

ВСЕСОЮЗНЫЙ ЖУРНАЛ
ТРЕНИЕ И ИЗНОС

ТИ

*

МАЙ — ИЮНЬ

ТОМ VI

3

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

МИНСК
«НАУКА И ТЕХНИКА»
1985

УДК 539.3

В. В. ПЕТРОВ, А. Г. ГРИНЕВСКИЙ, А. В. СЛАДКОВСКИЙ

МИКРОСКОЛЬЖЕНИЕ ПРИ СДВИГЕ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для объяснения механизма фрикционного взаимодействия пар трения необходимо исследование явления микроскольжения — образования в контактной области участков сцепления и относительного проскальзывания. Известно, что микроскольжение влияет на процесс изнашивания контактирующих поверхностей, причем особенно существенно при периодических и динамических процессах, например при циклической нагрузке, работе резинометаллических амортизаторов. Для изучения влияния предыстории нагружения на микроскольжение были применены экспериментальный метод — голографическая интерферометрия (ГИ) и теоретический метод конечных элементов (МКЭ), которые позволили проследить процесс появления и развития зон микроскольжения на модельной задаче о сложном нагружении упругого параллелепипеда.

Исследование микроскольжения при помощи ГИ. Возможность исследования процесса формирования площадки контакта и явления микроскольжения была доказана ранее [1—4]. В отличие от метода отпечатков [5], методики нанесения абразивных паст [6] и цветных сеток [7] голографические способы не влияют на микрорельеф и адгезионные свойства соприкасающихся поверхностей, коэффициенты трения скольжения и качения, а также на механические свойства контактирующих тел. В то же время ГИ имеет высокую чувствительность и позволяет получать информацию сразу по всей площадке контакта.

Для исследования микроскольжения была использована методика двухэкспозиционной ГИ с применением расходящегося предметного пучка. Получение голографических интерферограмм контактных поверхностей имеет ряд особенностей: необходимость записывать объекты небольших размеров (поперечные размеры участков микроскольжения порядка нескольких миллиметров); плотность полос может достигать 5 и более линий на миллиметр. В связи с этим предъявляются повышенные требования к отладке оптических схем. Для улучшения контрастности интерференционных полос на пути лучей, отражаемых объектом на фотопластинку, в схемах устанавливается поляризационный светофильтр. В качестве светоделиителя была использована плоскопараллельная пластинка, при необходимости в опорный пучок вводились нейтральные светофильтры.

Исследование микроскольжения при комбинированном воздействии нормального и касательного усилий, как показали предварительные эксперименты, возможно только при разработке образцов новой формы, метода контроля поверхности образцов и приемов нагружения. При воздействии на образец нормального и касательного усилий могут возникнуть перекосы, которые искажают форму и положение участков микроскольжения. С целью устранения перекосов предложен составной образец, состоящий из двух одинаковых частей, прикрепленных

симметрично к двум сторонам пластины, к которой прилагается сдвигающее усилие. Такой образец имеет одинаковые поверхности контакта, касательное усилие прикладывается к пластине на равном расстоянии от этих поверхностей, что исключает появление перекосов.

Образец нагружается в два этапа: сначала сжимающим усилием P , затем усилием сдвига T_0 , после чего экспонируется на фотопластинку. После догрузки усилием ΔT производится второе экспонирование. Суммарное усилие сдвига $T = T_0 + \Delta T$.

Исследование микроскольжения при помощи МКЭ. Влияние нагружения при описанном двухэтапном приложении усилий бы-

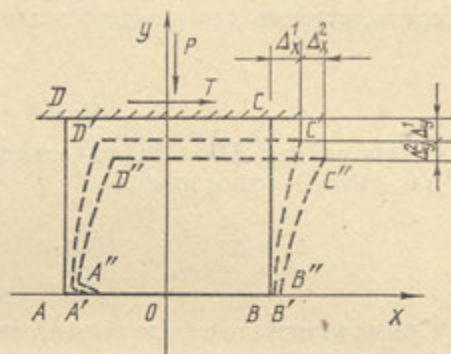


Рис. 1. Поэтапное деформирование прямоугольной области

ло исследовано теоретически при помощи МКЭ. Такая задача для чистого сжатия рассматривалась в работе [8]. В работе [9] указано на нереверсивный характер сил трения и возможность появления остаточных контактных напряжений, вызванных трением при циклических процессах. Задача об одновременном приложении сжимающей и сдвигающей нагрузок была рассмотрена в работах [10, 11], где подобная постановка была названа «косым» сдвигом.

