

Рентгеноэлектронное исследование защитных поверхностных слоев нитрованного масла на армко-железе

*по материалам XXIII Всероссийской конференции с международным участием
«Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь»
(Воронеж, 1–4 октября 2019)*

©2019 И. Н. Шабанова^{1✉}, С. М. Решетников^{1,3}, Е. А. Наймушина^{1,2},
Н. С. Терехова¹, Н. Ю. Исупов¹

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН
ул. им. Татьяны Барамзиной, д. 34, 426067 Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация

²Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, д. 7, 426069 Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация

³Удмуртский государственный университет
ул. Университетская, д. 1, 426034 Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация

Аннотация. Изучены рентгеноэлектронные спектры адсорбционных слоев нитрованного масла, используемого как ингибитор коррозии, на поверхности армко-железа. Определено межатомное взаимодействие между компонентами нитрованного масла и поверхностью армко-железа при температурах от комнатной до 500 °С. Исследование проводилось на уникальном отечественном магнитном рентгеноэлектронном спектрометре с высокой разрешающей способностью и светосилой.

Ключевые слова: рентгеноэлектронные спектры, межатомное взаимодействие, нитрованное масло.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что ингибиторы коррозии получили широкое применение в различных отраслях народного хозяйства как в отечественной, так и в зарубежной литературе отмечается явный недостаток работ, посвящённых исследованию механизма действия ингибиторов на современном уровне. В частности, почти нет работ, посвящённых исследованию электронной структуры и механизмов межатомного взаимодействия ингибиторов с поверхностью металла.

Защиту от атмосферной коррозии осуществляют с помощью составов на основе нефтяных масел, в которых добавляется ингибитор коррозии. Различают плотные смазки (минеральные масла высокой вязкости) и жидкие смазки (минеральные масла с растворёнными в них ингибиторами коррозии). Одним из эффективных способов защиты металлоконструкций от атмосферной коррозии в период хранения и транспортировки является применение консервационных масел [1, 2]. Ингибирующие присадки и композиции на основе нитрованных минеральных масел способствуют

образованию на поверхности металла адсорбционной пленки, препятствующей прониканию агрессивных веществ и влаги. Наиболее эффективны присадки получают нитрованием масла. Главное в существующих технологиях нитрования – избежать окислительного действия азотной кислоты на исходные масла. Для этого используют так называемые нитрующие смеси, в частности смесь концентрированных серной и азотной кислот. Получаемые нитросоединения представляют собой нитроалкилы. Высокая адсорбционная способность на железе обеспечивается нитрогруппой, образующей с металлом донорно-акцепторные связи. Для повышения защитных свойств масел, содержащих нитрованные алкилы, в состав композиций добавляют органические кислоты. Они также способны к адсорбции на поверхности железа и способствуют повышению сплошности, бездефектности защитной пленки, образуемой нитропродуктами [3–6].

Упростить процесс получения антикоррозионной присадки к консервационным маслам позволяет метод окислительного нитрования минеральных масел концентрированной азот-

✉ Шабанова Ирина Николаевна, e-mail: xps@udman.ru



ной кислотой (не менее 60 масс. %), в ходе которого параллельно проходят два процесса: нитрование и реакция частичного окисления углеводородов с образованием органических кислот, т. е. готовой масляной ингибированной композиции. Таким образом, в настоящей работе исследовалось нитрованное минеральное масло, получаемое путем воздействия концентрированной азотной кислотой на исходное масло.

Целью работы было исследование межатомного взаимодействия в защитных слоях полученных продуктов нитрования масел на поверхности армко-железа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В основе исследований температурной зависимости структуры защитного слоя лежит изучение изменения формы C1s, O1s, Fe2p, N1s-электронных спектров, полученных на уникальных отечественных магнитных рентгеноэлектронных спектрометрах.

В рентгеноэлектронной спектроскопии применяют различные типы монохроматоров для фокусировки электронов [7, 8]: магнитные и электростатические.

В магнитных электронных спектрометрах для фокусировки электронов используют магнитное поле. Тип магнитного спектрометра, успешно применяемый для рентгеноэлектронной спектроскопии, представляет собой спектрометр с двойной фокусировкой без железных деталей. Двойная фокусировка обеспечивается неоднородным магнитным полем, создаваемым набором цилиндрических катушек. Двойная фокусировка электронов магнитным полем, предложенная Зигбаном [9], позволяет достичь лучшего разрешения по сравнению с электростатической при прочих равных условиях.

