

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ /
AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-35

FE-NI-P GALVANIC COATINGS FOR RESTORATION OF WORN PARTS
OF AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT¹Shemyakin A. V., ¹Stekolnikov Yu. A., ¹Uspensky I. A., ¹Yukhin I. A.,
²Fomin S. D., ¹Pukhov E. V., ¹Kutyraev A. A.¹Ryazan Agrotechnological University named after P. A. Kostychev
Ryazan, Russian Federation²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
Volgograd State Agrarian University
Volgograd, Russian Federation

Corresponding author E-mail: ivan.uspensckij@ya.ru

Received 25.02.2024

Submitted 05.04.2024

Abstract

Introduction. By analyzing the electrodeposited Fe-Ni-P alloy using electron microscope scanning and X-ray analysis, its unusual structure, including micro and morphological features, becomes apparent. This alloy, produced from a sulphate electrolyte using asymmetric alternating current, is a complex system with the presence of α -Fe and β -Ni phases, as well as phosphorus integrated into Fe α Ni and a FeSO₄ phase resulting from electrolysis under dynamic conditions. The use of heat treatment causes the appearance of additional phases such as Ni₃P and Fe₃P. A notable characteristic of this alloy is its unique amorphous-nanocrystalline structure. Enhancing the performance of Fe-Ni-P alloy shells is the integration of phosphorus, which makes them twice strong and three times more corrosion resistant than traditional Fe-Ni shells. Also, heat treatment of these shells leads to an increase in their resistance to corrosion and microhardness due to the creation of intermetallic phases. It has been observed that plows treated in this way are distinguished by 1.5-2.2 times improved resistance to abrasion and corrosion compared to sormite products, achieving results similar to composite shells. Research shows a significant reduction in wear on the inside of grain pipelines after they are treated with an alloy based on iron, nickel and phosphorus. In particular, after moving 25,000 tons of grain, grain pipelines restored with this alloy demonstrate approximately 2.4-3.1 times lower levels of wear compared to analogues made from conventional sheet steel. **Object.** The object of the study is the study of galvanic coatings of the Fe-Ni-P type. **Results and conclusion.** The use of cathode current with variable asymmetry, where the current density ranges from 5 to 30 A/dm² and the asymmetry coefficient ranges from 8 to 12, leads to the formation of surfaces with uniform structures. These structures are characterized by the presence of both amorphous and crystalline particles, creating patterns that are similar in appearance to spheres and droplets. They contain phases of compounds such as Ni₃P and Fe₃P, and also contain elements such as α -Fe, β -Ni, and phosphorus, which are incorporated into Fe α Ni solid solutions.

Keywords: ploughshares, grain pipelines, Fe-Ni-P coating, sulfate electrolyte, asymmetric alternating current, scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis.

Citation. Shemyakin A. V., Stekolnikov Yu. A., Uspensky I. A., Yukhin I. A., Fomin S. D., Pukhov E. V., Kutyraev A. A. FE-NI-P galvanic coatings for restoration of worn parts of agricultural machinery and technological equipment. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2024. 3(75). 302-309 (in Russian). DOI:10.32786/2071-9485-2024-03-35.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.198

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ FE-NI-P ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

¹Шемякин А. В., доктор технических наук, профессор
¹Стекольников Ю. А., кандидат химических наук
¹Успенский И. А., доктор технических наук, профессор
¹Юхин И. А., доктор технических наук, профессор
²Фомин С. Д., доктор технических наук, профессор
¹Пухов Е. В., доктор технических наук, профессор
¹Кутыраев А. А., студент

¹ФГБОУ ВО «Рязанский агротехнологический университет имени П. А. Костычева»
г. Рязань, Российская Федерация
²ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ
г. Волгоград, Российская Федерация

