

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени 300-ЛЕТИЯ
ВОССОЕДИНЕНИЯ УКРАИНЫ С РОССИЕЙ

На правах рукописи

СЛАДКОВСКИЙ Александр Валентинович

УДК 539.3

МИКРОСКОЛЬЗЕНИЕ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГИХ ТЕЛ

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Днепропетровск 1986

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени 300-летия воссоединения Украины с Россией.

Научный руководитель - академик АН УССР, доктор физико-математических наук, профессор Моссаковский В.И.

Официальные оппоненты- доктор физико-математических наук, профессор Кравчук А.С., кандидат физико-математических наук, доцент Мицишин И.И.

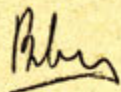
Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский конструкторско-технологический институт подпольщиковой промышленности (г.Москва)

Защита диссертации состоится "16" января 1987 г. в 14³⁰ часов на заседании специализированного совета К 053.24.05 по присуждению ученой степени кандидата физико-математических наук в Днепропетровском государственном университете: 320625, ГСП, Днепропетровск, 10, пр.Гагарина, 72, госуниверситет, корп.3, ауд. 57.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Днепропетровского госуниверситета.

Автореферат разослан "29" ноября 1986 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент

 Ламзук В.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших проблем современного машиностроения является обеспечение работоспособности машин и приборов, а значит, повышение надежности и долговечности их конструкции. В большинстве случаев их преждевременный выход из строя обусловлен не поломками, а износом контактирующих узлов при трении. Существенным фактором повышения работоспособности конструкции является контактная прочность узлов, учет специфики усталостного контактного разрушения.

Явление микроскольжения - образование на контактной площадке зон сцепления и относительного проскальзывания - один из наиболее существенных факторов, влияющих на контактную прочность, износ, трение качения колес. Важен также тот факт, что микроскольжение постоянно имеет место на контактной площадке катящегося колеса при тяговом качении, причем размер участков сцепления и проскальзывания, а также величина перемещений зависит от величины тягового момента. При этом с возрастанием момента увеличивается износ поверхности. Этим обусловлена актуальность исследования микроскольжения при стационарном качении.

Тем не менее нет единого мнения о количестве зон микроскольжения, их расположении и направлении проскальзывания в них для различных режимов стационарного качения, а также материалов колес.

Целью работы является исследование микроскольжения при стационарном качении цилиндров. При этом необходимо:

1. Разработать экспериментальные методики и оборудование, которое бы позволило с достаточной достоверностью оценить величину, расположение зон сцепления и относительного проскальзывания, а также его направление.

2. Исследовать напряженно-деформированное состояние (НДС) приконтактной области катящегося цилиндра. Определить наиболее характерные деформационные кривые и глубины, на которых проявляется влияние микроскольжения.

3. Определить распределения деформации в области контакта обрешеченных колес при различных режимах качения.

4. Провести сравнительный анализ известных решений с полученными новыми теоретическими и экспериментальными результатами.

Методика исследования деформаций приконтактной области, а также непосредственно на контактной площадке базируется на тензометрии. При этом использовались стандарты из материалов тензоре-

элиторы различных типов.

В качестве основного метода теоретического исследования использовался метод конечных элементов (МКЭ).

Научная новизна. В диссертационной работе решены новые задачи о сдвиге и сдвиге упругого прямоугольника жесткими плитами при наличии микроскользяния на контактной поверхности и о стационарном качении обремененного колеса по жесткому. Для решения использованы разработанные алгоритмы и программы, реализующие конечно-элементный подход.

Экспериментальные исследования проводились на установке новизна которой подтверждается полученным авторским свидетельством. При помощи новой методики тензометрии исследованы деформации на контактной поверхности катящегося колеса. Полученные распределения деформации позволили с достаточной достоверностью определить расположение и величину зон сцепления и относительного проскальзывания.

Разработана также экспериментально - теоретическая методика учета коэффициента армирования, которая использована для тензометрии низкомодульных материалов.

Проведенные исследования и разработанные методики позволили провести сравнительный анализ различных режимов стационарного качения колес.

