

DOI: 10.18698/0236-3933-2015-6-91-102

УДК 621.822.175

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ОПОР ПРИ НАЛИЧИИ ПОСТОРОННИХ ЧАСТИЦ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

А.И. Бивейнис¹, М.Н. Былинкин¹, А.В. Дубинин¹,
К.В. Смолян¹, В.А. Матвеев²

¹Филиал ФГУП “ЦЭНКИ” — “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”,
Москва, Российская Федерация
e-mail: 03@niipm.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

В процессе эксплуатации гироскопов с газодинамическими опорами ротора, в том числе динамически настраиваемых гироскопов, отмечены случаи отказов по моментным характеристикам вплоть до незапусков приборов, связанные с появлением на рабочих поверхностях газодинамических опор ротора загрязнений и посторонних частиц. Приведены результаты исследований таких загрязнений с помощью растрового электронного микроскопа с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором. Для идентификации загрязнений на рабочих поверхностях газодинамических опор ротора методом спектроскопии комбинационного рассеяния света проведен сравнительный анализ загрязнений с образцами органических веществ, применяемых при изготовлении деталей газодинамических опор ротора, а также деталей и сборочных единиц динамически настраиваемых гироскопов. Установлено, что загрязнение состоит из материала органического происхождения и, наиболее вероятно, является связующим веществом доводочных паст, применяемых при изготовлении деталей газодинамических опор ротора для механической обработки износостойких покрытий рабочих поверхностей.

Ключевые слова: гироскоп, газодинамическая опора, газовая смазка, загрязнение, износостойкие покрытия.

EXPERIMENTAL STUDY OF COMPACT GAS-DYNAMIC BEARINGS IN THE PRESENCE OF FOREIGN PARTICLES ON THE WORKING SURFACES

A.I. Biveynis¹, M.N. Bylinkin¹, A.V. Dubinin¹,
K.V. Smolyan¹, V.A. Matveev²

¹Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov (branch of TsENKI), Moscow, Russian Federation
e-mail: 03@niipm.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper considers the cases when gyroscopes with rotor gas-dynamic bearings (GDB) including a dynamically tuned gyroscope (DTG) with compact GDBs fail to operate due to the torque characteristics such as a device unstart, which is associated with contaminants and foreign particles on the working surfaces of GDBs. The paper presents the results of the research into such contaminants which is carried out using the scanning electron microscope with an X-ray energy dispersive micro analyzer. To

identify the foreign particles on the working surfaces of GDBs by Raman spectroscopy, a comparative analysis of the contaminants and samples of organic substances is performed. The latter are used in the manufacture of both GDB parts and assembly units of DTG. It was found out that the contaminants consist of the material of organic origin, and they are likely to be a binder of finishing pastes used in the manufacture of GDB parts for machining wear-resistant work surface coatings.

Keywords: gyroscope, gas-dynamic bearing, gas lubrication, contaminant, wear-resistant coatings.

Основными требованиями, предъявляемыми к материалам подшипников с газовой смазкой, являются возможность высокой точности и чистоты обработки, стабильность и малое значение коэффициента трения, незначительный износ элементов пары трения, достаточная прочность, высокая химическая, коррозионная, эрозионная стойкость и др.[1, 2]. В значительной степени выполнение этих требований обеспечивает элионная обработка деталей газодинамических опор (ГДО): нанесение нитрида титана (TiN) и алмазоподобного углерода (DLC) на их поверхность.

В процессе эксплуатации гироскопов с ГДО, в том числе динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ) с ГДО, отмечены случаи отказов по моментным характеристикам вплоть до незапусков приборов. В результате исследований таких случаев установлено, что отказы связаны с появлением на рабочих поверхностях ГДО загрязнений неизвестного происхождения, чаще всего в виде налета и мазков, выявляемых после разборки отказавших приборов. На рис. 1 приведено фото загрязнения в виде светлого налета, обнаруженного на полусфере ГДО после разборки ДНГ, отказавшего при эксплуатации (незапуск).

Процесс засорения подшипников с газовой смазкой накапливающимся мелким порошком отмечен достаточно давно [3], однако причины этого процесса до конца не изучены. По понятным причинам загрязнения такого рода представляют серьезную опасность для ГДО гироскопов, имеющих малые зазоры (≤ 3 мкм) и относительно большую поверхность взаимодействующих частей опоры [4].