Актуальность. Анализируя гальванически нанесенный сплав Fe-Ni-P с помощью сканирования электронным микроскопом и рентгеновского анализа, становится очевидной его необычная структура, включающая микро- и морфологические особенности. Этот сплав, получаемый из сульфатного электролита при использовании асимметричного переменного тока, представляет собой комплексную систему с присутствием α -Fe и β -Ni фаз, а также фосфора, интегрированного в FeNi, и фазы FeSO₄, возникающей в результате электролиза при динамических условиях. Применение тепловой обработки вызывает появление дополнительных фаз, таких как Ni₃P и Fe₃P. Примечательной характеристикой данного сплава является его уникальная аморфно-нанокристаллическая структура. Усиление характеристик оболочек из сплава Fe-Ni-P происходит благодаря интеграции фосфора, который делает их вдвое прочнее и в три раза более защищенными от коррозии по сравнению с традиционными Fe-Ni оболочками. Также термическая обработка этих оболочек ведет к увеличению их устойчивости к коррозии и микротвердости за счет создания интерметаллических фаз. Было замечено, что обработанные таким образом пилы выделяются улучшенной в 1,5-2,2 раза стойкостью к абразивному износу и коррозии по сравнению с изделиями из сормайта, достигая результатов, аналогичных композитным оболочкам. Исследования показывают значительное уменьшение износа внутренней части зернопроводов после их обработки сплавом на основе железа, никеля и фосфора. В частности, после перемещения 25 000 тонн зерна зернопроводы, восстановленные данным сплавом, демонстрируют примерно в 2,4-3,1 раза более низкий уровень износа по сравнению с аналогами, изготовленными из обычной листовой стали. **Объект.** Объектом исследования является изучение гальванических покрытий типа Fe-Ni-P. **Результаты и выводы.** Применение катодного тока с переменной асимметрией, где плотность тока колеблется от 5 до 30 А/дм² и коэффициент асимметрии находится в диапазоне от 8 до 12, приводит к формированию поверхностей с равномерными структурами. Эти структуры характеризуются наличием как аморфных, так и кристаллических частиц, создавая образцы, которые внешне похожи на сферы и капли. В их состав входят фазы соединений вроде Ni₃P и Fe₃P, а также содержатся элементы, такие как α -Fe, β -Ni, и фосфор, встраивающийся в твердые растворы FeNi.

Ключевые слова: лемеха, зернопроводы, покрытие Fe-Ni-P, сульфатный электролит, асимметричный переменный ток, растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ.

Цитирование. Шемякин А. В., Стекольников Ю. А., Успенский И. А., Юхин И. А., Фомин С. Д., Пухов Е. В., Кутыраев А. А. Гальванические покрытия FE-NI-P для восстановления изношенных деталей сельскохозяйственной техники и технологического оборудования. *Известия НВ АУК.* 2024. 3(75). 302-309. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-35.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. В области машиностроения часто сталкиваются с проблемой восстановления первоначальных габаритов деталей, подвергшихся износу. Решением этой задачи служит использование гальванических покрытий, особенно на основе железа и его сплавов, благодаря их выдающимся свойствам, включая высокую устойчивость к коррозии, износу, а также значительную твердость и специфическую структуру [1-3].

Среди прочих Fe-Ni-P покрытия замечательны своими уникальными химическими и физико-механическими качествами. Однако, несмотря на известность их полезных свойств, детальные данные о их химическом составе, структуре, морфологии, а также об особенностях физико-механических характеристик в разнообразных условиях электролиза все еще требуют углубленного изучения. Данное исследование посвящено детальному анализу структурных особенностей и фазового состава покрытий на основе Fe-Ni-P, созданных с применением асимметричного переменного тока для их нанесения.

Материалы и методы. Для производства гальванических покрытий из сплава Fe-Ni-P использовалась технология, основанная на применении специализированного оборудования, работающего на основе несимметричного переменного тока. Это устройство состояло из трансформатора для переменного тока, пары тиристоров и контроллера для их управления, включая в себя генератор импульсов, базирующийся на однопереходном транзисторе. Сила тока на катоде менялась в пределах от 5 до 30 ампер на квадратный дециметр, при этом коэффициент асимметрии тока (β) изменялся от 2 до 16 на фоне частоты в 60 Гц. Через управление переменным резистором достигалась регулировка задержки импульсов, что позволяло корректировать момент срабатывания тиристоров, основываясь на периоде, когда напряжение в сети пересекает нулевую отметку, обеспечивая тем самым изменение угла их активации.

Результаты и обсуждение. На специализированной лабораторной установке для нанесения гальванических слоев Fe-Ni-P применялся уникальный процесс, который задействовал асимметричный переменный ток. Этот процесс осуществлялся при различных условиях: катодная плотность импульсов тока варьировалась от 5 до 30 А/дм², асимметрия тока (β) менялась в диапазоне от 2 до 16, при этом частота составляла 60 Гц.