Практическая ценность. Полученные результаты могут найти практическое применение в научно-исследовательских организациях и на предприятиях при исследовании контактной прочности и износа пар трения. Разработанные программы и алгоритмы приведены к виду, удобному для пользования, и могут использоваться как для автономной работы, так и для включения их в качестве расчетного блока в комплекс других программ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной конференции "Повышение долговечности и надежности машин и приборов" (г.Куйбышев, 1981 г.), Всесоюзной конференции "Трение и изнашивание композиционных материалов" (г.Гомель, 1982 г.), VIII Всесоюзной конференции "Методы и средства тензометрии и их применение в народном хозяйстве" (г.Свердловск, 1983 г.), Всесоюзной конференции "Проектирование, изготовление, эксплуатация и диагностика узлов трения в машиностроении" (г.Рибинск, 1983 г.), II Всесоюзной конференции "Триботехника - машиностроению" (г.Луизиано-на-Оке, 1983 г.), научных конференциях, посвященных итогам научно-исследовательской работы ДГУ за 1975-1982 годы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ.

Структура - объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и списка литературы. Содержит 45 рисунков и 2 таблицы. Объем диссертации - 141 страница, из которых 15 заняты списком литературы, содержащим 137 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, излагается современное состояние проблем, связанных с исследованием микроскользяния, приводится краткое изложение результатов по всем разделам диссертации.

В первом разделе исследовалось влияние микроскользяния при качении на НДС приконтактной области. В частности, для качения цилиндров с одинаковыми упругими постоянными было проведено сравнение решений Г.Фроима и Н.И.Глаголева, использующих двухзонную гипотезу микроскользяния. Анализ зависимости распределения зон сцепления и относительного проскальзывания от тягового момента показал, что для равных радиусов колес решения совпадают. При качении колес различных радиусов отличия решений незначительны в том случае, если величина полуширины площадки контакта b на порядок меньше радиусов колес R_1 . На основе данных работ были записаны граничные условия вне зоны контакта и в зонах сцепления и относительного проскальзывания. С использованием решения Н.И.Глаголева было получено распределение деформации $\varepsilon_{xx}(x, y)$ при $y=0$, то есть на контактной площадке: (Принята декартова система координат XOY , где ось Y проходит через центры колес, а ось X связана с контактной площадкой).

$$\varepsilon_{xx} = \begin{cases} \frac{f(b+\alpha)}{4R} - \frac{f}{2R} \sqrt{(\alpha-x)(b-x)} + \frac{f}{2R} \sqrt{x^2 - b^2}, & \\ \frac{f(b+\alpha)}{4R} - \frac{f}{2R} \sqrt{(\alpha-x)(b-x)} - \frac{x-1}{R(x+1)} \sqrt{b^2 - x^2}, & -\infty < x \leq -b, \\ \frac{f(b+\alpha)}{4R} - \frac{x-1}{R(x+1)} \sqrt{b^2 - x^2}, & -b \leq x \leq \alpha, \\ \frac{f(b+\alpha)}{4R} + \frac{f}{2R} \sqrt{(\alpha-x)(b-x)} - \frac{f}{2R} \sqrt{x^2 - b^2}, & \alpha \leq x \leq b, \\ \frac{f(b+\alpha)}{4R} + \frac{f}{2R} \sqrt{(\alpha-x)(b-x)} - \frac{f}{2R} \sqrt{x^2 - b^2}, & -b \leq x < +\infty, \end{cases} \quad (1)$$

где f - коэффициент трения; α - граница зон сцепления $[\alpha, \beta]$ и проскальзывания $[-\beta, \alpha]$.

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Соотношение (1) использовалось для нахождения математического аналога деформации тензорезистора $\varepsilon_{90^\circ}(x)$. В данном случае 90° - угол установки тензорезистора по отношению к радиусу колеса. Таким аналогом были полученные деформации

$$\varepsilon_{90^\circ}^{\text{теор}}(x) = \frac{1}{\ell} \int_{\ell} \varepsilon_{xx}(x, 0) dx, \quad (3)$$

где ℓ - база тензорезистора.

Для нахождения деформации в приконтактной области использовалось решение Н.И. Мусхелишвили первой основной задачи для плоскости. В результате исследования были получены математические аналоги деформации ε_{0° , ε_{45° , ε_{90° . Анализ деформационных кривых для различных глубин установки тензорезистора показал, что влияние микроскользяния наиболее проявляется для распределения ε_{45° .

