

О. В. ТОЛОЧКО*, д-р техн. наук, А. Д. БРЕКИ*, Е. С. ВАСИЛЬЕВА*, канд. техн. наук,
М. Ю. МАКСИМОВ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ВОЛЬФРАМА

Исследованы жидкие смазочные композиции на основе масла VM-20 с мелкодисперсными частицами сульфида и селенида вольфрама при концентрации частиц 0,5–4 мас. %. Дана оценка влияния размера и состава частиц на основные для жидких смазочных композиций трибологические характеристики: индекс задира, нагрузку сваривания, несущую способность, противоизносные свойства.

Введение

Традиционно в триботехнике в качестве добавок к маслам применяли порошки из микрочастиц твердых смазочных материалов (модификаторов трения) [1, 2]: графита, дисульфида молибдена или вольфрама, диселенида ниобия – материалов со слоистой структурой, обладающих различной прочностью на срез в разных направлениях кристаллической решетки. Адсорбированные на поверхностях трения микрочастицы твердых смазочных материалов в процессе трения ориентируются базовыми плоскостями кристаллитов почти параллельно направлению скольжения, что обеспечивает срез частиц вдоль плоскостей спайности под воздействием тангенциальных сил. Именно в этом направлении сопротивление срезу незначительно, что и объясняет механизм смазочного действия твердых смазочных веществ и их дисперсий в данном случае.

С развитием методов изучения структуры и свойств наноразмерных материалов появилась возможность оценивать влияние размера частиц присадок к маслам на основные трибологические характеристики жидких смазочных композиций (СК) с дихалькогенидами. Вместе с тем появилась возможность сравнения влияния наночастиц различных дихалькогенидов на свойства базовых масел.

Для реализации указанных оценок и сравнений в настоящей работе были проведены исследования смазочных композиций с мелкодисперсными частицами двух типичных представителей класса дихалькогенидов.

Материалы и методика исследования

В качестве базового смазочного материала использовали авиационное масло MC-20, в качестве присадки – порошки дихалькогенидов вольфрама: WS_2 (дисульфид вольфрама) и WSe_2 (диселенид вольфрама). Наноразмерные частицы были получены методом газофазного синтеза [3]. Частицы дисульфида вольфрама были сферической формы (рис. 1, а), средний диаметр частиц не превышал 40 нм. Наночастицы диселенида вольфрама (рис. 1, б) имели пластинчатую форму размером 40×5 нм и состояли из 7–10 слоев WSe_2 . Для сравнения были использованы также микронные частицы сульфида вольфрама пластинчатой формы толщиной до 0,3 мкм и длиной 1–2 мкм производства компании Sigma–Aldrich [4].

Смазочные композиции были приготовлены путем ультразвукового диспергирования порошковых материалов в масле. Концентрация частиц c в исследуемых смазочных композициях составляла 0,5; 1; 2; 4 мас. %. Испытания смазочных

* ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

композиций, содержащих микро-
денной выше концентрации пр

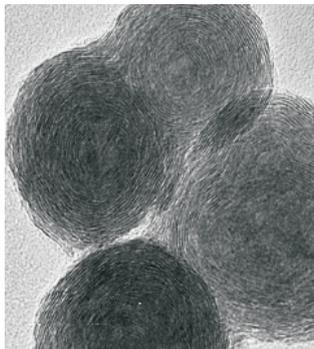


Рис. 1. Микрофотографии

Определение основных т
композиций с дихалькогенидам
на четырехшариковой машине
(рис. 2).

Цанга
(фиксация
верхнего шарика)

прик

3) определение противоизносных свойств по показателю износа $D_{и}$.

Испытания на индекс задира осуществляли согласно ГОСТ 9490–75 [5]. Из ряда нагрузок 1 $\{P_{\alpha} | \alpha = 1, 2, \dots, 23\}$ выбирали набор смежных нагрузок $\{P_{\beta} | 1 \leq \beta \leq 23\} = \{P_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, элементы которого перенумеровывали и располагали в порядке монотонного возрастания. Длительность испытания при фиксированной нагрузке из набора составляла $\Delta t_{и_3} = 10,0 \pm 0,2$ с. С использованием микроскопа «Прима-эксперт» измеряли длину $l_{i,j}(СК_a)$ и ширину $h_{i,j}(СК_a)$ j -того пятна износа ($j = 1, 2, \dots, 6$) при i -той нагрузке, образовавшегося при испытании смазочного материала $СК_a$ (рис. 3).