Структура самой установки включала в себя комплексные элементы: трансформатор для переменного тока, пару тиристоров и блок для их управления. Важную роль играл блок управления тиристорами, оборудованный генератором импульсов, работающим на основе однопереходного транзистора. Для точной настройки момента срабатывания тиристоров относительно периода сетевого напряжения использовался переменный резистор, что позволяло изменять угол их активации.

В составе используемого электролита присутствуют различные компоненты: от 350 до 400 граммов на литр серной кислоты с уровнем pH между 0,6 и 1,0, сернокислое железо в концентрации 150 до 350 граммов на литр, никель сернокислый, содержание которого варьируется от 10 до 75 граммов на литр, гипофосфит натрия и аскорбиновая кислота, добавляемые в количествах 5-15 граммов и 3-7 граммов на литр соответственно. Для поддержания и корректировки уровня pH в процессе использовалась серная кислота. Перед началом электролиза, который длится от одной до тридцати минут, образцы подвергались предварительной подготовке. Этот процесс включал химическое обезжиривание в щелочной среде в течение пяти минут, за которым следовали горячая и холодная промывки (при температурах 50 и 20 градусов Цельсия соответственно) на протяжении одной-двух минут. После этого образцы подвергались анодному пассивированию в растворе серной кислоты концентрацией 30% на полминуты до минуты и завершались холодной промывкой.

Размеры слоев колебались между 10 мкм и 300 мкм. Для исследования химического состава и структуры слоев использовали технику рентгеновского дифракционного анализа с применением аппаратуры «Дрон-4М» и использованием Co-K α излучения. Детальное изучение структуры поверхности и химического состава проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6380LV от JEOL (Япония) и аналитической системы INCA 250 от Oxford Instrument (Великобритания). В некоторых экспериментах слои подвергались обработке при температуре 400 градусов Цельсия на протяжении 30-60 минут в муфельной печи, что происходило в условиях обычной атмосферы.

Анализ начальных этапов формирования покрытий из сплава Fe-Ni-P (при параметрах: время осаждения 30 секунд, плотность тока 10А/дм², и значение β равное 12) выявил формирование множества сферических частиц микро- и наноразмера, которые как связаны, так и не связаны друг с другом, формируя агломераты, как это демонстрируют иллюстрации 1 и 2. Обнаружено, что покрытие формируется на поверхности, которая была предварительно защищена от окисления, при этом в области границ наносфер и агломератов заметно увеличение содержания углерода при одновременном уменьшении уровней кислорода и фосфора.

Покрытие Fe-Ni-P отличается значительным содержанием фосфора (5,25-7,11 вес %). Размер наносфер – порядка 10-20 нм, агломератов – 1 мкм (рисунок 1).

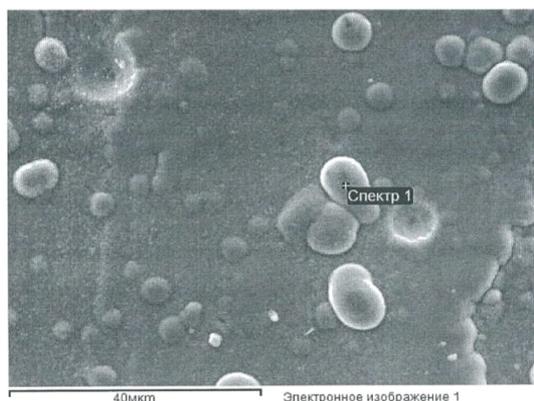


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности покрытия сплавом Fe-Ni-P
Figure 1 – Microstructure of the coating surface with Fe-Ni-P alloy

Из литературных данных известно [3], что повышение содержания фосфора в покрытиях способствует уменьшению внутренних напряжений, блокирует образование микротрещин и их развитие. В таблице 1 приведен суммарный спектр элементного состава покрытия Fe-Ni-P, полученного при указанных условиях электролиза.