Качение цилиндров с различными упругими постоянными рассмотрено в работе Р.Бенталла и К.Л. Джонсона¹. В диссертации отмечены отдельные неточности этой работы. Был проведен численный расчет на ее основе, в результате которого определено, что решение является неустойчивым, сильно зависит от выбора границ зон, на которых задаются как условия сцепления, так и относительного проскальзывания. Был сделан вывод о спорности доказательства пятизонной гипотезы микроскользяния. Полученные распределения контактных напряжений использовались для нахождения деформации ε_{45° в приконтактной области. Сравнение полученных распределений с распределениями, полученными по двухзонной гипотезе, позволило сделать вывод, что наличие зон микроскользяния можно заметить на глубинах установки тензорезистора менее $0,7 \delta$, а определить количество зон микроскользяния с достаточной достоверностью можно на глубинах $h \leq 0,03 \delta$. Эти результаты стали исходными расчетными данными для проведения тензометрических исследований деформированного состояния приконтактной области катящегося цилиндра.

¹ Bantall R.H., Johnson K.L. Slip in the Rolling Contact of Two Dissimilar Elastic Rollers // Int. J. Mech. Sci. - 1967. - V. 9. - P.389-404.

Второй раздел посвящен решению контактных задач с микроскользянием при помощи МКЭ. Приведен краткий обзор известных работ, посвященных решению контактных задач с трением на основе конечно-элементного подхода. Проведен анализ используемых для этого алгоритмов.

Рассмотрена постановка плоской задачи о контакте двух упругих тел. Выписаны граничные условия для зон сцепления, проскальзывания отрыва. Получена разрешающая система линейных алгебраических уравнений.

Конечно-элементный подход был тестирован на задаче о сжатии и сдвиге упругого прямоугольника жесткими плитами. Существует решение задачи о сжатии прямоугольной области при наличии микроскользяния в контактной области. Конечно-элементное решение задачи сравнивалось с решением¹ при $N = 17, 25, 49$. N - количество узлов в контактной области. Из сравнения распределения нормальных и касательных напряжений был сделан вывод, что даже малое количество контактных узлов ($N = 17$) дает удовлетворительное совпадение точного решения и решения по МКЭ. Наибольшее расхождение наблюдалось в зоне сцепления и на краев области контакта.

Однако задача была поставлена в более общем виде, и как задача о двухэтапном нагружении прямоугольной области имела самостоятельное значение. На рис.1 показано поэтапное деформирование рассматриваемой области $ABCD$. На сторону CD при помощи жесткой плиты передается сжимающее P и сдвиговое T усилия. Полагаем, что верхняя грань приклеена к плите, стороны AD и BC свободны от нагрузок.

На стороне AB задаются граничные условия 4 типов. Помимо участков сцепления, отрыва и относительного проскальзывания на втором этапе нагружения возможно появление зон прилипания. Граничные условия в них незначительно отличаются от условия в зонах сцепления.

Для области $ABCD$ была проведена конечно-элементная дискретизация. На каждом этапе нагружения определялись матрицы жесткости и полученные системы линейных алгебраических уравнения дополнялись граничными условиями для соответствующих зон. Для поиска зон использовались проверочные неравенства. Смещения верхней грани Δ_x^j и Δ_y^j (см.рис.1) считались неизвестными, и для их

¹ Prasad S.P., Dasgupta S. Effect of Sliding Friction on Contact Stresses in Rectangle Compressed by Rigid Plates // Trans. of the ASME. J. of Appl. Mech., E. - 1975. - V. 42. - P.656-662.

нахождения использовались уравнения равновесия. Закон трения выбирался в форме Кулона.

Решение задачи было реализовано при помощи следующего итерационного алгоритма. Первоначально задается геометрия рассматриваемой области, ее механические характеристики, нагрузки для j -этапа, формируется матрица жесткости, задаются граничные условия, причем во всех узлах грани AB - условие сцепления. Полученная система линейных алгебраических уравнения решается по методу Гаусса или методу Зейделя. Далее осуществляется проверка по условию отрыва, граничные условия в области AB пошагово корректируются и получается решение для $j = \infty$.