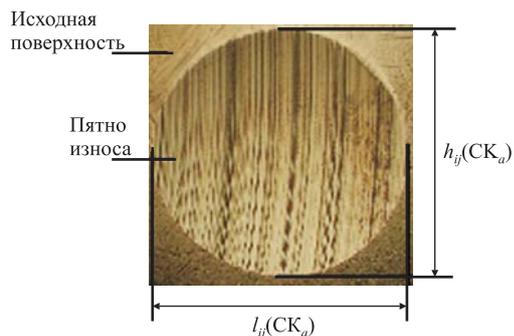


Рис. 3. Внешний вид пятна износа шарика после испытания на ЧШМ-3,2

Диаметр j -того пятна износа для композиции $СК_a$ при i -той нагрузке определяется как среднее арифметическое

$$d_{i,j}(СК_a) = \frac{l_{i,j}(СК_a) + h_{i,j}(СК_a)}{2}. \quad (1)$$

Согласно ГОСТ 9490–75, ряду нагрузок 1 был поставлен во взаимно однозначное соответствие ряд значений предельного износа: $d_{пра} = d_{ра} + 0,15$ мм. Таким образом, для выбранного набора нагрузок

$$d_{при} = d_{ри} + 0,15 \text{ мм}, \quad (2)$$

где $d_{ри}$ – диаметр зоны упругой деформации шариков по Герцу, мм, при нагрузке P_{is} , Н.

Непревышение предельного пятна износа и определяло критическую нагрузку P_k .

Условная нагрузка, соответствующая осевой нагрузке P_i при испытании смазочного материала $СК_a$, находится из соотношения

$$Q_i(СК_a) = P_i \frac{d_{ри}}{d_i(СК_a)}. \quad (3)$$

Индекс задира вычисляется по формуле

$$И_3(СК_a) = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} Q_i(СК_a)}{s-1}, \quad (4)$$

где s – порядковый номер нагрузки, при которой происходит процесс сваривания шариков (нагрузки сваривания P_c);

$s - 1$ – номер предшествующей нагрузки.

Испытания для определения показателя износа $D_{и}$ осуществляли при осевой нагрузке $P = 400 \text{ Н} = \text{const}$. Длительность испытаний на износ составляла $\Delta t_{D_{и}} = 60 \pm 0,5$ мин, количество проводимых испытаний в границах данной методики – $k_{исп} = 2, j = 1, 2, \dots, 6$. Диаметр j -того пятна износа для композиции $СК_a$ определяется по формуле (1). Показатель износа $D_{и}(СК_a)$ вычисляется по формуле (2)

$$D_{и}(СК_a) = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 d_j(СК_a). \quad (5)$$

Результаты эксперимента

После исследования противозадирных свойств смазочных композиций были получены графики зависимости индекса задира от концентрации мелкодисперсных частиц в базовом масле МС-20 (рис. 4).

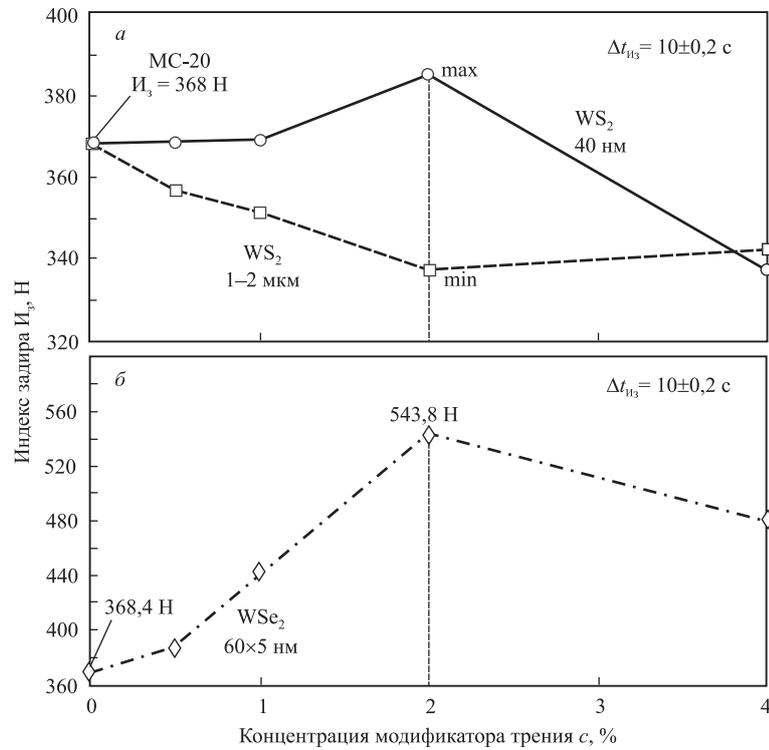


Рис. 4. Зависимость индекса задира от концентрации частиц модификатора трения в базовом масле МС-20

