

УДК 621.9.048.6

## АДГЕЗИЯ ВИБРАЦИОННОГО МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ТВЕРДОСМАЗОЧНОГО ПОКРЫТИЯ MoS<sub>2</sub>

© 2019 г. Н. М. Антонова<sup>1, \*</sup>, В. С. Шоркин<sup>2, \*\*</sup>, С. Н. Ромаши<sup>2</sup>, А. П. Бабичев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каменский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ)  
им. М.И. Платова, 437800 Каменск-Шахтинский, Россия

<sup>2</sup>Приокский государственный университет им. И.С. Тургенева, 302026 Орел, Россия

<sup>3</sup>Донской государственный технический университет, 344000 Ростов-на-Дону, Россия

\*E-mail: melnik1@rambler.ru

\*\*E-mail: vshorkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.11.2018 г.

После доработки 15.12.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

Показано, что в процессе виброволновой обработки из порошка дисульфида молибдена на стали формируется твердосмазочное покрытие. Исследованы морфологические особенности покрытия. Методами электронно-зондового микроанализа и инфракрасной спектроскопии выявлено, что химический состав покрытия в процессе виброобработки и после испытаний на трение остается неизменным. Проведена теоретическая оценка энергии адгезии покрытия MoS<sub>2</sub> к защищаемой стальной поверхности с использованием модели, учитывающей парные и тройные потенциальные взаимодействия частиц контактирующих материалов. Показано, что адгезия частиц MoS<sub>2</sub> к стали существенно выше адгезии частиц MoS<sub>2</sub>–MoS<sub>2</sub>. Рассчитана энергия адгезионного взаимодействия для пар MoS<sub>2</sub>–MoS<sub>2</sub> ( $-0.04 \times 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>), MoS<sub>2</sub>–Fe ( $-0.54 \times 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>). Теоретические расчеты подтверждают результаты экспериментов по исследованию адгезионных свойств покрытия MoS<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** механохимическое покрытие, твердая смазка, дисульфид молибдена, адгезия, потенциальное взаимодействие, сплошная среда.

**DOI:** 10.1134/S0207352819070023

### ВВЕДЕНИЕ

Твердые смазочные материалы широко применяются в промышленности для создания на поверхностях трения деталей пленок, обладающих высоким сопротивлением разрушению под действием нормальной нагрузки и низким сопротивлением сдвигу. По сравнению с пластичными и жидкостными смазочными материалами они обладают определенными преимуществами – функционируют при низких и высоких температурах, стабильны в широком интервале нагрузок и скоростей, не меняют своих свойств со временем. В качестве компонента для формирования твердосмазочных покрытий используют мягкие оксиды металлов, фториды, хлориды, йодиды, теллуриды, сульфиды различных материалов, полимерные материалы, вещества слоистой структуры и так далее. Среди дихалькогенидов переходных металлов VI группы широко применяется дисульфид молибдена (MoS<sub>2</sub>) – материал, обеспечивающий за счет слоистой структуры “легкое” скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга. Это способствует снижению

коэффициента трения и повышению износостойкости поверхности деталей, входящих в пары трения различных механизмов и машин. Традиционно MoS<sub>2</sub> используется как присадка при промышленном изготовлении пластичных смазочных материалов. Интерес к этому виду твердосмазочных покрытий не уменьшается: описаны трибологические свойства твердосплавного инструмента с покрытием в условиях сухого скольжения [1], определены условия стабильности наночастиц MoS<sub>2</sub> в различных дисперсиях [2]. Предлагаются новые подходы к использованию дисульфида молибдена в условиях постоянной и переменной нагрузки [3]. Ряд работ касается состояния дисульфида молибдена и методов, позволяющих более эффективно использовать его как смазку: уменьшения размера частиц [4, 5], создания адаптивных смазок [6], проявления синергетических эффектов композитов, содержащих MoS<sub>2</sub> [7, 8].

Перспективным направлением является формирование механохимических твердосмазочных покрытий на металлических поверхностях с при-

менением виброволновых технологий [9, 10]. Такой подход позволяет обеспечить высокую плотность смазочного слоя и наибольшую площадь его контакта с защищаемой поверхностью путем заполнения естественных неровностей микрорельефа. Виброволновые технологии способствуют длительной сохранности покрытия и его эксплуатационных свойств из-за хорошей адгезии к защищаемому материалу и ее увеличению за счет увеличения поверхности реального адгезионного контакта и слабой, но неравной нулю адгезии частиц покрытий друг к другу. Работ, касающихся аспектов нанесения, формирования химико-механических покрытий на основе  $\text{MoS}_2$ , обеспечивающих необходимые трибологические свойства защищаемых поверхностей деталей, мало [9–11]. Несмотря на многообразие методов нанесения покрытий и использование широкого спектра экспериментально проверенных смазочных материалов, практически отсутствуют критерии, с помощью которых можно теоретически предсказать адгезионные или антиадгезионные свойства определенной пары материалов. Ранее [12] авторами была показана перспективность использования механохимического твердосмазочного покрытия дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) после виброволновой обработки для создания антифрикционных материалов и приведены результаты экспериментальных исследований его триботехнических свойств. Настоящая работа является продолжением этих исследований.