Спектрометры с магнитным монохроматором имеют ряд существенных преимуществ перед электростатическими [10]. Анализатор магнитного типа конструктивно отделен от вакуумной камеры спектрометра. Это позволяет применять различные способы воздействия на образец, сопровождающиеся интенсивным выделением агрессивных газовых потоков непосредственно в вакуумном объеме спектрометра без ущерба для фокусирующих свойств прибора. В электростатических же приборах такое газовыделение приводит к нарушению чистоты поверхности стенок вакуумной камеры, являющейся электродами энергоанализатора, что отражается на ухудшении фокусировки электронов.

Кроме того, преимуществом электронных

магнитных спектрометров по сравнению с электростатическими, является постоянство светосилы и разрешения по всей энергетической области. Это особенно важно для изучения спектров валентных полос, которые также контрастны, интенсивны и разрешены, как и спектры внутренних уровней.

Таким образом, электронные магнитные спектрометры, обладая очень высокой точностью в измерении электронных спектров, позволяют использовать в эксперименте практически любые технологические приставки и приспособления для дополнительно физико-химического и механического воздействия на исследуемый образец во время исследования. Возможность использования нагрева, плавления, охлаждения, распыления, механической чистки, излома, химической обработки поверхности и т. п. ставит электронные магнитные спектрометры с двойной фокусировкой в ряд совершенно уникальных приборов современной экспериментальной науки [11].

Объектами исследований являлись:

1. Подложка из армко-железа.
2. Тонкий слой минерального масла И-20 нанесенный на поверхность подложки из армко-железа.
3. Тонкий слой минерального масла И-20 после нитрования, нанесенный на поверхность подложки из армко-железа.
4. Для идентификации химической связи Fe-N исследовались тонкие слои нитробензойной кислоты, бензотриазола, трилона на армко-железе.

Исследованное масло получено из минерального масла И-20 после нитрования. Нитрование проведено концентрированной 60 % азотной кислотой при температуре 100- 120 °С в течение 5–24 часов. Смесь продуктов нитрования подщелачивали едким натром до pH = 7.7–10.5, после чего масляную фракцию отделяли от водной. Продукты нитрования при взаимодействии с водным раствором щелочи, в частности, продукты окисления масла превращались в соответствующие натриевые соли органических кислот.

Проведенные коррозионные испытания показали снижение скорости коррозии по сравнению со стандартными консервационными смазками К-17, К-ПВК в 4–5 раз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучались особенности химического строения поверхностных защитных слоев, получаемых при адсорбции консервационных композиций на основе минеральных масел на армко-железе.

Получены рентгеноэлектронные C1s, O1s, Fe2p, N1s- спектры внутренних уровней исследованных образцов.

Рентгеноэлектронное исследование поверхности подложки из армко-железа, на которую в дальнейшем наносилось изучаемое масло, показало, что при комнатной температуре в спектре Fe2p присутствуют две составляющих Fe_{чист} (707.0 eV) и Fe–O (710 eV) (рис. 1a), в O1s-спектре две составляющих от связи Fe с O (530 eV) и O_{адс} (532.3 eV) кислорода, адсорбированного на поверхности образца.

