12. Lukashova N.V., Savchenko A.G., YagodkinYu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V. Investigation of structure and magnetic properties of nanocrystalline iron oxide powders for use in magnetic fluids. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 586, pp. 298–300.

13. Korzhov A.V., Ryabukhin A.G. Influence of electric and magnetic fields on the corrosion of aluminum sheaths of power cables *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya*. 2013. V. 5. No 1, pp. 40–46.

14. Burdo G.B., Bolotov A.N. Calculation of magnetic fluid friction units operated in an airless or gaseous environment. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 2 (6), pp. 42–49.

Поступила в редакцию/received: 28.06.2022; после рецензирования/revised: 05.07.2022; принята/accepted: 27.07.2022

УДК 621.891

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ, СМАЗАННЫХ МАГНИТНОЙ НАНОСМАЗКОЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2022

Изучена динамика изменения контактной разности потенциалов между металлическими поверхностями, смазанными магнитным маслом, и его компонентами. Показано, что смазочные свойства исследуемых жидкостей коррелируют с величиной изменения контактной разности потенциалов после их нанесения. С целью прогнозирования эксплуатационных свойств узлов трения, смазанных магнитным маслом, детально изучены специфические физико-химические особенности процессов, протекающих на твердых поверхностях после нанесения магнитного смазочного материала. Оценка энергетических изменений, происходящих на поверхности после нанесения на нее магнитного масла, производилась по работе выхода электронов. С помощью двухкомпонентного магнитного масла изучено влияние дисперсных частиц магнетита на работу выхода электронов. Частицы магнетита прилипают к поверхности под действием вандерваальсового или дипольного взаимодействия и частично экранируют ее. Из полученных данных следует, что добавление в жидкость триэтаноламина магнитных частиц не приводит к существенному изменению работы выхода во всем временном диапазоне. В то же время частицы магнетита, покрытые слоем адсорбированных молекул жирной кислоты, увеличивают работу выхода электронов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, поверхность, работа выхода электрона, эксплуатационные свойства.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-22-30

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности машиностроительных изделий является важной научной и практической задачей. Применение новых смазочных материалов – модифицированных магнитных жидкостей, содержащих нанодисперсные магнитные

частицы, позволяет повысить надежность, качество узлов трения машин и механизмов и расширить их функциональные возможности [1–4].

Однако для прогнозирования эксплуатационных свойств узлов трения, смазанных магнитной жидкостью (маслом), требуется углубленное понимание механизма смазочного действия. Необходимо детальное изучение специфических физико-химических особенностей процессов, протекающих на твердых поверхностях после нанесения магнитного смазочного материала.

Как установлено (см., например, [5]), сила внешнего трения зависит от энергетического состояния контактирующих поверхностей. Одной из физических характеристик, наиболее чувствительных к этому показателю, является работа выхода электронов. В [6, 7] установлено, что между поверхностной энергией и работой выхода электронов существует приблизительно линейная связь. Хорошая чувствительность работы выхода электронов к структурным изменениям на поверхности трения показана в работах [8–12]. Поэтому в основу оценки энергетических изменений, происходящих на поверхности после нанесения на нее магнитного масла, была положена именно эта характеристика.

Цель работы заключалась в изучении влияния магнитных смазочных материалов на энергию металлической поверхности трения.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментах методом вибрирующего конденсатора [6] непосредственно измерялась контактная разность потенциалов U_c, которая связана с работой выхода простым соотношением $eU_c = A_e - A_s$, где A_e – работа выхода электрона из образца, A_s – работа выхода электрона для эталона (в нашем случае для никеля). Площадь вибрирующего электрода равнялась 20 мм^2, следовательно, измеренная контактная разность потенциалов являлась интегральным значением по этой поверхности. Поверхности образцов перед исследованиями предварительно полировались и очищались инертным растворителем.

Динамика изменения контактной разности потенциалов после воздействия на поверхность измерялась в течение нескольких минут (большее время не характерно для условий трения скольжения).

