

УДК 621.891

Виктор Григорьевич ПИСАРЕНКО,
доктор технических наук, начальник КНПО
“Форт” МВД Украины, г. Винница

МОДЕЛЬ СУММИРОВАНИЯ ТРИБОПОВРЕЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРЕНИЯ

Предложена модель накопления трибоповреждений, основанная на термокинетической теории разрушения и учитывающая особенности высокоскоростного трения.

Ключевые слова: *высокоскоростное трение, динамический коэффициент трения.*

Постановка проблемы. Создание высокопроизводительных технических устройств неизбежно ведет к увеличению скоростей функционирования узлов и агрегатов данных машин и соответственно увеличению рабочих скоростей узлов трения. Активное использование технологий высокоскоростной обработки материалов резанием, разработка и эксплуатация высокоскоростных энергетических установок приводят к тому, что узлы трения данных устройств работают в диапазонах скоростей, превышающих 100 м/с. Такие тенденции современного машиностроения ставят новые задачи в обеспечении износостойкости и надежности узлов в условиях высокоскоростного трения. В связи с этим изучение процессов изнашивания, анализа и прогнозирования, разработки технологий, обеспечивающих требуемый уровень долговечности, при высоких скоростях эксплуатации узлов

трения выдвигается на передний план в ряду основных задач трибологии.

Целью данной работы является анализ особенностей процессов изнашивания в условиях высокоскоростного трения.

Анализ исследований, связанных с процессами высокоскоростного трения, показывает, что работы по изучению процессов изнашивания в условиях высоких скоростей трения можно условно разбить на несколько направлений. Одно из них – это направление по изучению процессов изнашивания электрических контактов в условиях высоких скоростей скольжения. Второе – исследования, связанные с процессами резания на высоких скоростях. Третье направление объединяет работы, рассматривающие высокоскоростное трение как технологию повышения износостойкости элементов узлов трения. Работы, связанные с внутренней баллистикой стрелкового оружия, можно выделить как четвертое направление исследований, связанных с высокоскоростным трением при динамической нагрузке.

Практически авторы всех работ [1–14] отмечают ряд особенностей протекания процессов изнашивания в зоне трения при скоростях скольжения, превышающих 100 м/с. В первую очередь, отмечается явление значительного падения значений коэффициента трения для всех пар трущихся материалов.

Среди первых работ, связанных с экспериментальными исследованиями высокоскоростного трения, можно отметить работу авторов [1], которыми получены значения коэффициентов трения при нагрузках до 150 МПа и скоростях скольжения, достигавших 200 м/с.

Авторами [2] приведены результаты экспериментальных исследований высокоскоростного трения сталь по стали, которые показывают, что коэффициент трения в данном случае может уменьшаться до значений 0,0001.

С элементами пар трения скольжения электрических контактов в работе [3] проводились исследования при скоростях до 75 м/с и удельных нагрузках до 15 Н. Анализ полученных результатов показал, что при скоростях, достигающих 50 м/с, происходит существен-

ное уменьшение коэффициента трения, при этом скорость падения коэффициента трения растёт при увеличении нагрузки.

С целью исследования механизмов трения и изнашивания при высоких скоростях скольжения появились работы, направленные на усовершенствование и разработку экспериментального оборудования для определения динамических коэффициентов трения [4–7].

Однозначного объяснения причин и механизмов происходящих процессов при высокоскоростном трении нет.

Различные авторы по-разному объясняют механизмы трения и изнашивания при высоких скоростях скольжения. Авторы [9] отмечают, что при высоких скоростях скольжения поверхности подвержены интенсивному фрикционному нагреву, если только сопротивление скольжению не становится экстремально малым. Отмечается, что при скоростях скольжения выше 100 м/с поверхностный слой плавится. В качестве доказательства авторы приводят то, что значительно деформированная масса металла имеет рекристаллизационную структуру с очень маленькой величиной зерна и с отсутствием любой предпочтительной ориентации. Мелкозернистая структура распространяется на глубину нескольких микрометров и отделена от крупнозернистой структуры резкой границей.

Наличие расплавленного металла на поверхности при скоростях скольжения 125 м/с отмечается в работе [10], в которой речь идет об опытах на образцах из стали 45 и У8. При этом автор указывает на появление сплошного слоя расплавленного металла.

