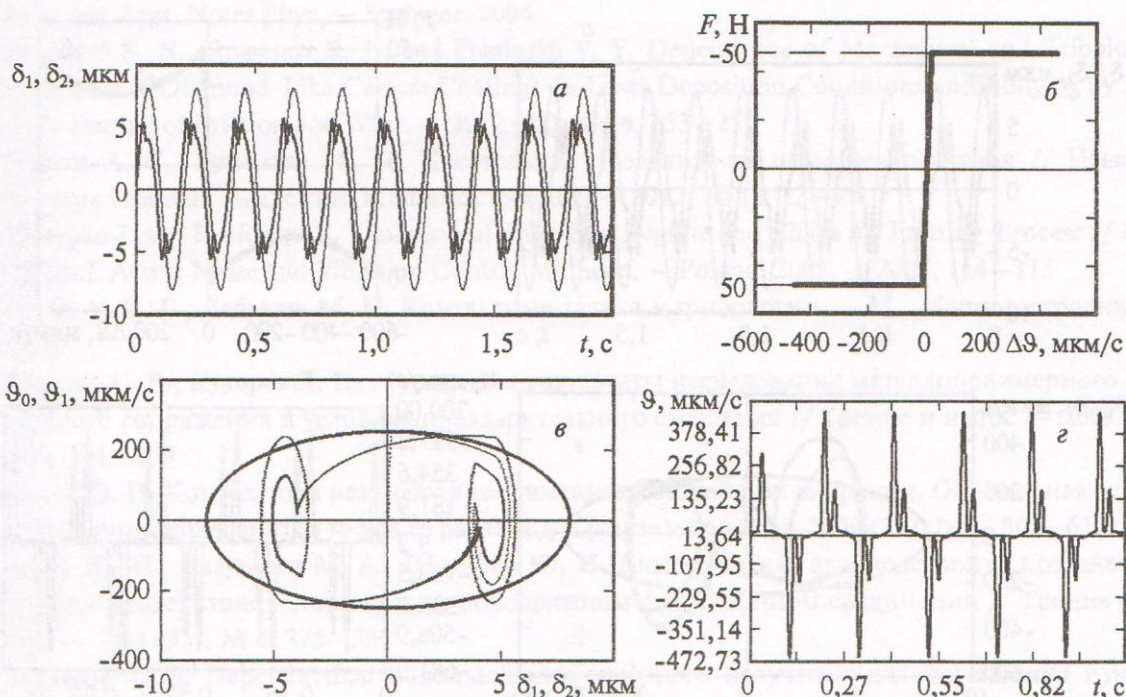


Рис. 8. Характеристики фреттинг-процесса при условии действия закона Кулона-Амонтона: *a* — микроперемещения в элементах контактной пары при гармоничном возмущении основания; *b* — характеристика трения; *c* — фазовая диаграмма; *d* — относительная скорость проскальзывания

