

($p < 0,01$) по сравнению с контрольными животными), что очевидно связано с усилением транскапиллярного перехода белков из крови в ткани. На фоне препарата «Кровохлебка» токсическое

действие солей тяжелых металлов несколько уменьшилось, что показало положительное протекторное действие данного препарата при остром отравлении.

Технические науки

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ БЕЗ СМАЗКИ

^{1,2}Корнопольцев В.Н., ¹Гурьев А.М.,
²Могнонов Д.М.

¹*Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова, Барнаул,
e-mail: gurievam@mail.ru;*

²*Байкальский институт
природопользования Сибирского
отделения РАН, Улан-Удэ,
e-mail: kornop@mail.ru*

Развитие техники сопровождается потребностью в разработке узлов трения, эксплуатируемых в сложных условиях. Среди материалов, применяемых для изготовления опор скольжения выделяются конструкционные материалы на жесткой стальной подложке с припеченным металлокерамическим (бронзовым) пористым слоем, поры которого заполняются антифрикционной композицией. При применении в качестве связующего антифрикционной композиции политетрафторэтилена (ПТФЭ) эти материалы используют для узлов трения, в которых трудно и даже не рекомендуется или невозможно ввести смазочные материалы. Такие листовые антифрикционные материалы (ЛиАМ) широко применяются не только в области общего машиностроения, но и для узлов трения специальной техники.

Одной из первоочередных задач технического материаловедения является создание материалов для узлов трения, способных длительно выдерживать режимы работы с высокими скоростями и нагрузками. Однако долговечность известных промышленных аналогов резко снижается при трении в условиях ограничения смазки при увеличении скорости скольжения.

Причина увеличения износа рабочего слоя ЛиАМ при увеличении скорости скольжения заключается в завышенной объемной составляющей сферической бронзы, при помощи кото-

рой получают пористый металлокерамический слой. Для промышленных аналогов объем металлокерамического слоя составляет 70-75% от общего объема рабочего слоя. При трибоиспытаниях установлено, что благоприятный период трения наблюдается при соотношении площади выступов бронзового каркаса к общей площади контакта один к десяти, т.е. если площадь бронзовых выступов не превышает 10%. В дальнейшем интенсивность износа увеличивается и по мере износа рабочего слоя ее зависимость имеет нелинейный характер. При этом за счет образования большой площади бронзы на рабочей поверхности ЛиАМ увеличивается коэффициент и температура трения.

Увеличение температуры приводит к деградации антифрикционной фторопластовой смазки, образующейся в зоне сопряжения. Как показывают трибоиспытания ЛиАМ, содержащих в полимерном связующем в качестве наполнителя порошковый свинец, при благоприятных условиях трения (относительно площади контакта, занимаемой бронзовым каркасом), при трении по стальным контр-телам в зоне трения образуется «третье тело» желтого цвета сложного химического состава, которое способствует снижению температуры и коэффициента трения и резко сокращает интенсивность износа. ИК спектральные¹ и термогравиметрические² анализы продуктов износа желтого цвета, переносимых на стальное контр-тело показывают, что трибодеструкция ПТФЭ приводит к значительным изменениям химического состава полимера. Наряду с пиками поглощения, относящимся к валентным колебаниям связи CF_2 (1210 и 1150 см^{-1}) появляется пики в диапазоне $1450-1350 \text{ см}^{-1}$. Термогравиметрия показывает, что кривая потери массы продуктов износа имеет три дополнительных характерно выраженных участка. Примерно 3 мас. % от общего количества навески продуктов износа теряется в интервале температур $100-270^\circ\text{C}$, затем еще 3-х % до температуры 325°C , причем при темпе-

¹ ИК Фурье-спектрометр Excalibur HE 3100, фирма Varian Inc. (США).

² Синхронный термоанализатор STA 449 C Jupiter, фирма NETZSCH (Германия).

ратуре 318 °С имеется слабовыраженный эндотермический пик. До 420 °С образец теряет еще 10 мас. % с присутствием в этом интервале пика плавления при 353 °С.

