

УДК 621.8

Пластическое равновесие поверхностного слоя при трении

Зелинский В.В.

В статье обоснована актуальность исследований, посвященных взаимодействию поверхностей в процессе трения по весьма малой по размерам фактической площади контакта. Такое взаимодействие происходит в трибосопряжениях многих машин и механизмов, в том числе в процессе технологической приработки. Применительно к подшипникам скольжения методом построения линий скольжения показано, что при пластической деформации микронеровностей происходит смыкание и перекрытие деформированных участков под ними. Рассмотрено моделирование реального взаимодействия внедрением жесткого конуса с определенными размерами в пластическое полупространство, подчиняющемуся одному из условий пластичности. Приведены основные формулы из результатов математического моделирования взаимодействия трущихся поверхностей, полученные на основе фундаментальных положений теории пластичности. Дана оценка результатов математического моделирования по соответствию результатам опытов, установленных методом рентгено-структурного анализа.

Ключевые слова: деформация, поверхность, пластичность, моделирование, микронеровность, материал, скольжение.

Введение

Для многих машин эксплуатационная надежность определяется триботехническим качеством узлов трения. Шероховатость на их рабочих поверхностях обуславливает весьма малую фактическую площадь контакта. Под нагрузкой это вызывает значительную деформацию контактирующих микронеровностей, которая во многих случаях является пластической. Пластическая деформация всегда имеет место на поверхности относительно мягких антифрикционных сплавов подшипников скольжения при технологической приработке двигателей внутреннего сгорания (ДВС), при неустановившихся и переходных режимах их работы. Перегрузка поверхности приводит к «опасному» уровню пластической деформации, обуславливающему появление повреждений, их развитие, заедание. Однако к настоящему времени закономерности пластического деформирования при трении мало изучены и сложившиеся общие представления о деформации поверхностных слоев не имеют достаточно конкретного содержания. Закономерности микромеханики пластического деформирования нагруженных поверхностей при трении также могут быть приме-

нимы при технологическом влиянии на размеры пластически деформированного слоя при выполнении операций поверхностного пластического деформирования – накатывания, выглаживания и т. п.

Целью работы является установление закономерностей распространения пластически деформированной области в поверхностном слое нагруженного тела.

Основное содержание

Применительно к подшипникам скольжения использование метода построения линий скольжения показало, что с насыщенностью микронеровностей, соответствующей реальным поверхностям, при пластическом деформировании происходит смыкание и перекрытие деформированных участков под ними. Поэтому в подповерхностном слое при трении происходит распространение деформированной области по глубине. В случае стесненной деформации, что имеет место при трении, под поверхностью контакта образуется зона деформации с напряжениями, значительно превышающими предел текучести материала. Вследствие наличия внешней тангенциальной силы трения «опасный» очаг

деформации смещается в сторону движения с выходом на поверхность, что приводит к ее разрушению [1].

Знание закономерностей формирования размеров пластически деформированной области позволит избежать перегрузки трущихся поверхностей в процессе технологической приработки ДВС и обеспечить им более высокое триботехническое качество.

Важное значение на условия пластического деформирования оказывают геометрические параметры контакта. Поэтому при изучении взаимодействия шероховатых поверхностей микронеровности моделируют телами правильной формы, в определенной мере соответствующей реальным микронеровностям. В проводимом математическом моделировании за эквивалент микронеровности был принят жесткий конус, движущийся по жестко-пластическому полупространству, подчиняющемуся условию пластичности Треска. При этом учитывалось, что для металлических поверхностей углы наклона сторон микронеровностей к поверхности трения, зависят от вида обработки, степени приработанности и составляют угол $5...30^\circ$ [2]. Принималось, что распределение материала в шероховатом профиле контртела описывается уравнением опорной кривой. Важной особенностью считалось наличие взаимного влияния соседних микронеровностей в процессе деформирования.

Согласно принятой модели микронеровность внедрена в полупространство на величину a , движется под действием касательной силы и деформирует полупространство на глубину h . В расчетах использовался метод баланса работ пластической деформации, предполагающий рассмотрение главных напряжений. При этом считается, что на распределение напряжений касательная сила не влияет, но механические свойства материала определяются наличием деформации, скоростью деформирования и температурой, кото-

рые могут вызвать упрочнение и разупрочнение. Возможность учета перечисленных явлений, неизбежно сопутствующих процессам трения и изнашивания, обеспечивает используемому методу расчета преимущество по сравнению с другими методами. В решении задачи использовалось уравнение баланса работ внешних и внутренних сил

$$A = A_D + A_T, \quad (1)$$

где A – работа внешней силы, A_D – работа деформации материала, A_T – работа силы трения на контактной поверхности.

Работа внешней силы определялась через элементарное перемещение микронеровности, для определения A_D и A_T использовались уравнения работ для плоского деформирования

$$A_D = \iint \sigma_i \varepsilon_i dV, \quad (2)$$

$$A_T = \int \tau_k u dS, \quad (3)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, ε_i – интенсивность деформаций, dV – объем элементарного деформируемого участка, τ_k – средняя удельная сила трения, u – перемещение, dS – дифференциал площади контакта.