Рассматривается задача о двухэтапном нагружении (двухзвенная траектория). Предложенная численная методика позволяет решать задачу для произвольной траектории нагружения, заменяя ее ломаной. Таким образом, возможно в принципе рассмотрение замкнутого цикла в системе координат $T-P$.

Вывод матрицы жесткости и основные положения МКЭ с учетом особенностей задачи (специальная конечно-элементная дискретизация, контактные граничные условия) взяты из работы [12]. Настоящая статья является логическим продолжением работы [11] для более сложного случая.

На рис. 1 показана рассматриваемая прямоугольная область. В отличие от подхода работы [11] система координат связана с нижней плитой, которая неподвижна, хотя некоторые точки нижней грани AB в процессе нагружения могут двигаться (микроскольжение, отрыв). На сторону CD при помощи жесткой плиты передается сжимающее и сдвигающее усилие. Контактные явления рассматриваются на стороне AB , поэтому принимаем, что верхняя грань приклеена к плите, а стороны AD и BC свободны от нагрузок.

Запишем при помощи терминов МКЭ разрешающую систему уравнений и граничные условия. Предполагаем, что нагружение производится в два этапа, тогда

$$\begin{aligned} [K^1]\{\Delta^1\} &= \{R^1\}, \\ [K^2]\{\Delta^2\} &= \{R^2\} \end{aligned} \quad (1)$$

— системы линейных уравнений для первого и второго этапов соответственно. Суммарные перемещения $\{\Delta\}$ и узловые силы $\{R\}$ после второго этапа деформирования будут равны

$$\{\Delta\} = \{\Delta^1\} + \{\Delta^2\}, \quad (2)$$

$$\{R\} = \{R^1\} + \{R^2\}. \quad (3)$$

Граничные условия для узла i , выражаемого вектором $\{x_i\} = \{x_i y_i\}$ и принадлежащего стороне CD , запишем в виде

$$\begin{cases} \Delta_{2i-1}^1 = \Delta_x^1, & \Delta_{2i-1}^2 = \Delta_x^2, \\ \Delta_{2i}^1 = \Delta_y^1, & \Delta_{2i}^2 = \Delta_y^2 \end{cases} \quad (4)$$

соответственно для каждого этапа. Суммарные усилия T и P равны

$$\begin{aligned} T &= T_1 + T_2, \\ P &= P_1 + P_2. \end{aligned} \quad (5)$$

На гранях AD и BC задаются условия отсутствия напряжений или для МКЭ — узловых сил

$$\begin{cases} R_{2i-1}^1 = 0, & R_{2i-1}^2 = 0, \\ R_{2i}^1 = 0, & R_{2i}^2 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Суммарная сила в узле выражается соотношением (3).

Граничные условия на нижней грани зависят от того, к какой зоне принадлежит данный узел. Расположение зон и их величина заранее неизвестны, однако, используя предложенный в работе [10] алгоритм поиска зон, их можно найти. Для этого необходимо знать вид граничных условий и дополнительных неравенств в каждой зоне.

1. *Зона сцепления.* Граничные условия в этой зоне аналогичны соотношениям (4) с той разницей, что правые части известны и равны нулю (нижняя плита неподвижна)

$$\begin{cases} \Delta_{2i-1}^1 = 0, & \Delta_{2i-1}^2 = 0, \\ \Delta_{2i}^1 = 0, & \Delta_{2i}^2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Однако $\Delta_{2i-1} = \Delta_{2i-1}^1 + \Delta_{2i-1}^2 \neq 0$ в общем случае, так как точка, находящаяся в зоне сцепления на втором этапе, могла проскользнуть на первом. Дополнительными условиями являются неравенства

$$\begin{aligned} R_{2i}^1 &> 0, \\ |R_{2i-1}^1| &< \mu |R_{2i}^1| \end{aligned} \quad (8)$$

для первого этапа и

$$\begin{aligned} R_{2i}^1 + R_{2i}^2 &> 0, \\ |R_{2i-1}^1 + R_{2i-1}^2| &< \mu |R_{2i}^1 + R_{2i}^2| \end{aligned} \quad (9)$$

для второго этапа, которые выражают необходимость в зоне сцепления сжимающих напряжений (для положительных нормальных узловых сил) и выполнения неравенства Амонтона—Кулона со знаком меньше.