Таблица 1 – Элементный состав покрытия Fe-Ni-P в зависимости от условий осаждения
($D_c=10A/dm^2$, $\beta=12$, время осаждения 10 минут)

Table 1 – Elemental composition of the Fe-Ni-P coating depending on the deposition conditions
($D_c=10A/dm^2$, $\beta=12$, deposition time 10 minutes)

Элемент / Element	Ni	C	P	Fe	O
Содержание, вес.% / Content, wt.%	13,43	6,62	7,11	51,4	21,44

Проведение электролиза на протяжении одного часа увеличивает концентрацию фосфора (от 9,5% до 10,1%) и никеля (от 17,5% до 18%), в то же время уменьшая содержание железа в покрытии. Это приводит к формированию на поверхности равномерного слоя с текстурой, напоминающей глобулы и сфероиды, и имеющего структуру, состоящую из слоев и блоков. Основываясь на анализе изображений на рисунке 1 и изучении поперечных сечений на рисунке 2, становится очевидным, что такая уникальная структура слоя обусловлена периодическими изменениями уровня щелочности возле катода. Эти изменения являются результатом использования асимметричного переменного тока в процессе электролиза и ведут к образованию осадка $FePO_4$. Дальнейшая интеграция этого осадка в покрытие подтверждается результатами анализа дифракционного рассеяния и сравнения с данными из базы ASTM.

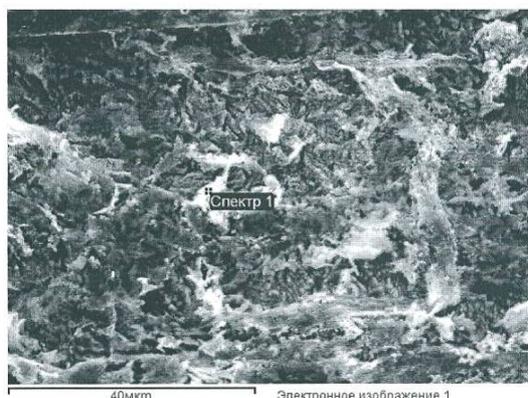


Рисунок 2 – Микроструктура поверхности железо-никель-фосфорного покрытия
Figure 2 – Microstructure of the surface of the iron-nickel-phosphorus coating

В ходе анализа рентгеновских изображений, которые были получены в процессе исследования покрытия Fe-Ni-P, сформированного при помощи электролиза с несимметричным АС с характеристиками в диапазоне $D_k=10-30 \text{ A/дм}^2$ и $\beta=6-12$, обнаружено множество компонентов. Исходное состояние покрытия до проведения тепловой обработки включало в себя различные фазы, среди которых $\alpha\text{-Fe}$, $\beta\text{-Ni}$, Ni_3P , Fe_3P и твердые растворы фосфора в FeNi . Термообработка приводит к появлению дополнительных фосфорных и Ni_2P соединений. Металлические элементы демонстрируют микрокристаллическую структуру, тогда как фосфор находится в аморфном состоянии. Это ведет к формированию уникального покрытия с аморфно-кристаллической структурой и сфероидально-глобулярной морфологией, содержащего Ni_3P и Fe_3P .

Изменение микротвердости и устойчивости к износу покрытий сплава Fe-Ni-P можно наблюдать при различных условиях электролиза, включая плотность тока 20 A/дм^2 и соотношение катод-анод $\beta=6$, как это отражено на рисунке 3. С точки зрения влияния фосфора (P) на качество покрытия, его увеличенное присутствие на стыках кристаллов в условиях неравномерного осаждения способствует повышению показателей микротвердости до диапазона $950-1090 \text{ кгс/мм}^2$ и улучшает защиту от износа. Также стоит отметить, что с ростом катодного импульса происходит уменьшение размеров глобул в процессе формирования сплава. Роль фосфора в улучшении характеристик покрытия подтверждается на примере изменения микротвердости в зависимости от его содержания, что также продемонстрировано на рисунке 3. Термическая обработка является дополнительным методом для достижения высоких показателей микротвердости.