Цель работы – установление особенностей формирования структуры в процессе износа механохимического покрытия  $\text{MoS}_2$ , получаемого путем виброволновой обработки металлических поверхностей, и теоретическое обоснование оценки адгезии  $\text{MoS}_2$ –сталь.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовали естественный тонкодисперсный порошок дисульфида молибдена марки МВЧ-1 (ЦМЕУ 06-1-68). Дисперсность порошка  $\text{MoS}_2$  определяли на анализаторе Micro-Trac Blue wave (ЦКП “Нанотехнологии” ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова).

Покрытие наносили путем вибрационной обработки поверхности стали 45: для осуществления процесса в качестве рабочей среды применяли смесь стальных полированных шаров из стали ШХ15 диаметром 2.0 мм (HRC62) и порошок дисульфида молибдена. Продолжительность обработки, требуемая для получения сплошной пленки  $\text{MoS}_2$ , составила 60–90 мин, амплитуда и частота колебаний:  $A = 2.5$  мм,  $f = 33$  Гц. Рабочую камеру заполняли шарами на 3/4 объема рабочей

камеры, порошок  $\text{MoS}_2$  засыпали из расчета 10 г на 1 л насыпанного объема шаров.

Морфологические особенности покрытий с  $\text{MoS}_2$  изучали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) ZEISS Crossbeam 340 (НОЦ “Материалы”, ДГТУ). Исследовали поверхность образцов, покрытых  $\text{MoS}_2$  после виброволновой обработки и после испытаний всухую на торцевой машине трения ТМТ-25 при нагрузке до 6 МПа, скорости скольжения 0.04 м/с (ЦКП “ОКТБ “Орион”).

Для получения информации о распределении  $\text{MoS}_2$  на поверхности и оценки изменения соотношения  $\text{Mo/S}$  в образцах проводили элементное картирование участков поверхности. Использовали микроанализаторы – энергодисперсионный INCA Energy 450 (с детектором X-Act ADD) и волнодисперсионный INCA Wave 700 фирмы OXFORD Instruments Analytical на базе растрового электронного микроскопа Tescan Vega LMU (“Центр исследований минерального сырья и состояния окружающей среды” ЮФУ). Измерения проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Инфракрасные (ИК) спектры регистрировали на спектрофотометре ФТ-08 (“Люмэкс”, Санкт-Петербург) в интервале  $600\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  методом нарушенного полного внутреннего отражения – НВПО (оборудование ОАО “Каменскволокно”).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Структура и фазовый состав механохимических покрытий  $\text{MoS}_2$ .** На рис. 1 представлено РЭМ-изображение использованного в работе порошка  $\text{MoS}_2$ . На рис. 2 приведены гистограммы распределения частиц  $\text{MoS}_2$  по размерам в исходном состоянии и после вибрационной обработки. Здесь  $N$  – общее число частиц,  $\Delta N$  – число частиц, попавшее в интервал диаметров,  $d$  – размер частицы. Количество субмикронных частиц (размером менее 0.1 мкм) при виброволновой обработке уменьшается в связи с упаковкой таких частиц в неровностях рельефа покрываемой поверхности. В исходном порошке преобладают микрочастицы с размерами до 10 мкм. В процессе обработки по мере повышения дисперсности порошка наблюдается склонность частиц к агрегации – превалируют конгломераты размером до 30 мкм. Были изучены морфологические особенности и структура образцов с механохимическим покрытием  $\text{MoS}_2$  до и после испытания пары трения в воздухе, всухую (табл. 1).