При задании полученных функций в виде формулы для СК с наночастицами WS_2 имеем

$$I_3(c)_5 = \begin{cases} 0,055c + 36,84 & \text{при } c \in [0; 1]; \\ 1,64c + 35,26 & \text{при } c \in (1; 2]; \\ -2,4c + 43,34 & \text{при } c \in (2; 4]. \end{cases} \quad (6)$$

Для СК с микрочастицами WS_2 получена зависимость

$$I_3(c)_6 = \begin{cases} 0,243c^4 - 1,6c^3 + 3,27c^2 - 3,63c + 36,84 & \text{при } c \in [0;2], \\ 0,255c + 33,2 & \text{при } c \in (2;4]. \end{cases} \quad (7)$$

Зависимость индекса задира от концентрации наночастиц WSe_2 в базовом масле МС-20 имеет следующий вид:

$$I_3(c)_7 = \begin{cases} 3,77c + 36,84 & \text{при } c \in [0;0,5]; \\ 10,4c + 33,66 & \text{при } c \in (0,5;2], \\ -3,2c + 60,8 & \text{при } c \in (2;4]. \end{cases} \quad (8)$$

На основании анализа полученных зависимостей было установлено:

1. На отрезке $c \in [0;1]$ индекс задира для СК с наночастицами практически не меняется (незначительное увеличение – на 0,15%), а для СК с микрочастицами уменьшается на 4,7%.

2. На сегменте $c \in [0;2]$ уровень противозадирных свойств СК с наночастицами повышается на 4,3% (относительно МС-20), а свойств СК с микрочастицами понижается на 8,5%.

3. На полуинтервале $c \in (2;4]$ индекс задира для СК с наночастицами уменьшается на 12,5% (на 8,4% относительно МС-20), а для СК с микрочастицами увеличивается на 1,5% при концентрации $c = 4\%$ (оставаясь на 7% меньше, чем для базового масла).

4. На сегменте $c \in [0;2]$ индекс задира увеличился на 32% относительно базового масла МС-20. На полуинтервале $c \in (2;4]$ наблюдается снижение уровня противозадирных свойств на 12% относительно достигнутого уровня (при этом в точке $c = 4\%$ индекс задира для смазочной композиции на 23% больше, чем для базового масла). Из анализа зависимостей на рис. 3 индекса задира от концентрации наночастиц дихалькогенидов видно, что имеет место идентичность промежуточных возрастания и убывания.

Изучение предельной нагрузочной способности показало, что у смазочной композиции с наночастицами WS_2 на отрезке $c \in [0;0,5]$ происходит увеличение (на 37%) предельной нагрузочной способности. Далее следует интервал относительной стабильности нагрузки сваривания $c \in (0,5;2]$, в котором она незначительно возрастает. На интервале $c \in (2;4]$ происходит новое увеличение – на 11% нагрузки сваривания.

У смазочной композиции с микрочастицами (при резко отличающихся данных по индексу задира относительно СК с наночастицами) также имеет место тенденция увеличения предельной нагрузочной способности. На отрезке $c \in [0;1]$ происходит увеличение нагрузки сваривания на 20,6%. Далее следует интервал относительной стабильности нагрузки сваривания $c \in (1;2]$, длина которого меньше, чем у СК с наночастицами, и новое увеличение предельной нагрузочной способности на интервале $c \in (2;4]$ – на 20,8%.

Лучшие результаты получены при исследовании СК с наночастицами WSe_2 . На отрезке $c \in [0;2]$ предельная нагрузочная способность увеличивается в 2,84 раза. На полуинтервале $c \in (2;4]$ происходит снижение на 10,7% нагрузки сваривания, что, однако, в 2,5 раза больше, чем для базового масла.

Несмотря на существенное увеличение нагрузки сваривания и индекса задир, установлено, что такие факторы, как концентрация и размер частиц диоксида вольфрама в базовом масле не оказывают существенного влияния (на выбранных уровнях) на критическую нагрузку (несущую способность СК), которая во всех случаях не превышала 790 Н. Диаметры пятен износа при использовании СК с наночастицами и СК с микрочастицами практически не отличаются. Графики зависимости показателя износа от концентрации мелкодисперсных частиц WS_2 приведены на рис. 5, а.

На основе экспериментальных данных выявлено, что концентрация наночастиц и микрочастиц, при которой наблюдается минимальный показатель износа, одинакова и составляет приблизительно 1%.