2. *Зона проскальзывания.* В качестве граничных условий записывается второе уравнение (7) и закон Амонтона—Кулона для узловых сил (в граничных условиях переносим неизвестные величины в левую часть)

$$\begin{aligned} \Delta_{2i}^1 &= 0, \\ R_{2i-1}^1 - \mu \operatorname{sign}(\delta) R_{2i}^1 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

для первого этапа и

$$\begin{aligned} \Delta_{2i}^2 &= 0, \\ R_{2i-1}^2 - \mu \operatorname{sign}(\delta) R_{2i}^2 &= -(R_{2i-1}^1 - \mu \operatorname{sign}(\delta) R_{2i}^1) \end{aligned} \quad (11)$$

для второго этапа. Не следует думать, что правая часть второго соотношения (11) равна нулю на основании выражений (10). Это справедливо только тогда, когда узел i проскальзывает и на первом и на втором этапе в том же направлении. Дополнительные условия совпадают с первыми соотношениями (8), (9).

3. *Зона отрыва.* В этом случае, если первые соотношения (8), (9) не выполняются, считается, что узел i принадлежит зоне отрыва и поверхностные напряжения в нем (узловые силы) равны нулю:

$$\begin{aligned} R_{2i-1}^2 &= 0, \\ R_{2i}^2 &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

для второго этапа аналогично

$$\begin{aligned} R_{2i-1}^2 &= -R_{2i-1}^1, \\ R_{2i}^2 &= -R_{2i}^1. \end{aligned} \quad (13)$$

В том случае, если отрыв в узле происходит только на втором этапе, правые части выражений (13) не равны нулю. Дополнительные соотношения

$$\begin{aligned} \Delta_{2i}^1 &> 0, \\ \Delta_{2i}^2 + \Delta_{2i}^1 &> 0 \end{aligned} \quad (14)$$

показывают, что точки в зонах отрыва могут перемещаться вверх (рис. 1).

4. *Зона прилипания.* Данная зона может появиться только на втором этапе, если точки, находившиеся на первом этапе в зоне отрыва, под воздействием приращения усилий снова сцепляются с нижней плитой. Таким образом, эта зона аналогична зоне сцепления, однако обособлена, так как граничные условия немного видоизменены. Кроме того, по величине она может совпадать или быть частью зоны отрыва первого этапа. Граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{2i}^2 &= -\Delta_{2i}^1, \\ \Delta_{2i-1}^2 &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

и только одно дополнительное условие

$$R_{2i}^1 + R_{2i}^2 > 0. \quad (16)$$

Для определения неизвестных Δ_x^1 , Δ_y^1 , Δ_x^2 , Δ_y^2 запишем условия равновесия

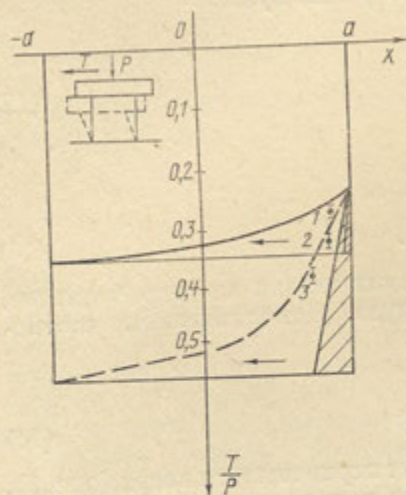
$$\left\{ \begin{aligned} \{x_i\} &\in CD, \\ \sum_i R_{2i-1}^1 &= T_1, \end{aligned} \right\} \quad \left\{ \begin{aligned} \{x_i\} &\in CD, \\ \sum_i R_{2i-1}^2 &= T_2, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \{x_i\} &\in CD, \\ \sum_i R_{2i}^1 &= P_1, \end{aligned} \right\} \quad \left\{ \begin{aligned} \{x_i\} &\in CD, \\ \sum_i R_{2i}^2 &= P_2. \end{aligned} \right\}$$