Поиск зон проскальзывания осуществляется следующим образом. Во всех точках нарушения неравенства Кулона вместо условия сцепления оставились граничные условия проскальзывания с заданным коэффициентом трения. Далее проводилась пошаговая корректировка. Более эффективным оказался алгоритм, по которому граничные условия проскальзывания использовались только в узлах с максимальным для данного шага отношением касательных и нормальных узловых сил. При этом коэффициент трения f^d изменялся пошагово от ∞ до f - заданного. Такая математическая постановка имела физическую интерпретацию. Предполагается, что ненагруженная область $ABCD$ имеет сцепление с нижней плитой в каждой точке с коэффициентом трения $f = \infty$. После нагружения в силу деформации микронеровностей начинается проскальзывание, но не сразу во всех точках областей проскальзывания, а постепенно, начиная с точек с максимальным отношением касательного и нормального контактных напряжений. С уменьшением локального коэффициента трения растут участки проскальзывания, которое продолжается до тех пор, пока не будет достигнут коэффициент трения для данных материалов и поверхностей.

Было исследовано сжатие и сдвиг упругого квадрата со следующими параметрами: размер сторон $AB = AC = 5$ см, модуль упругости $E = 50$ кг/см², а также прямоугольника $AB = 5$ см, $AC = 3$ см, $E = 100$ кг/см². Коэффициент Пуассона ν , коэффициент трения, величина усилий сжатия и сдвига варьировались. Максимальная конечно-элементная дискретизация - 6x49 узлов.

На рис.2 представлены характерные распределения нормальных (два верхних графика) и касательных напряжений при сжатии и сдвиге области $ABCD$, причем графики чистого сжатия сплошные, сдвига - пунктирные. Стрелками показано направление скольжения в зонах проскальзывания AK , LB , AM и NB . Определено, что, по сравнению со случаем полного сцепления $f = \infty$, основное влияние мик-

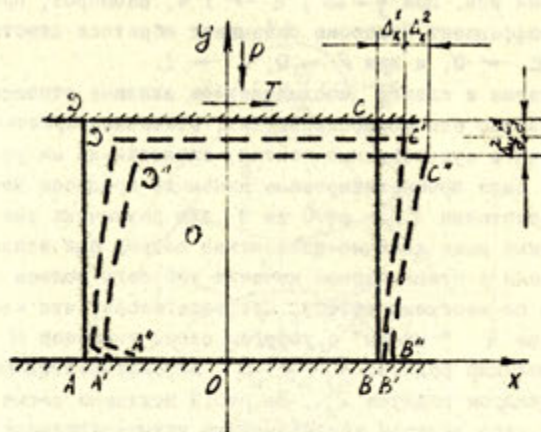


Рис.1

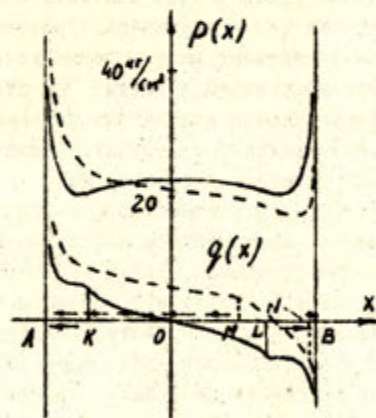


Рис.2

скольжения сказывается на распределении касательных контактных напряжений. Вклад микроскольжения в распределение нормальных напряжений незначителен.

Было проведено исследование влияния коэффициентов трения f и Пуассона при чистом сжатии на относительную ширину зоны сцепления e . (На рис.2 $e = KL/AB$.) Определено, что при возрастании коэффициента трения возрастает удельный вес зоны сцепления в общем

распределении зон. При $f \rightarrow \infty$, $\epsilon \rightarrow 1$ и, наоборот, при $f \rightarrow 0$, $\epsilon \rightarrow 0$. Коэффициент Пуассона оказывает обратное действие. При $\nu \rightarrow 0,5$, $\epsilon \rightarrow 0$, и при $\nu \rightarrow 0$, $\epsilon \rightarrow 1$.

При сжатии и сдвиге исследовалось влияние отношения T/P на распределение зон микроскольжения. Отношение приложенных сил T/P - наиболее существенный фактор, влияющий на микроскольжение при сдвиге. Была проанализирована динамика процесса зонообразования при возрастании T/P от 0 до f для различных значений ν .