В целях определения состава и происхождения загрязнений на рабочих поверхностях ГДО проведены исследования с помощью растро-

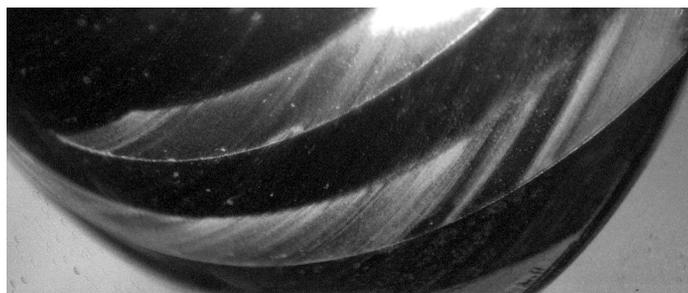


Рис. 1. Загрязнение на рабочей поверхности полусферы ГДО

вого электронного микроскопа (РЭМ) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором. Микроскоп позволяет получать изображение объектов в рассеянных электронах без специальной подготовки поверхности при увеличениях до $\times 300\,000$ и сведения об элементном составе с № 4 Be по № 92 U периодической системы по анализу спектров характеристического рентгеновского излучения поверхности материалов с локальностью до 1×1 мкм².

На РЭМ-изображениях (рис. 2, *а*, *б*) видно, что налет представляет собой гранулированный порошок с характерным размером зерен 0,5... 1 мкм. Большая часть зерен имеет признаки слегка вытянутого в одном направлении призматического кристаллического габитуса со стертими вершинами и ребрами. Встречаются также изометрические зерна почти сферической формы и сильно вытянутые частицы длиной до 4 мкм (рис. 2, *в*).

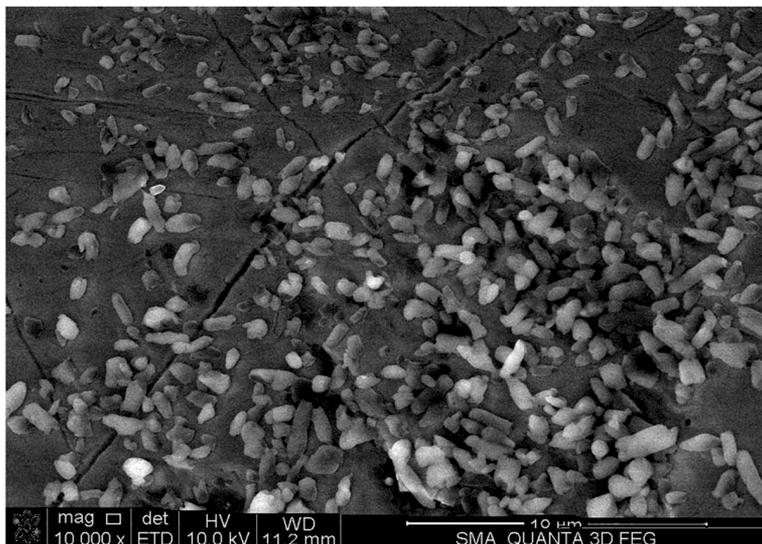
Микрорентгеноспектральный анализ участка с порошком (рис. 3) с использованием энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора РЭМ показал присутствие углерода (до 71 ат. %), а также азота, титана, кислорода, фтора, кремния. При этом надо учитывать, что в область анализа попадает не только налет на поверхности, но и подложка, покрытая нитридом титана (TiN). Для сравнения проведен микрорентгеноспектральный анализ подложки — чистого участка (без порошка) дна канавки. Данные анализа показывают присутствие азота и титана в пропорциях, соответствующих покрытию TiN, а также углерода и кислорода, возможно, находящихся на поверхности в виде мономолекулярной пленки.

Для исключения влияния подложки на результаты анализа произведен соскоб налета с полусферы ГДО на кремниевую пластину (рис. 4).

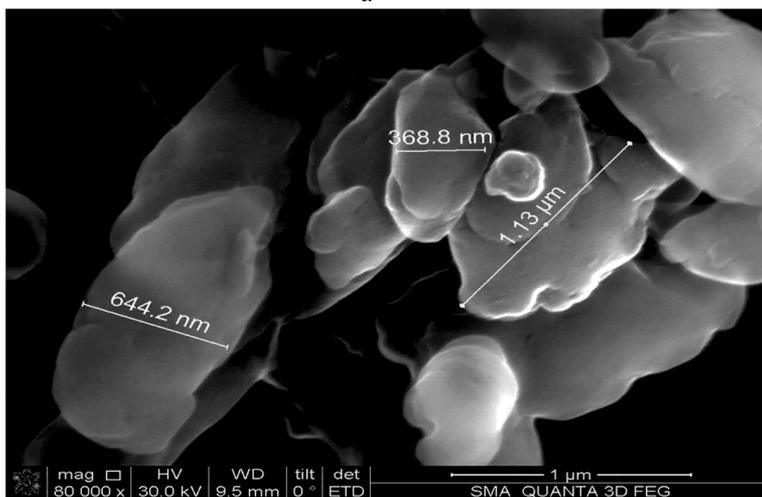
Микроанализ соскоба показал присутствие углерода (до 82 ат. %) и кислорода (до 18 ат. %) (рис. 5). Измерения в разных областях соскоба выявили также присутствие кремния, фтора, алюминия, титана.

Анализ чистой кремниевой пластины выявил присутствие помимо кремния (96 ат. %), малого количества углерода, кислорода и алюминия.