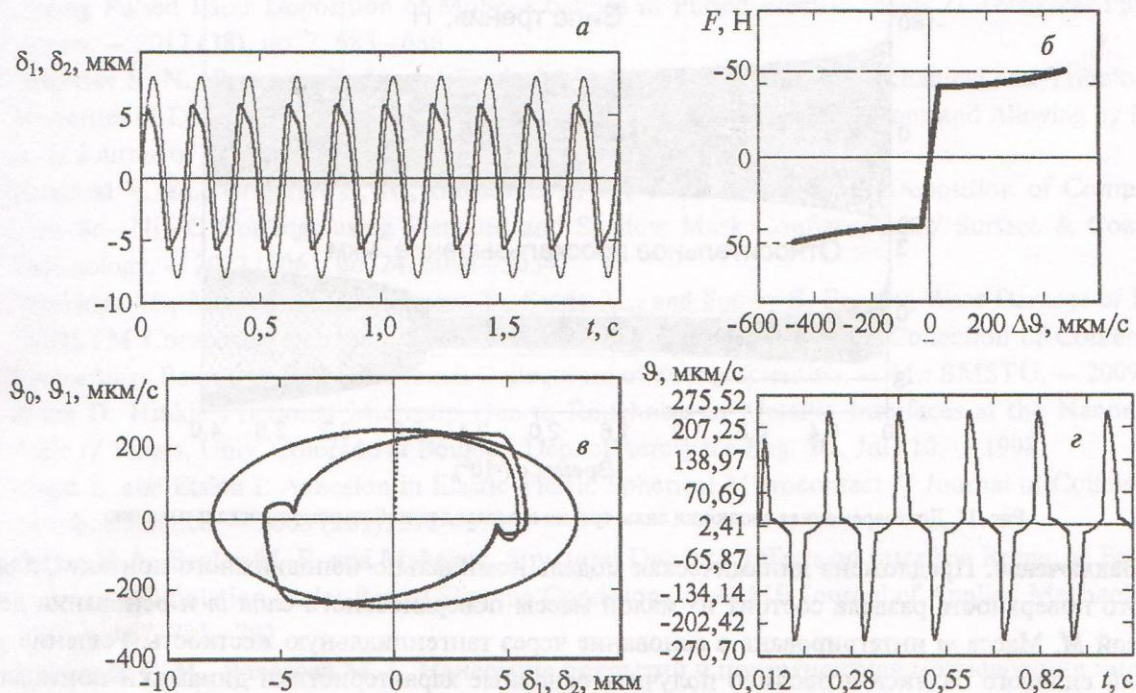


Рис. 9. Характеристики фреттинг-процесса в условиях вязкого трения ($a = 0,2, b = 0, n = 0$)

Постепенное уменьшение силы трения приводит к практически мгновенному проскальзыванию по всей плоскости контакта. Главным отличием всех переходных процессов является их скачкообразное изменение. В целом для критических значений микроперемещений наблюдается следующая картина: потеря целостности контакта напрямую зависит от толщины (массы) упруго деформированного слоя — при его уменьшении резко увеличивается амплитуда проскальзывания; увеличение частоты вынужденных колебаний ведет к сцеплению поверхностей. Однако заметим,

что при частотах 20...100 Гц виброактивность контактной пары достаточно высокая, что не снимает проблему фреттингостойкости для традиционных частот работы механических систем.