Результаты исследования методом РЭМ стальной поверхности с покрытием  $\text{MoS}_2$  до и после испытаний на трение приведены на рис. 3, 4. В процессе виброволновой обработки при нанесении на металлическую поверхность частицы

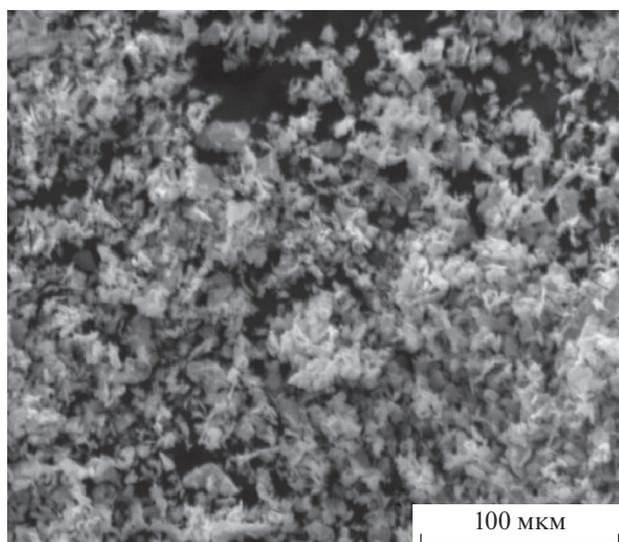


Рис. 1. РЭМ-изображение исходного порошка дисульфида молибдена.

порошка заполняют микронеровности поверхности. На рис. 3 показан вид поверхности стали с нанесенным порошком  $\text{MoS}_2$  после виброволновой обработки. Частицы порошка довольно плотно упакованы на поверхности. Агломерирование частиц в процессе виброобработки приводит, видимо, к формированию областей на стальной поверхности, в которых частицы распределены в большем количестве (показано стрелкой на рис. 3б). Неровности металлической поверхности образца, возникающие в процессе его токарной обработки, также заполнены частицами  $\text{MoS}_2$  (рис. 3б). В.В. Ивановым в [13] было показано, что толщина формируемого в процессе виброобработки покрытия  $\text{MoS}_2$  достигает  $\sim 5$  мкм. Поверхность образцов после испытаний на установке трения (всухую) изображена на рис. 4. Износ стального образца после испытаний носит преимущественно адгезионный характер. Дисульфид молибдена обладает слоистой структурой, которая обеспечивает “легкое” скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, способствуя снижению коэффициента трения и повышению износостойкости поверхности деталей, входящих в пары трения. После испытаний на установке трения образцы с композиционным покрытием приобретают гладкую, блестящую поверхность. Микрочастицы порошка в процессе

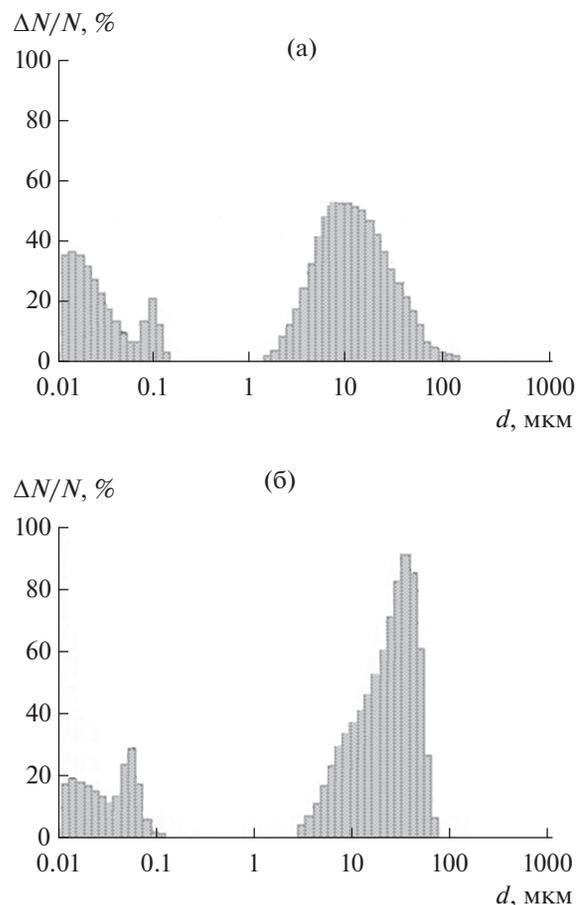


Рис. 2. Гистограмма распределения микрочастиц порошка  $\text{MoS}_2$  по размерам: а – исходное состояние; б – после вибрационной обработки.

работы пары трения перераспределяются по стальной поверхности, и слипание частиц в агломераты в локальных областях не наблюдается.