Далее характер потери массы свидетельствует об испарении ПТФЭ, при этом образец теряет 14 мас. % до 550 °С. Оставшаяся часть образцов навесок (74-76 %) представляют собой смесь соединений свинца, продуктов бронзового каркаса и их соединений, обладающих большей термической стабильностью.

При термодеструкции фторопластовой смазки трения и увеличении площади контакта бронзового каркаса продукты износа не только меняют цвет, но и начинают интенсивно выноситься из зоны трения в виде коричневой пыли. Такие режимы работы характеризуются большим износом рабочего слоя ЛиАМ. ИК спектр таких продуктов показывает основные пики поглощения в области 800-600 см⁻¹ больше подтверждающей присутствие оксидов и фторидов металлов.

Выводом этому следует, что главным фактором самосмазывания металлофторопластового ЛиАМ при работе без смазки является высокое содержание в рабочем слое композиции на основе ПТФЭ, которая при трении образует композиционную смесь из низкомолекулярных продуктов трибодеструкции полимера.

Для достижения цели увеличения допустимой скорости скольжения за счет повышения в рабочем слое объемной составляющей ПТФЭ-композиции и получения равномерного коэффициента трения по мере износа рабочего слоя ЛиАМ принято решение создать на поверхности стальной подложки пористый слой со структурой, отвечающей установленному соотношению площадей контакта бронзовых выступов и окружающего его полимерного композита. По предположению пористый слой должен иметь своеобразную столбчатую структуру. Создать такую структуру промышленными методами, в которых бронзовый пористый слой, толщиной 0,3 мм, получают припеканием свободно насыпанных частиц сферической бронзы, довольно затруднительно. Для получения пористого слоя столбчатой структуры наиболее пригоден прием припекания слоя бронзы, при котором можно получить на пластине оттиск. Одним из таких решений является применяемый нами кассетный метод, в котором заготовки получают в виде листов конечных размеров. Термическая обработка изделий поводится в плотно сжатом пакете, который может содержать одновременно несколько десятков заготовок. В качестве материалов для получения пористого слоя мо-

гут быть использованы бронзовые порошки различной дисперсности, стружка или сетки. В случае получения пористого слоя столбчатой структуры наиболее пригодны высокодисперсные порошки, а оттиск получается при спекании с использованием специальной прокладки с рифленой поверхностью, плотно прижатой к наносимому слою. Выбором материала бронзового слоя и рельефа прокладки можно регулировать объем свободного пространства тем самым придавать металлокерамическому слою заданные самосмазывающиеся свойства, несущую способность, теплопроводность и пр. Сравнительные трибоиспытания показывают, что при высоких скоростях скольжения разработанный ЛиАМ имеет значительное преимущество по сравнению с материалом DU, по аналогии с которым пористый бронзовый слой заполняется композицией ПТФЭ со свинцом. Если рабочий слой вкладыша из материала DU при трении по стали без смазки ($V = 2$ м/с, $p = 2$ МПа) изнашивается на глубину 0,2-0,25 мм за 20-30 часов с ростом коэффициента трения, то рабочий слой разработанного ЛиАМ за 100 часов испытаний изнашивается не более 10-15 мкм со снижением коэффициента трения до 0,1-0,12.

Нельзя оставить без внимания и выбор обратной пары для работы с ЛиАМ. От правильного выбора контр-тела во многом зависит работоспособность любого узла трения. Для работы с металлополимерными материалами хорошо зарекомендовали себя стальные детали с высокой твердостью поверхности. В мировой практике для увеличения поверхностной твердости и износостойкости стальных изделий применяют различные способы поверхностного термодиффузионного легирования (химико-термическая обработка (ХТО)).

Одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения конструкционных сталей является диффузионное борирование, при помощи которого на поверхности любых сталей можно получить слои боридов железа, обладающих высокой твердостью (до 15-40 ГПа) и износостойкостью. Установлено, что при работе ЛиАМ по борированному стальному контр-телу нагрузку на узел трения можно увеличить до 3-х раз по сравнению со сталью 45 с обработкой ТВЧ (поверхностная закалка токами высокой частоты). Однако широкому использованию борирования мешает повышенная хрупкость получаемых покрытий. За счет возникновения в борированном слое высоких напряжений получаемые покрытия не выдерживают динамических нагрузок, склонны к растрескиванию и выкашиванию. Для

решения этой проблемы различными исследователями предлагается комплексное насыщение стальной поверхности бором совместно с другими элементами. Нами разработаны составы насыщающих сред для бороникелирования, борохромирования, бротанирования и боробронирования, которые позволяют получать компактные боридные покрытия, толщиной до 1 мм с высокими показателями ударной

вязкости, износостойкости, с твердостью до 15-30 ГПа и способностью к финишной обработке высокопрочными сплавами или алмазным резцом. Разработанные способы могут быть рекомендованы для упрочнения стальных контр-тел, работающих в паре с ЛиАМ, а также других стальных деталей общего и специального машиностроения, эксплуатируемых при высоких динамических нагрузках.

Физико-математические науки

МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ МАТЕРИАЛОВ

Ершов В.И.

Анапа,

e-mail: andr-vitaliy@gmail.ru

Методология в физико-математических и технических проблемах – это постановка задачи, всегда имеющая место при рождении проблемы и иногда – при её развитии.

Англичане говорят: «Seeing is believing» (увидел – поверил), а также: «One picture is worth a thousand words» (одна картинка стоит тысячи слов).

Самым простым геометрическим образом является плоская кривая. Именно этот геометрический образ позволил исчерпывающе решить проблемы при растяжении-сжатии. Многие проблемы механики материалов быстрее решаются с использованием следующего по порядку геометрического образа – поверхности.

Эффективность использования поверхности имеет место, например, в создании теории прочности из материалов, не подчиняющихся закону Гука [1]. Наличие ограниченных величин приводит к трем неравенствам в условиях прочности. Записываемым через главные напряжения, которые могут быть сведены к одному. Характер ограничений определяется экспериментальной поверхностью, по которой принимаются допускаемые значения напряжений.

Удивительной поверхностью является поверхность, соответствующая перемещениям в задаче Фламана, поскольку она при традици-

онном подходе невидима, ибо все точки полуплоскости в процессе деформирования остаются в одной и той же плоскости, что совершенно исключает проявление эффекта пространства. Поверхность можно сделать осязаемой, если все вектора перемещений повернуть на 90°. Геометрическое место концов этих векторов дает искомую поверхность в цилиндрической системе координат. Полученная координата соответствует деформированному состоянию. Вопрос состоит в том, какими должны быть две другие координаты. Если взять координаты недеформированного состояния, то приходим к очевидному противоречию: три координаты соответствуют разным точкам. Соответствующие уравнения не дадут правильный результат. По-видимому, именно поэтому, оценивая формулу для перемещений в задаче Фламана, крупнейший специалист М.И. Горбунов-Посадов писал: «Возникает вопрос, нельзя ли решение Фламана, по традиции удерживающееся в теории упругости уже 90 лет, заменить другим, более строгим решением?».

Во избежание методологического противоречия необходимо для исследуемой поверхности все координаты принимать для деформированного состояния, т.е. математическую модель задачи следует формировать в переменных Эйлера. Только после этого можно обсуждать пути решения дифференциальной формы математической модели объекта с учетом инженерных рекомендаций об ограничениях переменных и искомых функций.

В рассматриваемой задаче дифференциальные уравнения в переменных Эйлера имеют вид [2]:

$$\frac{\partial \tilde{U}(\tilde{r}, \tilde{\theta})}{\partial r} = -\frac{K \cos \tilde{\theta}}{\tilde{r}}; \quad \frac{\tilde{U}(\tilde{r}, \tilde{\theta})}{\tilde{r}} + \frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial V(\tilde{r}, \tilde{\theta})}{\partial \theta} - \frac{\tilde{V}(\tilde{r}, \tilde{\theta})}{\tilde{r}} = \frac{\mu K \cos \tilde{\theta}}{\tilde{r}}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial U(\tilde{r}, \tilde{\theta})}{\tilde{r} \partial \theta} + \frac{\partial \tilde{V}(\tilde{r}, \tilde{\theta})}{\partial r} - \frac{2\tilde{V}(\tilde{r}, \tilde{\theta})}{\tilde{r}} = 0.$$