

4. Baldayev L. Kh., Borisov V.N., Vakhalin V.N. [and others]. Gazotermicheskoye napyleniye [Gas-thermal spraying]. Moscow, Staraya Basmannaya, 2015. 539 p. (in Rus.)

5. Kuznetsov Y.A., Kravchenko I.N., Goncharenko V.V. Reconditioning and hardening of tillage tools by plasma spraying. *Journal of Scientific Society of Power Machines. Tractors and Maintenance*, 2016. Vol. 21. No. 1. Pp. 41-47.

6. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Bobryashov Ye.M. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razvitiya ostatochnykh napryazheniy pri formirovaniye plazmennyykh pokrytiy [Mathematical modeling of the development of residual stresses during the formation of plasma coatings]. *Sovremennyye naukovyye tekhnologii*, 2013. No. 11. Pp. 77-80. (in Rus.)

7. Tsvetkov S.V., Sokolov I.K., Zurabov V.M. Chislenny raschet napryazhenno-deformirovannogo sos-

toyaniya tel za predelami uprugosti [Numerical calculation of a stress-strain state of bodies beyond the elasticity limit]. *Puti povysheniya kachestva i nadezhnosti detaley iz poroshkovykh materialov: Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Rubtsovsk, 1991. P. 85. (in Rus.)

8. Kravchenko I.N., Glinskiy M.A., Korneyev V.M. [and others]. Optimizatsiya tekhnologicheskikh rezhimov naneseniya zashchitnykh pokrytiy plazmennymi metodami (TST Plasma Renovation) [Optimization of technological modes of applying protective coatings by plasma methods (TST Plasma Renovation)]. Certificate of state registration of computer program No. 2017619358 (RU). Publ. on 24.08.2017. (in Rus.)

The paper was received on March 6, 2017

УДК 621.791.927.55

DOI 10.26897/1728-7936-2017-5-48-53

ЕРОХИН МИХАИЛ НИКИТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, академик РАН, профессор¹

E-mail: Er.mihn@mail.ru

КАЗАНЦЕВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор¹

E-mail: kspts@bk.ru

ЧУПЯТОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент²

E-mail: nikolaj-ch@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

² Тверской государственный технический университет, набережная Афанасия Никитина, 22, г. Тверь, 170026, Российская Федерация

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КАРБИДОСОДЕРЖАЩИХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

В работе отражены результаты исследования износостойкости CVD-покрытий, полученных термическим разложением карбида хрома на подложке, изготовленной из стали 45 ГОСТ 1050-88, в сравнении с образцами без покрытий: цементированной и закалённой до HRC54...56 сталью 15X ГОСТ 4543-71 и сталью 45 ГОСТ 1050-88 с закалкой ТВЧ до HRC52...54. Эксперименты с исследованием износостойкости выполнялись с образцами «диск-колодка» на машине трения СМЦ-2. Износостойкость поверхностей оценивалась как визуально (по наличию следов изнашивания), так и по потере массы образцов. Установлено, что сопряжения с дисками, имеющими карбидохромовое покрытие, обладают более высокой устойчивостью к воздействию кварцевых абразивных частиц, чем сопряжения с дисками, изготовленными с применением классических технологий. Максимальное повышение износостойкости наблюдается при микротвёрдости покрытия 17 ГПа и выше. Ни на одном из образцов, имеющих CVD-покрытие после испытаний, не выявлено дефектов покрытия (отслаиваний, сколов и др.). На основании полученных результатов в работе сделан обоснованный вывод о возможности применения карбидохромовых покрытий, полученных термическим разложением гексакарбонила хрома, для восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: хромовые покрытия, CVD-метод, металлизация, гексакарбонил хрома, карбид хрома, карбидохромовые покрытия, износостойкость.

Введение. На сегодняшний день в области сельскохозяйственного машиностроения особо остро стоит вопрос повышения надёжности узлов гидравлических систем, что связано с их чрезвычайно низкой надёжностью. Статистические данные свидетельствуют о том, что более 50% неисправностей сельскохозяйственных технологических машин приходится именно на узлы гидропривода. Данные неисправности приводят к значительным материальным издержкам и создают экологическую опасность, связанную с утечками рабочей жидкости.