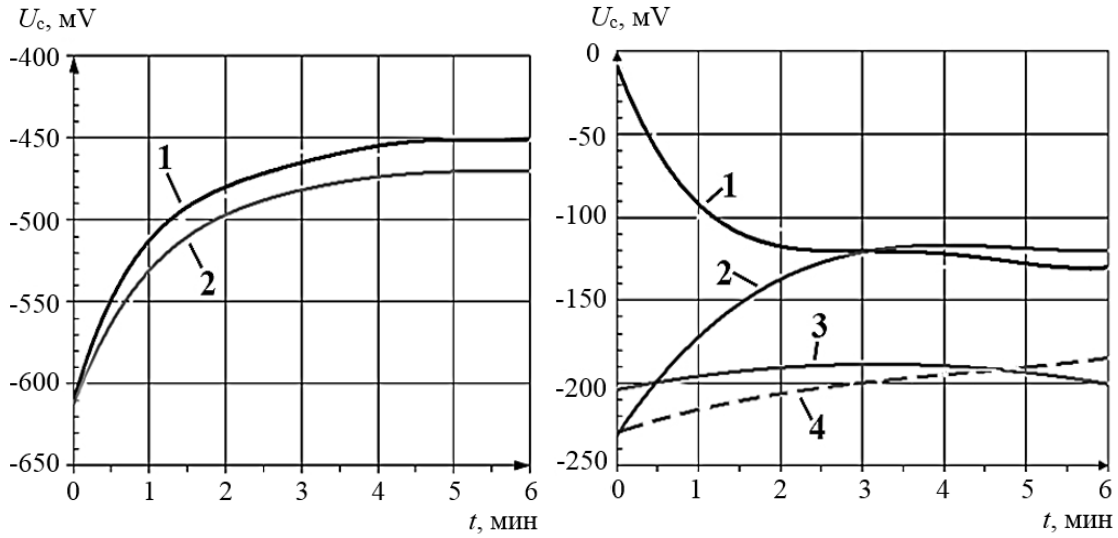
Было изучено взаимодействие двух различных по составу магнитных масел, ММ-1 и ММ-2, с поверхностью, выполненной из стали 45. Масло ММ-1 состояло только из триэтаноламина (TEA) и частиц магнетита (5 об. %), масло ММ-2 содержало кремнийорганическую жидкость на основе полиэтилсилоксана (PES-5) и магнетит Fe_3O_4 (5 об. %), стабилизированный для коллоидной устойчивости олеиновой кислотой (OA). Для сравнения анализировалось взаимодействие с твердой поверхностью жидкостей, являющихся дисперсионной средой магнитных масел (TEA и PES-5). Смазочные свойства всех использовавшихся для проведения опытов веществ приведены в таблице (испытывалась пара трения «конструкционная сталь (0,2 % C) – оловянно-свинцово-цинковая бронза» при давлении 6,5 МПа, скорости скольжения 0,24 м/с на трехпальчиковой машине трения).

Смазочные свойства магнитных масел и их дисперсионных сред

№ п/п	Смазочный материал	Интенсивность износа, 10^{-9}	Коэффициент трения
1	Жидкость PES-5	16,0	0,15
2	Жидкость PES-5 + 1 % ОА	20,0	0,13
3	Жидкость PES-5 + 5 % ОА	25,0	0,13
4	Жидкость ТЕА	13,2	0,13
5	Масло ММ-1	6,8	0,1
6	Масло ММ-2	6,2	0,1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Триэтаноламин, входящий в состав масла ММ-1, является ингибитором коррозии с положительным суммарным электронным эффектом. В результате этого сродство электрона к молекулам триэтаноламина оказывается большим, чем к поверхностям исследуемых материалов. В этом случае электроны из поверхности переходят на электронные оболочки молекул, и электронная плотность на поверхности возрастает, образуя электроотрицательный слой и увеличивая работу выхода электрона (рисунок а). Формируется прочная хемосорбционная связь молекул триэтаноламина с поверхностью металла, а величина контактной разности потенциалов сдвигается в отрицательную область значений.