На рис. 5, 6 показаны результаты элементного картирования поверхностей с покрытием – исходного образца после виброобработки и образца после испытаний на трение. Поверхность трения с покрытием  $\text{MoS}_2$  сканировали в области микроборозд (дорожек трения), наблюдаемых на поверхности трения. Отношения S/Mo (ат. %) для исходной поверхности с твердосмазочным покрытием (образец 1) и поверхности трения (образец 2) близки: 1.99 (табл. 2) и 2.01 (табл. 3) соответственно. Различий на уровне чувствительности анализа в агрегатах  $\text{MoS}_2$  не выявлено. Отклоне-

Таблица 1. Характеристики образцов

№	Материал образцов	Состояние поверхности
1	Сталь 45	$\text{MoS}_2$ , исходное покрытие
2	Сталь 45	$\text{MoS}_2$ , покрытие после испытаний на трение

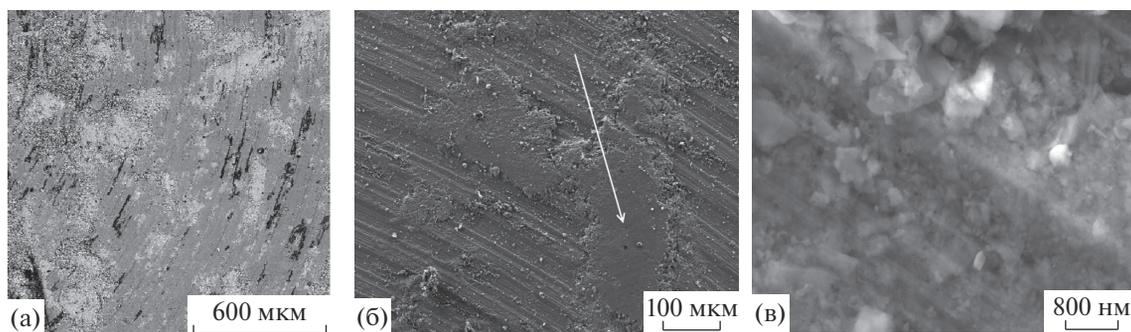


Рис. 3. Образец 1: а – вид стальной поверхности с покрытием  $\text{MoS}_2$  до испытаний на трение; б, в – фрагменты изображения.

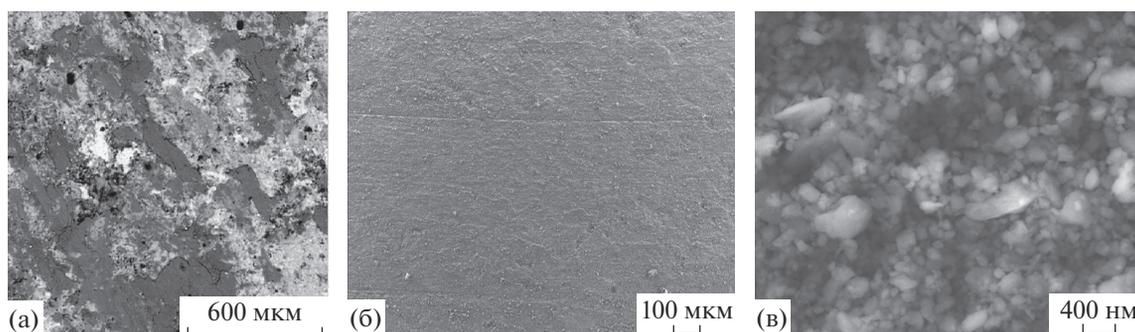


Рис. 4. Образец 2: а – вид стальной поверхности с покрытием  $\text{MoS}_2$  после испытаний на трение; б, в – фрагменты изображения.

ние отношения S/Mo на участках с тонким слоем в сторону снижения во всех образцах объясняется систематической ошибкой.

Минимальная относительная погрешность измерений для металлической (электропроводной) полированной поверхности, однородной по составу, составляет  $\sim 1\text{--}2\%$ . Дополнительный вклад в погрешность вносит глубина генерации аналитического сигнала ( $\sim 1\text{--}2$  мкм). На поверхности присутствуют отдельные участки покрытия, глубина которых сопоставима с глубиной генерации сигнала. Большинство участков измерений имеет рыхлую, слоистую и частично не электропроводящую поверхность. В этом случае погрешность может достигать  $\sim 10\%$ . Поэтому незначительные изменения соотношения между S и Mo могут не фиксироваться.

Далее сравнивали ИК-спектры образцов 1 и 2. На рис. 7 приведены спектры, полученные методом нарушенного полного внутреннего отражения. В области  $3800\text{--}3200\text{ см}^{-1}$  присутствуют полосы, соответствующие колебаниям группы O–H, что объясняется адсорбцией воды [14]. Присутствие полосы  $2350\text{ см}^{-1}$  в спектрах образцов 1 и 2, возможно, указывает на наличие примеси  $\text{CO}_2$ , входящей в состав стальной подложки покрытий.