Совместное решение уравнений (1), (2), (3) с учетом геометрических соотношений, условия несжимаемости и закона Зибеля позволило представить уравнение баланса работ при пластическом деформировании как условие пластического равновесия поверхностного слоя

$$\tau = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu}{\sin \alpha}\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \Phi(a, h), \quad (4)$$

где τ – касательное напряжение, σ_s – истинное напряжение текучести материала полупространства, μ – коэффициент контактного трения, α – угол между боковой поверхностью микронеровности и полупространством, h – глубина деформированного слоя, Φ – безразмерная характеристика трибодетформации, зависящая от a и h , семейства решений которой получены с помощью ПЭВМ.

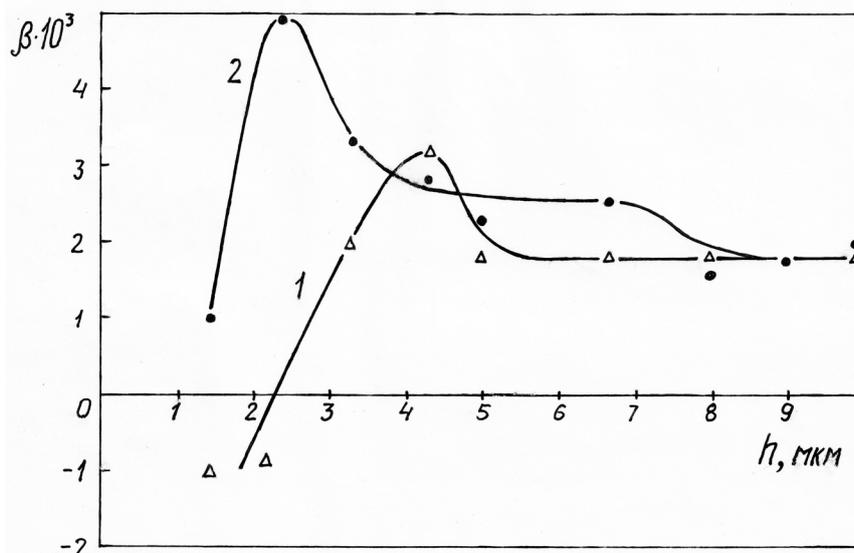


Рис.1. Изменение уровня пластического деформирования по глубине для подшипниковых сплавов: с 3% олова (1), с 50% олова (2).

Достоверность условия (4) подтверждается результатами изучения образцов алюминиево-оловянных подшипниковых сплавов с разным содержанием олова, прошедших приработку в равных условиях, методом рентгеноструктурного анализа по глубине распространения пластического деформирования в алюминиевой матрице (основе) сплавов (рис. 1).

Мерой искаженности микростроения от пластического деформирования являлось физическое уширение интерференционных линий β материала основы. У сплава, с 3% олова (кривая 1), глубина распространения пластического деформирования и уровень деформации оказались меньше, чем у сплава с 50% олова (кривая 2), имеющего меньший коэффициент контактного трения, что согласуется с условием пластического равновесия (4). Результаты расчета и рентгеноструктурного анализа по глубине деформированного слоя совпали не только качественно, но и оказались достаточно близкими по величине.

Заключение

Расчеты по условию пластического равновесия позволили определить направление и степень влияния параметров контакта на глупину деформирования, оценить границы области протекания процесса и начала разрушения в диапазоне изменения параметров контакта, соответствующем подшипникам скольжения ДВС в период технологической приработки [2,3].

Литература

1. Зелинский В.В. Установление связи между параметрами трибоконтакта при приработке // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов. Выпуск 1. – Брянск, 2002. – С. 41-44.
2. Зелинский В.В. Феноменологические основы изофрикционной приработки опор скольжения машин. Часть 1 // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2009, № 6. – С. 117-121.
3. Зелинский В.В. Феноменологические основы изофрикционной приработки опор скольжения машин. Часть 2 // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2011, № 3(10). – С. 48-52.

References

1. Zelinskiy V.V. Communication between the parameters tribocontact during running // New materials and technologies in mechanical engi-

neering research institute. Volume 1. - Bryansk, 2002. – Pp. 41-44.

2. *Zelinskiy V.V.* Phenomenological bases of the isofriction running-in of supports of the slip of machines. Part 1 // Engineering industry and life safety, 2009, № 6. – Pp. 117-121.

3. *Zelinskiy V.V.* Phenomenological bases of the isofriction running-in of supports of the slip of machines. Part 2 // Engineering industry and life safety, 2011, № 3. – Pp. 48-52.

Статья поступила в редакцию 15 октября 2012 г.

The topicality of researches devoted to interaction of surfaces in the process of friction on the small size of the actual contact area is substantiated. That interaction occurs into tribomates of many machines, and mechanisms as well as in the process of technological running-in. In relation to the plain bearings by the method of slip lines is shown, that at plastic deformation of micro-roughness is convergence and overlap of the deformed parts under them. The modeling of real interaction by the introduction of the hard cone with a certain sizes into plastic half-space, subjected to one of the conditions of plasticity is considered. The basic equations from the results of mathematical modeling of interaction of rubbing surfaces, obtained on the basis of the fundamental assumptions of the theory of plasticity are presented. Evaluation of the results of mathematical modeling on the correspondence of the results of the experiments, established by the method of x-ray structural analysis is given.

Keywords: deformation, surface, plasticity, modeling, micro-roughness, material, slip.

Зелинский Виктор Васильевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»