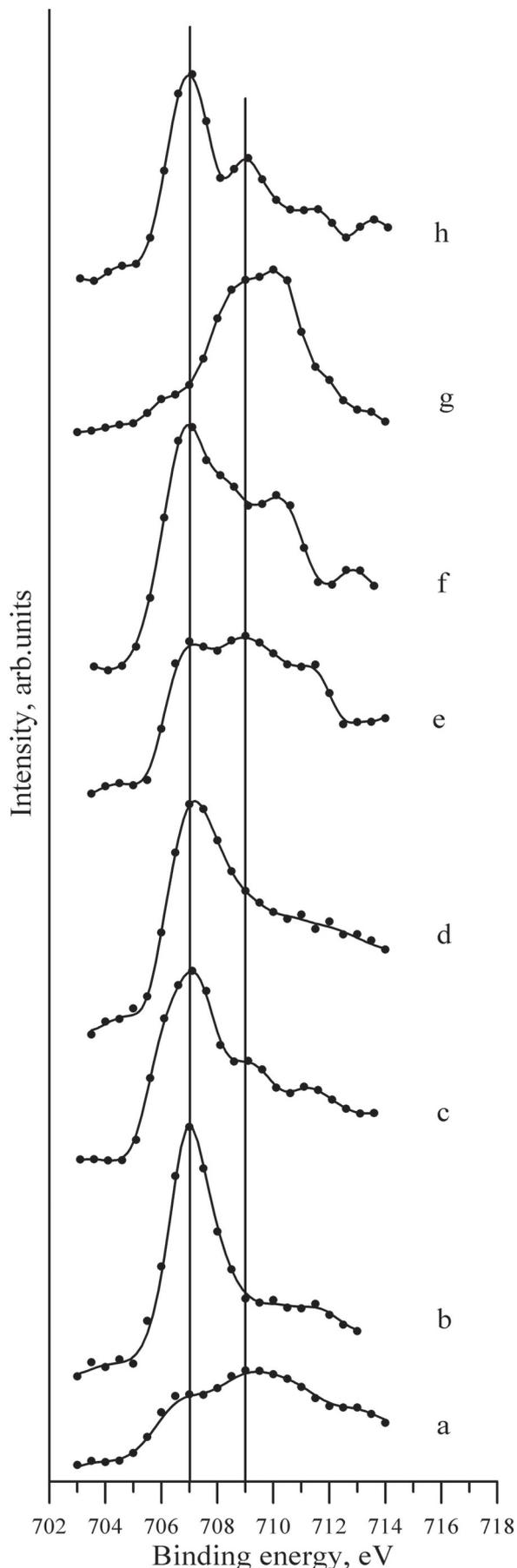
После очистки поверхности образца от загрязнений нагревом (от 50 до 500 °С) поверхность армко-железа очищается от окисла, и в Fe2p-спектре остается составляющая Fe_{чист} (707.0 eV) (рис. 1b). Положение максимума C1s-спектра не изменяется и соответствует связи в углеводородах C–H (285 eV), но при нагреве контрастность спектра уменьшается вдвое. Образование связи Fe–C не обнаружено.

В Fe2p спектре образца тонкого слоя минерального масла на армко-железе, не подвергавшегося процессу нитрования, уже без нагрева присутствуют две составляющие Fe_{чист} (707 eV) и максимум Fe–O (709 eV), совпадающего по положению с Fe₂O₃ (рис. 1c). При нагреве вплоть до менее 500 °С сохраняется небольшой максимум Fe–O (рис. 1d). В спектре O1s при температуре меньше 500 °С также присутствует небольшая составляющая O–Fe (530 eV).

В спектре Fe2p нитрованного масла на армко-железе без нагрева кроме максимума в спектре

Рис. 1. Рентгеноэлектронные Fe2p-спектры: a) поверхности армко-железа без нагрева; b) поверхности армко-железа при нагреве; c) минерального масла на поверхности армко-железа без нагрева; d) минерального масла на поверхности армко-железа при нагреве; e) нитрованного масла на поверхности армко-железа без нагрева; f) нитрованного масла на поверхности армко-железа при нагреве; g) нитробензойной кислоты на поверхности армко-железа без нагрева; h) нитробензойной кислоты на поверхности армко-железа при нагреве

[Fig. 1. The XPS Fe2p-spectra of: a) armco-iron surface without heating; b) armco-iron surface at heating; c) mineral oil on the surface of armco iron without heating; d) mineral oil on the surface of armco iron at heating; e) nitrated oil on the surface of armco iron without heating; f) nitrated oil on the surface of armco iron at heating; g) nitrobenzoic acid on the surface of armco iron without heating; h) nitrobenzoic acid on the surface of armco iron at heating]



Fe2p в области чистого железа, имеются максимумы в области связи Fe–O (709–711 eV) (рис. 1e). При нагреве до температуры ~ 100–200 °C в спектре Fe2p увеличивается максимум, характерный для области чистого железа. При температуре выше 200 °C положение основного максимума в спектре Fe2p соответствует чистому железу или ковалентной (донорно-акцепторной связи) железа с азотом Fe–N (707.0 eV) (рис. 1f). В спектре O1s имеются два максимума, характерные для окисла железа и адсорбированного кислорода. В спектре N1s без нагрева помимо основного максимума с энергией 401 eV, характерного для связи N–O (N–Fe–O), в области меньших энергий связи наблюдается небольшой максимум, соответствующий связи N–Fe (рис. 2a). При нагреве выше 200 °C кроме связи N–Fe–O выявляется интенсивный максимум N–Fe с энергией связи 399 eV (рис. 2b). Выше 300 °C часть атомов азота испаряется, но связь N–Fe сохраняется и при нагреве до 500 °C.

