

*Руслан Пугач*

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНОГО ПРОТИВОИЗНОСНОГО  
АНТИФРИКЦИОННОГО РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО СОСТАВА**

*Руслан Пугач*

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ У РЕЗУЛЬТАТІ  
ЗАСТОСУВАННЯ МАСТИЛЬНОГО ПРОТИЗНОШУВАЛЬНОГО  
АНТИФРИКЦІЙНОГО РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СКЛАДУ**

*Ruslan Puhach*

**IMPROVING THE QUALITY OF STEEL PRODUCTS SURFACE AS A RESULT  
OF ANTI-WEAR ANTI-FRICTION LUBRICANT REPAIR AND RESTORATIVE  
COMPOSITION**

*Рассмотрен механизм формирования реновационной поверхности при использовании геомодификаторов трения на основе серпентинитов. Приведены результаты испытаний, которые подтверждают эффективность использования природных добавок, обеспечивающих компенсацию размерного износа элементов машин.*

**Ключевые слова:** геомодификатор трения, диспергирование, шероховатость, реновация, износ, модифицирование.

*Рис.: 4. Табл.: 1. Библ.: 8.*

*Розглянуто механізм формування реноваційної поверхні у разі використання геомодифікаторів тертя на основі серпентинітів. Наведено результати випробувань, які підтверджують ефективність використання природних добавок, що забезпечують компенсацію розмірного зносу елементів машин.*

**Ключові слова:** геомодифікатор тертя, диспергування, шорсткість, реновація, знос, модифікування.

*Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 8.*

*The mechanism of formation renovating surface using geomodifiers friction on the basis of serpentinite. Test results have confirmed the effectiveness of the use of natural supplements that provide compensation of dimensional wear of machine elements.*

**Key words:** geomodifiers friction, dispersion, surface roughness, renovation, wear, modification.

*Fig.: 4. Tabl.: 1. Bibl.: 8.*

**Постановка проблемы.** Перед современным производством стоит задача снижения стоимости ремонтных работ и эксплуатации изделий с учетом обеспечения максимальной безопасности. Развитие технологий улучшения поверхностей связано с явлениями, протекающих в зоне контакта деталей, с учетом прочностных характеристик поверхностей и их разрушения. Известно, что путем улучшения качества поверхностей трения можно значительно повысить ресурс механизма. Таким образом, задача трения, смазки и износа выступает на первый план.

Основным направлением по улучшению качества изделий и механизмов является создание безизносного узла трения. Данную задачу можно решать созданием новых смазочных материалов. При эксплуатации машин и механизмов происходят значительные химические и физические изменения масел, т. е. изменения их состава и свойств, что влияет на эксплуатационные свойства масел. Для предотвращения подобных изменений в большинство смазочных масел вводят специальные вещества и их композиции.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Рассмотрим процесс образования модифицированного слоя на поверхностях пар трения. За счет высоких абразивных свойств геомодификатора трения (ГМТ) в местах контакта происходит шлифование абразивом поверхностей трения от нагаров, окислов, микронеровностей. В местах локального контакта на микроуровне возникают высокие температуры (превышающие 400 °С), что приводит к инициации микрометаллургических процессов: микросхватывания и микросваривания. В результате происходит заклёпывание частиц ремонтно-восстановительного состава (РВС) к кристаллической решетке поверхностного слоя стали. Так как реагенты составов работают как катализаторы, то создаются условия для

активного протекания окислительно-восстановительных процессов, вследствие чего происходит образование модифицированного слоя. Одновременно в пограничной области происходит образование новых кристаллов, наращенных на кристаллической решетке металла [1; 2; 3]. В дальнейшем эти кристаллы ориентируются вдоль поля и срастаются, образуя на всей поверхности контакта непрерывный ряд твердых растворов и монокристаллов.

Механизм начала модификации поверхностей объясняется явлением изоморфизма, т. е. замещение элементами друг друга в соединениях родственного состава (например, изовалентный изоморфизм иона  $Mg^{2+}$  к двухвалентному иону  $Fe^{2+}$ ). При этом возможен переход ионов магния из разрушенной структуры серпентинов в железо поверхностей трибопары, что может служить дополнительным подтверждением активности РВС [4].