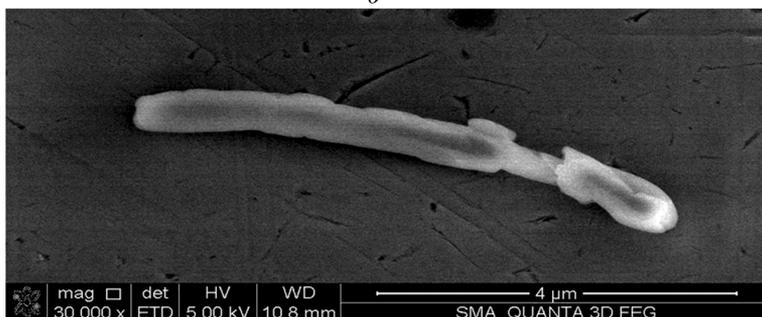
Полученные результаты показывают, что загрязнение, обнаруженное на рабочих поверхностях ГДО и представляющее собой мелкодисперсный порошок, свободно лежащий на поверхности, в основном состоит из конгломератов неструктурированного углеродсодержащего материала. Присутствие фтора в некоторых анализах объясняется остатками фторсодержащей промывочной жидкости (хладон). Присутствие кремния и алюминия в соскобах порошка на кремниевую пластину, наиболее вероятно, связано с наличием указанных элементов в составе самой пластины.



a

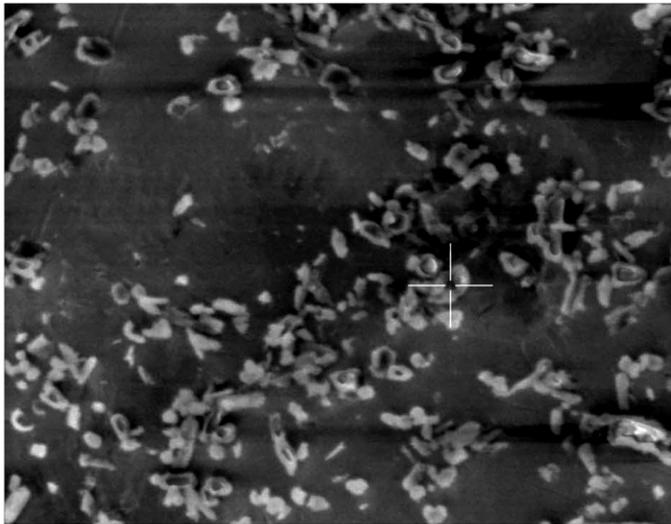


b



v

Рис. 2. Порошок (а, б) и частица (в) на поверхности полусферы ГДО:
a – $\times 10\,000$, *b* – $\times 80\,000$, *v* – $\times 30\,000$



EDS Quantitative Results		
Element	Wt%	At%
CK	54.55	71.03
NK	7.83	8.74
TiL	21.03	6.87
OK	6.00	5.86
FK	6.00	4.94
SiK	4.58	2.55