Следует отметить, что ресурс отечественных элементов гидропривода в разы ниже ресурса зарубежных аналогов. При этом он определяется, в большей степени, техническим состоянием прецизионных сопряжений, изнашивание которых приводит к нарушению герметичности, снижению КПД, утечкам и потере работоспособности.

Исследования, выполненные в работах ряда авторов [1-5], представляют основной причиной разрушения поверхностей деталей гидропривода абразивное и гидроабразивное изнашивание, причиной которого является присутствие в рабочей жидкости значительного количества загрязняющих абразивных частиц. Основная часть абразива попадает в гидравлическую систему при эксплуатации техники в виде пыли, состоящей более чем на 70% из частиц кварца. Твёрдость кварца составляет 11000 МПа, что значительно превосходит поверхностную твёрдость основных деталей (микротвёрдость поверхностей деталей гидропривода, изготовленных по классическим технологиям, не превышает 7500 МПа).

Применяемые в серийном производстве способы поверхностного упрочнения не могут обеспечить высокую стойкость к воздействию абразивных частиц. Для получения высоких значений износостойкости поверхностная твёрдость деталей должна быть не ниже 17000 МПа [5].

Универсальным и наиболее перспективным способом в области получения поверхностей с заданными физическими и механическими свойствами является CVD-метод металлоорганических соединений. Данный способ позволяет с минимальными материальными затратами реализовать процесс получения разнообразных по физическим, химическим и механическим свойствам функциональных покрытий [5-10].

Цель исследований – изучение триботехнических свойств хромовых и карбидохромовых CVD-покрытий с целью подтверждения возможности их применения для восстановления и модифицирования быстроизнашиваемых поверхностей прецизионных деталей сельскохозяйственной техники.

Методика исследований. Полное представление о свойствах упрочнённых с применением CVD-покрытий поверхностей можно получить, располагая данными сравнительных стендовых испытаний модифицированных и стандартных сопряжений (образцов «диск-колодка») на изнашивание.

Испытания проводились для следующих вариантов сопряжений: образцов типа «диск», изготовленных:

- из стали 45 ГОСТ 1050-88 с закалкой до HRC52...54;
- из стали 15X ГОСТ 4543-71 с цементацией и закалкой до HRC54...56;
- из стали 45 ГОСТ 1050-88, имеющих упрочняющее CVD-покрытие толщиной 250 мкм (семь видов образцов с различной микротвёрдостью покрытия – от 12 до 18 ГПа).

Образцы «колодка» изготавливались из серого чугуна СЧ21-40 ГОСТ 1412-85.

Выбор данных материалов обусловлен их широкой применимостью для изготовления деталей гидравлических систем (конструкция образцов представлена на рисунке 1).

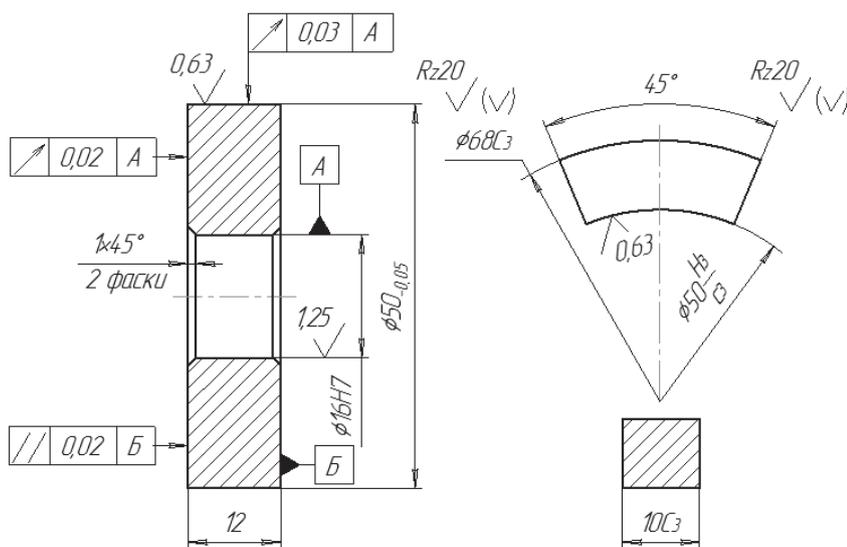


Рис. 1. Образцы типа «диск-колодка» при проведении испытаний хромовых покрытий из газовой фазы на износ

Исследование износостойкости проводили на испытательной машине модели СМЦ-2 при постоянной скорости скольжения 0,786 м/с, что соответствует 300 об/мин, и постоянной нагрузке в 250 Н, что соответствует (равноценно) удельной нагрузке 1,275 МН/м².