Исследование тонкого слоя нитробензойной кислоты на армко-железе показало, что без нагрева максимум спектра Fe2p принадлежит окисленному железу (рис. 1g). При нагреве в спектре Fe2p появляется составляющая с энергией связи 707 eV (рис. 1h). Эта энергия связи характерна для чистого железа или для ковалентной (донорно-акцепторной) связи Fe–N. Спектр N1s без нагрева (рис. 2c) имеет один максимум с энергией связи 401 eV, характерный для связи N–O (N–Fe–O). В спектре N1s после нагрева в области меньших энергий проявляется составляющая, характерная для связи N–Fe (399 eV), и остается максимум от связи N–Fe–O (401 eV) (рис. 2d).

Температурные исследования бензотриазола и трилона на армко-железе показали отсутствие связи Fe–N, что связано с тем, что азот в этих соединениях не образует с железом прочных адсорбционных связей

Таким образом, результаты исследования образца нитрованного масла и сравнение их с эталоном показывают, что:

1) В защитном поверхностном слое образуются донорно-акцепторная связь железа и азота: Fe–N.

2) При нагреве свыше 200 °C содержание азота, не связанного прочной связью с подложкой, уменьшается, т. е. азот частично испаряется, но связь Fe–N ковалентная (донорно-акцепторная) сохраняется вплоть до 500 °C.

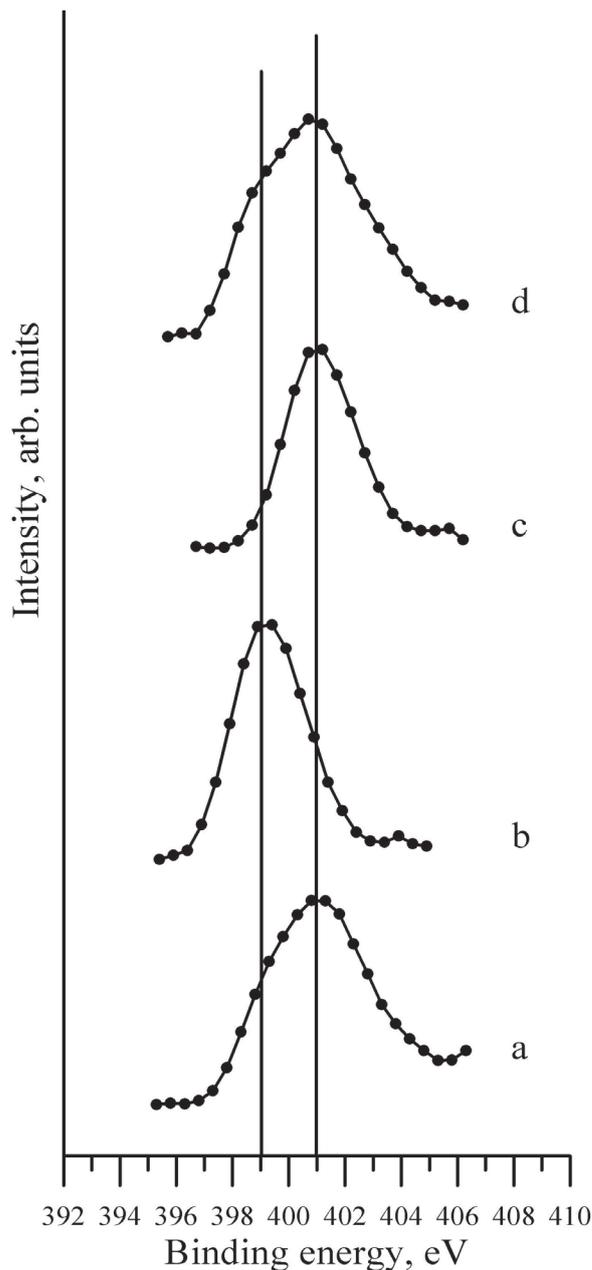


Рис. 2. Рентгеноэлектронные N1s-спектры: а) нитрованного масла на поверхности армко-железа без нагрева; б) нитрованного масла на поверхности армко-железа при нагреве; в) нитробензойной кислоты на поверхности армко-железа без нагрева; г) нитробензойной кислоты на поверхности армко-железа при нагреве