Описанный выше конечно-элементный подход был использован для решения задачи о стационарном качении упругого колеса с жестким сердечником по жесткому колесу. Предполагалось, что жесткий - цилиндр радиуса R "склеен" с упругим слоем толщиной H , и этот составной цилиндр радиуса $R_1 = R + H$ перекачивается совместно с жестким цилиндром радиуса R_2 . На рис.3 показана схема задачи. Из упругого слоя вырезан криволинейный четырехугольник $ABCD$. Стороны AC и BD достаточно ($\sim AB \approx 86$) удалены от контактной зоны. Конечно-элементная сетка ($\max 6 \times 49$) состояла из треугольных элементов первого порядка. Разбиение по контактной области - равномерное. Количество узлов в зоне контакта - до 41. При приближении к области контакта сетка сгущалась. Граничные условия были приведены к конечо-элементному виду в перемещениях, который учитывал неплоскостность контактной области. При этом была проведена линеаризация с учетом малости контактных перемещений по сравнению с радиусом. Их произведения и квадраты исключались из уравнений. Алгоритм решения подобен описанному выше.

На рис.4 представлены расчетные деформации ϵ_{30° на контактной поверхности для качения обрезиненного колеса по жесткому. Стрелками показано направление качения. Кривая 1 получена для верхнего колеса - ведомого, кривая 2 - ведущего. Прямолинейные участки внутри контактной области $[-b, b]$ соответствуют зонам сцепления. На входе в контакт находится малая зона проскальзывания. Основная зона проскальзывания находится на выходе, причем направление проскальзывания в ней зависит от знака тягового усилия. Полученные распределения использовались для сравнения с экспериментальными данными.

В третьем разделе были проведены экспериментальные исследования деформированного состояния приконтактной области катящегося цилиндра. Проведенный анализ существующих методов экспериментального исследования микроскольжения при качении позволил выявить основные сложности в применении таких методов, как фотоупругость,

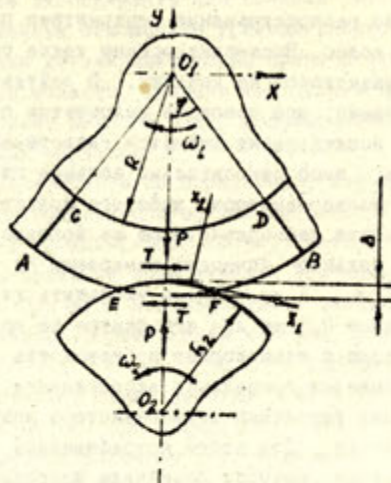


Рис.3

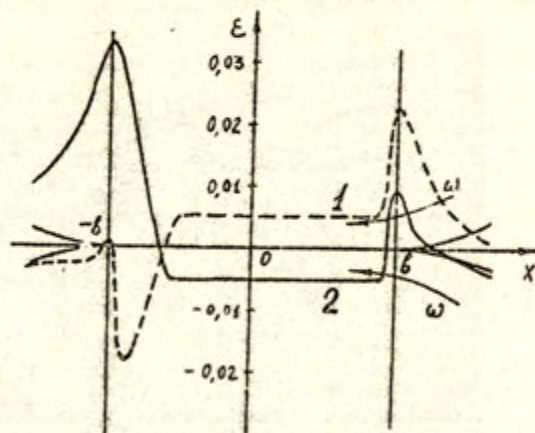


Рис.4

голографическая интерферометрия и других. Такими причинами являются динамика процессов качения, малая величина зоны контакта и ее относительная труднодоступность для измерения, затухание деформации с глубиной. При этом тензометрия обладает рядом несомненных достоинств: высокой точностью измерения, сравнительной простотой

оборудован широком диапазоном измерений и другими. Это обусловило наибольшее распространение тензометрии при исследовании процесса качения колес. Проанализированы также основные способы установки тензорезисторов на колесах. В результате проведенного анализа определено, что основные недостатки проводимых ранее тензометрических исследований являются следствием либо низкой точности методики, либо относительно большой глубины установки регистрирующего тензорезистора, либо его большой базы.

При установке тензорезисторов на боковую поверхность колеса можно достичь большой точности измерения на тензорезисторах с малой базой $l \leq 1$ мм. Однако уменьшить глубину установки тензорезистора менее 0,5 мм для его центра не представляется возможным, что связано с технологией производства малобазных тензорезисторов и условиями проведения эксперимента. Уменьшить относительную глубину установки тензорезистора можно увеличив ширину контактной области. Для этого потребовалось создание принципиально новой установки, которая позволяла проводить экспериментальные исследования качения цилиндрических образцов диаметром $\sim 0,5$ м. На рис.5 показан общий вид установки.

