

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7783

УДК 621.357.74

Статья

Повышение износостойкости муфты сцепления композиционным гальваническим хромированием

Жачкин Сергей Юрьевич

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация), zhach@list.ru

Козлов Вячеслав Геннадьевич

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация), vya-kozlov@yandex.ru

Трифонов Григорий Игоревич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Российская Федерация), grishakip@yandex.ru

Сидоркин Олег Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Российская Федерация), trifonov_gi@mail.ru

Получена: 7 марта 2024 / Принята: 4 июня 2024 / Опубликовано: 11 июня 2024

Аннотация: В настоящее время развиваются технологии и инновации, которые направлены на восстановление и упрочнение рабочих поверхностей деталей машин, в особенности при рассмотрении специального оборудования агропромышленного комплекса, поэтому большой интерес вызывают технологии получения качественных хромовых износостойких композиционных покрытий. Их многокомпонентная структура лежит в основе улучшения работоспособности восстанавливаемых деталей сельскохозяйственных машин. Данная научная работа посвящена исследованию износостойкости образцов с нанесёнными покрытиями гальваническим хромированием. Так, представлены результаты экспериментов, которые дали основу для уточнения механизма износостойкости сталей с хромовым покрытием, полученные стандартным гальваническим методом, а также методом нанесения композиционных покрытий. Проводимые экспериментальные исследования выполнялись на образцах из стали 30ХГСА ТУ 14-1-950-74 в форме цилиндра, которые учитывают эксплуатационные

особенности специального тракторного оборудования и условия его работы. Размер цилиндрических образцов из стали 30ХГСА: диаметр 25 мм, длина 150 мм. Для осаждения покрытий применялся электролит: 200—250 г/л CrO_3 и 2,0—2,5 г/л H_2SO_4 . При этом использовалась экспериментальная установка, разработанная коллективом авторов, которая полностью соответствует требованиям по формированию функциональных покрытий на поверхностях деталей сельскохозяйственной техники и специального оборудования. После проведения операций по нанесению хромовых покрытий были детально проанализированы их критерии качества ввиду высокой вероятности образования избыточных остаточных напряжений. На данных образцах проводился весь цикл предварительной подготовки для нанесения покрытий. Проведены испытания и представлены полученные сводные результаты по их относительной износостойкости. Кроме того, получены данные по интенсивности износа исследуемых образцов при различных нагрузках на узел трения. Исследования показали, что существующие утверждения о преимуществах композиционных покрытий подтверждаются, поскольку количественная характеристика износа в образцах менялась в пользу увеличения износостойкости при применении метода нанесения композиционных покрытий. При этом виды износа образцов со стандартными гальваническими и хромовыми композиционными покрытиями оказались сходными с серийными парами трения.

Ключевые слова: хромирование; композиционное покрытие; износ; износостойкость; плотность тока; электролит

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7783

Article

Clutch wear resistance enhancement by composite galvanic chrome plating

Sergey Zhachkin

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I (Russian Federation), zhach@list.ru

Vyacheslav Kozlov

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I (Russian Federation), vya-kozlov@yandex.ru

Grigory Trifonov

Ph. D. in engineering, senior researcher, Military educational scientific center Air force «Air force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin» (Russian Federation), grishakip@yandex.ru

Oleg Sidorkin

Ph. D. in engineering, associate professor, Military educational scientific center Air force «Air force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin» (Russian Federation), trifonov_gi@mail.ru