(а) (б)

Зависимость контактной разности потенциалов U_c
от времени t после нанесения масел: 1 – ТЕА; 2 – ММ-1 (а);
1 – ММ-2; 2 – PES-5 + 5 % ОА; 3 – PES-5; 4 – чистая дисперсионная среда (б)

С помощью двухкомпонентного магнитного масла ММ-1 представляется возможным выяснить влияние дисперсных частиц магнетита на работу выхода. Частицы магнетита прилипают к поверхности под действием вандерваальсового или дипольного взаимодействия и частично экранируют ее. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что добавление в жидкость триэтаноламина магнитных частиц

не приводит к существенному изменению работы выхода во всем временном диапазоне. Небольшое различие объясняется тем, что работа выхода у магнетита больше, чем у стали, поэтому и интегральная работа выхода у поверхности, покрытой маслом с добавлением дисперсных частиц, также будет несколько больше, чем в случае их отсутствия.

Влияние дисперсных частиц магнетита на работу выхода электрона зависит не только от их физических свойств, но и от характера их взаимодействия с молекулами, образующими сольватные (защитные) оболочки. Наиболее часто для сольватации частиц в магнитном масле используют олеиновую или стеариновую кислоту. Сравнение работы выхода электрона из поверхности, покрытой чистыми указанными органическими кислотами и содержащими 10 % магнетита, показало, что магнетит увеличивает работу выхода. Добавление магнетита в инактивное вазелиновое масло и жидкость PES-5 также приводит к росту работы выхода электронов. Значит, магнетит, содержащийся в исследованном масле ММ-2, должен аналогичным образом изменять работу выхода электронов.

Сравнение временных зависимостей работы выхода электрона из поверхностей, смазанных магнитными маслом ММ-2 и дисперсионными средами, показывает, что зависимости имеют различный характер изменения и тенденцию к сближению (см. рисунок б). Если работа выхода у поверхностей, смазанных магнитным маслами, со временем увеличивается, то при смазывании их чистыми дисперсионными средами она уменьшается. Этот интересный факт не может быть традиционно объяснен тем, что магнитные масла имеют более сложный состав. В самом деле, добавление в полиэтилсилоксановую жидкость PES-5 ОА, содержащейся в магнитных маслах, не меняет ход временной зависимости работы выхода. Если бы влияние оказывала дисперсная фаза магнитных масел, то это проявилось бы у масла ММ-1.

Указанное различие может быть результатом образования двойного электрического слоя на твердой поверхности непосредственно после нанесения на нее магнитного масла. Вполне возможен адсорбционный механизм образования двойного электрического слоя из ионов, попавших в масло вместе с магнетитом. Магнетит для масел получали методом химической конденсации по реакции, предложенной Элмором. В результате синтеза магнетита как побочные продукты образуются ионы $Cl-$ и $NH+$, которые в определенном количестве всегда переносятся в магнитное масло. Содержание в масле элементов, образующих ионы и ионные комплексы, было экспериментально подтверждено с помощью масспектрографических исследований. При контакте масла с поверхностью ионы $Cl-$, как более химически активные, адсорбируются на поверхности и создают на ней заряд, который компенсируется зарядами ионов $NH+$, скапливающимися около поверхности.

Малое значение работы выхода электронов сразу после нанесения масла на поверхность можно объяснить влиянием двойного электрического слоя. Одновременно с образованием двойного электрического слоя на твердую поверхность адсорбируются молекулы олеиновой кислоты (поверхностно-активное вещество), но поскольку подвижность ионов выше, чем молекул, то ионный двойной электрический слой образуется быстрее, чем молекулярный адсорбционный слой. В дальнейшем молекулы поверхностно-активного вещества постепенно разрушают двойной электрический слой и работа выхода увеличивается.

На поверхностях в зоне граничного трения протекают два конкурирующих процесса – разрушения и восстановления адсорбционного смазочного слоя. Поэтому очевидно, что наиболее полно энергетическое состояние поверхности трения характеризует начальное значение работы выхода электрона, причем в сравнении с

работой выхода из чистой поверхности. Согласно экспериментальным данным (см. рисунок б), магнитное масло ММ-2 значительно сильнее влияет на работу выхода, чем триэтаноламин, на основе которого данное магнитное масло получено. Возможно, именно эта особенность является причиной более высоких смазочных свойств магнитных масел (см. таблицу). Аналогичную связь изменения работы выхода электрона с силой трения отмечали и другие исследователи [7]. Можно достаточно обоснованно предположить, что значительное изменение работы выхода электрона из твердой поверхности после нанесения смазочного материала происходит в результате пропорционального снижения энергии металлической поверхности или (и) образования на ней более прочных адсорбционных пленок. Все это приводит к тому, что при умеренных контактных давлениях снижение силы трения при смазывании магнитным маслом (см. таблицу) происходит в результате уменьшения ее адгезионной составляющей.