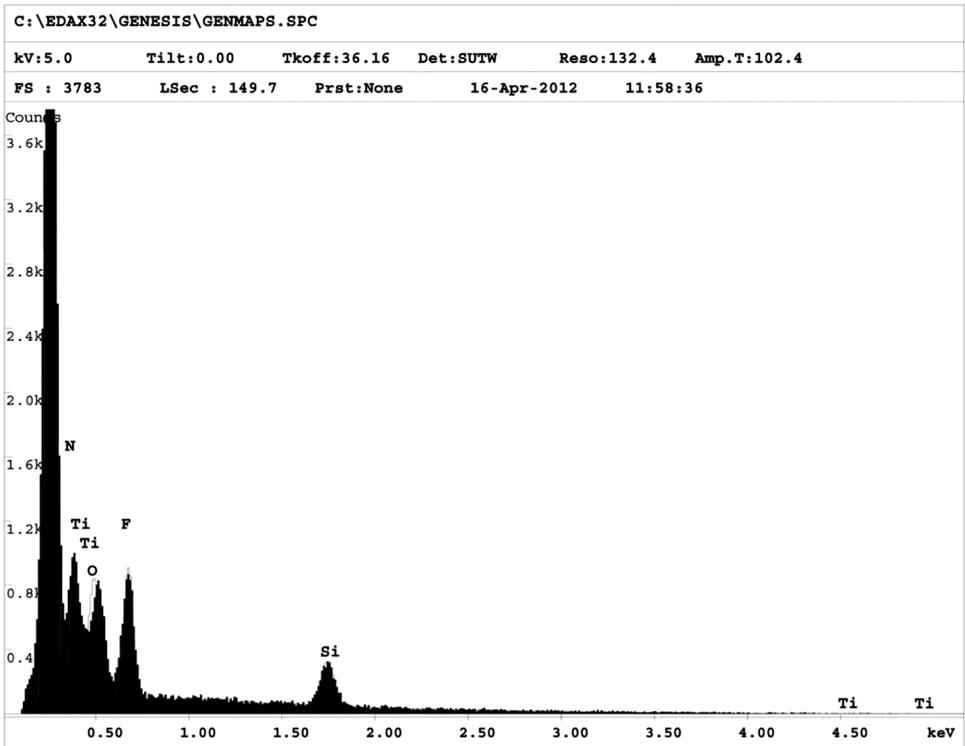
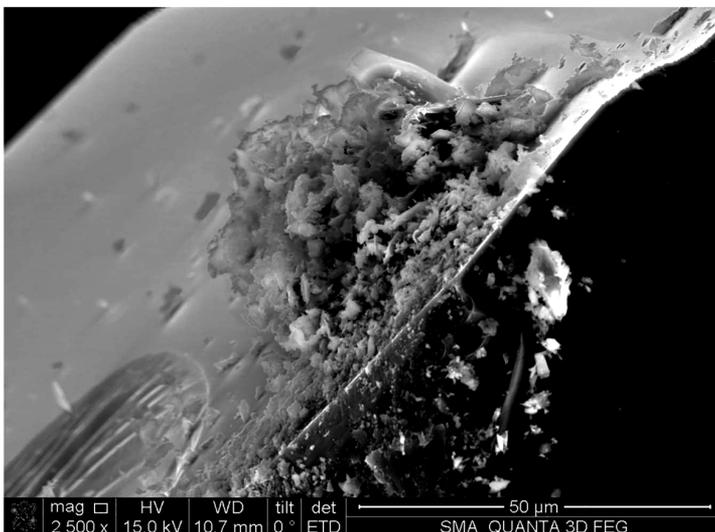
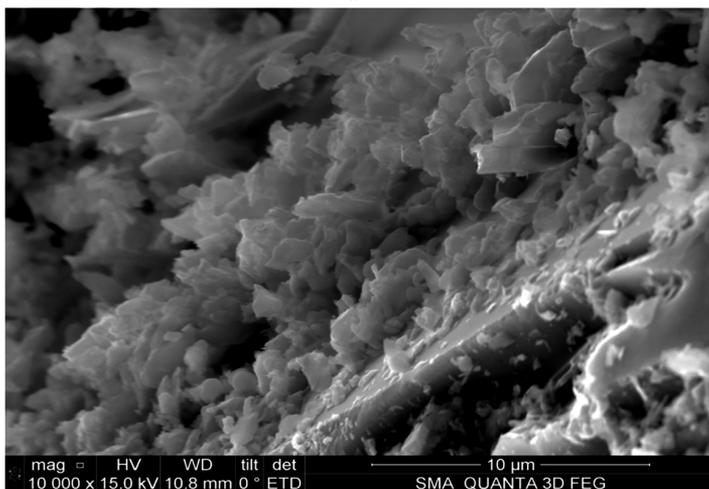


Рис. 3. Микрорентгеноспектральный анализ частиц налета на полусфере ГДО



a



б

Рис. 4. Соскоб налета с кремниевой пластины:
a — $\times 2500$, *б* — $\times 10\,000$)

На рис. 6 приведены спектры, полученные методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света с участков рабочих поверхностей полусфер ГДО, имеющих видимые загрязнения, в сравнении с чистыми участками.

На спектрах КР, полученных с загрязненных участков поверхности исследованных полусфер, присутствуют линии комбинационного рассеяния света в области $2800 \dots 2900 \text{ см}^{-1}$ (рис. 7), соответствующие колебаниям связей С–Н, характерным для органических веществ [5]. На спектрах незагрязненных участков эти линии отсутствуют. Это дает основание утверждать, что загрязнение состоит из материала органического происхождения.