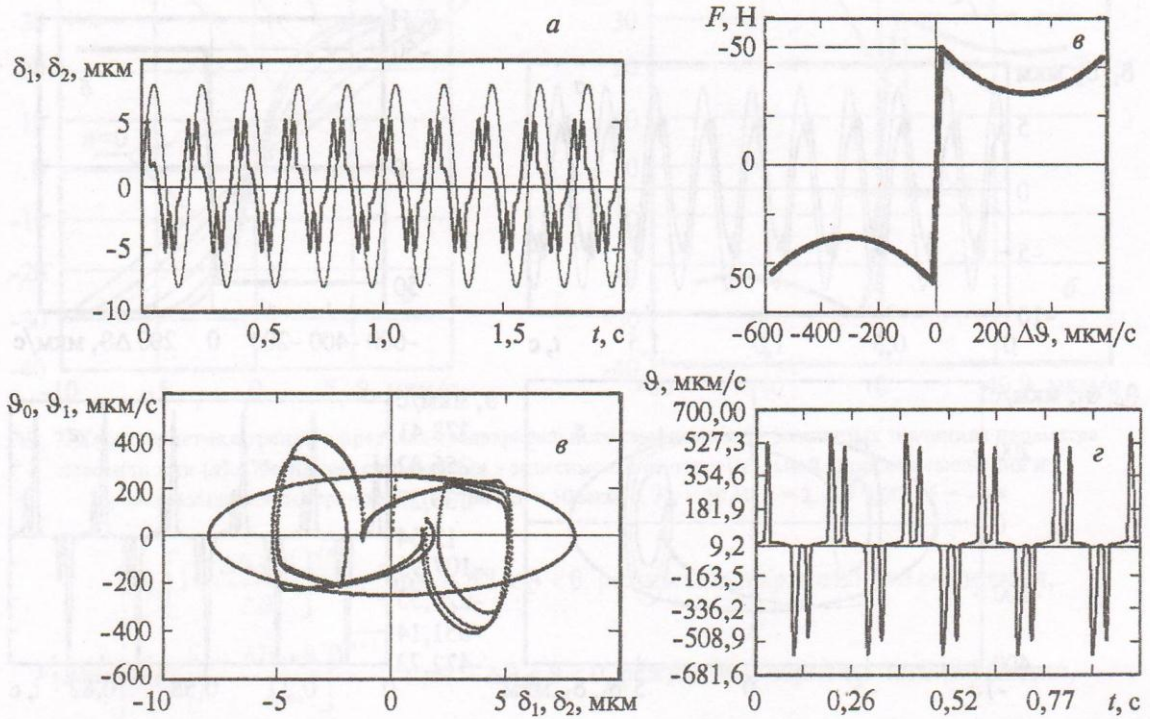


Рис. 10. Характеристики фреттинг-процесса с вязким трением и Штрибек-эффектом ($a = 0,2$, $b = 0$, $n = 0$)



Рис. 11. Долговременная эволюция силы трения и переход к глобальному проскальзыванию

Заключение. Предложена динамическая модель номинально-неподвижного контакта, для которого поверхность раздела состоит из малой массы поверхностного слоя m и основания детали массой M . Масса m интегрирована в основание через тангенциальную жесткость. Решение уравнений силового баланса позволило получить основные характеристики динамики номинально-неподвижного контакта во времени в зависимости от параметров характеристик трения. Модель позволяет отслеживать эволюцию относительных перемещений, скоростей, рассчитывать фазовые диаграммы, получать характеристики трения, амплитуды проскальзывания. Определены закономерности для описания силы трения при малых скоростях скольжения с учетом явления предварительного смещения, Штрибек-эффекта и вязкости трения.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.В37.21.1841 от 04 октября 2012 г.).

