

Теплонапряженность фрикционного контакта модифицированных поверхностей

¹ *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,*

² *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Проанализировано влияние защитных покрытий на теплонапряженность в зоне контакта трущихся поверхностей. Расчет проведен для трех комбинаций пар трения: из стали 45 без покрытия, с покрытием TiN и NbN на одной из контактирующих поверхностей. Полученные результаты показывают, что покрытия изменяют распределение мощности, температурную нагрузку на материал подложки и температуру фрикционного контакта. Результаты справедливы для условий работы деталей машин, а также для рабочих поверхностей режущего инструмента.

Ключевые слова: кратковременный дискретный контакт, защитные покрытия, теплофизические свойства, экранирующий эффект.

Введение

В настоящее время для повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей машин и инструмента широко используются методы модифицирования поверхностных слоев материала. Особое внимание уделяется методам получения тонких покрытий на основе нитридов, карбидов, оксидов тугоплавких металлов.

Следует отметить, что температура в зоне фрикционного контакта сопряженных поверхностей деталей машин или обрабатываемого и инструментального материалов в процессе механической обработки, влияющая на эффективный коэффициент трения, во многом будет зависеть от теплофизических свойств используемого покрытия.

В работе [1] установлено, что в условиях граничного трения наличие покрытия на основе нитрида титана приводит к существенному изменению локализации температурного поля в материале подложки в зоне контакта. Высказано предположение, что это связано с экранирующим эффектом из-за низкой теплопроводности нитрида титана. Авторы работы [2] при решении тепловой задачи трения для инструмента с тонким покрытием приходят к выводу, что защитное действие покрытия определяется малой глубиной проникновения теплового импульса в подложку, которая, по их данным, меньше толщины покрытия.

Цель настоящей работы заключается в анализе экранирующего действия покрытия в условиях дискретного контактирования трущихся поверхностей.

Постановка задачи

Проанализируем особенности теплопередачи в зоне фрикционного контакта, когда он осуществляется кратковременным дискретным контактированием отдельных микроплощадок. При скорости скольжения 1 м/с и характерном поперечном размере неровностей поверхности трения 10 мкм время контактирования единичной неровности с контртелом составляет 10^{-5} с. Пусть q_0 – интенсивность теплового источника, усредненная по номинальной площади

контакта S_0 . Тогда на площадках фактического контактирования S действует тепловой источник интенсивностью

$$q_1 = q_0 \cdot k, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплового перенапряжения единичной площадки контакта; $k = S_0 / S$.

Выделяемая на единичной неровности мощность распределяется между контртелами в соответствии с их теплофизическими характеристиками [3].

Оценка максимальной температуры тепловой вспышки T на неровности, глубины z , на которой температура составляет $0,5 T$, производилась с использованием выражений, полученными для условий теплопередачи, весьма сходных с рассматриваемыми [4, 5]:

$$T = \frac{2q_1}{\lambda} \sqrt{\frac{\omega\tau}{\pi}}, \quad (2)$$

$$z = 0,68\sqrt{\omega\tau}, \quad (3)$$

где q_1 – интенсивность теплового потока в рассматриваемое тело;

λ – коэффициент теплопроводности;

ω – коэффициент температуропроводности тела;

τ – время, в течение которого поток интенсивностью q_1 поступает в тело.

Интенсивность нагрева будет определяться соотношением глубины проникновения излучения в материал и толщины прогретого путем теплопроводности слоя. Для большинства материалов при столь кратковременном контактировании единичных неровностей толщина прогретого путем теплопроводности слоя z значительно превосходит глубину проникновения излучения в материал и составляет от 2 до 10 мкм. Таким образом, источник тепла в рассматриваемых условиях кратковременного дискретного контактирования всегда можно считать поверхностным и распределение тепловой мощности в точках фактического контакта контртел будет определяться в данном случае соотношением теплофизических свойств весьма тонких поверхностных слоев. На практике толщина реально используемых покрытий составляет 5 – 10 мкм, в связи с чем очевидно, что переход при прочих равных условиях к покрытию с более низким λ должен существенным образом снизить долю тепла, идущую в подложку.