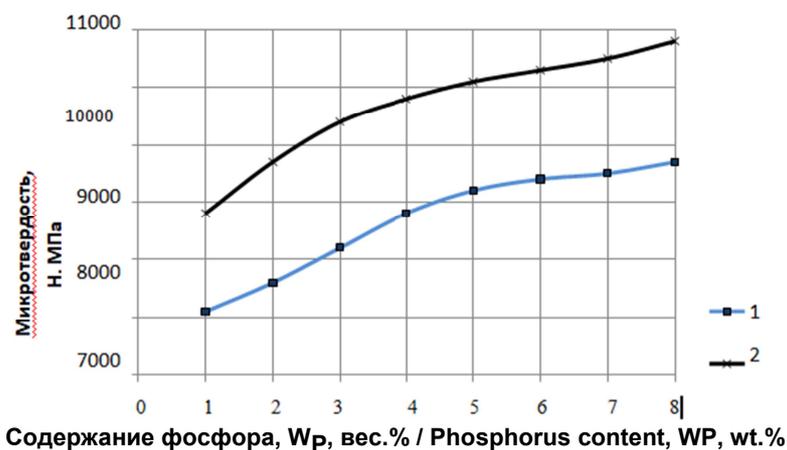


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости сплава Fe-Ni-P от содержания фосфора в сплаве без термообработки (1), после термообработки (2)

Figure 3 – Dependence of the microhardness of the Fe-Ni-P alloy on the phosphorus content in the alloy without heat treatment (1), after heat treatment (2)

Основываясь на данных, представленных в рисунке 3, можно сделать вывод о том, что покрытия, обогащенные фосфором, демонстрируют значительное усиление микротвердости, которая может возрастать с 6100 МПа до 8700 МПа в зависимости от его концентрации. Когда же рассматривается воздействие термической обработки в условиях защитной среды при температуре 400°C на протяжении одного часа, микротвердость может достигать значений от 7800 до 11000 МПа . Такое увеличение твердости объясняется формированием пересыщенного твердого раствора фосфора внутри FeNi , что характерно для Fe-Ni-P сплавов. Эти сплавы, содержащие фосфор в диапазоне от $1,3\%$ до $3,2\%$, отличаются мелкокристаллической и слоисто-блочной структурой. В то же время при увеличении содержания фосфора до $3,5-8\%$ покрытия принимают рентгеноаморфный характер, что подтверждается наличием широкого гало в диапазоне углов 2θ от 20 до $35-540$, аналогично наблюдениям для сплавов Ni-P, описанным в источниках [4, 5].

В исследованиях было обнаружено, что сплавы, содержащие от $1,2\%$ до $2,7\%$ фосфора, проявляют интересные характеристики после процесса термической обработки. В частности, в сплавах Fe-Ni-P наблюдался распад на фосфидные фазы, такие как Fe_3P , Ni_3P

и Ni_5P_2 . Этот процесс сопровождался появлением характерных линий α -Fe (110), Ni (111) и Ni (200), аналогичных тем, что были зарегистрированы в сплавах на основе Fe-P и Ni-P. Также было отмечено, что наличие углерода в покрытиях значительно влияет на поверхностную гетерогенность, создавая препятствия на пути дефектов, таких как дислокации, вакансии и микротрещины. Это, в свою очередь, улучшает характеристики износостойкости и коррозионной устойчивости сплавов, как подтверждено исследованиями.

Износ лемехов плугов, упрочненных Fe-Ni-P покрытиями при испытаниях на черноземе выщелоченном среднесуглинистом в полевых условиях при наработке 150 га в сравнении с лемехами, упрочненными сормайтом, оказался меньше на 50-70%. С упрочненной носовой частью лемеха с покрытиями Fe-Ni-P толщиной 30 мкм при сравнении с лемехами с сормайтом имели износ на 80-85% меньше при наработке 150 га в тех же полевых условиях. Эффект самозатачивания и высокая износостойкость покрытий привели к тому, что у лемехов почвообрабатывающих машин повышается долговечность, так угол заостренности составил соответственно 20-27°, а у эталонных 42-45°. Лемеха с покрытиями Fe-Ni-P имели коррозионно абразивную стойкость в 1,5-2,2 раза выше, чем из сормайта, что близко к композиционным покрытиям. Износ внутренней поверхности зернопроводов восстановленных Fe-Ni-P сплавом в 2,4-3,1 раза меньше, чем у изготовленных из листовой стали при пропуске 25000 т зерна.