Литература

1. Shillor M., Sofonea M., and Telega J. J. Models and Analysis of Quasistatic Contact: Variational Methods. Lect. Notes Phys. — Springer, 2004
2. Grigoriev S. N., Romanov R. I., and Fominskii V. Y. Dependence of Mechanical and Tribological Properties of Diamond-Like Carbon Coatings on Laser Deposition Conditions and Alloying by Metals // Journal of Friction and Wear. — 2012 (33), no. 4, 253—259
3. Иванов А. С., Ермолаев М. М. Касательная податливость шероховатого слоя // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2012, № 13, 23—25
4. Shalapko J. and Kostogryz S. Evolution of Stick-Slip Regime and Chaos for Fretting-Process // Proc. 8th Conf. Active Noise and Vibration Control Methods. — Poland. 2007. — 2007, 114—115
5. Горячева И. Г., Добычин М. Н. Контактные задачи в трибологии. — М.: Машиностроение. — 1988
6. 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
7. Заспа Ю. П. Контактный резонанс в соединениях деталей при вибрации. Одномерная модель нелинейных колебаний и метод ее расчета // Трение и износ. — 2006 (27), № 6, 592—611
8. Заспа Ю. П., Разуваева М. А., Шалапко Ю. И. Динамическая автоподстройка под внешнее силовое воздействие в номинально неподвижном фрикционном соединении // Трение и износ. — 2011 (32), № 4, 375—380
9. Тарасова Т. В. Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионноустойчивых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2010, № 6, 54—58
10. Fominskii V. Yu., Grigoriev S. N., Gnedovets A. G., et al. Specific Features of Ion-Initiated Processes During Pulsed Laser Deposition of MoSe₂ Coatings in Pulsed Electric Fields // Technical Physics Letters. — 2012 (38), no. 7, 683—686
11. Grigoriev S. N., Romanov R. I., and Fominskii V. Yu. Dependence of Mechanical and Tribological Properties of Diamond-Like Carbon Coatings on Laser Deposition Conditions and Alloying by Metals // Journal of Friction and Wear. — 2012 (33), no. 4, 253—259
12. Fominski V. Yu., Grigoriev S. N., Gnedovets A. G., et al. Pulsed Laser Deposition of Composite Mo—Se—Ni—C Coatings using Standard and Shadow Mask Configuration / Surface & Coatings Technology. — 2012 (206), no. 24, 5046—5054
13. Terekhina M., Malycheva G., Tarasova T., Salvia M., and Fouvry S. Fretting Wear Damage of HexTOOLTM Composite Depending on the Different Fiber Orientations // Collection of Conference Proceedings Bauman's Russian-French Colloquium of Young Scientists. — М.: BMSTU. — 2009
14. Jason D. Hinkle Frictional Microslip Due to Roughness in Metallic Interfaces at the Nanometer Scale // Thesis, Univ. Colorado at Boulder, Dep. of Aerospace Eng. Sc., July 10. — 1998
15. Kogut L. and Etsion I. Adhesion in Elastic-Plastic Spherical Microcontact // Journal of Colloid and Interface Science. — 2003 (261), 372—378
16. Berger E. J., Begley M. R. and Mahajani. Structural Dynamic Effects on Interface Response Formulation and Simulation under Partial Slipping Conditions // ASME Journal of Applied Mechanics. — 2000, no. 67, 785—792
17. Григорьев С. Н., Волосова М. А. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента / Учебное пособие. — М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН». — 2007
18. Ambrico J. M. and Begley M. R. Plasticity in Fretting Contact // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2000, no. 48, 2391—241
19. Волосова М. А. Вакуумно-плазменные технологии: получение наноструктурных покрытий триботехнического и инструментального назначения // Вестник МГТУ Станкин. — 2010, № 4, 66—73
20. Beard J. An Investigation in to the Mechanism of Fretting-Fatigue // Ph. D. Thesis, University of Salford. — 1982

21. Сотова Е. С., Верещака А. С. Управление контактными процессами при резании путем нанесения функциональных покрытий на керамический инструмент // Вестник МГТУ Станкин. — 2011, № 2, 61—67
22. Григорьев С. Н., Кулиш С. М., Зотов Е. А., Соломахо Г. И., Ошурко В. Б. Эффект снижения коэффициента трения в “горячих” точках интерфейса трения // Естественные и технические науки. — 2011, — № 6, 337—343
23. Vaumberger T. and Caroli C. Solid Friction from Stick-Slip Down to Pinning and Aging // Phys. Rev. — 2007, no. E 62, 300—338
24. Костогрыз С. Г., Гладкий Я. Н. Математическое моделирование предварительного смещения в номинально неподвижном фрикционном контакте // Проблемы Трибологии. — 1996, no. 1, 5—15
25. Крагельский И. В., Гитис Н. В. Фрикционные автоколебания. — М.: Машиностроение. — 1987

Поступила в редакцию 17.01.13.

Shalapko Y. I. and Tarasova T. V. Processes Dynamics of Surface Layers at Low-Amplitude Fretting.

A model of dynamic interaction with small-amplitude oscillations of the surface in tangential contact was created. The solution of the differential equations of force balance provided basic characteristics of the dynamics of nominal fixed contact, depending on the control parameters of the system. There were defined the regularities of friction at low sliding speeds, taking into account pre-conditions of displacement, Shtribek effect, ductility parameters and toughness of friction. The model allows tracking the evolution of the relative displacement, velocity slip, calculate the phase diagram, obtain friction characteristics, the actual amplitude of the slip of the regime of mixed friction and low-amplitude fretting.

Keywords: nominal and motionless joints, fretting, friction characteristic, evolutionary model, dynamics of the third bodies.