В итоге имеем на каждом этапе свою систему уравнений (1), граничные условия (4), (6), (7), (10), (11), (12), (13), (15), (17) и необходимые для организации итерационного процесса дополнительные неравенства (8), (9), (14), (16), что дает возможность, применяя описанный алгоритм [10], решить поставленную задачу.

Таким образом, приведенная расчетная схема позволила исследовать нагружение образца не только в два этапа, но и более.

Результаты исследований. Геометрические параметры для расчета упругого прямоугольника были взяты совпадающими с экспериментом: основание и высота соответственно равны 2,2 и 2,0 см, модуль упругости $E=50 \text{ кг/см}^2$, коэффициент Пуассона $\nu=0,04$. На рис. 2 показано распределение зон микроскольжения в зависимости от величины отношения



силовых факторов T/P . Схема приложения усилий приведена в верхнем левом углу рис. 2. Стрелками отмечено направление проскальзывания. Расчет производился для полученных экспериментально на образцах коэффициентов трения $\mu=0,35$ и $\mu=0,55$. Сплошные линии относятся к распределению зон при $\mu=0,35$, штриховые — при $\mu=0,55$. Зоны проскальзывания и отрыва заштрихованы.

Рис. 2. Распределение зон микроскольжения в зависимости от отношения силовых факторов T/P , $\nu=0,04$

Анализ результатов показал, что на первом этапе нагружения зоны проскальзывания по краям образца для данных коэффициентов трения отсутствуют. Это объясняется малым коэффициентом Пуассона исследуемого материала. При отношении силовых факторов $T/P=0,23$ на правом краю образца появляется зона отрыва, которая незначительно увеличивается с ростом T/P . Для коэффициента трения $\mu=0,35$ при $T/P=0,27$ возникает зона проскальзывания, которая быстро расширяется вплоть до полного отрыва образца при $T/P=\mu$. Аналогичная картина наблюдается при $\mu=0,55$ с отличием в моменте возникновения зоны проскальзывания ($T/P=0,3$) и с меньшей интенсивностью роста зоны.

Экспериментальные исследования проведены на образцах из пенопласта ПС-4-40. На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных (1—3) и расчетных данных для сдвига образцов. В опытах достигнута хорошая стабильность результатов. Экспериментальные точки получены усреднением данных по нескольким сериям интерферограмм. На рис. 3 даны интерферограммы контактной поверхности, причем а, б, в соответствуют точкам 1, 2, 3 на рис. 2.

Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными было возможно по центральному сечению образца (совпадающему с рис. 1). Состояние материала упругого параллелепипеда в зоне указанного сечения близко к плоской деформации.

На правом краю образца видны одна (рис. 3, а) или несколько (рис. 3, б, в) темных и светлых интерференционных полос, которые свидетельствуют о наличии перемещений на участке контактной поверхности. Темная интерференционная полоса, максимально удаленная от правого края образца, наиболее близка к границе зон микроскольжения. При обработке результатов определялось расстояние этой полосы от правого края образца, т. е. размер зоны проскальзывания, в срединном сечении образца, равноудаленном от верхнего и нижнего краев рис. 3. Таким образом,