Область спектра  $1100\text{--}900\text{ см}^{-1}$  можно идентифицировать как полосу, характеризующую воду, координационно-связанную с атомами металлов, в данном случае молибдена [15]. Сведения об окислении наружных слоев порошкообразного дисульфида молибдена литературным данным не противоречат [16]:  $\text{MoO}_3$  легко образуется из дисульфида молибдена в воздухе. В области  $450\text{--}500\text{ см}^{-1}$  имеются слабые полосы поглощения валентных колебаний, относящиеся к концевым Mo=S, а в области  $500\text{--}600\text{ см}^{-1}$  к валентным колебаниям связи S–S [17]. Приведенные на рис. 7 спектры близки, что свидетельствует о сохранении агрегатов  $\text{MoS}_2$ .

Проведенные анализы свидетельствуют о том, что в процессе формирования механохимического покрытия при работе пар трения химический состав покрытия не меняется.

**Теоретический анализ адгезионных взаимодействий частиц дисульфида молибдена между собой и со сталью.** С течением времени твердая смазка может удалиться из зоны контакта двух деталей из-за отсутствия достаточно высокой адгезии к материалам деталей. Результаты элементного картирования и ИК-спектроскопии свидетельствуют о сохранении соединения  $\text{MoS}_2$  на сталь-

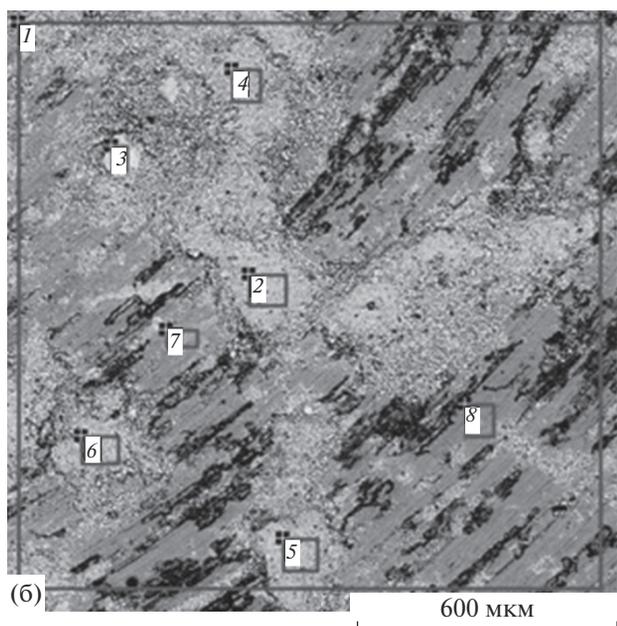
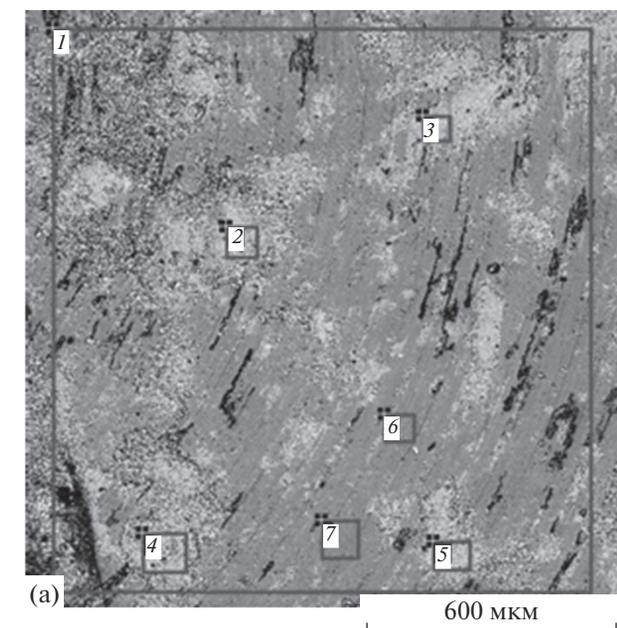


Рис. 5. Образец 1: участки исходного покрытия  $\text{MoS}_2$  (а, б), подвергнутые картированию.

ной поверхности. Атомарное содержание серы и молибдена находится в пропорции 2 : 1. Это свидетельствует о том, что, во-первых, дисульфид молибдена при проведении операций механической очистки не разрушается, а во-вторых, он сохраняет высокую адгезию к защищаемой стальной поверхности.