Все указанные процессы на самом деле протекают практически одновременно и имеют место до тех пор, пока в носителе не иссякнет РВС, или пока в системе не наступит равновесие: все зазоры будут выбраны до оптимальной величины, определяемой термодинамическими процессами, протекающими в каждой точке локального контакта данной системы.

**Нерешенные части проблемы.** В зоне контактирующих поверхностей может реализоваться механическое измельчение частиц ГМТ до момента оптимального взаимодействия с ними без нарушения поверхностей контакта после их приработки. Физическое объяснение этого явления требует экспериментального подтверждения влияния активированных частичек ГМТ на модификацию поверхностей.

**Цель и постановка задачи.** Исследовать модифицирование поверхностей деталей за счёт применения геомодификатора трения в качестве добавки, полученной на основе тонкодисперсных серпентинитов, к смазочным материалам.

**Изложение основного материала.** В статье рассматривается сравнение в процессе лабораторных трибологических испытаний эффективности добавок 4÷6 % содержания геомодификатора трения в составе масла Литол 24 ГОСТ 21150-87, а также оценка эффективности применения этой смеси в процессе стендовых испытаний.

Состав ГМТ представляет собой природный измельченный минерал с дисперсностью 0,01÷30 мкм при следующем соотношении компонентов, в %: серпентин (лизардит или хризотил)  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  87÷90; амфотерный оксид железа  $Fe_2O_3$  2÷3; оксида алюминия  $Al_2O_3$  2÷8, доломит  $CaMg(CO_3)_2$  3÷5.

Важным есть измельчение природных минералов, используемых для технологического процесса подготовки комплексного состава ГМТ, естественно, чем меньших размеров будут наши частички ГМТ, тем значительно ускорится процесс диспергирования и активации частиц в сопряжении, которые позволяют проводить процессы диффузии при менее высоких температурах, нагрузках и, естественно, во времени.

Исследования на износостойкость проводилось на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск-колодка». Нагрузка образцов обеспечивалась штатным нагрузочным устройством 150 кг/см<sup>2</sup>. Частота вращения подвижного ролика составляет 500 об/мин. На протяжении 100 часов испытания производился замер изношенной массы детали через каждые 5 часов. На рис. 1 представлен график износа образцов из стали 40Х. Как видно из рис. 1, в испытуемом образце, где добавлен в зону трения ГМТ, первые 25 часов происходит интенсивный износ, что связано с микрошлифованием поверхности детали и ее выравниванием, отрицательные значения на графике свидетельствуют о восстановлении изношенной поверхности элементами ГМТ [5; 6], что приведёт к снижению вибрации за счет уменьшения зазоров между сопряженными деталями, а также снижается трение и износ, увеличивается опорная площадь ресурсопределяющих элементов механизма.

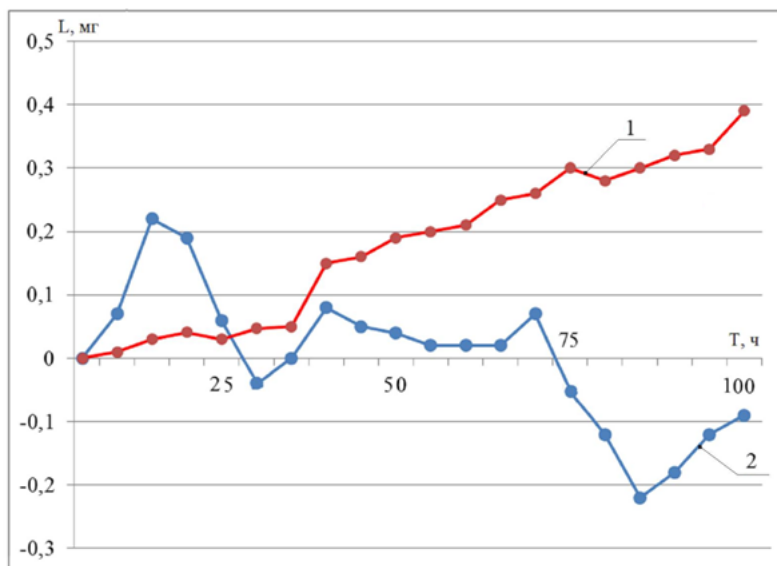


Рис. 1. Экспериментальный график износа стали: 1 – использование смазки Литол 24; 2 – использование смазки Литол 24 с добавлением в зону трения 5 % ГМТ