Интенсивность теплового источника на площадке фактического контакта будет существенно больше средней интенсивности теплового источника q_0 и пропорциональна величине коэффициента перенапряжения k , поэтому максимальная температура на площадке фактического контакта должна быть выше той температуры, которую можно получить исходя из средней интенсивности теплового источника q_0 . В соответствии с законом Фурье ($\Delta T = q_1 \cdot \delta \cdot \lambda^{-1}$) должно быть больше и падение температуры на покрытии, причем, чем ниже λ покрытия, тем существенней будет падение. Покрытие за счет своей более высокой теплостойкости воспринимает основную часть теплового удара на себя, защищая тем самым подложку от воздействия высоких температур, а

снижение теплопроводности поверхностного слоя влечет за собой повышение температуры фрикционного контакта.

Особенности расчета и результаты с учетом влияния покрытий

Оценка теплонапряженности фрикционного контакта и температуры в центре единичного контакта трущихся тел рассмотрены для случая трения цилиндра из стали 45 по кубической колодке из стали 45 без покрытия, с покрытиями TiN и NbN. Условия трения соответствовали схеме эксперимента работы [1]. Для упрощения будем считать, что неровности колодки имеют вид коротких стержней с $d = 10^{-3}$ см и трутся по плоскому контртелу, скорость скольжения 1 м/с., время контактирования каждого стержня с плоскостью составляет $\tau = 10^{-5}$ с, средняя интенсивность теплового источника – q_0 , коэффициент перенапряжения – k . Предположим, что за время между двумя последующими контактами температура поверхности каждой неровности успевает уменьшиться до уровня температуры окружающей среды.

Для определения доли тепла b , идущей в стержень, интенсивности потока в стержень q_1 и максимальной температуры на площадке контактирования T использованы зависимости, выведенные для аналогичной задачи, и значения λ , ω испытываемых материалов [3, 4]

Доля тепла b , поступившего в тело, относительно которого тепловой источник неподвижен (в нашем эксперименте это колодка), определяется соотношением между коэффициентами теплопроводности соприкасающихся тел и комплексного критерия $Pe \cdot F_0$, характеризующего их контактное взаимодействие [3]

$$b = \frac{1}{1 + 1,5 \cdot \lambda_A / \lambda_B \sqrt{Pe_A \cdot F_{0B}}}, \quad (4)$$

где λ_A и λ_B – теплопроводность тела A (относительно которого тепловой источник равномерно перемещается – в нашем эксперименте цилиндр) и тела B (относительно которого тепловой источник неподвижен – колодка) соответственно;

Pe_A – безразмерный критерий Пекле для тела A ;

F_{0B} – безразмерный критерий Фурье для тела B .

$$Pe = \frac{1}{6} \cdot \frac{V \cdot l}{\omega}, \quad (5)$$

где V – скорость движения источника, м/мин;

l – его характерный размер, мм

ω – коэффициент температуропроводности тела, в котором движется источник, $\text{см}^2/\text{с}$.

$$F_0 = \frac{100\omega \cdot \tau}{l^2}, \quad (6)$$

где ω – коэффициент температуропроводности тела, относительно которого источник неподвижен, $\text{см}^2/\text{с}$;

λ – время контактирования, с;

l – характерный размер источника, мм.

Критерий Пекле характеризует скорость перемещения теплового источника, а критерий Фурье – время его функционирования.

Теплофизические свойства используемых материалов [3, 6]: сталь 45 – $\lambda = 40$ Вт/м·К, $\omega = 0,08$ см²/с; TiN – $\lambda = 19,6$ Вт/м·К, $\omega = 0,059$ см²/с; NbN – $\lambda = 4,18$ Вт/м·К, $\omega = 0,012$ см²/с.