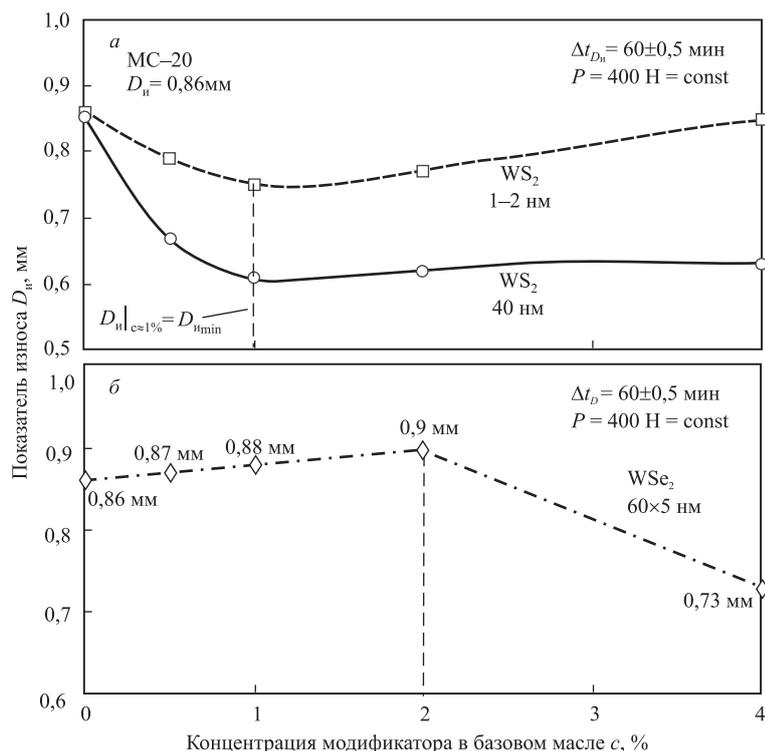


Рис. 5. Зависимость показателя износа от концентрации WS_2 (а) и WSe_2 (б)

На отрезке $c \in [0;1]$ показатель износа для СК с наночастицами уменьшается на 29%, а для СК с микрочастицами – на 12,8%. Далее в связи с увеличением коррозионно-механической составляющей процесса изнашивания на полуинтервале $c \in (1;4]$ для СК с наночастицами показатель износа увеличивается на 3,2%, а для СК с микрочастицами – на 11,7%, что свидетельствует о преимуществах СК с наночастицами перед СК с микрочастицами при испытаниях в данных условиях. График зависимости показателя износа от концентрации наночастиц диселенида вольфрама показан на рис. 5, б.

В отличие от СК с дисульфидом вольфрама в случае использования диселенида показатель износа незначительно возрастает относительно базового масла – на 4,4% на отрезке $c \in [0;2]$. На промежутке $c \in (2;4]$ показатель износа уменьша-

ется на 19% относительно достигнутого уровня (в точке $c = 4\%$), что на 15% меньше, чем у базового масла.

ВЫВОДЫ

1. Противозадирными свойствами обладают СК с добавлением модификаторов трения с наночастицами дисульфида вольфрама, что предполагает возможность их использования в тяжело нагруженных узлах трения. Вместе с тем с увеличением концентрации WS_2 в базовом масле увеличивается предельная нагрузочная способность СК. При этом несущая способность остается стабильной. Наибольшее увеличение индекса задира и нагрузки сваривания (почти в 3 раза) наблюдается при использовании пластинчатых наночастиц диселенида вольфрама.

2. При малых концентрациях WS_2 в МС-20 происходит увеличение противозадирных свойств. При этом СК с наночастицами обладают лучшими противозадирными свойствами. Таким образом, фактор размера частиц не является нейтральным относительно противозадирных свойств смазочных композиций. В связи с этим существует потенциальная возможность использования данных СК в узлах трения машин, работающих при высоких скоростях и малых нагрузках.

3. Диселенид вольфрама WSe_2 , по предварительным данным, является хорошей противозадирной присадкой, значительно повышающей предельную нагрузочную способность СК, но относительно нейтральной по отношению к износу в условиях трения скольжения. Это позволяет предположить возможность использования данной присадки в узлах машин, подверженных высоким нагрузкам, при низких скоростях движения элементов узлов трения, таких как некоторые подшипниковые узлы, подпятники, редукторы.

Работа поддержана министерством образования и науки РФ совместно с фондом грантов Президента РФ. Грант № 02.120.11.7633-МК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смазочные материалы: Антифрикционные и противозадирные свойства. Методы испытаний: Справочник / Р. М. Матвеевский, В. Л. Лашхи, И. А. Буяновский и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
2. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н., Дудко П. П. Повышение надежности трибосопряжений. – СПб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2001. – 304 с.
3. Synthesis of Tungsten Disulphide Nanoparticles by Chemical Vapor Condensation Method/ E. S. Vasilyeva, O. V. Tolochko, B.-K. Kim e. a.// Microelectronic Journal. – April–May 2009. – V. 40, Is. 4–5. – P. 687–691.
4. <http://www.sigmaaldrich.com/technical-service-home/product-catalog.html>
5. ГОСТ 9490–75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1975. – 14 с.

Статья поступила 16.12.2010