В качестве рабочей жидкости применяли масло индустриальное И20 (ГОСТ 20779-75). Для ускорения процесса изнашивания в рабочую жидкость добавляли абразив, приготовленный из кварцевого песка, соответствующего требованиям ГОСТ 2138-84, с дисперсностью 3 мкм. Концентрация абразивного материала составляла $3 \pm 0,5\%$ по массе масла. Температуру в зоне трения поддерживали в интервалах 60...80°C за счет постоянного поступления масла в камеру и слива из нее. Через каждые три часа образцы снимали, промывали в ацетоне, просушивали обдувкой сжатым воздухом и взвешивали на аналитических весах ВЛА-200М с точностью до 0,1 мг.

Поверхность трения до и после испытаний проверяли на оптическом микроскопе. Визуально определялась интенсивность изнашивания, а также оценивалось качество покрытия.

Интенсивность изнашивания упрочнённых и неупрочнённых образцов рассчитывали по формуле

$$J = \frac{W}{L},$$

где J – интенсивность изнашивания, кг/м; W – износ по массе упрочнённого и неупрочнённого образцов в соединении с контрообразцом, кг; L – путь трения в соединении, соответствующий износу W , м.

При испытаниях на износостойкость повторность опытов принимали равной трём (ГОСТ 16504-81).

Результаты исследования. Установлено, что интенсивность изнашивания образцов, не имеющих упрочняющего покрытия, значительно выше, чем у образцов, покрытых карбидом хрома. При этом максимальный износ зафиксирован в сопряжении с диском, изготовленным из стали 45 (HRC52...54), минимальный – в сопряжении с диском, упрочнённым карбидом хрома (микротвёрдость 18 ГПа).

Внешний вид поверхности образцов, прошедших испытания, представлен на рисунке 2-4. На рисунке 2 изображен фрагмент диска, изготовленного из стали 45. Очевидно, что поверхность неупрочнённого образца изрезана множеством продольных борозд и царапин – следов изнашивания. На образце заметны также следы возможного шаржирования поверхности крупными абразивными частицами.

Поверхность образца с покрытием, имеющим твёрдость 12 ГПа, значительно в меньшей степени подверглась воздействию абразивных частиц (рис. 3). На образце значительно меньше риск и царапин, а присутствующие на поверхности детали дефекты имеют менее выраженный характер, чем у образца без покрытия. Следы шаржирования присутствуют.

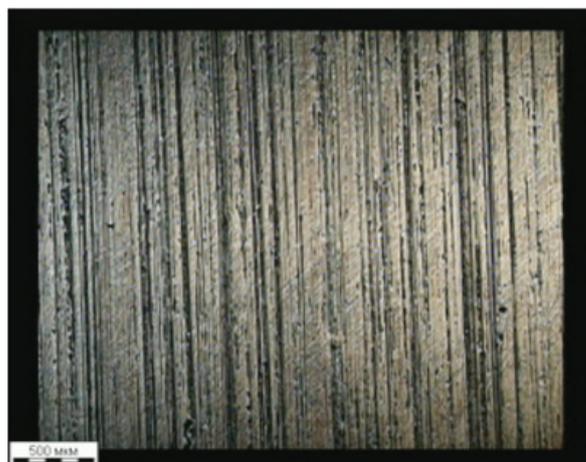


Рис. 2. Общий вид фрагмента образца без покрытия после испытания на изнашивание

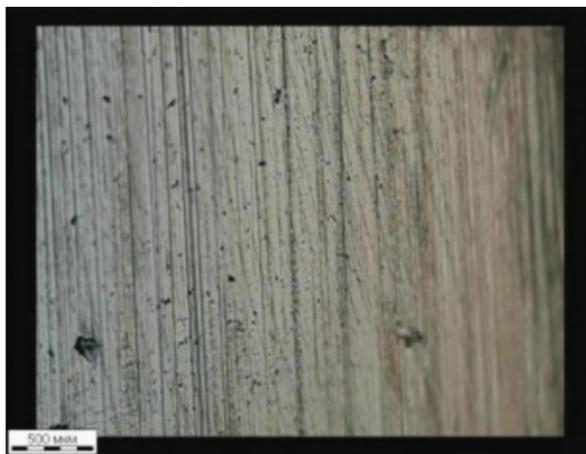


Рис. 3. Общий вид фрагмента образца с покрытием (12 ГПа) после испытания на изнашивание