Следует отметить, что, как правило, контактная разность потенциалов между поверхностями, смазанными магнитными маслами, выше, чем между поверхностями, смазанными дисперсионной средой магнитных масел. Если при смазке магнитным маслом пары трения возникает большее значение U_c, значит, создается большее электрическое поле между контактирующими поверхностями. Стальная поверхность при этом заряжается отрицательно, так как работа выхода электронов у нее выше, чем у сопряженной поверхности из цветного сплава.

Контактное электрическое поле, в свою очередь, может влиять на движение ионов, находящихся в масле. Так, например, под действием поля ионы водорода (протоны), образовавшиеся в результате электрохимических или других реакций, будут увлекаться в глубь стальной поверхности. Вероятно, такое действие контактного электрического поля является одним из факторов, способствующих водородному разрушению стальной поверхности. Очевидно, что контактное электрическое поле влияет на ориентацию дифильных молекул граничного слоя, способствует их проникновению в микротрещины на поверхности и тем самым усиливает эффект Ребиндера.

Отметим еще одну особенность фрикционного контакта поверхностей, смазанных магнитным маслом. При контакте двух металлов в условиях трения с различной работой выхода электрона (энергией Ферми) в результате перераспределения электронов проводимости между поверхностями создается двойной электрический слой, такой же, как при нахождении металла в электролите, который должен обладать выпрямляющим действием. Если поверхности металлов чистые, то величина двойного электрического слоя невелика (около ангстрема) и он становится прозрачным для электронов благодаря туннельному эффекту. В процессе граничного трения поверхностей между ними образуется прослойка из адсорбированных молекул. Толщина двойного электрического слоя значительно возрастает (до десятков нанометров), выпрямляющие свойства контакта становятся ощутимыми и усиливаются при увеличении контактной разности потенциалов.

При контакте поверхностей, смазанных магнитным маслом, возникает большая разность потенциалов, чем при контакте поверхностей, смазанных жидкостями дисперсионной фазы. Магнитные масла образуют также более толстые граничные слои на поверхностях трения из-за наличия в маслах дисперсных частиц. Следовательно, электропроводимость фрикционного контакта, смазанного магнитным и немагнитным маслом, должна ощутимо различаться.

При трении возникают токи проводимости, которые протекают через зону контакта поверхностей трения и влияют на физико-химические процессы в области контакта. Величина токов (например, индуцируемых внешними магнитными полями,

предназначенными для позиционирования магнитного масла) зависит от направления движения носителей заряда и электропроводимости контакта. На основании приведенных данных следует ожидать, что негативное влияние токов на свойства фрикционного контакта, смазанного магнитным маслом, будет меньше. Этим, в частности, можно объяснить противоречивость результатов по влиянию магнитных полей на трение.

Несколько серий экспериментов было выполнено с целью установления влияния магнитного поля на поверхностные свойства твердых тел. Такое влияние может быть результатом как непосредственного взаимодействия спинов электронов с магнитным полем, так и изменения обменного взаимодействия между электронами в поле.

Энергетическое состояние поверхностных электронов изменяется в реальном внешнем магнитном поле (10^5 А/м) на величину порядка 10^{-5} эВ и не может существенно повлиять на физические свойства поверхности и исключить эмиссию электронов.

Зависимость обменных взаимодействий в ферромагнитных телах от ориентации спинов электронов является причиной магнитострикции, проявляющейся в изменении их размеров при намагничивании. При магнитострикции изменение расстояний между атомами кристаллической решетки приводит к изменению энергетического состояния атомов. Поэтому если магнитострикция охватывает также поверхностный слой ферромагнетика, это должно повлиять на работу выхода.

Возможно влияние внешнего магнитного поля на (через) тонкую структуру поверхностного магнетизма, что может привести к изменению характера хемосорбционных процессов.