[Fig. 2. The XPS N1s-spectra of: a) nitrated oil on the surface of armco iron without heating; b) nitrated oil on the surface of armco iron at heating; c) nitrobenzoic acid on the surface of armco iron without heating; d) nitrobenzoic acid on the surface of armco iron at heating]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены рентгеноэлектронные спектры адсорбционных слоёв нитрованного масла и эталонов на поверхности армко-железа.

Установлены закономерности изменения химической связи в поверхностных слоях армко-железа с адсорбционными слоями нитрованного масла, исследована природа межатомного взаимодействия поверхностных слоев армко-железа с атомами азота и кислорода из адсорбционных слоев нитрованного масла, установлены температурные условия формирования и пределы устойчивости формируемых защитных слоев в интервале от комнатных температур до 500 °С.

Показано, что формирование прочного защитного слоя при адсорбции нитрованного масла происходит за счет образования прочных химических связей (донорно-акцепторных) атомов железа с атомами азота.

Полученные результаты направлены на повышение эффективности применения известных ингибиторов в технологии получения консервационных композиций на основе нитрованных масел.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ гос. регистрации АААА-А17-117022250040-0).

Исследования выполнялись с использованием оборудования ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН, поддержанного Минобрнауки в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Уникальный идентификатор проекта – RFMEFI62119X0035).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анурьев С. Г., Киселев И. А. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии // *Молодой ученый*, 2017(11.3), с. 57–59.
2. Миронов Е. Б., Косолапов В. В., Тарукин Е. М., Маслов М. М. Оценка консервационных материалов для защиты от коррозии рабочих органов сельскохозяйственной техники // *Вестник НГИЭИ*, 2015, 8(51), с. 45–57.
3. Крейн С.Э., Шехтер Ю.Н. *Нитрованные масла (производство и применение)*. М.: Химия, 1967, 180 с.
4. Шехтер Ю. Н., Школьников В. М., Богданова Т. И. Милованов В. Д. *Рабоче-консервационные смазочные материалы*. М.: Химия, 1979, 256 с.
5. Богданова Т. И., Шехтер Ю. Н. *Ингибированные нефтяные составы для защиты от коррозии*. М.: Химия, 1984, 247 с.
6. Левитин М. К., Шехтер Ю. Н., Крейн С. Э., и др. *Способ получения ингибитора коррозии к смазочным маслам*. А. С. 162616 СССР, 1964.
7. Афанасьев В. П., Явор С. Я. *Электростатические анализаторы для пучков заряженных частиц*. М.: Атомиздат, 1978, 224 с.
8. Фридрихов С. А. *Энергоанализаторы и монохроматоры для электронной спектроскопии*. Ленинград: ЛГУ, 1978, 158с
9. Sigbahn K., Edvarson K. X-Ray Spectroscopy in the precision range of 1:105. *Nucl. Phys.*, 1956(1), pp. 137–147.
10. Трапезников В. А., Евстафьев А. В., Сапожников В. П., Ключников О. И., Шабанова И. Н., Максютлов Ф. Б., Соколов О. Б., Кузнецов В. Л. Рентгеноэлектронный магнитный спектрометр // *ФММ*, 1973, т. 36(6), с. 1293–1305.
11. Шабанова И. Н., Добышева Л. В., Варганов Д. В., Карпов В. Г., Ковнер Л. Г., Ключников О. И., Манакон Ю. Г., Махонин Е. А., Хайдаров А. В., Трапезников В. А. Новые автоматизированные рентгеноэлектронные магнитные спектрометры: спектрометр с технологическими приставками и манипуляторами, спектрометр для исследования расплавов // *Известия Академии наук СССР. Серия физическая*, 1986, т. 50(9), с. 1677–1682.