Received: 7 March 2024 / Accepted: 4 June 2024 / Published: 11 June 2024

Abstract: At a time of developing technologies and innovations aimed at restoring and strengthening the working surfaces of machine parts, especially considering special equipment of the agro-industrial complex, technologies for obtaining high-quality chrome wear-resistant composite coatings are of great interest. Their multicomponent structure underlies operability improvement of the restored parts of agricultural machinery. This work presents the study of the wear resistance of samples with electroplated chrome plating coatings. The experimental results provided the basis for clarifying the mechanism of wear resistance of chrome-coated steels obtained by the standard electroplating method, as well as by the method of applying composite coatings. The experimental studies were performed on samples made of steel 30KHGSA TU 14-1-950-74 in the form of a cylinder, which take into account the operational characteristics of special tractor equipment and its working conditions. The size of cylindrical samples made of 30HGSA steel were the following: diameter 25 mm, length 150 mm. The authors used the electrolyte 200—250 g/l CrO₃ and 2.0—2.5 g/l H₂SO₄

for deposition of coatings. An experimental installation was developed by a team of authors, which met the requirements for functional coatings formation on the surfaces of agricultural machinery parts and special equipment. The chrome coating quality criteria were analyzed in detail because of the high probability of excessive residual stresses. The entire cycle of preliminary preparation for coating was performed on these samples. Tests results and summary results on relative wear resistance are presented. In addition, data were obtained on the wear intensity of the studied samples under various loads on the friction unit. The conducted studies have shown that the existing claims about the advantages of composite coatings are confirmed, since the quantitative characteristics of samples wear demonstrated wear resistance increase when using the composite coating method. The type of samples wear with standard galvanic and chrome composite coatings turned out to be similar to that of serial friction pairs.

Keywords: chrome plating; composite coating; wear; wear resistance; current density; electrolyte

1. Введение

История современных тракторов неразрывно связана с проблемой их интенсивного износа. Учитывая то, что преимущественно тракторная техника используется в сельском хозяйстве и строительной отрасли, непрерывный процесс износа является неотъемлемым аспектом её жизненного цикла. Представляя собой сложную техническую систему, тракторы подвержены различным видам износа. Один из наиболее распространённых видов износа — это механический износ, вызванный трением между движущимися деталями. Это может происходить в результате неправильной эксплуатации машины, несоответствия смазочных материалов и деталей, а также нарушения режима работы. Кроме того, износ может быть вызван абразивными материалами, с которыми тракторы взаимодействуют во время работы. Песок, глина, гравий и другие вещества, находящиеся на поле или строительной площадке, могут наносить повреждения металлическим деталям тракторов, вызывая износ последних. Это требует постоянного внимания со стороны операторов и использования защитных покрытий с целью уменьшения износа.

Инновационные технологии восстановления и упрочнения контактирующих поверхностей деталей машин и механизмов, которые эксплуатируются в условиях высокого контактного давления, в контакте с агрессивными средами и веществами, а также при высоких показателях температурных режимов, как правило, основываются на основополагающих способах получения функциональных покрытий.

Опираясь на детальный анализ работ [1—3], можно утверждать, что на современном этапе развития технологий по восстановлению работоспособности детали любого агропромышленного агрегата перспективной (с точки зрения получения качественных износостойких композиционных покрытий и, кроме того, безопасной и экономически выгодной) является технология гальванического хромирования.

Получаемые покрытия при хромировании сталей характеризуются многими параметрами качества [4]. Многокомпонентная структура композитных покрытий улучшает работоспособность рабочих поверхностей восстанавливаемых деталей сельскохозяйственных машин в условиях скольжения и присутствия смазки. Так, один из самых важных эксплуатационных показателей покрытия — износостойкость [5], поскольку ввиду интенсивной работы машин в промышленных масштабах производства их сокращение срока службы обусловлено разрушением поверхностных слоёв рабочих поверхностей. Таким образом, данная научная работа посвящена исследованию износостойкости образцов с нанесёнными покрытиями гальваническим хромированием.

Муфта сцепления пускового двигателя ПД-23, применяемая на бульдозерах Т-130, Т-170 и Б10М, представляет собой важный элемент, обеспечивающий эффективное и плавное соединение между двигателем и сцеплением. Однако в процессе эксплуатации хомута бронзового 17-73-127СП возникает интенсивное изнашивание его рабочих поверхностей, что за время его активной работы приводит к снижению эксплуатационных характеристик.