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения b , q_1 и T для различных пар трения

Параметр	Пара трения		
	сталь 45 – сталь 45	сталь 45 – TiN	сталь 45 – NbN
b	0,40	0,27	0,15
q_1	$0,40q_0k$	$0,27q_0k$	$0,15q_0k$
T, K	$1,0 \cdot 10^{-7} q_0k$	$1,2 \cdot 10^{-7} q_0k$	$1,4 \cdot 10^{-7} q_0k$

Выводы

Анализ полученных результатов свидетельствует о существенном различии теплонапряженности фрикционного контакта для образцов с покрытиями и без него. В условиях упругого контакта при одинаковой выделяемой мощности износостойкие покрытия, обладая отличными от материала подложки теплофизическими свойствами, изменяют распределение мощности, температуру фрикционного контакта и температурную нагрузку материала подложки. Кроме теплофизических свойств покрытия на теплонапряженность фрикционного контакта будет оказывать влияние и состояние рельефа поверхности контакта в силу важности коэффициента k . Поэтому при разработке износостойких покрытий необходимо регулировать их теплофизические свойства и качество поверхности покрытий. Следует добавить, что анализ особенностей теплопередачи проведен для условий кратковременного дискретного контактирования отдельных микроплощадок контртел, характерного для работы деталей машин. Вместе с тем полученные результаты справедливы также для рабочих поверхностей обрабатывающего инструмента на участках с преобладанием упругого и упругопластического взаимодействия, качественно верно характеризуя теплорегулирующую функцию покрытия при обработке материалов.

Список литературы

1. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов / В.М. Мацевитый. – Харьков: Вища школа, 1987. – 128 с.
2. Lenz E., Pnueli D., Rozeanu L. The effect of a thin coating of insulating material on the performance of cutting tools / E. Lenz, D. Pnueli, L. Rozeanu // Wear. – 1979. – № 53. – P. 337-344.
3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
4. Крылов К.И. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении / К.И. Крылов. – Л.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
5. Spalding I.J. Lasers – their applications and operational requirements / I.J. Spalding // Optics and Laser Technology. – 1974. – Vol. 6, Issue 6. – P. 263-272.

6. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия / Г.В. Самсонов, А.П. Эпик. – М.: Металлургия, 1973. – 400 с.

7. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий – Кн. 1– 588 с.; Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования – Кн. 2 – 482 с. [Текст] / Г.И. Костюк. – Харьков: Изд-во АИНУ, 2002

Поступила в редакцию 14.09.2017

Теплонапруженість фрикційного контакту модифікованих поверхонь

Проаналізовано вплив захисних покриттів на теплонапруженість в зоні контакту поверхонь, що труться. Розрахунок проведено для трьох комбінацій пар тертя: зі сталі 45 без покриття, з покриттям TiN і NbN на одній з контактуючих поверхонь. Отримані результати показують, що покриття змінюють розподіл потужності, температурне навантаження на матеріал підкладки і температуру фрикційного контакту. Результати справедливі для умов роботи деталей машин, а також для робочих поверхонь різального інструменту.

Ключові слова: короткочасний дискретний контакт, захисні покриття, теплофізичні властивості, екранувальний ефект.

Heat Stress of Frictional Contact of Modified Surfaces

The influence of protective coatings on the heat stress in the contact zone of rubbing surfaces is analyzed. The calculation was carried out for three combinations of friction pairs: from 45 uncoated steel, coated with TiN and NbN on one of the contacting surfaces. The results obtained show that the coatings change the power distribution, the temperature load on the substrate material and the temperature of the frictional contact. The results are valid for the working conditions of machine parts, as well as for working surfaces of the cutting tool.

Keywords: Short-term discrete contact, protective coatings, thermal properties, shielding effect.

Сведения об авторах:

Вакулєнко Карина Владимировна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник института проблем машиностроения НАН Украины, Харьков Украина.

Казак Ирина Богдановна - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник института проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина.

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретической механики, машиностроения и роботомеханических систем» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», академик Академии инженерных наук и Академии наук технологической кибернетики Украины, Харьков, Украина.