Анализ образцов с карбидохромовым покрытием, твёрдость которого превышает 17 ГПа, свидетельствует об отсутствии выраженного воздействия абразивных частиц на поверхность (рис. 4). При такой твёрдости покрытий взаимодействие кварцевой частицы на поверхность диска принимает характер упругого оттеснения. Шаржирования поверхности не происходит. Именно такие покрытия позволят получить максимальный ресурс деталей гидравлических систем и исключить возможность повреждения поверхностей частицами кварца, присутствующими в гидравлической жидкости.

Суммарный износ в сопряжении оценивался взвешиванием пар трения, прошедших полный цикл испытаний. Результаты взвешивания представлены на рисунке 5.

Очевидно, что значение суммарного износа в сопряжениях с упрочнёнными дисками значительно

меньше, чем в сопряжениях с образцами, не имеющими покрытия, при этом с повышением твёрдости диска значение суммарного износа снижается.

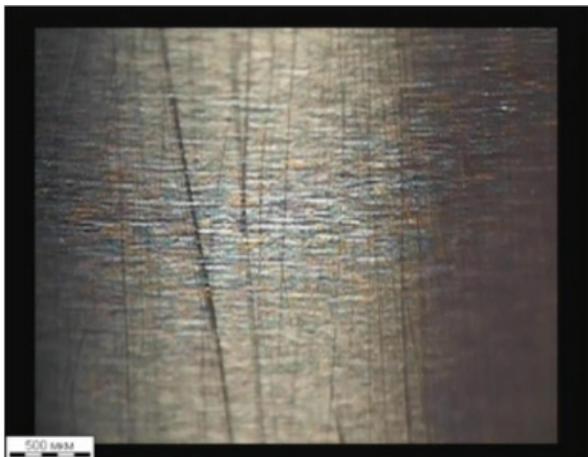


Рис. 4. Общий вид фрагмента образца с покрытием (17 ГПа) после испытания на изнашивание

При исследовании влияния твёрдости карбидохромового покрытия диска на износостойкость деталей сопряжения получена зависимость, которая представлена на рисунке 6. Установлено, что среднее значение суммарного износа в сопряжении снижается с увеличением микротвёрдости, при этом максимальный рост износостойкости наблюдается при повышении микротвёрдости с 12 до 17 ГПа (рис. 6).

Повышение микротвёрдости покрытия диска выше 17 ГПа не приводит к значительному росту износостойкости, что, вероятней всего, связано с использованием в опытах в качестве абразива кварцевого песка, влияние которого минимально на поверхность, имеющую микротвёрдость выше 16...17 ГПа.

Влияние повышения микротвёрдости диска на снижение износа колодки минимально, хотя и носит положительный характер. При этом снижение износа колодки при повышении микротвёрдости диска связано с уменьшением шаржирования его поверхности и снижением количества дефектов на упрочнённой поверхности. Снижение количества дефектов (борозд, царапин, вырывов и др.) приводит к уменьшению объёма абразивного материала, удерживаемого в зоне трения, и как следствие замедляет процесс изнашивания.