Стоит отметить, что в условиях трения, возникающего при возвратно-вращательных движениях, перенос материала и структурные изменения отсутствуют.

При детальном изучении вопроса, касающегося особенностей эксплуатации хомута бронзового 17-73-127СП, был сделан вывод, что на величину его эксплуатационного ресурса прямое влияние оказывают динамические воздействия абразивных частиц в ходе его работы, особенно в случаях отсутствия упрочняющего покрытия. Известно [6], [7], что при трении хромового покрытия с другим материалом (металлическим сплавом), из которого изготовлена деталь трения, износ происходит преимущественно на детали с более низкой твердостью. Причём, согласно работам [8], [9] и прикладным исследованиям [10], [11], было определено, что хромовое покрытие на восстановленных деталях машин не имеет следов от соударения с абразивными частицами и прочих повреждений и царапин, а степень износа минимальна.

2. Материалы и методы

Цель исследований — в лабораторных условиях провести ряд экспериментов, направленных на уточнение механизма износостойкости сталей с хромовым покрытием, которое получено стандартным гальваническим методом и методом нанесения композиционных покрытий.

Для проведения исследований и выполнения поставленной в работе цели были подготовлены образцы из стали 30ХГСА ТУ 14-1-950-74 в форме цилиндра, которые учитывают эксплуатационные особенности специального тракторного оборудования и условия его работы. Размер цилиндрических образцов из стали 30ХГСА: диаметр 25 мм, длина 150 мм. Данные образцы подвергались термообработке при напряжении до 1450 МПа, шлифовались, причём шероховатость R_a достигала порядка 1,25 мкм, и затем проводился их отпуск при температуре до 230 °С в течение 120—180 мин, далее — магнитный контроль, обезжиривание, промывка и сушка.

В итоге после проведения вышеописанных действий проводилось осаждение хромовых покрытий. Состав используемого электролита: 200—250 г/л CrO_3 и 2,0—2,5 г/л H_2SO_4 . Выбранный электролит весьма широко используется на машиностроительных и автомобилестроительных предприятиях. Так, согласно известной методике, представленной в работе [12], подготовка электролита проводилась из химически чистых для анализа реактивов. В процессе его изготовления плотность измерялась с помощью ареометра, а кислотность — милливольтметром. При этом температура находилась на необходимом уровне с точностью до 1 К, что подтверждалось с помощью термометра ТПП-11 и параллельно контролировалось термометром ТН-5.

После проведения операций по нанесению хромовых покрытий на поверхности образцов были детально проанализированы их критерии качества, причём необходимо учесть, что образцы не подвергались предварительной и последующей механической обработке ввиду высокой вероятности образования остаточных напряжений [13], что обусловило

получение хромовых покрытий с высокой износостойкостью и предварительно заданными физико-механическими и эксплуатационными параметрами.

В ходе нанесения хромовых покрытий было обусловлено назначение максимальной плотности тока на уровне 350 A/дм^2 , однако в большинстве существующих гальванических цехов, ввиду ограниченности спектра специального оборудования, затруднительно обеспечить плотность тока выше 200 A/дм^2 . При нанесении покрытий величина тока должна быть ограничена на строго заданных пределах, поскольку пропуск токов большой величины приводит к избыточному нагреву поверхностей деталей, следовательно, возникает проблема обеспечения стабильных технологических режимов.

Опираясь на вышепредставленные задачи и аспекты формирования покрытий на поверхностях деталей техники, для нанесения композитных хромовых покрытий была разработана универсальная установка ГКО-1. На фото 1 изображена экспериментальная установка, которая была разработана коллективом авторов с целью обеспечения возможности по нанесению композиционных хромовых покрытий. Данная установка полностью соответствует требованиям по формированию функциональных покрытий на рабочих (изношенных) поверхностях деталей сельскохозяйственной техники и специального оборудования.