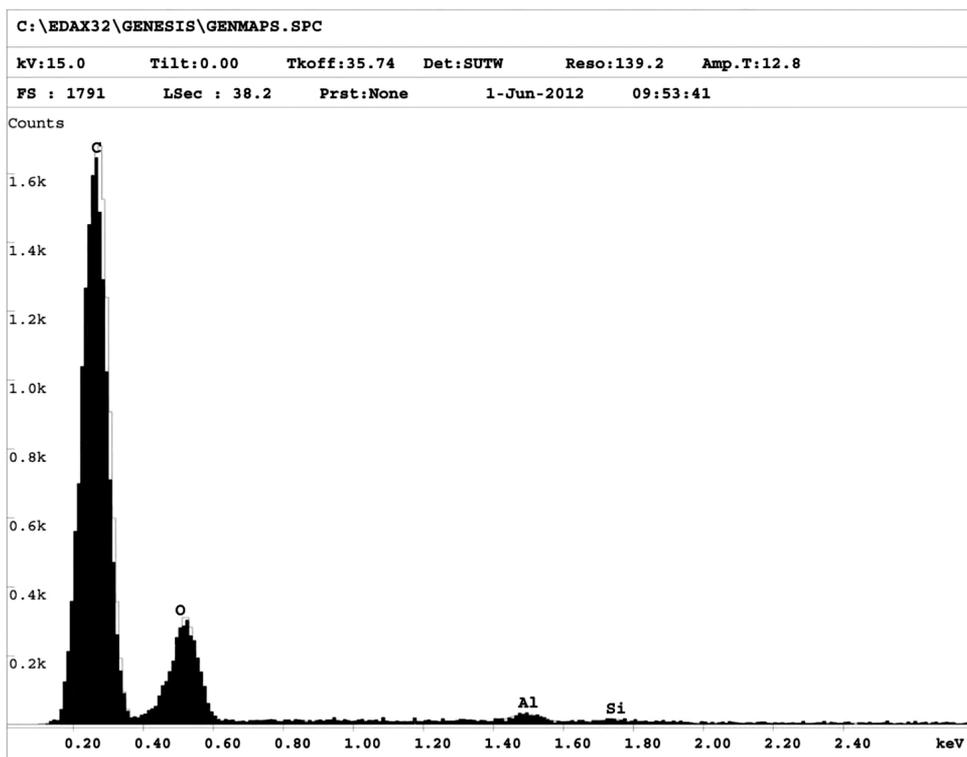
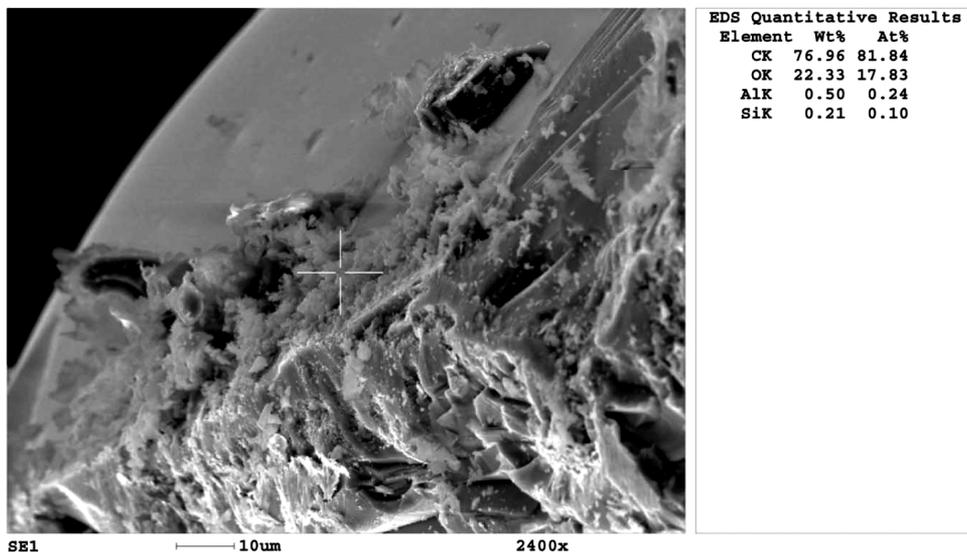


Рис. 5. Микрорентгеноспектральный анализ соскоб с полусферы ГДО

Для более точной идентификации загрязнений на рабочих поверхностях ГДО проведен сравнительный анализ загрязнений и образцов ряда органических веществ, применяемых при изготовлении деталей ГДО, а также деталей и сборочных единиц ДНГ, методом спектроскопии комбинационного рассеяния света.