Для теоретического обоснования этого результата, а также того, что адгезия частиц  $\text{MoS}_2$  друг к другу является низкой (что позволяет использовать дисульфид молибдена в качестве твердой

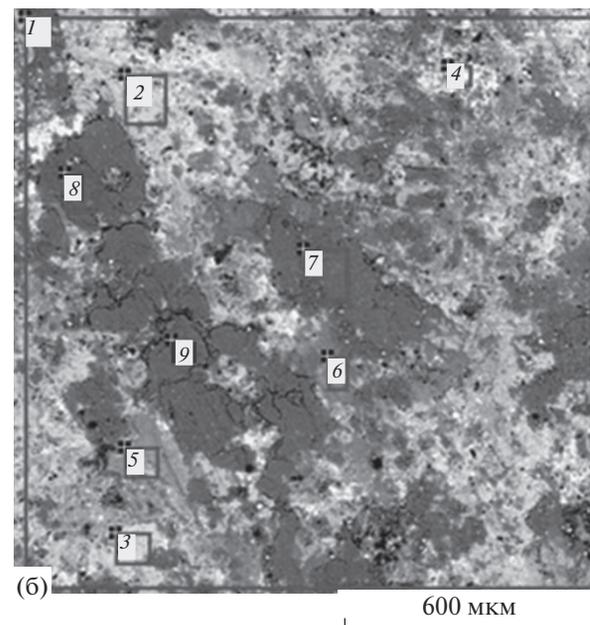
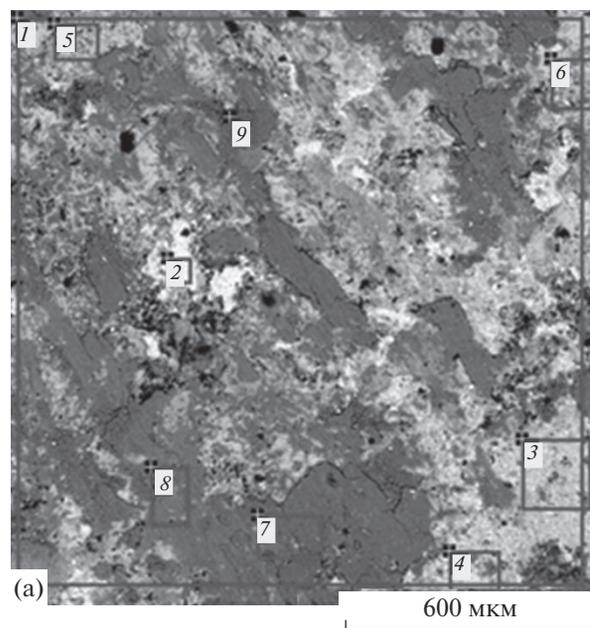


Рис. 6. Образец 2: покрытие  $\text{MoS}_2$  после испытаний на трение: участки в пределах дорожек трения, подвергнутые картированию (а, б).

смазки), проведены расчеты энергии адгезии частиц твердой смазки  $\Delta B_{(1)}$ , имеющих малый, но конечный объем  $\Delta V_{(1)}$ , к ее слою и к поверхности защищаемой детали (в обоих случаях тело  $B_{(2)}$ ). Они опираются на результаты работ по исследованию адгезионного взаимодействия твердых тел [18–22]. В их основе лежит предположение: энергия адгезии двух твердых тел  $W$  равна сумме значений потенциальной энергии взаимодействий слагающих их элементарных частей. Адгезионные свойства железа приравнены к свойствам

**Таблица 2.** Результаты микроанализа различных участков на рис. 5

Номер участка	Содержание, ат. %		S/Mo
	S	Mo	
2(б)	49.05	23.55	2.08
3(б)	64.54	30.49	2.12
4(б)	49.72	25.14	1.98
5(б)	51.32	26.15	1.96
6(б)	49.75	25.00	1.99
2(а)	50.36	26.55	1.90
3(а)	44.76	23.09	1.94
4(а)	50.02	24.03	2.08
5(а)	55.01	28.88	1.90
	Среднее		1.99
6(а)	7.76	4.31	1.80
7(а)	6.80	4.01	1.70
7(б)	15.32	8.51	1.80
8(б)	7.86	3.91	2.01
Среднее (погрешности значительные)			1.83

**Таблица 3.** Результаты микроанализа различных участков на рис. 6

Номер участка	Содержание, ат. %		S/Mo
	S	Mo	
2(а)	45.02	21.77	2.07
3(а)	22.77	11.20	2.03
4(а)	16.92	9.41	1.80
5(а)	12.74	6.44	1.98
6(а)	14.22	6.54	2.17
2(б)	11.85	6.22	1.91
3(б)	4.98	2.38	2.09
4(б)	33.05	16.14	2.05
	Среднее		2.01
5(б)	16.06	8.36	1.92
6(б)	16.16	8.12	1.99
7(б)	11.01	5.80	1.90
8(б)	9.57	5.56	1.72
9(б)	10.94	5.84	1.87
7(а)	10.53	6.22	1.69
8(а)	11.40	5.73	1.99
9(а)	10.84	6.05	1.79
Среднее (погрешности значительные)			1.86

стали. Вычисление энергии адгезии между  $\Delta B_{(1)}$  и  $B_{(2)}$  проводили по формуле:

$$W = w\Delta V_{(1)} = -1.5\left(\frac{\Phi}{\beta^3}\right)\Delta V_{(1)}. \quad (1)$$

Здесь  $\beta$  – параметр, характеризующий скорость убывания до нуля потенциальной энергии взаимодействующих частиц с ростом расстояния;  $\Phi$  – параметр, характеризующий максимальное значение потенциальной энергии.