Фото 1. Установка ГКО-1 [фото автора]

Photo 1. Installation of GKO-1

В данном исследовании проводились две серии нанесения покрытий.

Серия 1 (стандартное хромирование)

Плотность тока 5 кА/м².

Температура электролита 55 °С.

Серия 2 (композиционные покрытия)

Плотность тока 20 кА/м².

Температура электролита 63 °С.

Давление инструмента 2,0 МПа.

Частота вращения детали 140 об./мин.

Число двойных ходов инструмента 140 дв. х./мин.

С целью создания на финальном этапе в верхнем слое покрытия все экспериментальные образцы серии 1 подвергались пескоструйной обработке (песок ГОСТ 3647-71) при пяти атмосферах давления.

4. Обсуждение и заключение

После проведения технологических операций по нанесению стандартных хромовых покрытий (серия 1) и композиционных покрытий (серия 2) были проведены испытания на их относительную износостойкость. Характеристики покрытий исследуемых образцов (серия 1 и серия 2) представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1. Характеристики образцов с хромовыми покрытиями

Table 1. Characteristics of samples with chrome coatings

№ серии	Шероховатость R_a , мкм	Микротвёрдость HV , МПа	Толщина покрытия, мкм	Наличие сетки трещин в покрытии
Серия 1	0,1—0,16	9800—10500	20—40	+
Серия 2	0,04—0,06	10420—11500	20—40	—

На стенде СТО1А были проведены натурные исследования типовой конструкции узла трения, а именно «ось — подшипники скольжения». Исследуя работу подвижных шарнирно-болтовых соединений с различными типами покрытий, авторы использовали специальный стенд. В ходе исследований было обработано по четыре образца в каждой серии испытаний. Результаты сравнительных испытаний показали, что при нагрузке $N = 3,6 \times 10^4$ колебаний вид зависимостей коэффициентов трения для различных нагрузок совпадает. Также было

отмечено сходство износа и несущей способности исследуемых пар. При этом отмечается большая стабильность композиционных покрытий.

Графические результаты исследований представлены на рисунке 1, испытывались образцы при различных нагрузках и частоте колебаний $\nu = 0,5$ Гц. На графике (рисунок 1) введены следующие обозначения: 1, 2, 3 — стандартная технология хромирования; 1*, 2*, 3* — технология нанесения композиционных покрытий. Причём 1,1* — $P = 18,8$ МПа; 2,2* — $P = 42,3$ МПа; 3,3* — $P = 84,3$ МПа. При этом 1, 2, 3 — стандартная технология хромирования; 1*, 2*, 3* — технология нанесения композиционных покрытий.

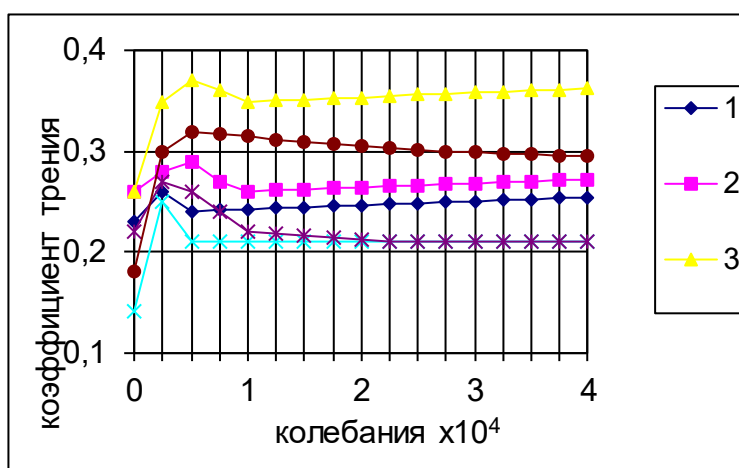


Рисунок 1. Зависимость коэффициента трения от наработки подшипников [рисунок авторов]

Figure 1. Dependence of the coefficient of friction on the operating time of bearings

В таблице 2 представлены полученные данные по интенсивности износа образцов при различных нагрузках на узел трения. Полученные данные были сформированы при показателе в один миллион колебаний.