XPS Investigation of the Protective Layers of Nitrated Oil on the Armco-Iron Surface

*based on the materials of the XXIII All-Russian Conference with International Participation
«X-ray and electron spectra and chemical bonds»
(Voronezh, October 1–4, 2019)*

©2019 I. N. Shabanova^{1✉}, S. M. Reshetnikov^{1,3}, E. A. Naimushina^{1,2},
N. S. Terebova¹, N. Yu. Isupov¹

¹*Institution of Science «Udmurt Federal Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences»
34 named after Tatyana Baramzina str., 426067 Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation*

²*T. M. Kalashnikov Izhevsk State Technical University*

³*7, Studencheskaya str., 426069 Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation*

³*Udmurt State University*

1, Universitetskaya str., bld. 1, off. 240, 426034 Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation

Abstract

Objectives. The XPS spectra of the adsorption layers of nitrated oil used as antirust inhibitor on the surface of armco-iron were studied. The interatomic interaction between the components of the nitrated oil and the armco-iron surface is revealed in the temperature range of room temperature – 500 °C.

Purpose. The objective of the work is the interatomic interaction in the protective layers of nitrated oils on the armco-iron surface.

Methods and methodology. The X-ray photoelectron spectroscopy studies were performed on an X-ray electron magnetic spectrometer with resolution of 10^{-4} and luminosity – 0.085 % at the excitation with AlK α line 1486.5 eV. In contrast to an electrostatic spectrometer, a magnetic spectrometer has a number of advantages due to the constructive possibilities of X-ray electron magnetic spectrometers which are the constancy of luminosity and resolution regardless of the energy of electrons, the high contrast of spectra, and the possibility of external actions on a sample (in the considered case, heating) during spectra taking.

Results. The comparison of the results of the investigation of the nitrated oil sample with those obtained for the reference sample shows that:

1. In the protective surface layer between atoms of iron and nitrogen are formed the donor-acceptor bond Fe–N.
2. At heating to the temperatures above 200 °C the content of nitrogen, which is not strongly bound to the substrate, decreases, i.e. nitrogen is partially evaporated; however the donor-acceptor bond Fe–N remains at heating to 500 °C.

Conclusions. The results should increase the effectiveness of the use of known inhibitors and the technology for producing preservation compositions based on nitrated oils.

Keywords: XPS spectra, interatomic interaction, nitrated oil.

SOURCE OF FINANCING

The work was performed as part of a state assignment (state registration number AAAA-A17-117022250040-0).

This study was performed using the equipment of the Shared Use Centre «Centre of Physical and Physicochemical Methods of Analysis and Study of the Properties and Surface Characteristics of

Nanostructures, Materials, and Products» of the Institution of Science «Udmurt Federal Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», supported by the Ministry of Education and Science in the framework of the Federal Target Program «Research and Development in Priority Directions for the Development of the Russian Science and Technology Complex for 2014–2020» (The unique identifier of the project is RFMEFI62119X0035).

✉ Shabanova Irina Nikolaevna, e-mail: xps@udman.ru

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Anur'ev S. G., Kiselev I. A. Zashhita sel'skoho-zhajstvennoj tehniki ot korrozii [Protection of agricultural machinery from corrosion]. *Molodoy uchenyj* [Young Scientist], 2017(11.3), pp. 57–59. (in Russ.)
2. Mironov E. B., Kosolapov V. V., Tarukin E. M., Maslov M. M. Evaluation of conservation materials to protect against corrosion working organs agricultural machinery. *Bulletin NGIEI*, 2015(8), pp. 45–57. (in Russ., abstract in Eng.)
3. Krejn S. Je., Shehter Ju. N. *Nitrovannye masla (proizvodstvo i primenenie)* [Nitrated oils (production and use)]. Moscow, Himija Publ., 1967, 180 p. (in Russ.)
4. Shekhter Yu. N., Shkolnikov V. M., Bogdanova T. I. Milovanov V.D. *Raboche-konservacionnye smazochnye materialy* [Working and conservation lubricants]. Moscow, Himija Publ., 1979, 256 p. (in Russ.)
5. Bogdanova T. I., Shehter Ju. N. *Ingibirovannye neftjanye sostavy dlja zashhity ot korrozii* [Inhibited oil formulations for corrosion protection]. Moscow, Himija Publ., 1984, 247 p. (in Russ.)
6. Levitin M. K., Shehter Ju. N., Krejn S. Je., et al. *Sposob poluchenija ingibitora korrozii k smazochnym*

maslam [Method of obtaining a corrosion inhibitor to lubricating oils]. Certificate of authorship No. 162616 USSR, 1964. (in Russ.)