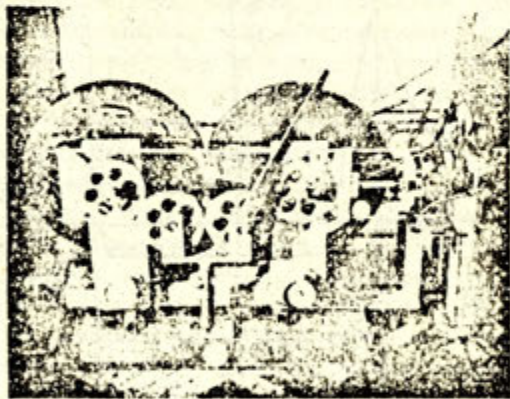


Рис.5

Конструкция установки позволяла корректировать форму пятна контакта за счет точного выставления осей образцов. Применение двух силовых измерительных систем (динамометра системы Н.Г.Токарева типа ДДСМ-3-5 и тензодинамометров на тягах) позволило с большой точностью задавать усилие сжатия образцов от 10 кг до 3000 кг.

Использование сменных приспособлений (моментного и вестеренчатого) позволило проводить эксперименты для качения с заданным тяговым моментом или с заданным отношением угловых скоростей. Приведены используемые методики регулировки формы пятна контакта, измерения ширины контактной области, задания контактных нагрузок, определения модуля упругости первого рода, коэффициентов Пуассона и трения для исследуемых образцов.

Были проведены эксперименты по определению деформированного состояния приконтактной области при помощи малобазных тензорезисторов типа ИПБ-1, ИПТ-1, 2ФКПА-1-50Б, КФ-4-1, которые наклеивались на боковую поверхность колес из полистирола. Для измерения собиралась мостовая схема. При этом использовались тензоусилители УТ4-1 или ТДА-3, магазины сопротивления МСР-60М, двухкоординатные самописцы "ХУ - recorder endim 620.02". Дополнительно собиралась потенциметрическая схема датчика угла поворота колеса. Питание осуществлялось от прибора УИП-2. В качестве самого датчика использовался переменный резистор сопротивлением 4,7 ком с характеристикой типа А (линейной). Для уменьшения влияния внешних помех все приборы включались в сеть через стабилизатор С-0,9.

Экспериментальные исследования, проведенные на цилиндрических образцах из полистирола, подтвердили наличие микроскольжения на контактной площадке. Полученные деформационные кривые совпали с приведенными в работах В.И.Коссаковского, И.И.Мицишина, В.В.Петрова. Однако в результате исследований был сделан вывод о том, что ни увеличение ширины зоны контакта в три раза по сравнению с указанными работами за счет применения колес большего диаметра, ни использование прочих преимуществ установки не позволило с достаточной достоверностью определить количество и расположение зон микроскольжения.

В четвертом разделе в соответствии с выводами предыдущего была разработана новая экспериментальная методика, позволявшая исследовать контактные деформации непосредственно на контактной поверхности. Ее суть состоит в том, что тензорезистор наклеивается по центру цилиндрической поверхности колеса, причем тензочувствительный элемент ориентирован в направлении качения, и прокатывается через контакт. Полученные деформационные кривые позволяют судить о наличии микроскольжения. Особо следует выделить случай контакта жесткого и упругого колес. При этом участки деформационных кривых внутри зоны контакта, в которых выполняется условие $\epsilon = const$, соответствуют зонам сцепления. А следова-

тельно, могут быть определены и все другие зоны микроскольжения.

Обусловить такую методику удалось на специальных цилиндрических образцах, обтянутых слоем резины. При деформациях резины до 1 % датчик, прокатываемый через контакт, не разрушался и выдерживал многократный эксперимент. Приводится технология изготовления образцов, позволяющая получать срезу несколько колес с одинаковыми механическими свойствами. Материал образцов (резину) в пределах деформации до 1 % можно было считать линейно-упругим, что определено в результате экспериментов на растяжение-сжатие.