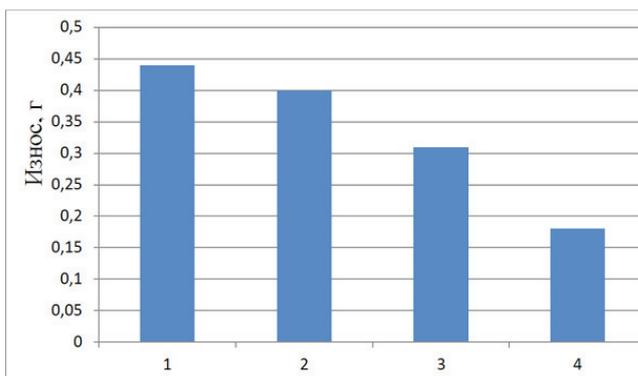


Рис. 5. Значение фактического износа образцов, прошедших испытания (в граммах). Для дисков, изготовленных по разным технологиям: 1 – сталь 45 HRC52...54; 2 – сталь 15X с цементацией и закалкой до HRC54...56; 3 – сталь 45 с упрочняющим покрытием (12 ГПа); 4 – сталь 45 с упрочняющим покрытием (18 ГПа)

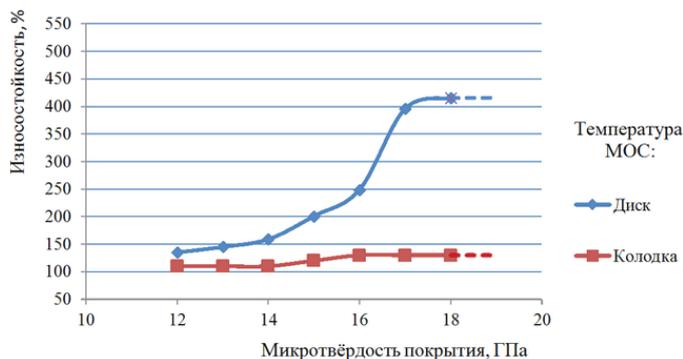


Рис. 6. Влияние микротвёрдости покрытия диска на износостойкость деталей сопряжения

Выводы

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

- сопряжения с упрочнёнными дисками обладают более высокой устойчивостью к воздействию кварцевых абразивных частиц, чем сопряжения с дисками, изготовленными с применением классических технологий;
- максимальное повышение износостойкости наблюдается при микротвёрдости покрытия 17 ГПа и выше;
- ни на одном из образцов не выявлено дефектов покрытия (отслаиваний, сколов и др.), что свидетельствует о возможности применения карбидохромовых покрытий, полученных термическим разложением гексакарбонила хрома, для восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники;
- технология получения хромовых и карбидохромовых покрытий термическим разложением гексакарбонила хрома представляет большой интерес и может быть использована при реализации процессов восстановления и изготовления прецизионных деталей гидравлических систем сельскохозяйственной техники. Ее можно также рекомендовать для упрочнения и восстановления широкой номенклатуры прецизионных деталей топливной аппаратуры сельскохозяйственных, дорожно-строительных и лесозаготовительных машин.

Библиографический список

1. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. 140 с.
2. Сёмочкин В.С. Повышение долговечности прецизионных деталей гидравлических распределителей нанокompозитным химическим никелированием: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Саратов, 2013.
3. Хрущёв М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
4. Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М.: МГАУ имени В.П. Горячкина, 2006.
5. Ерохин М.Н., Казанцев С.П. Диффузионные покрытия в ремонтном производстве. М.: ФГОУ ВПО МГАУ имени В.П. Горячкина, 2006. 124 с.
6. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Применение карбонильного хрома для получения упрочняющих покрытий на деталях сельскохозяйственной техники // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК». Минск: БГАТУ, 2014. Ч. 1. С. 275-278.
7. Козырев В.В. Металлоорганические соединения в машиностроении и ремонтном производстве. Тверь: Издательство «Студия-С», 2003. 160 с.
8. Hugh O. Pierson. Handbook of Chemical Vapor Deposition, 1999.
9. Сыркин В.Г. Газофазная металлизация через карбонилы. М.: Металлургия, 1985. 248 с.
10. Разуваев Г.А., Грибов Б.Г., Домрачев Г.А. и др. Металлоорганические соединения в электронике. М.: Наука, 1972. 479 с.