Формула (1) является следствием представленной в [22] формулы, которая получена для нулевого расстояния между взаимодействующими телами при учете только парных взаимодействий между их элементарными частицами. Значения параметров  $\beta$  и  $\Phi$  вычисляются через значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона взаимодействующих материалов на основании методов, представленных в [18–20]. Ввиду ограниченности объема статьи вывод выражения (1) и методы вычисления параметров  $\beta$  и  $\Phi$  не приводятся.

Характеристики изотропных сред, используемых в расчетах, на основании данных об их анизотропных характеристиках определяли методами, изложенными в [23, 24] с использованием данных о механических свойствах, представленных в [24, 25]. На их основании вычислены модуль Юнга, коэффициент Пуассона материалов:

$$\text{Fe: } E = 21.4 \times 10^{10} \text{ н/м}^2, \quad \nu = 0.26;$$

$$\text{MoS}_2: E = 1.5 \times 10^{10} \text{ н/м}^2, \quad \nu = 0.22.$$

При сравнении между собой значений энергии адгезии частиц диоксида молибдена к слою смазки из того же материала и к поверхности стали считали, что в обоих случаях частицы  $\Delta B_{(1)}$  имеют один и тот же объем  $\Delta V_{(1)}$ . Поэтому вычисляли только представляющую в этом случае интерес ее объемную плотность  $w$ .

В результате получены следующие значения энергии взаимодействия  $w = W/\Delta V_{(1)}$ :

$$\text{MoS}_2\text{–MoS}_2: w = -0.04 \times 10^{10} \text{ Дж/м}^3,$$

$$\text{MoS}_2\text{–Fe: } w = -0.54 \times 10^{10} \text{ Дж/м}^3.$$

Анализируя полученный результат, можно заключить следующее. В обоих случаях энергия адгезионного взаимодействия оказалась отрицательной. Это свидетельствует о том, что частицы  $\Delta B_{(1)}$  из  $\text{MoS}_2$  в обоих случаях находятся в состоянии адгезии – как к слою смазки из того же материала, так и к поверхности стальной смазываемой детали. В последнем случае энергия адгезии на порядок выше. Это соответствует представлению о том, что из-за слабых ван-дер-ваальсовых сил взаимодействия между частицами  $\text{MoS}_2$  их слои

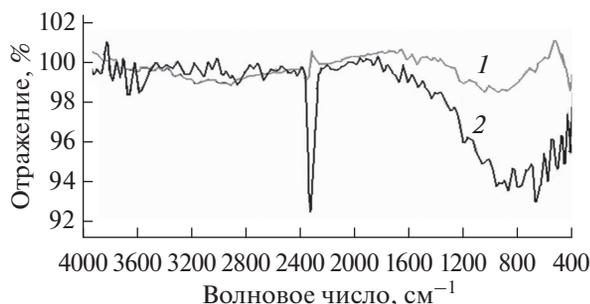


Рис. 7. ИК-спектры образцов с покрытиями  $\text{MoS}_2$  после вибрационной обработки (1) и после испытаний на трение (2).

могут легко скользить друг относительно друга. Это приводит к появлению смазочного эффекта. Вместе с тем адгезия частиц  $\text{MoS}_2$  к поверхности стали дает им возможность не отрываться от нее.

## ВЫВОДЫ

Исследована структура износостойкого твердосмазочного механохимического покрытия  $\text{MoS}_2$ , формируемого в процессе виброволновой обработки. Методами электронно-зондового микроанализа и инфракрасной спектроскопии установлено, что в процессе вибрационной обработки и по мере работы пары трения химический состав покрытия остается неизменным.

Показана возможность расчета адгезии путем применения критериев для линейно упругих материалов с использованием модели, в рамках которой учитываются парные и тройные потенциальные взаимодействия частиц дисульфида молибдена между собой и сталью. Установлено, что адгезия частиц  $\text{MoS}_2$  к стали существенно выше адгезии частиц  $\text{MoS}_2$ — $\text{MoS}_2$ .