Определение элементного состава, приповерхностных слоев поверхности трения скольжения проводилось вторично-ионной оже-спектрометрией на установке РНІ -660. Оже-спектрометры исследуемых образцов в приповерхностной области  $40 \text{ \AA}^0$  представлены на рис. 2. Из рис. 2, а видно, что в стали имеется карбид железа и хрома, а на поверхности в основном окисленное железо. Что касается рис. 2, б, то дополнительно регистрируются пики Mg, Si, Ca, Cr и С. Очевидно, компоненты ГМТ диффундируют в поверхностные слои металла и образуют новый слой, представляющий собой растворы компонентов ГМТ в фазовых составляющих стали.

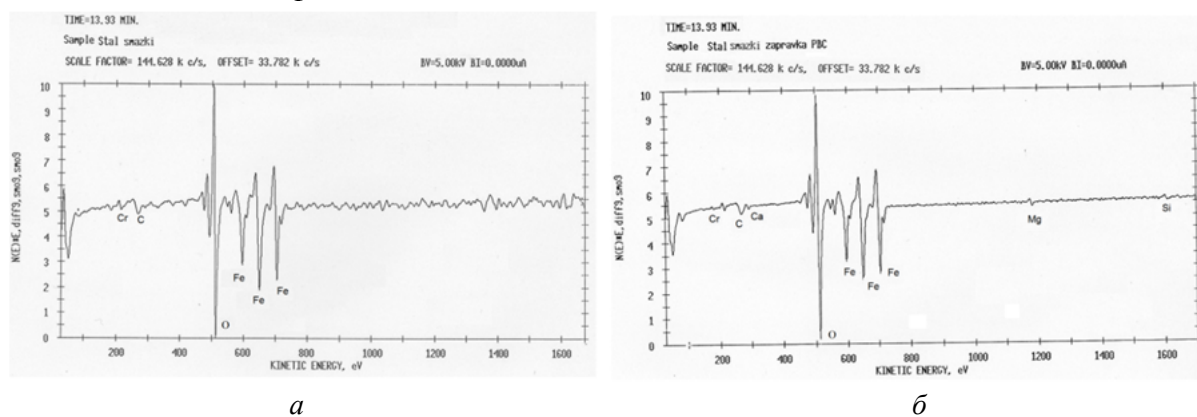


Рис. 2. Оже-спектрометрии приповерхностных слоев стали 40Х: а – использование смазки Литол 24; б – использование смазки Литол 24 с добавлением в зону трения 5 % ГМТ

На рис. 3 представлен поперечный шлиф стали с формированием на поверхности реновационного слоя, содержащего в своем составе элементы ГМТ. Глубина проникновения достигает 30–50 мкм. Скорость формирования слоя пропорциональна локальным всплескам температуры и давлению на пятнах фактического контакта. Формируется этот слой в первую очередь на изношенных участках сопряженных поверхностей, в результате чего происходит восстановление размеров и формы деталей.