7. Afanas'ev V. P., Javor S. Ja. *Jelektrostaticheskie analizatory dlja puchkov zarjzhennyh chastic* [Electrostatic analyzers for charged particle beams.]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978, 224 p. (in Russ.)
8. Fridrihov S. A. *Jenergoanalizatory i monohromatory dlja jelektronnoj spektroskopii* [Energy analyzers and monochromators for electron spectroscopy]. Leningrad: LGU, 1978, 158 s.
9. Sigbahn K., Edvarson K. X-Ray Spectroscopy in the precision range of 1:105. *Nucl. Phys.*, 1956, no. 1, pp. 137–147.
10. Trapeznikov V. A., Evstaf'ev A. V., Sapozhnikov V. P., Kljushnikov O. I., Shabanova I. N., Maksjutov F. B., Sokolov O. B., Kuznecov V. L. Rentgenojelektronnyj magnitnyj spektrometr [X-ray magnetic spectrometer], *FMM* [The Physics of Metals and Metallography], 1973, v. 36(6), pp. 1293–1305. (in Russ.)
11. Shabanova I. N., Dobysheva L. V., Varganov D. V., Karpov V. G., Kovner L. G., Kljushnikov O. I., Manakov Ju. G., Mahonin E. A., Hajdarov A. V., Trapeznikov V. A., Novye avtomatizirovannye rentgenojelektronnye magnitnye spektrometry: spektrometr s tehnologicheskimi pristavkami i manipulyatorami, spektrometr dlja issledovaniya rasplavov // *Izvestija Akademii nauk SSSR. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics], 1986, v. 50(9), pp. 1677–1682. (in Russ.)

Шабанова Ирина Николаевна – д. ф.-м. н., профессор, гл. н. с., Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация; e-mail: xps@udman.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7896-0843>.

Решетников Сергей Максимович – д. х. н., профессор, профессор кафедры Фундаментальной и прикладной химии, Удмуртский государственный университет; с. н. с., Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация; e-mail: smr41@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3072-2341>.

Наймушина Екатерина Александровна – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры физики и оптотехники, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова; н. с., Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация; e-mail: naimushina_ekaterina@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6023-4672>.

Irina N. Shabanova – Dr. Sci. (Phys.- Math.), Professor, Chief Researcher, Institution of Science «Udmurt Federal Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation; e-mail: xps@udman.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7896-0843>.

Sergey M. Reshetnikov – Dr. Sci. (Chem.), Full Professor, Professor of the Department of Fundamental and Applied Chemistry, Udmurt State University; Senior Researcher, Institution of Science «Udmurt Federal Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation; e-mail: sms41@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3072-2341>.

Ekaterina A. Naimushina – Cand. Sci. (Phys.- Math.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Optical Engineering, T. M. Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Researcher, Institution of Science «Udmurt Federal Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation; e-mail: naimushina_ekaterina@mail.ru. ORCID iD: [http://orcid.org/0000-0002-6023-4672](https://orcid.org/0000-0002-6023-4672).

Теребова Надежда Семеновна – к. ф-м. н., с. н. с., Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация; e-mail: terebova@udman.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7544-7884>.

Исупов Никита Юрьевич – аспирант очного обучения, ведущий конструктор, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск, Удмуртская Республика, Российская Федерация; e-mail: inik@udman.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2515-8117>.

Nadezhda S. Terebova – Cand. Sci. (Phys.- Math.), Senior Researcher, Institution of Science «Udmurt Federal Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation; e-mail: terebova@udman.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7544-7884>.

Nikita Yu. Isupov – graduate student, Leading Designer, Institution of Science «Udmurt Federal Research Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Izhevsk, Udmurt Republic, Russian Federation; e-mail: inik@udman.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2515-8117>.