Заключение. Применение катодного тока с переменной асимметрией, где плотность тока колеблется от 5 до 30 А/дм² и коэффициент асимметрии находится в диапазоне от 8 до 12, приводит к формированию поверхностей с равномерными структурами. Эти структуры характеризуются наличием как аморфных, так и кристаллических частиц, создавая образцы, которые внешне похожи на сферы и капли. В их состав входят фазы соединений вроде Ni_3P и Fe_3P , а также содержатся элементы, такие как α -Fe, β -Ni, и фосфор, встраивающийся в твердые растворы FeNi. Эта уникальная композиция, обогащенная фосфором, придает покрытиям выдающиеся свойства, сравнимые с хромовыми покрытиями из обычного хромового электролита, включая высокую устойчивость к коррозии и износу, а также значительную микротвердость. Эти качества делают полученные покрытия весьма подходящими для восстановления и улучшения деталей сельскохозяйственной техники и производственных машин.

Conclusions. The use of cathode current with variable asymmetry, where the current density ranges from 5 to 30 A/dm² and the asymmetry coefficient ranges from 8 to 12, leads to the formation of surfaces with uniform structures. These structures are characterized by the presence of both amorphous and crystalline particles, creating patterns that are similar in appearance to spheres and droplets. They contain phases of compounds such as Ni_3P and Fe_3P , and also contain elements such as α -Fe, β -Ni, and phosphorus, which are incorporated into FeNi solid solutions. This unique phosphorus-rich composition gives the coatings outstanding properties comparable to chrome coatings made of conventional chromium electrolyte, including high resistance to corrosion and wear resistance and significant microhardness. These qualities make the resulting coatings very suitable for restoring and improving parts of agricultural machinery and production machines.

Библиографический список

1. Полищук С. Д., Стекольников Ю. А., Чурилов Д. Г. и др. Восстановление сельскохозяйственной техники и оборудования гальваническими покрытиями на основе железа. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 3 (43). С. 130-135.
2. Ушанев А. И., Кравченко А. М., Борисов Г. А. и др. Современные технологии и материалы для защиты металлических и неметаллических поверхностей сельскохозяйственной техники. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 3 (43). С. 142-147.
3. Полищук С. Д. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники хромовым покрытием с применением наноглерода. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2022. Т. 14. № 3. С. 113-120.
4. Полищук С. Д., Стекольников Ю. А., Чурилов Д. Г., Стекольников Н. Ю., Арапов И. С. Восстановление сельскохозяйственной техники и оборудования гальваническими покрытиями на основе железа. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 3 (43). С. 130-135.
5. Астанин В. К., Стекольников Ю. А., Емцев В. В., Чурилов Д. Г., Композиционные покрытия на основе сплавов железа с никелем. Проблемы совершенствования машин, оборудования и технологий в агропромышленном комплексе: материалы международной научно-технической конференции. 2019. С. 74-77.
6. Чурилов Д. Г., Стекольников Ю. А., Арапов И. С., Шемякин А. В., Андреев К. П. Промышленное использование хромирования при ремонте деталей сельскохозяйственной техники. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 4 (44). С. 120-125.
7. Пухов Е. В., Сидоренков В. Л., Успенский И. А. и др. Результаты определения температурных значений поверхности восстанавливаемой детали при газотермическом плакировании. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2023. Т. 15. № 2. С. 140-146.
8. Фадеев И. В., Успенский И. А., Воронов В. П. и др. Влияние продолжительности струйной мойки на степень очистки деталей. Техника и оборудование для села. 2022. № 8 (302). С. 28-30.

9. Астанин В. К., Стекольников Ю. А., Стекольников Н. Ю. и др. Наводороживание основного металла и хромовых покрытий. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2018. № 2 (38). С. 127-136.

10. Шемякин А. В., Фадеев И. В., Успенский И. А. и др. Повышение коррозионной стойкости внутренних поверхностей топливных цистерн при очистке. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2023. Т. 15. № 1. С. 182-190.

11. Успенский И. А., Фадеев И. В., Пестряева Л. Ш. и др. Присадка к средствам для мойки деталей автотракторной техники. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 4 (60). С. 414-425.

12. Фадеев И. В., Успенский И. А., Пестряев Д. А. и др. Дипинаконборатные добавки в растворы для мойки деталей автотракторной техники. Техника и оборудование для села. 2021. № 5 (287). С. 37-40.

13. Успенский И. А., Кулик С. Н., Митрохина Е. В., Фадеев И. В. Определение оптимальной продолжительности процесса мойки деталей в растворе синтетического моющего средства. Техника и оборудование для села. 2020. № 8 (278). С. 40-42.