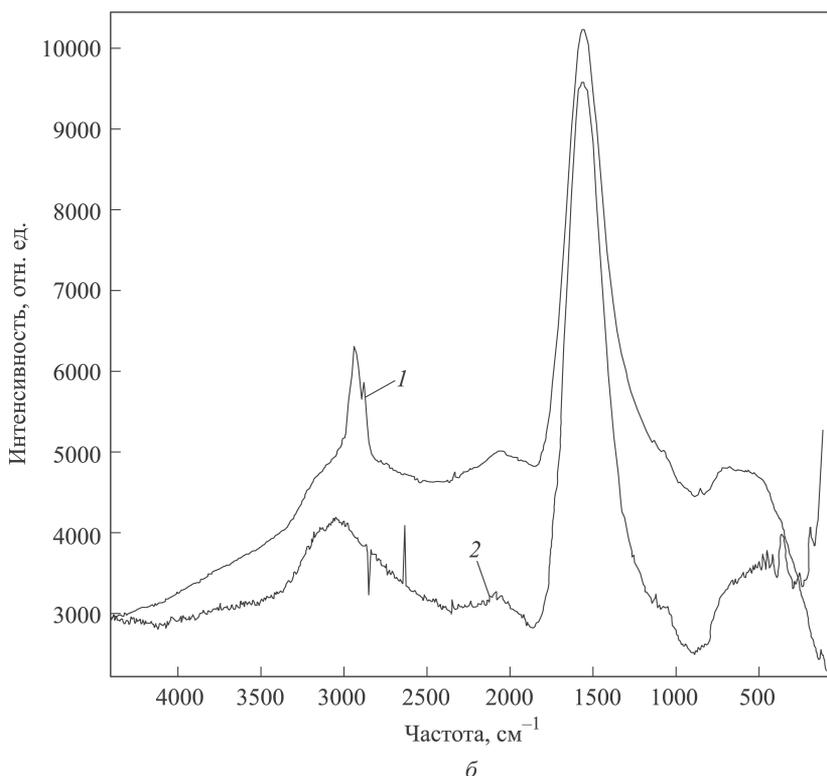
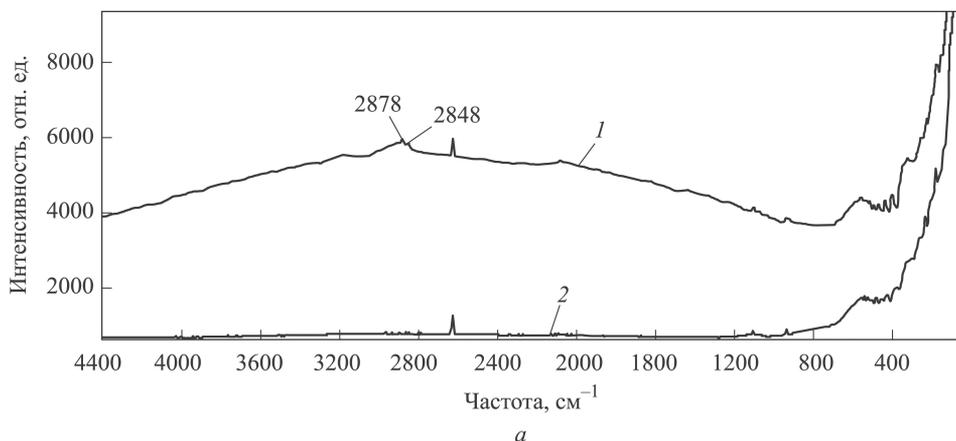


Рис. 6. Спектры КР, полученные при исследовании ГДО:

1 — с загрязненного участка TiN (а) и участка DLC (б); 2 — с чистого участка TiN (а) и участка DLC (б)

Схожие линии спектров КР (рис. 8) в области $2800 \dots 2900 \text{ см}^{-1}$ имеют следующие материалы, используемые при изготовлении ГДО и ДНГ: калий стеариновокислый, масло ВМ, флюс № 6, флюс ФКСп, флюс ФКТ.

Дополнительно были исследованы спектры КР (рис. 9) доводочных паст типа АСМ 5/3 ПВОМЛ, АСМ 2/1 ПВОМЛ, применяемых для

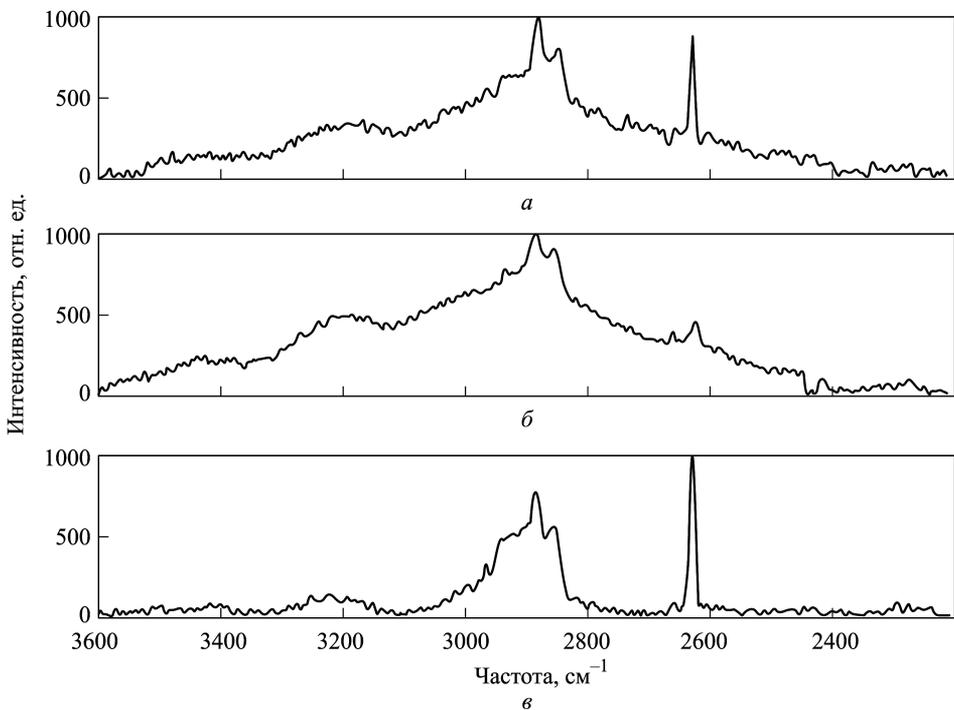


Рис. 7. Спектры КР загрязненных участков ГДО в области 2300...3600 см⁻¹

доводки нитрида титана и алмазоподобного углерода после их нанесения на рабочие поверхности ГДО при изготовлении.