Теоретически подтверждено свойство  $\text{MoS}_2$  прилипать к защищаемой стальной поверхности из-за сильной адгезии частиц покрытия при сохранении способности их проскальзывания по слою смазки из того же материала из-за слабой адгезии частиц  $\text{MoS}_2$  друг к другу.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена частично в рамках базовой части Государственного задания Приокскому государственному университету им. И.С. Тургенева на 2017—2019 гг. (код проекта 1.5265.2017/БЧ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pature U.M.R., Narala S.K.R. // Proceed. Institution Mech. Engin. J.: J. Engin. Tribol. 2015. V. 229. № 12. P. 1503.

2. Jia W., Xinyang L., Xuejun C. // Petroleum Processing and Petrochemicals. 2017. V. 48. № 10. P. 75.
3. Nehme G.N. // Wear. 2017. V. 376—377. P. 876.
4. Hu K.H., Hu X.G., Xu Y.E. et al. // Tribol. Lett. 2010. V. 40. № 1. P. 155.
5. Aleksandrov S.E., Speshilova A.B., Tyurikov K.S., Andreeva V.D. // Russ. J. Appl. Chem. 2016. V. 89. № 10. P. 1596.
6. Prasad S.V., Devitt N.T., Zabinski J.S. // Wear. 2000. V. 237. № 2. P. 186.
7. An V., Irtegov Y., de Izarra C. // J. Nanomater. 2014. V. 2014. P. 865839.
8. Antonova N.M., Babichev A.P., Berezovsky V.S. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. № 5. P. 955. doi 10.7868/S0207352817090098
9. Ivanov V.V., Lebedev V.A., Pinahin I.A. // J. Friction and Wear. 2014. V. 35. № 4. P. 339.
10. Lebedev V.A., Ivanov V.V., Fedorov V.P. // Mater. Sci. Engin. 2016. V. 124. P. 3.
11. Иванов В.В., Селеменев М.Ф., Марченко Ю.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2(286). С. 66.
12. Бабичев А.П., Шоркин В.С., Антонова Н.М., Красноступ В.В. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 1(145). С. 3.
13. Иванов В.В. Процессы и методология создания поверхностных слоев высокоресурсных изделий путем вибрационного формирования покрытий комбинированным химико-механическим воздействием: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07. Воронеж: ВГТУ, 2017. 37 с.
14. Белами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. 590 с.
15. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. 536 с.
16. Брейтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. М.: Химия, 1967. 320 с.
17. Сулов А.Ю. Синтез, физико-химические и трибологические свойства наночастиц трисульфида молибдена: Автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.13. М.: ИНХС РАН, 2004. 28 с.
18. Азаров А.С., Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С. // Материаловедение. 2011. № 2. С. 2.
19. Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С. // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2017. № 1. С. 76.
20. Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S. // PNRPU Mechanics Bull. 2013. № 1. P. 235.
21. Dolgov N.A., Romashin S.N., Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S. // Nanomech. Sci. Tech: Intern. J. 2015. V. 6. № 2. P. 117.
22. Presnetsova V.Yu., Romashin S.N., Frolenkova L.Yu. et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engin. 2017. V. 208. P. 012034. doi 10.1088/1757-899X/208/1/012034
23. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 640 с.
24. Гордцов В.А., Лисовенко Д.С. // Инженерная физика. 2009. № 4. С. 36.
25. Самсонов Г.В. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства. М.: Металлургия, 1976. 600 с.

## Adhesion of Vibratory Mechanochemical Hard Lubricant Covering MoS<sub>2</sub>

N. M. Antonova, V. S. Shorkin, S. N. Romashin, A. P. Babichev

It is shown that in the process of vibrowave working a hard lubricant is formed from molybdenum disulfide powder on the steel surface. Morphological peculiarities of the covering are studied. Using methods of electron probe microanalysis and infrared microscopy, it has been found that chemical composition of the covering during vibration processing and after friction tests doesn't change. A theoretical evaluation of the energy of adhesion of MoS<sub>2</sub> covering to the protected steel surface has been carried out using a model that takes into account double and triple potential interactions between particles of contacting materials. The adhesion of MoS<sub>2</sub> particles to steel is shown to be substantially higher than MoS<sub>2</sub>–MoS<sub>2</sub> particles adhesion. The adhesion interaction energy for pairs MoS<sub>2</sub>–MoS<sub>2</sub> ( $-0.04 \times 10^{10}$  J/m<sup>3</sup>) and MoS<sub>2</sub>–Fe ( $-0.54 \times 10^{10}$  J/m<sup>3</sup>) has been calculated. Theoretical calculations confirm the results of experiments concerning adhesion properties of MoS<sub>2</sub> covering.

**Keywords:** mechanochemical covering, hard lubricant, molybdenum disulphide, adhesion, potential interaction, continuum.