Приведена методика, позволяющая учесть влияние нормальных контактных напряжений на показания датчика. Описаны методики определения границ области контакта. Исследовано влияние эффекта армирования тензорезистором поверхности резины. При этом тензорезистор показывал заниженные данные. Разработана методика, позволяющая учесть влияние коэффициента армирования. Для этого при помощи эксперимента на растяжение мажоранного тензорезистора определяется его жесткость. Далее этот тензорезистор используется в эксперименте по качению, а его параметры — для решения задачи о качении жесткого колеса по резиновому слою, армированному тензорезистором. В результате решения определяется распределение коэффициента армирования в зависимости от места установки тензорезистора. Для проверки методики использовались теоретические и экспериментальные данные В.М.Александрова и других авторов, исследовавших эффект армирования. Получено хорошее соответствие результатов.

На рис. 6 и 7 представлены полученные деформационные кривые для качения пар колес резина-резина и резина-полистирол. Тензорезисторы установлены на ведущем колесе. Кривые получены для тяговых моментов $M_1 > M_2 > M_3$ (--- M_1 , — M_2 , - - - M_3). Для качения колес из одинаковых материалов (рис. 6) существует две зоны микроскольжения — зона сцепления $[\alpha, \beta]$ на входе в контакт и зона проскальзывания на выходе $[-\beta, \alpha]$. Границы α определяются по излому кривых. Качественное сравнение с теоретическими распределениями, построенными по формулам (1) и (3), подтверждает справедливость данного вывода. Для качения упругого и жесткого колес (рис. 7) существует три зоны микроскольжения: зона сцепления в центре и две зоны проскальзывания у краев контакта. Экспериментальные кривые соответствуют полученным в результате расчета по МКЭ (рис. 4). Были проанализированы различные режимы стационарного качения, определены динамика роста зон и направление

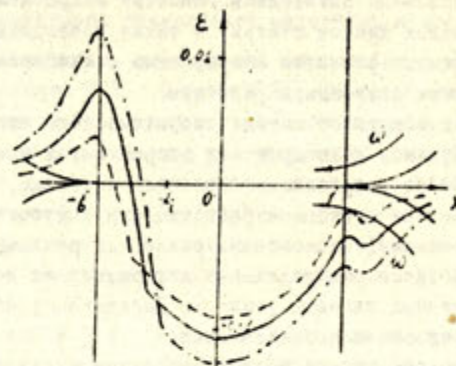


Рис. 6

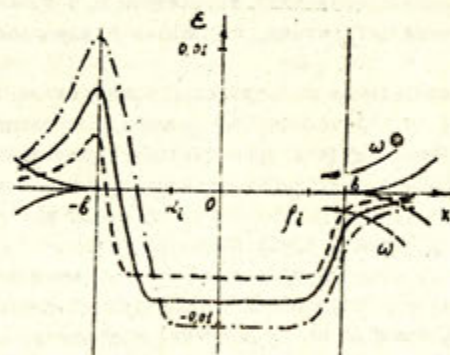


Рис. 7

проскальзывания в зависимости от величины и знака тягового момента.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе решения Г.Фромма и Н.И.Глазголева получено при помощи теории функции комплексного переменного поле деформации в приконтактной области цилиндра для случая стационарного качения колес с одинаковыми упругими постоянными. Определены наиболее характерные деформационные кривые для выявления влияния микроскольжения на НДС цилиндров, а также необходимые для этого глубины установки тензорезисторов.

2. Для изучения качения цилиндров из разномодульных материа-

ков была проанализирована работа Р. Бенгале и К. Л. Джонсона, в основу которой положена пятizonная гипотеза микроскольжения. Из рассмотрения выкладок данной статьи, а также проведенных автором на их основе численных расчетов и сравнения с экспериментом сделан вывод о спорности пятizonной гипотезы.

3. В качестве основного метода теоретического исследования качения разномодульных цилиндров был выбран метод конечных элементов. На его основе разработана численная методика, при помощи которой решена задача о стационарном качении упругого колеса с сердечником по жесткому. Исследованы различные режимы стационарного качения, рассмотрены распределения деформации на контактной площадке при различных тяговых усилиях. Определено, что возможно существование трех зон микроскольжения.

4. Конечно-элементный подход использован для решения задачи о скатии и сдвиге упругого прямоугольника жесткими плитами. Причем, если задача о скатии с микроскольжением являлась тестовой и подтвердила на основе сравнения с решением С. П. Прасада правомочность разработанных алгоритмов, то задача о двухэтапном сдвиге является новой.

5. Экспериментальные исследования проводились при помощи тензоэметрии. Для их проведения спроектирована и изготовлена новая установка, позволявшая изучить стационарное перекачивание цилиндрических тел большого диаметра при различных видах нагружения. Установка позволила устранить возможные перекосы при приложении усилий, а также регулировать форму пятна контакта.