В спектре КР доводочных паст также имеются линии в области 2800...2900 см⁻¹, что свидетельствует о наличии в составе паст органического вещества.

Из всех спектров КР, полученных при анализе образцов, в наибольшей мере соответствуют загрязнению на полусферах (имеют схожие линии КР в области 2800...2900 см⁻¹) калий стеариновокислый, применяемый в ГДО в качестве граничной смазки, флюс № 6, а также связующее доводочных паст.

Важно отметить, что случаи появления загрязнений наблюдались как в ГДО, на детали которых наносилась граничная смазка, так и в ГДО без граничной смазки. При этом все детали ГДО подвергались механической обработке с использованием доводочных паст. Флюс № 6, вероятнее всего, не может являться причиной появления загрязнений, так как применяется в крайне малых количествах для пайки при изготовлении ДНГ и не имеет возможности попасть на рабочие поверхности ГДО.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что загрязнение на рабочих поверхностях ГДО имеет органическое происхождение и, наиболее вероятно, является остатками связующего вещества доводочных паст, которые не полностью удаляются при

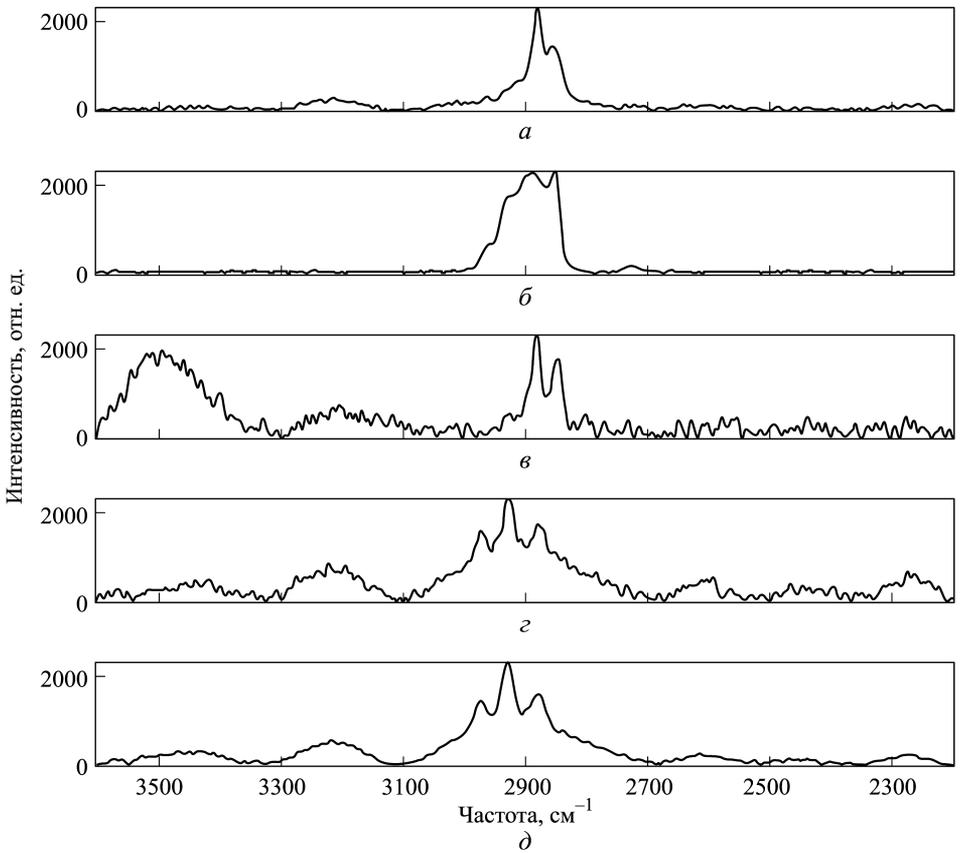


Рис. 8. Спектры КР образцов материалов:

а — спектр КР стеариновокислого калия; *б* — спектр КР масла ВМ; *в* — спектр КР флюса № 6; *г* — спектр КР флюса ФКСп; *д* — спектр КР флюса ФКТ