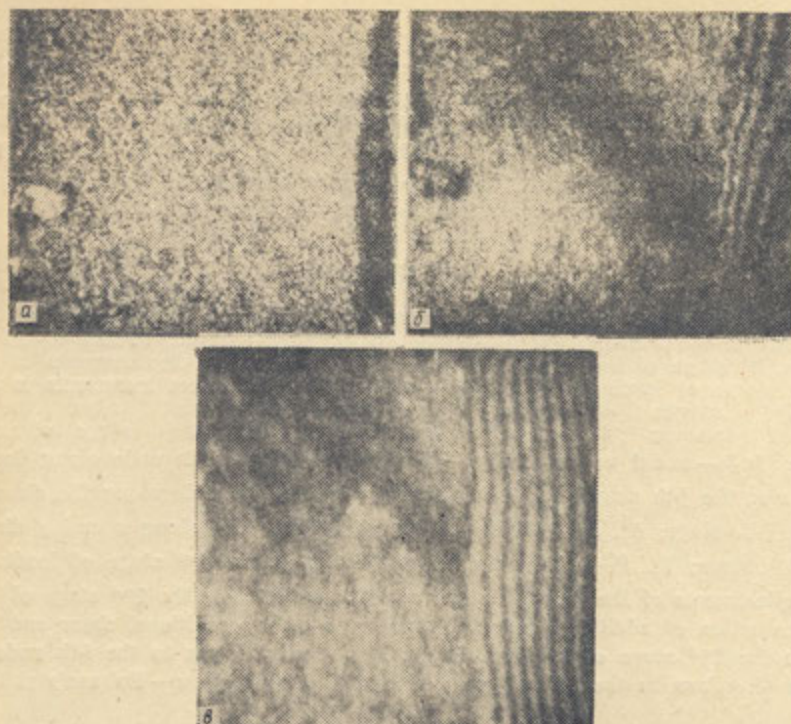


Рис. 3. Интерферограммы контактной поверхности

корректировалось несовпадение направления приложения усилия сдвига со срединным сечением, вызывающее плавное линейное изменение размеров зоны микроскольжения и проявляющееся в наклоне интерференционных полос. На левом краю образца видны светлые и темные пятна, положение которых с ростом T/P не меняется. Они вызваны наличием дефектов в приповерхностном слое образца.

В связи со значительным ростом перемещений по мере приближения параметра T/P к критическому ($T/P = \mu$) не удалось получить интерферограммы площадки контакта при $T/P \sim \mu$.

В ходе эксперимента установлено, что характер развития зон микроскольжения не зависит от начальной неоднородности контактной поверхности образца, которая влияет только на форму границы зон проскальзывания.

Обозначения

P — сжимающее усилие; T_0 — усилие сдвига; ΔT — дополнительное усилие сдвига; $[K^1]$ — матрица жесткости недеформированного континуума $ABCD$; $[K^2]$ — матрица жесткости континуума $ABCD$ с учетом деформаций первого этапа нагружения; $\{\Delta^1\}$ — вектор узловых перемещений на первом этапе нагружения; $\{\Delta^2\}$ — вектор узловых перемещений на втором этапе нагружения; $\{R^1\}$ — вектор приращения узловых сил на первом этапе нагружения; $\{R^2\}$ — вектор приращения узловых сил на втором этапе нагружения; $\{R\}$ — суммарное перемещение после второго этапа нагружения; $\{R\}$ — узловые силы после второго этапа нагружения; i — узел; $\{x_i\}$ — вектор узла; Δ_{2i-1}^j — перемещение узла i в направлении x на j -м этапе; Δ_{2i}^j — перемещение узла i в направлении оси y на j -м этапе; Δ_x^1 — смещение грани CD в направлении x на первом этапе; Δ_y^1 — смещение грани CD в направлении y на первом этапе; T_1 — касательное усилие на первом этапе нагружения; P_1 — нормальное

усилие на первом этапе нагружения; Δ_x^2 — смещение грани CD в направлении x на втором этапе под воздействием добавочных усилий T_2 и P_2 ; Δ_y^2 — смещение грани CD в направлении y на втором этапе под воздействием добавочных усилий T_2 и P_2 ; T_2 — добавочное касательное усилие на втором этапе нагружения; P_2 — добавочное нормальное усилие на втором этапе нагружения; R_{2i-1}^j — узловая сила в узле i в направлении оси x на j -м этапе; R_{2i}^j — узловая сила в узле i в направлении оси y на j -м этапе; μ — коэффициент трения; ν — коэффициент Пуассона.