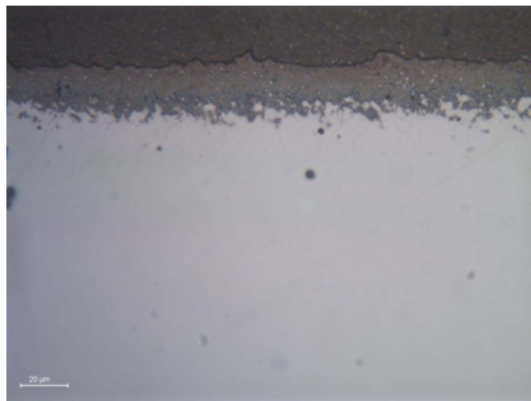
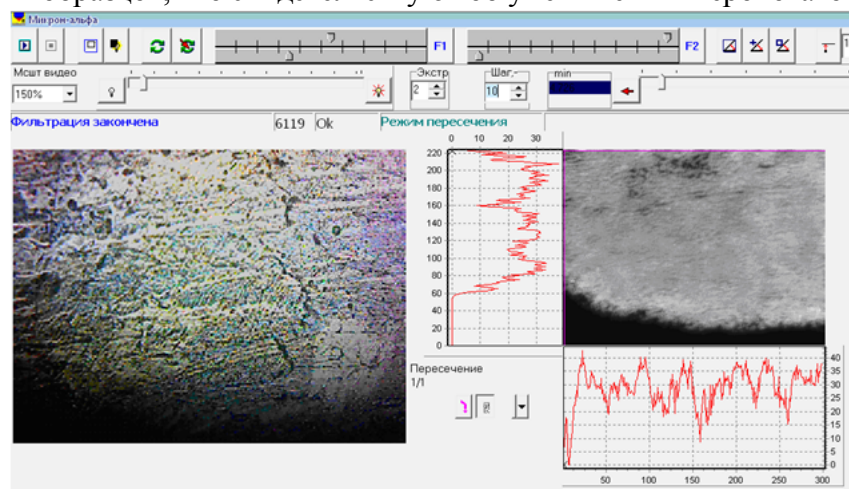
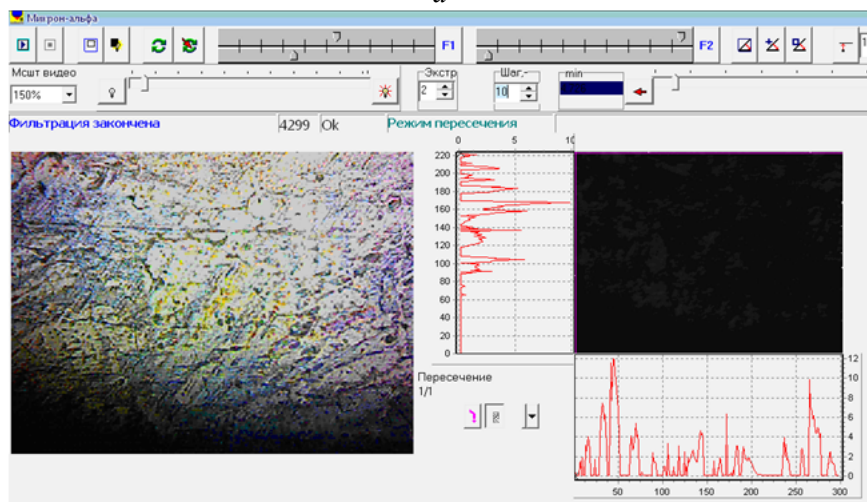


Рис. 3. Структура реновационного слоя с антифрикционным покрытием

Измерение микропрофиля поверхности выполнялось на профилометре «Micro-alpha» и представлено на рис. 4. Шероховатость поверхности по всем исследуемым параметрам претерпевает положительных изменений, происходит выравнивание поверхности, уменьшается количество критических выступов и впадин неровности поверхности, все это способствует увеличению площади контакта между трущимися деталями. В таблице приведены среднестатистические данные по измерению шероховатости поверхности испытуемых образцов, что свидетельствуют об уменьшении шероховатости в 2 раза.



а



б

Рис. 4. Профилограммы поверхности стали после 100 часов приработки: а – использование смазки Литол 24; б – использование смазки Литол 24 с добавлением в зону трения 5% ГМТ

Таблица

*Среднестатистические данные по измерению шероховатости поверхности*

Показатели	Смазка Литол 24, мкм	Смазка Литол 24 с добавлением в зону трения 5 % ГМТ, мкм
Rz	6,51	2,908
Ra	8,05	3,938
R	0,097	1,026
H	16,2	6,128

Крупные включения частиц ГМТ могут образовывать когерентные и некогерентные фазовые границы с материалами поверхностей пар трения в зависимости от меры различия фаз по структуре и постоянным кристаллической решетки. При этом когерентные фазы либо усиливают, либо ослабляют фазовые границы частиц геомодификаторов с поверхностями трибосопряжения. В такой системе обнаруживаются отдельные элементы самоорганизации, формирование равномерной шероховатости поверхности трения с диспергируемыми и активируемыми компонентами ГМТ, ускоряющими достижение установившейся микрогеометрии поверхности, воспроизводимой в процессе трения.

Один из основных компонентом ГМТ MgO в процессе механохимического взаимодействия вызывает развитие самоподдерживающейся реакции за счет экзотермического эффекта. Высокие температуры в зоне трибоконтакта развиваются за счет теплоты химической реакции на поверхности металлов пар трения и новых поверхностях диспергированных частичками ГМТ.