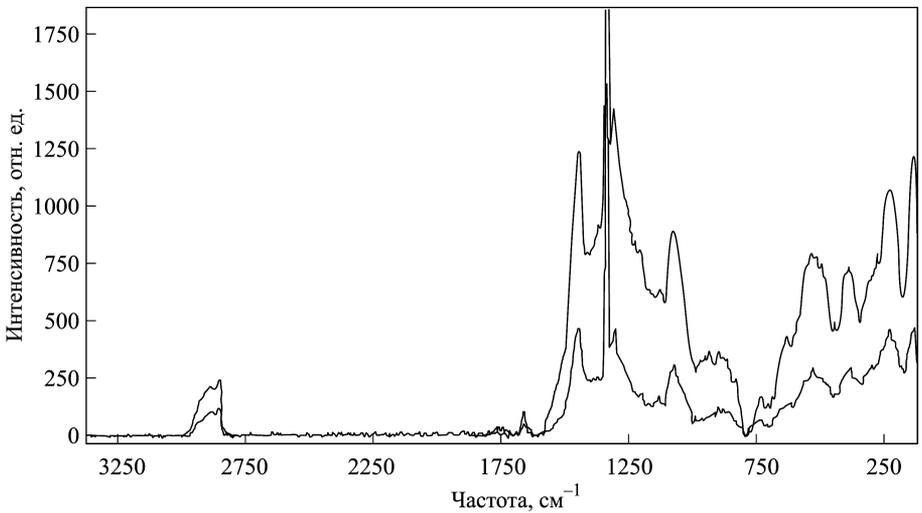


Рис. 9. Спектры КР доводочных паст

проведении промывок после доводки рабочих поверхностей деталей ГДО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинегин С.В., Петров В.П., Гудченко В.М. Исследование материалов для подшипников с газовой смазкой. М.: Наука, 1975. 48 с.
2. Никитин Е.А., Шестов С.А., Матвеев В.А. Гироскопические системы. Ч. III. Элементы гироскопических приборов / под ред. Д.С. Пельпора. М.: Высш.шк., 1988. 432 с.
3. Подшипники с газовой смазкой / под ред. С.А. Харламова. М.: Мир, 1966.
4. Подчерзцев В.П. К расчету газодинамических опор прецизионных гироскопов // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 1. С. 44–50.
5. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 438 с.

REFERENCES

- [1] Pinegin S.V., Petrov V.P., Gudchenko V.M. Issledovanie materialov dlya podshipnikov s gazovoy smazkoy [Research in Materials for Gas Lubricated Bearings]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 48 p.
- [2] Nikitin E.A., Shestov S.A., Matveev V.A. Giroskopicheskie sistemy. Ch. III. Elementy giroskopicheskikh priborov [Gyroscopic Systems. Part III. Elements of Gyroscopic Instruments]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1988. 432 p.
- [3] Kharlamov S.A., ed. Podshipniki s gazovoy smazkoy [Gas-Lubricated Bearings]. Moscow, Mir Publ., 1966.
- [4] Podchezertsev V.P. About calculation gas-dynamic bearings of precision gyroscopes. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2014, no. 1, pp. 44–50 (in Russ.).
- [5] Pretsch E., Bühlmann F., Affolter C. Structure Determination of Organic Compounds. Berlin, Heideberg, 2000.

Статья поступила в редакцию 12.05.2015

Бивейнис Александр Иванович (1953–2015) — главный специалист филиала ФГУП “ЦЭНКИ”–НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова”.

Biveynis A.I. (1953–2015) — Chief Specialist, Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov.

Былинкин Михаил Николаевич — ведущий инженер-технолог филиала ФГУП “ЦЭНКИ–НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова”.

Филиал ФГУП “ЦЭНКИ–НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова”, Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А.

Bylinkin M.N. — leading industrial engineer, Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov (branch of TsENKI).

Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov (branch of TsENKI), ul. Prud Kluchiki 12A, Moscow, 111024 Russian Federation.

Дубинин Александр Викторович — начальник отделения филиала ФГУП “ЦЭНКИ–НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова”.

Филиал ФГУП “ЦЭНКИ–НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова”, Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А.

Dubinin A.V. — Head of Division, Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov (branch of TsENKI).

Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov (branch of TsENKI), ul. Prud Kluchiki 12A, Moscow, 111024 Russian Federation.

Смолян Корней Владимирович — заместитель начальника отдела филиала ФГУП “ЦЭНКИ–НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова”.

Филиал ФГУП “ЦЭНКИ–НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова”, Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А.

Smolyan K.V. — Deputy Head of Department, Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov (branch of TsENKI).

Scientific and Research Institute for Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov (branch of TsENKI), ul. Prud Kluchiki 12A, Moscow, 111024 Russian Federation.

Матвеев Валерий Александрович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель НТК факультета ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Matveev V.A. — D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Information Security, Head of the Research-Educational Complex of the Faculty Informatics and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бивейнис А.И., Былинкин М.Н., Дубинин А.В., Смолян К.В., Матвеев В.А. Экспериментальное исследование малогабаритных газодинамических опор при наличии посторонних частиц на рабочих поверхностях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 6. С. 91–102.

Please cite this article in English as:

Biveynis A.I., Bylinkin M.N., Dubinin A.V., Smolyan K.V., Matveev V.A. Experimental study of compact gas-dynamic bearings in the presence of foreign particles on the working surfaces. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 6, pp. 91–102.