В первой серии экспериментов определялась работа выхода из поверхности образцов, выполненных из ферромагнитных материалов – стали 20, 45, У10А. Перед опытами поверхность образцов тщательно очищалась органическими растворителями, затем образец помешался в прибор для измерения работы выхода. После того как стабилизировалась структура поверхности и работа выхода устанавливалась постоянной, на образец, не изменяя его положения, воздействовали магнитным полем, величина которого около исследуемой поверхности составляла приблизительно 10^5 А/м. Однако никаких изменений работы выхода в магнитном поле обнаружено не было.

Во второй серии экспериментов определялась работа выхода электрона из поверхности размагниченных и намагниченных постоянных магнитов из сплава $SmCo_5$. Вначале определялась работа выхода на определенном участке поверхности размагниченного образца, затем образец намагничивался без каких-либо механических воздействий и на том же участке снова определялась работа выхода. Установлено статистически достоверное увеличение работы выхода после намагничивания на (7–15) 10^{-2} эВ. В связи с этим отсутствие эффекта влияния магнитного поля на работу выхода из сталей можно объяснить тем, что энергия магнитострикционных напряжений у них на 2–4 десятичных порядка меньше, чем у постоянных магнитов.

В следующей серии экспериментов проверялось влияние магнитного поля на динамику формирования межфазной поверхности на границе «магнитное масло – твердое тело». Приложение магнитного поля к стальным образцам, покрытым кремнийорганическим магнитным маслом, не приводило к изменению хода временной зависимости работы выхода.

На основании большого количества эмпирических данных можно сделать качественный вывод о том, что работа выхода из поверхности намагниченного магнита, которая покрыта магнитным маслом, быстрее стабилизируется, чем для поверхности размагниченного образца. Количественная оценка указанного различия не представляется возможной из-за низкой воспроизводимости результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана динамика изменения контактной разности потенциалов, возникающая после нанесения на стальную поверхность типовых магнитных масел и их компонентов, а также предложена физико-химическая трактовка полученных результатов. В рамках выполненных исследований прослеживается корреляция между начальной контактной разностью потенциалов смазанных поверхностей и их триботехническими свойствами. Дальнейшие исследования позволят уточнить полученные результаты и высказанные предположения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.

2. Korolev V.V., Ramazanova A.G., Yashkova V.I., Balmasova O.V. Physicochemical properties of magnetic fluids based on synthetic oils // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013. V. 87. № 4. P. 684–687.

3. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 4. С. 75–81.

4. Ochoński W. Sliding bearings lubricated with magnetic fluids // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2007. V. 59. № 6. P. 252–265.

5. Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Зенкин Н.В. Энергия поверхностного слоя металлов как инструмент воздействия на величину коэффициента трения // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2. С. 251–254.

6. Демченко В.В., Хомутов Н.Е. О взаимной связи работы выхода электрона с поверхностным натяжением // *Труды Московского химико-технологического института им. Д.И. Менделеева*. 1962. Вып. 39. С. 115.

7. Zharin A., Pantsialeyeu K., Opielak M., Rogalski P. Charge sensitive techniques in tribology studies // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016. V. 92. № 11. P. 239–243.

8. Hua G., Li D. Electron work function: a novel probe for toughness // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2016. V. 18. № 6. P. 4753–4759.

9. Lu H., Hua G., Li D. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function – An alternative parameter for materials design // *Applied Physics Letters*. 2013. V. 103. № 26. URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4852675 (дата обращения: 17.12.2021).

10. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 127 с.

11. Hua G., Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals // *Applied physics letters*. 2011. V. 99. № 4. URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3614475 (дата обращения: 17.12.2021).

12. Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Смазочные наномасла на основе кремнийорганических наножидкостей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 13–21.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Энергетические свойства поверхностей, смазанных магнитной наносмазкой // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 3 (15). С. 22–30.

ENERGY PROPERTIES SURFACES LUBRICATED WITH MAGNETIC NANOSLUBRICATION

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., G.B. BURDO, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

The dynamics of changes in the contact potential difference between metal surfaces lubricated with magnetic oil and its components has been studied. It is shown that the lubricating properties of the studied liquids correlate with the magnitude of the change in the contact potential difference after their application. In order to predict the operational properties of friction units lubricated with magnetic oil, specific physical and chemical features of processes occurring on solid surfaces after applying magnetic lubricant have been studied in detail. Estimates of the energy changes occurring on the surface after applying magnetic oil to it were made based on the work of the electron output. The effect of dispersed magnetite particles on the output operation was studied using a two-component magnetic oil. Magnetite particles adhere to the surface under the action of Van der Waals or dipole interaction and partially shield it. It follows from the data obtained that the addition of magnetic particles to the triethanolamine liquid does not lead to a significant change in the output operation over the entire time range. At the same time, magnetite particles covered with a layer of adsorbed fatty acid molecules increase the work of the electron output.