В случае аморфизации SiO<sub>2</sub>, как реагента смеси ГМ, наблюдается небольшой максимум и последующее уменьшение степени аморфизации в процессе диспергирования в трибоконтакте. Наличие аморфной фазы кремния α-Si в зоне подвижного контакта и переведенной импульсными трибоисточниками в активное структурно-неустойчивое состояние аморфно-кристаллической α-к-границы раздела является кристаллизация α-Si с образованием износостойкого слоя поликристаллического к-Si на поверхностях трибосопряжения в диапазоне температур, возникающих на пятнах фактического контакта [7].

В процессе диспергирования частиц наполнителя смазки повышается и устойчивость в диапазоне аморфизации основных компонентов геомодификаторов трения. Аморфизированная часть SiO<sub>2</sub> расходуется на формирование реновационного слоя, который проявляет себя как антифрикционный слой. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в составе смазочной композиции приводит к выводу о дезактивации наночастиц, которые в приработанных трибосопряжениях выполняют функцию нанокерамической смазки. Аморфизированная часть Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, по предположению, выступает в качестве катализатора трибохимических реакций в трибосопряжении. Частички наноразмеров Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выступают в роли микро- и нанокерамических безактивационных компонентов смазки. В случае избыточности компоненты Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> образуют интерметаллидные соединения с продуктами разделения диспергируемых частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Несмотря на аддитивный вклад каждой из составляющей диспергированной смеси порошков в подвижном сопряжении, превалирующее влияние на формирование силицидных реновационных слоев оказывает α-Si. При этом реакционно-активная фаза α-Si образует слои вторичных структур на поверхностях сопряжения пары трения, снижая свою концентрацию в смазочном слое. Реакции SiO<sub>2</sub> с твердыми веществами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO и CaO при возрастании температуры в зоне трения, создают условия для формирования реновационных слоев в восстановительной технологии размерного износа поверхностей сопряжения [8]. Это снижает вибрацию за счет уменьшения зазоров между сопряженными деталями, а также снижает работу трения и износ ресурсопределяющих элементов механизма.

**Вывод.** Эффект применения геомодификаторов трения заключается в значительном, более чем двукратном снижении коэффициента трения. Важным результатом есть малый либо практически отсутствующий износ деталей узла трения с одновременным

упрочнением поверхностей трения. Одновременно «залечиваются» дефекты и другие нарушения поверхностей, что приводит к формированию более совершенной, близкой к идеальной кристаллической структуры поверхностных зон узлов трения и, соответственно, продлению их ресурса. Процесс приработки протекает в более благоприятных условиях и завершается значительно раньше по сравнению с чистым эксплуатационным маслом, т. е. геомодификатор трения, входящий в состав РВС, позволяют форсировать процесс приработки деталей и получить повышенные физико-механические свойства поверхностей трения.

#### Список используемых источников

1. Дунаев А. В. Состояние применения нетрадиционной триботехники для безремонтного восстановления сопряжений трения узлов и агрегатов машин и оборудования / А. В. Дунаев // Сборник научных трудов. Семинар «Современные технологии в горном машиностроении». – М. : МГГУ, 2012. – С. 154–163.
2. Миняев Ю. Н. Трибохимическая технология восстановления изношенных узлов стационарных поршневых компрессоров / Ю. Н. Миняев, Н. П. Ткач, В. В. Молодцов // Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал. – 2009. – № 12, т. 16. – С. 357–362.
3. Соловйов С. М. Повышение несущей способности тяжело нагруженных пар трения / С. М. Соловйов, С. Ж. Боду // Наукові праці. Техногенна безпека. – 2012. – Вип. 191, т. 203. – С. 27–31.
4. Телух Д. М. Введение в проблему использования природных слоистых гидросиликатов в трибосопряжениях / Д. М. Телух, В. П. Кузьмин, В. В. Усачев // Трение, износ, смазка. – 2009. – № 3.
5. Didyk R. P. New technology of modifying a machine element surface in an attempt to overcome the tribological barrier / R. P. Didyk, R. S. Puhach, V. A. Kozechko // State Higher Educational Institution «National Mining University». – Д. : НГУ, 2015. – № 5 (149). – С. 59–63.
6. Didyk R. P. Technology of Modifying a Machine Element / R. P. Didyk, R. S. Puhach // Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. – Sankt Lorenzen, Austria, March 2016. – Vol. 3. – Pp. 14–18.
7. Ткаченко Э. А. Самоорганизация механической активации и механо-химических твердофазных реакций геомодификаторов трения в подвижных сопряжениях / Э. А. Ткаченко // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2014. – Вип. 2 (48). – С. 137–146.
8. Ткаченко Э. А. Нанотехнология компенсации размерного износа подвижных сопряжений элементов машин / Э. А. Ткаченко, Д. А. Кононов // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2012. – Вип. 1, 2 (44). – С. 255–263.