Таблица 2. Характеристики образцов с хромовыми покрытиями

Table 2. Characteristics of samples with chrome coatings

Нагрузка на узел трения, МПа	Интенсивность износа, мкм/мин		
	Стандартный узел трения	Узел трения с композиционным покрытием	
	пористое	пористое	герметичное
18,8	0,001—0,002	0,0007	0,0011—0,0012
42,3	0,007—0,035	0,0049	0,0058—0,0062

Используя существующую методику проверки износостойкости [12], были проведены аналитические операции по оценке износостойкости покрытий, которые, как показано в данной работе, были получены двумя разными технологиями их нанесения. Было установлено, что технология нанесения композиционных покрытий (серия 2) и её первичная основа (серия 1) обеспечивают получение покрытий, которые в ходе последующей эксплуатации подвергаются повторяющимся циклам изнашивания, причём механизм износа можно представить следующим образом:

- образование плёнки красноватого или бронзового оттенка на поверхности бронзового подшипника (при $P < P_{кр}$) или (при $P > P_{кр}$);
- разрушение плёнки на определённой глубине;
- отшелушивание плёнки, образование глубоких лунок и рисок;
- сглаживание поверхности трения бронзовых подшипников, образование новой плёнки;
- налипание плёнки (бронзы) на хромовые поверхности образца.

Подводя итог проведённым экспериментальным и натурным исследованиям, было выяснено, что с увеличением удельных нагрузок интенсивность износа также растёт. В сравнении с серийными образцами интенсивность износа остаётся практически на исходном уровне. Проведённые исследования показали, что существующие утверждения и научные гипотезы, описывающие особенности и преимущества композиционных покрытий в сравнении со стандартными (легированными), подтверждаются, поскольку, как показали экспериментальные исследования, количественная характеристика износа менялась в пользу увеличения износостойкости при применении метода нанесения композиционных покрытий (серия 2).

Отсюда делаем выводы:

- вид износа и несущая способность образцов со стандартными гальваническими и хромовыми композиционными покрытиями оказались сходными с серийными парами трения;
- с увеличением нагрузок интенсивность изнашивания увеличивается, однако в случае с композиционными покрытиями данный процесс протекает в меньшей степени.

Список литературы

1. *Кравченко И. Н.* Обоснование рационального способа восстановления деталей рабочих органов бетоносмесительных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Балашиха, 2003. 24 с.
2. *Блюментейн В. Ю., Малахов М. С.* Способы восстановления деталей и процессы реновации машин. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2016. 139 с. ISBN 978-5-906888-23-5.
3. *Коломейченко А. В.* Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами

с применением микродугового оксидирования. Орёл: Орловский государственный аграрный университет им. Н. В. Парахина, 2012. 255 с.

4. Жетесова Г. С., Жаркевич О. М., Нуржанова О. А. Оценка показателей качества газотермических покрытий // *Технология машиностроения*. 2017. № 10. С. 27—30.
5. Якунина Ю. Ю. Обзор технологии повышения износостойкости покрытий при восстановлении деталей // *Высшая школа*. 2016. № 21-1. С. 78—79.
6. Обзор и анализ разработок и исследований трибологических характеристик покрытий Ni—P как альтернатива хромовым покрытиям / Е. Г. Винокуров, Т. Ф. Бурухина, В. Д. Скопинцев [и др.] // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2023. Т. 31, № 1. С. 19—35. DOI: 10.47188/0869-5326_2023_31_1_19.
7. Жачкин С. Ю. Восстановление деталей плунжерных пар дисперсно-упрочнённым хромовым покрытием // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2006. № 10. С. 10.
8. Жачкин С. Ю. Восстановление деталей сельхозмашин методом холодного нанесения гальванических композитных хромовых покрытий: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 45 с.
9. Жачкин С. Ю. Восстановление деталей сельхозмашин методом холодного нанесения гальванических композитных хромовых покрытий: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 367 с.
10. Глянцев Н. И., Стекольников Н. М., Котов В. В. Шероховатость хромовых покрытий // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2005. Т. 5, № 6. С. 828—833.
11. Битюцкая Л. А., Соколов Ю. В., Спиридонов Б. А. Особенности электрокристаллизации хромовых покрытий // *Технология машиностроения*. 2011. № 6. С. 17—19.
12. Гаркунов Д. Н., Старосельский А. А. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 126 с.
13. Гринченко М. И. Метод определения механических остаточных напряжений и его перспективы для создания эталона единицы механического остаточного напряжения // *Вестник метролога*. 2016. № 4. С. 19—23.