Статья поступила 07.09.2017

WEAR-RESISTANCE OF CARBIDE-CONTAINING CHROME COATINGS OBTAINED FROM GAS PHASE

MIKHAIL N. EROKHIN, DSc (Eng), Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor¹
E-mail: Er.mihn@mail.ru

SERGEY P. KAZANTSEV, DSc (Eng), Professor¹
E-mail: kspts@bk.ru

NIKOLAI N. CHUPYATOV, PhD (Eng), Associate Professor²
E-mail: nikolaj-ch@mail.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

² Tver State Technical University, Afanasy Nikitin Emb., 22, Tver, 170026, Russian Federation

The paper contains the research results of the wear resistance of CVD coatings obtained by thermal decomposition of chromium carbide on a substrate made of steel 45 GOST 1050-88 as compared with uncoated samples: cemented and hardened to HRC54...56 steel 15X GOST 4543-71 and steel 45 GOST 1050-88 with HFC-hardening to HRC52...54. Experiments with the study of wear resistance have been performed with

disc-pad samples on a SMC-2 friction machine. The abrasion resistance of surfaces was assessed visually (by the presence of wear traces), and by the samples mass decrease. It has been established that matings with discs having a carbide chrome coating are characterized by a higher resistance to the action of quartz abrasive particles than matings with disks produced by classical technologies. The maximum increase in wear resistance is observed when the coating microhardness is 17 GPa and higher. None of the samples having a CVD coating has shown defects (peeling, chips, etc.) in the coating after the tests. The obtained results have provided for a substantiated conclusion to be made on the possibility of using carbidechrome coatings obtained by thermal decomposition of chromium hexacarbonyl for the restoration and hardening of farm machinery parts.

Key words: chrome coatings, CVD method, metallization, chromium hexacarbonyl, chromium carbide, carbide chrome coatings, wear resistance.

References

1. Yerokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Sposoby modifitsirovaniya poverkhnostey treniya detaley mashin: Monografiya [Methods of modifying friction surfaces of machine parts: Monograph]. M.: FGBOU VPO MGAU, 2014. 140 p. (in Rus.)
2. Somochkin V.S. Povysheniye dolgovechnosti pretsizionnykh detaley gidravlicheskiykh raspredelitel'nykh nanokompozitnym khimicheskim nikelirovaniyem: Dissertatsiya na soiskaniye uchonoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Increasing the durability of precision parts of hydraulic distributors by nanocomposite chemical nickel plating: PhD (Eng) thesis]. Saratov, 2013. (in Rus.)
3. Khrushchov M.M., Babichev M.A. Abrazivnoye iznashivaniye [Abrasive wear]. Moscow, Nauka, 1970. 252 p. (in Rus.)
4. Kazantsev S.P. Razrabotka kombinirovannoy tekhnologii polucheniya zhelezoboridnykh pokrytiy pri vosstanovlenii i uprochnenii detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki. Dissertatsiya na soiskaniye uchonoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Development of a combined technology for obtaining iron-bearing coatings for the restoration and strengthening of agricultural machinery parts]. DSc (Eng) thesis. Moscow, MGAU imeni V.P. Goryachkina, 2006. (in Rus.)
5. Yerokhin M.N., Kazantsev S.P. Diffuzionnyye pokrytiya v remontnom proizvodstve [Diffusion coatings in repair production]. Moscow, FGOU VPO MGAU imeni V.P. Goryachkina, 2006. 124 p. (in Rus.)
6. Yerokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Primneniye karbonil'nogo khroma dlya polucheniya uprochnyayushchikh pokrytiy na detalyakh sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Application of carbonyl chromium to obtain hardening coatings on agricultural machinery parts]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennyye problemy osvoyeniya novoy tekhniki, tekhnologiy, organizatsii tekhnicheskogo servisa v APK"*. Minsk, BGATU, 2014. Part 1. Pp. 275-278. (in Rus.)
7. Kozyrev V.V. Metalloorganicheskiye soyedineniya v mashinostroyenii i remontnom proizvodstve [Organometallic compounds in mechanical engineering and repair production]. Tver', Izdatel'stvo "Studiya-S", 2003. 160 p. (in Rus.)
8. Hugh O. Pierson. Handbook of Chemical Vapor Deposition, 1999.
9. Syrkin V.G. Gazofaznaya metallizatsiya cherez karbonily [Gas-phase metallization through carbonyls]. Moscow, Metallurgiya, 1985. 248 p. (in Rus.)
10. Razuvayev G.A., Gribov B.G., Domrachev G.A. i dr. Metalloorganicheskiye soyedineniya v elektronike [Metalloorganic compounds in electronics]. Moscow, Nauka, 1972. 479 s. (in Rus.)

The paper was received on September 7, 2017