#### References

1. Dunaev, A.V. (2012). Sostoianie primeneniia netraditsionnoi tribotekhniki dlia bezremontnogo vosstanovleniia sopriazhenii treniia uzlov i agregatov mashin i oborudovaniia [Status of application of nonconventional tribotechnology for recovery of maintenance-free components and interfaces of the friction units of machines and equipment]. *Sbornik nauchnykh trudov. Seminar "Sovremennye tekhnologii v gornom mashinostroenii"*. Moscow: MGGU, pp. 154–163 (in Russian).
2. Miniaev, Iu.N., Tkach, N.P., Molodtsov, V.V. (2009). Tribokhimicheskaiia tekhnologiia vosstanovleniia iznoshennykh uzlov statsionarnykh porshnevykh kompressorov [Tribo Chemical Technology of restoration of worn components of stationary reciprocating compressors]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten – Mining informational and analytical bulletin*, no. 12, vol. 16, pp. 357–362 (in Russian).
3. Solovyov, S.M., Bodu, S.Zh. (2012). Povyshenie nesushchei sposobnosti tiazhelonagruzhennykh par treniia [Increasing the bearing capacity of highly loaded friction pairs]. *Naukovi pratsi. Tekhnohenna bezpeka – Proceedings. Technogenic security*, issue 191, vol. 203, pp. 27–31 (in Russian).
4. Telukh, D.M., Kuzmin, V.P., Usachev, V.V. (2009). Vvedenie v problemu ispolzovaniia prirodnykh sloistykh gidrosilikatov v tribosopriazheniiax [Introduction to the problem of natural

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

layered Hydrosilicates in friction units]. *Trenie, iznos, smazka – Friction, wear, lubrication*, no. 3 (in Russian).

5. Didyk, R.P., Puhach, R.S., Kozechko, V.A. (2015). New technology of modifying a machine element surface in an attempt to overcome the tribological barrier. *State Higher Educational Institution “National Mining University”*, № 5 (149), pp. 59–63.

6. Didyk R.P., Puhach, R.S. (2016). Technology of Modifying a Machine Element. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*. Sankt Lorenzen, Austria, March, vol. 3, pp. 14–18.

7. Tkachenko, E.A. (2014). Samoorganizatsiia mekhanicheskoi aktivatsii i mekhanokhimicheskikh tverdogaznykh reaktsiy geomodifikatorov treniia v podvizhnykh sopriazheniakh [Self-organization of mechanical activation and mechanochemical solid-state reactions geomodifiers friction in mobile interfaces]. *Progresivni tekhnologii i sistemy mashinobuduvannia – Progressive technologies and systems engineering*, issue 2 (48), pp. 137–146 (in Russian).

8. Tkachenko, E.A., Kononov, D.A. (2012). Nanotekhnologiiia kompensatsii razmernogo iznosa podvizhnykh sopriazhenii elementov mashin [Nanotechnology compensation of dimensional wear movable joints of machine elements]. *Progresivni tekhnologii i sistemy mashinobuduvannia – Progressive technologies and systems engineering*, issue 1, 2 (44), pp. 255–263 (in Russian).

**Пугач Руслан Сергеевич** – ассистент кафедры технологии горного машиностроения, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49005, Украина).

**Пугач Руслан Сергійович** – асистент кафедри технології гірничого машинобудування, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна).

**Puhach Ruslan** – assistant Department of Mechanical Engineering Technology for Mining, State Higher Educational Institution “National Mining University” (19 Dmytro Yavornytskyi Av., 49005 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** dracov-pugach@yandex.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2502-7966>