При исследовании пил трения [11] приходят к выводу, что при разрезании металла за счет трения в зоне разреза металл очень быстро достигает температуры плавления и жидкий металл удаляется диском пилы из зоны трения, о чем свидетельствует круглая форма большого числа частиц стружки.

Определением закономерностей распределения тепловых потоков и их связи с режимами высокоскоростного трения занимались авторы [12] применительно к разработке технологии упрочнения трением.

Следовательно, в настоящее время нет единого мнения о зависимости температуры на поверхности контакта на высоких скоростях скольжения от режимов трения. На основании проведенных исследований авторы отмечают, что поверхность детали при трении может нагреваться до температуры, значительно превышающей критические точки, и в поверхностных слоях возможны структурные изменения.

Следует отметить, что вышеприведенный анализ и объяснение возможных механизмов протекания процессов дается для случая длительного высокоскоростного фрикционного контакта.

Основным результатом данных исследований есть то, что значительное количество фрикционного тепла при долговременном контакте может привести к размягчению и оплавлению одного из элементов пары трения, что при больших относительных скоростях скольжения и высоких нагрузках приводит к существенному уменьшению коэффициента трения.

Кратковременное взаимодействие элементов пар трения при высоких скоростях изучено чрезвычайно мало. В этой связи следует отметить работу [13], в которой авторами изучались процессы трения и изнашивания применительно к вопросам внутренней баллистики стрелкового оружия.

Учитывая особую важность знания величины коэффициента трения для изучения процессов изнашивания при высокоскоростном трении, автор [14] делает попытку расчетного определения динамического коэффициента трения, исходя из предположения возникновения в зоне трения оплавления и как следствия – возникновения трения со смазкой.

Таким образом, анализ вышеуказанных работ показывает, что процессы накопления трибоповреждений при высоких скоростях скольжения изучены недостаточно и требуют проведения дальнейших исследований.

Одним из путей в направлении понимания процессов изнашивания при высокоскоростном трении является построение моделей накопления трибоповреждений, анализ которых позволит обосновать рекомендации по повышению износостойкости узлов трения, рабо-

таючих в умовах високих швидкостей скольження і динамічних навантажень.

Построение модели. Исходя из фундаментальности физических законов, положенных в основу термокинетической теории разрушения [15], логично предположить, что процессы накопления повреждений, происходящие в условиях высокоскоростного трения, будут подчиняться основным закономерностям данной теории. Термокинетическая теория делает возможным исследование в явном виде совместного влияния на разрушение напряженного состояния и температурных эффектов, которые являются преобладающими факторами, определяющими процессы накопления трибоповреждений в условиях высоких скоростей скольжения и динамических нагрузок.

Согласно термокинетической теории скорость накопления повреждений задается соотношением [15]

$$V_{TP}(x, y, z, t) = \frac{dP(x, y, z, t)}{dt} = \frac{1}{\tau^*} \exp\left(-\frac{U - \gamma \cdot \sigma(x, y, z, t)}{k \cdot T(x, y, z, t)}\right), \quad (1)$$

где U – энергия активации; τ^* , γ – характеристики материала; k – постоянная Больцмана; $\sigma(x, y, z, t)$ – характеристика поля напряжений в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t ; $T(x, y, z, t)$ – абсолютная температура в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t .

Исходя из вышеприведенного анализа, следует внести некоторые уточнения в зависимость (1) для учета особенностей процессов, происходящих в условиях высокоскоростного трения. А именно, следует обратить внимание, что характеристики полей напряжений $\sigma(x, y, z, t)$ и температур $T(x, y, z, t)$ должны определяться с учетом динамических эффектов, происходящих в условиях высоких скоростей скольжения, и учитывать изменение коэффициента трения как функции скорости скольжения.

Для решения дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии в координатах Лагранжа, целесообразно прибегнуть к численным методам, исполь-

зую разработанные и хорошо апробированные на сегодняшний день пакеты динамического анализа, например Ansys Autodyn.

В качестве модели трения можно принять обобщенную модель Кулона–Амонтона с учетом эффекта Штрибека, которая учитывает изменения коэффициента трения от скорости скольжения:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \cdot e^{-\beta V}, \quad (2)$$

где μ_d – динамический коэффициент трения; μ_s – коэффициент трения покоя; V – относительная скорость скольжения в точке контакта; β – показатель степени.