Nomenclature

P — compressing load; T_0 — shear force; ΔT — additional shear force; $[K^1]$ — rigidity matrix of the nondeformed continuum $ABCD$; $[K^2]$ — rigidity matrix of the $ABCD$ after the 1st stage of loading; $\{\Delta^1\}$, $\{\Delta^2\}$ — vectors of nodal displacements in the 1st and 2nd stages of loading; $\{R^1\}$, $\{R^2\}$ — vectors of nodal forces increments in the 1st and 2nd stages of loading; $\{\Delta\}$ — total displacement after the 2nd stage of loading; $\{R\}$ — nodal forces after the 2nd stage of loading; i — node; $\{x_i\}$ — nodal vector; Δ_{2i-1}^j — displacement of the i -th node along the direction of x in the j -th stage; Δ_{2i}^j — displacement of the i -th node along the direction of y in the j -th stage; Δ_x^1 , Δ_y^1 — displacements of the face CD along x and y directions in the 1st stage; T_1 , P_1 — shear and normal forces in the 1st stage of loading; Δ_x^2 , Δ_y^2 — displacements of the face CD along x and y direction in the 2nd stage of loading under the action of additional forces T_2 and P_2 ; T_2 , P_2 — additional shear and normal forces in the 2nd stage of loading; R_{2i-1}^j , R_{2i}^j — nodal forces in the i -th node along x and y directions in the j -th stage; μ — friction coefficient; ν — Poisson's ratio.

Figure Captions

- Fig. 1. Step-by-step deformation of the rectangular area.
 Fig. 2. Distribution of microslip zones as a function of the ratio T/P , $\nu=0,04$.
 Fig. 3. Interferograms of the contact surface.

Summary

The holographic interferometry has been used in studying the microslip on the contact surface of elastic body under the action of shear force. A comparison was made between the experimental data and the prediction obtained by finite element method for two-stage loading. Development of microslip zone have been obtained when varying the shear force.

Литература

1. Петров В. В. Применение голографической интерферометрии. — В кн.: Тез. III Респ. сем. по квантовой электронике. Харьков, 1973, с. 96—99.
2. Петров В. В. Применение голографической интерферометрии к решению некоторых задач теории упругости. — В кн.: Теоретические и экспериментальные методы исследования прочности, устойчивости и динамики конструкций. Днепропетровск: ДГУ, 1973, с. 43—47.
3. Моссаковский В. И., Петров В. В. О влиянии трения на микроскольжение. — Докл. АН СССР, 1976, т. 231, № 3, с. 603—606.
4. Петров В. В., Гриневский А. Г. Применение простых способов расшифровки интерферограмм при исследовании контактных явлений. — В кн.: Геометрические методы исследования деформаций и напряжений: Тр. Всесоюз. сем. Челябинск, 1976, с. 99—102.
5. Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. — Giesammelte Werke. Leipzig, 1895, Bd 1, S. 755.
6. Ollerton E., Piggot P. Experimental determination of adhesion and slip areas in rolling contact. — J. of Strain Analysis, 1970, vol. 5, N 3, p. 193.
7. Максак В. Н., Хохлов В. А., Кашеев В. Н. Микроперемещения на поверхности контакта упругих тел при действии тангенциальных сил. — Машиноведение, 1978, № 6, с. 65—69.
8. Ohte S. Finite element analysis of elastic contact problems. — Bulletin of JSME, 1973, vol. 16, N 96, p. 797—804.

9. Tsuta T., Yamaji S. Finite element analysis of contact problem.— Theory and Practice in Finite Element Analysis, 1973, p. 177—194.
10. Моссаковский В. И., Петров В. В., Сладковский А. В. Исследование микроскольжения на контактных поверхностях при помощи МКЭ.—Днепропетровск, 1981.— 63 с.— Рукопись представлена Днепропетр. ун-том. Деп. в ВИНТИ 20 сент. 1981, № 5327—81.
11. Моссаковский В. И., Петров В. В., Сладковский А. В. Исследование микроскольжения при сжатии и сдвиге упругого прямоугольника жесткими плитами.— Трение и износ, 1982, т. 3, № 4, с. 596—602.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике.— М.: Мир, 1975.—544 с.

*Днепропетровский государственный университет
им. 300-летия воссоединения
Украины с Россией*

02.07.84.