Keywords: magnetic fluid, surface, electron work function, operational properties.

REFERENCES

1. Bolotov A.N., Izmailov V.V., Novoselova M.V. Teoreticheskiye i eksperimentalnye issledovaniya protsessov v tribotekhnicheskikh sistemakh: monografiya [Theoretical and experimental studies of processes in tribological systems: monograph]. Tver: TvGTU, 2019. 164 p.

2. Korolev V.V., Ramazanova A.G., Yashkova V.I., Balmasova O.V. Physicochemical properties of magnetic fluids based on synthetic oils. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013. V. 87. No 4, pp. 684–687.

3. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. On the dependence of the colloidal stability of magnetic fluids on the dielectric constant of the stabilizer and the dispersion medium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya.* 2017. V. 60. No 4, pp. 75–81. (In Russian).

4. Ochoński W. Sliding bearings lubricated with magnetic fluids. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2007. V. 59. No 6, pp. 252–265.

5. Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N., Zenkin N.V. Energy of the surface layer of metals as a tool for influencing the value of the friction coefficient *Fundamentalnye issledovaniya.* 2015. No 2, pp. 251–254. (In Russian).

6. Demchenko V.V., Khomutov N.E. On the relationship between the electron work function and surface tension. *Trudy Moskovskogo khimiko-tekhnologicheskogo instituta im. D.I. Mendeleyeva.*1962. Issue 39, pp. 115. (In Russian).

7. Zharin A., Pantsialeyeu K., Opielak M., Rogalski P. Charge sensitive techniques in tribology studies. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016. V. 92. No 11, pp. 239–243.

8. Hua G., Li D. Electron work function: a novel probe for toughness. *Physical Chemistry Chemical Physics.* 2016. V. 18. No 6, pp. 4753–4759.

9. Lu H., Hua G., Li D. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function – An alternative parameter for materials design. *Applied Physics Letters.* 2013. V. 103. No 26. URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4852675 (date accessed: 17.12.2021).

10. Bushe N.A., Kopytko V.V. Sovmestimost trushchikhsya poverkhnostey. [Compatibility of rubbing surfaces]. Moscow: Nauka, 1981. 127 p.

11. Hua G., Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals. *Applied physics letters*. 2011. V. 99. No 4. URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3614475 (date accessed: 17.12.2021).

12. Burdo G.B., Bolotov A.N. Lubricating nanooils based on organosilicon nanofluids *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki».* 2020. No 4 (8), pp. 13–21. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 28.06.2022; после рецензирования/revised: 05.07.2022; принята/accepted: 27.07.2022

УДК 621.914

МНОГОСЛОЙНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, Е.В. ИСАЕВ, гл. науч. сотр.,
А.М. МИГРАНОВ, науч. сотр., И.И. МОСЕНЗ, гл. науч. сотр.,
А.С. ГУСЕВ, асп., С.С. ОПЛЕСНИН, науч. сотр.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127994, ГСП-4, Москва, Вадковский пер., 1, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Исаев Е.В., Мигранов А.М.,
Мосенз И.И., Гусев А.С., Оплеснин С.С., 2022

Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости концевых фрез с многослойными композиционными покрытиями при лезвийной обработке резанием хромоникелевых сплавов, которые широко применяются в ответственных, тяжелонагруженных и высокотемпературных трибосопряжениях авиакосмической техники. Исследованы перспективные и инновационные износостойкие покрытия, полученные на различных установках и при использовании различных технологий.

Ключевые слова: концевые фрезы, многослойные композиционные покрытия, хромоникелевые сплавы, тяжелонагруженные и высокотемпературные трибосопряжения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-30-37

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является ключевой отраслью промышленности, так как без использования его возможностей по изготовлению необходимых деталей, изделий, оборудования не может обойтись ни одна отрасль. Ориентация отечественной