References

1. Kravchenko I. N. *Substantiation of a rational way to restore the details of the working bodies of concrete mixing machines: Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Balashikha, 2003. 24 p. (In Russ.)
2. Blumenstein V. Yu., Malakhov M. S. *Methods of restoration of parts and processes of renovation of machines*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, 2016. 139 p. ISBN 978-5-906888-23-5. (In Russ.)
3. Kolomeichenko A. V. *Technologies for increasing the durability of machine parts by restoring and strengthening working surfaces by combined methods using microarc oxidation*. Orel: Oryol State Agrarian University named after N. V. Parakhin, 2012. 255 p. (In Russ.)
4. Zhetesova G. S., Zharkevich O. M., Nurzhanova O. A. Assessment of the quality indicators of gas thermal coatings. *Mechanical engineering technology*, 2017, no. 10, pp. 27—30. (In Russ.)
5. Yakunina Yu. Y. Review of technology for increasing the wear resistance of coatings during the restoration of parts. *High school*, 2016, no. 21-1, pp. 78—79. (In Russ.)
6. Vinokurov E. G., Burukhina T. F., Skopintsev V. D., Vasil'ev V. V., Grafushin R. V. Review and analysis of the development and research of tribological characteristics of Ni—P coatings

- as an alternative to chrome coatings. *Electroplating and surface treatment*, 2023, vol. 31, no. 1, pp. 19—35. doi: 10.47188/0869-5326_2023_31_1_19. (In Russ.)
7. Zhachkin S. Yu. Restoration of parts of plunger pairs with a dispersed-hardened chrome coating. *Repair. Recovery. Modernization*, 2006, no. 10, p. 10. (In Russ.)
 8. Zhachkin S. Y. *Restoration of agricultural machinery parts by cold application of electroplated composite chrome coatings: specialty 05.20.03 «Technologies and maintenance tools in agriculture»: Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2005. 45 p. (In Russ.)
 9. Zhachkin S. Yu. *Restoration of agricultural machinery parts by cold application of electroplated composite chrome coatings: specialty 05.20.03 «Technologies and maintenance tools in agriculture»: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2005. 367 p. (In Russ.)
 10. Glossev N. I., Stekolnikova N. M., Kotov V. V. Roughness of chrome coatings. *Sorption and chromatographic processes*, 2005, vol. 5, no. 6, pp. 828—833. (In Russ.)
 11. Bityutskaya L. A., Sokolov Yu. V., Spiridonov B. A. Features of electrocrystallization of chrome coatings. *Mechanical engineering technology*, 2011, no. 6, pp. 17—19. (In Russ.)
 12. Garkunov D. N., Staroselsky A. A. *Durability of rubbing machine parts*. Moscow, Mechanical engineering, 1967. 126 p. (In Russ.)
 13. Grinchenko M. I. Method for determining mechanical residual stresses and its prospects for creating a standard unit of mechanical residual stress. *Bulletin of the metrologist*, 2016, no. 4, pp. 19—23. (In Russ.)