6. Проведенные тензоэметрические исследования деформированного состояния приконтактной области подтвердили известные результаты для качения цилиндров из одинаковых материалов, однако не удалось с достаточной достоверностью оценить величину зон и направление проскальзывания. Поэтому была разработана новая методика, которая позволила измерять деформации непосредственно на площадке контакта катящегося колеса. В результате большого количества экспериментов было изучено явление микроскольжения для различных режимов стационарного качения на модельных обрешеченных колесах большого диаметра. Полученные данные свидетельствуют о справедливости двухзонной гипотезы микроскольжения при качении колес из одинаковых материалов, а также о возможном существовании трех зон микроскольжения при качении разномодульных цилиндров. Указанные результаты соответствуют теоретическим.

7. Для сравнения экспериментальных и теоретических данных была разработана вспомогательная методика тензоэметрии низко-

модульных материалов, позволяющая при помощи МКЭ учесть влияние армирования тензорезистором поверхности материала изделия.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Моссековский В. И., Петров В. В., Сладковский А. В. Экспериментальное исследование явления микроскольжения при стационарном качении цилиндров // Повышение долговечности и надежности машин и приборов: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Курьшев, 1981. - С. 251-252.
2. Моссековский В. И., Петров В. В., Сладковский А. В. Определение зон микроскольжения при стационарном качении цилиндров // Гидроэрозионная механика и теория упругости. - Днепропетровск: ДГУ, 1981. - Вып. 28. - С. 35-45.
3. Моссековский В. И., Петров В. В., Сладковский А. В. Исследование микроскольжения на контактных поверхностях при помощи МКЭ // Днепропетр. гос. ун-т. - Днепропетровск, 1981. - 63 с. - Деп. в ВИНИТИ 20.11.81, № 527.
4. Моссековский В. И., Петров В. В., Сладковский А. В. Исследование микроскольжения при скатии и сдвиге упругого прямоугольника жесткими плитами // Трение и износ. - 1982. Т. 3, № 4. - С. 596-602.
5. Моссековский В. И. и др. Методика исследования межслойного контактного взаимодействия композиционных оболочек с учетом трения // В. И. Моссековский, Н. Е. Качаловская, В. В. Петров, А. В. Сладковский. - Трение и изнашивание композиционных материалов: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Гомель, 1982. - С. 39-40.
6. А. с. 991253 СССР, МКИ³ G CI N 3/56. Устройство для исследования трения цилиндрических образцов // В. И. Моссековский, В. В. Петров, А. В. Сладковский (СССР). - № 2954035/25-28; Заявлено 09.07.80; Опубл. 23.01.83, Бюл. № 3. - 2 с.
7. Петров В. В., Сладковский А. В. Тензоэметрия конструкции из низко модульных материалов // Методы и средства тензоэметрии и их применение в народном хозяйстве: Тез. докл. УШ Всесоюз. конф. Свердловск. - М., 1983. - С. 308-309.
8. Петров В. В., Сладковский А. В., Рожковский В. Ф. К вопросу о контактном взаимодействии угругих цилиндров при качении // Триботехника - машиностроение: Тез. докл. II Всесоюз. конф. - М., 1983. - С. 221-222.
9. Петров В. В., Гриневский А. Г., Сладковский А. В. Микроскольжение при сдвиге контактирующих поверхностей // Трение и износ. - 1985. - Т. 6, № 3. - С. 396-403.
10. Петров В. В., Сладковский А. В. Эффект микроскольжения при качении упругих разномодульных цилиндров // Трение и износ. - 1986. - Т. 7, № 1. - С. 63-68.

СЛАДКОВСКИЙ АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ

МИКРОСКОЛЬЗЕНИЕ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГИХ ТЕЛ

Специальность 01.02.04 - механика деформируемого
твёрдого тела

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 21.II.86. БТ 601П7. Формат 60x84/16.
Бумага типографская. Печать плоская. Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.
л. 0,8. Тираж 100 экз. Заказ # 274 Бесплатно

Редакционно-издательский отдел ДГУ, 320625, ГСП,
г.Днепропетровск-10, пр.Гагарина, 72.

Ротапринт ДГУ, 320110, г.Днепропетровск, ул.Генерала Пушкина, 4.