С учетом вышесказанного, уравнение (1) можно представить следующим образом:

$$V_{TP}(x, y, z, t) = \frac{dP(x, y, z, t)}{dt} = \frac{1}{\tau^*} \exp\left(-\frac{U - \gamma \cdot \sigma_D(x, y, z, \mu, t)}{k \cdot T_D(x, y, z, \mu, t)}\right), \quad (3)$$

где $\sigma_D(x, y, z, \mu, t)$ – характеристика поля напряжений в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t , определенная из динамического анализа; $T_D(x, y, z, \mu, t)$ – характеристика поля температур в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t , определенная из динамического анализа.

Анализ полученной модели, построенный на основе динамического анализа конкретного узла трения, работающего в условиях высокоскоростного трения, позволит численно оценить влияние тех или иных факторов на протекание процессов изнашивания.

Выводы. На основании анализа результатов исследований трения и изнашивания при высоких скоростях скольжения предложена модель накопления трибоповреждений, учитывающая особенности высокоскоростного трения, основанная на термокинетической теории разрушения.

Список использованной литературы

1. Montgomery R. S. Friction and Wear at High Sliding Speeds // Wear. – 1976. – Т. 36. – P. 275–298.
2. Lim J. Cambridge University Internal Report / Michael F. Ashby // CUED, C. – mat. – 1986. – Т. 123.

3. Zhao H. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current / G. C. Barber, J. Liu // *Wear*. – 2001. – Т. 249. – Р. 409–414.
4. Rajagopalan S. A modified torsional Kolsky bar for investigating dynamic friction / V. Prakash // *Experimental Mechanics*. – 1999. – Vol. 39, N. 4. – Р. 295–303.
5. Molinari A. Dependence of the coefficient of friction on the sliding conditions in the high velocity range / Y. Estrin, S. Mercier // *Journal of Tribology*. – 1999. – Vol. 121, N. 1. – Р. 35–41.
6. Брагов А. М. Модификация метода Кольского для определения динамического коэффициента трения / А. М. Брагов, А. Ю. Константинов, А. К. Ломунов // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*. – 2008. – № 6. – С. 125–131.
7. Arnoux J. J. Friction Experiments for Dynamical Coefficient Measurement / G. Sutter, G. List, A. Molinari // *Advances in Tribology*. – 2011. – Vol. 2011. – Р. 1–6.
8. Lim S. C. Recent developments in wear-mechanism maps // *Tribology International*. – 1998. – Vol. 31. – Р. 87–97.
9. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М. : Машиностроение, 1968. – 544 с.
10. Голего Н. Л. Схватывание в машинах и методы его устранения / Н. Л. Голего. – К. : Техника, 1965. – 231 с.
11. Горбатов Н. И. Пилы трения / Н. И. Горбатов. – М. : Машгиз. – 1960. – 243 с.
12. Люленков В. И. Использование высокоскоростного трения в технологических целях / В. И. Люленков, И. И. Логунов // *Кузнецкие металлурги в борьбе за технический прогресс и повышение эффективности производства*. – Кемерово. – 1974. – С. 261–262.
13. Дроздов Ю. Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю. Н. Дроздов, Е. Г. Юдин, А. И. Белов. – М. : Эко-Пресс, 2010. – 604 с.
14. Matsuyama Takao Friction and wear mechanism at high sliding speeds / Matsuyama Takao // *Proceedings of 19th International Symposium of Ballistics*. – Interlaken, Switzerland, 7–11 May 2001. – Р. 333–339.
15. Регель Р. В. Кинетическая природа прочности твёрдых тел / Р. В. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2015.

Писаренко В. Г. Модель підсумовування трибопошкоджень в умовах високошвидкісного тертя

Запропоновано модель накопичення трибопошкоджень, яка ґрунтується на термокінетичній теорії руйнування і враховує особливості швидкісного тертя.

Ключові слова: *високошвидкісне тертя, динамічний коефіцієнт тертя.*

Pysarenko V. G. Model of adding up of tribo damages in the conditions of high-speed friction

The model of accumulation of tribodamages, which founded on the term-kinetic theory of destruction and takes into account the features of speed friction, is offered.

Keywords: *high-speed friction, dynamic coefficient of friction.*