References

1. Polishchuk S. D., Stekolnikov Yu. Restoration of agricultural machinery and equipment with iron-based electroplating. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2019. № 3 (43). Pp. 130-135.

2. Ushanev A. I., Kravchenko A. M., Borisov G. A., et al. Modern Technologies and Materials for the Protection of Metal and Non-Metal Surfaces of Agricultural Machinery. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2019. № 3 (43). Pp. 142-147.

3. Polishchuk S. D. Restoration of Agricultural Machinery Parts by Chrome Coating Using Nanocarbon. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2022. V. 14. № 3. Pp. 113-120.

4. Polishchuk S. D., Stekolnikov Y. A., Churilov D. G., Stekolnikova N. Yu., Arapov I. S. Restoration of Agricultural Machinery and Equipment with Iron-Based Galvanic Coatings. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2019. № 3 (43). Pp. 130-135.

5. Astanin V. K., Stekolnikov Y. A., Yemtsev V. V., Churilov D. G., Composite Coatings Based on Iron-Nickel Alloys. Problems of Improving Machines, Equipment and Technologies in the Agroindustrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. 2019. Pp. 74-77.

6. Churilov D. G., Stekolnikov Y. A., Arapov I. S., Shemyakin A. V., Andreev K. P. Industrial Use of Chrome Plating in the Repair of Agricultural Machinery Details. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2019. № 4 (44). Pp. 120-125.

7. Pukhov E. V., Sidorenkov V. L., Uspenskii I. A., et al. Results of Determining the Temperature Values of the Surface of the Part to Be Restored under Gas-Thermal Cladding. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2023. V. 15. № 2. Pp. 140-146.

8. Fadeev, I. V., Uspenskii, I. A., Voronov, V. P., et al. Effect of Jet Cleaning Duration on the Degree of Cleaning of Parts. Machinery and equipment for the village. 2022. № 8 (302). Pp. 28-30.

9. Astanin V. K., Stekolnikov Y. A., Stekolnikova N. Yu., et al. Watering of the Base Metal and Chrome Coatings. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2018. № 2 (38). Pp. 127-136.

10. Shemyakin, A. V., Fadeev, I. V., Uspenskiy, I. A., et al. Improving the Corrosion Resistance of Internal Surfaces of Fuel Tanks during Cleaning. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2023. V. 15. № 1. Pp. 182-190.

11. Uspenskii I. A., Fadeev I. V., Pestryaeva L. Sh., et al. Additive to Means for Washing Parts of Automotive and Tractor Equipment. Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: science and higher professional education. 2020. № 4 (60). Pp. 414-425.

12. Fadeev I. V., Uspenskii I. A., Pestryaev D. A., et al. Dipinakonborate Additives in Solutions for Washing Parts of Automotive and Tractor Equipment. Machinery and equipment for the village. 2021. № 5 (287). Pp. 37-40.

13. Uspenskii I. A., Kulik S. N., Mitrokhina E. V., Fadeev I. V. Determination of the optimal duration of the process of washing parts in a solution of a synthetic detergent. Machinery and equipment for the village. 2020. № 8 (278). Pp. 40-42.

Информация об авторах

Шемякин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Российская Федерация, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Стекольников Юрий Александрович, кандидат химических наук, профессор, зав. кафедрой защиты растений и химии, ФГБУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Российская Федерация, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), e-mail: chemic57@mail.ru

Успенский Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация транспорта», ФГБУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Российская Федерация, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, e-mail: ivan.uspenckij@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автотракторная техника и теплоэнергетика», ФГБУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Российская Федерация, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, e-mail: yuival@gambler.ru

Фомин Сергей Денисович, доктор технических наук, доцент, заведующий Центром наукометрического анализа и международных систем индексирования, профессор кафедры «Механика», ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, Университетский проспект, д. 26), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7910-9284>, e-mail: fsd_58@mail.ru

Пухов Евгений Васильевич, доктор технических наук, профессор, ФГБНУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Российская Федерация, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), e-mail: puma231@yandex.ru

Кутыраев Александр Андреевич, лаборант кафедры «Техническая эксплуатация транспорта», ФГБНУ Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Российская Федерация, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), e-mail: kutyraev@bk.ru

Author's Information

Shemyakin Aleksander Vladimirovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Russian Federation, 390044, Ryazan, Kostycheva st.1), e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Stekolnikov Yuri Aleksandrovich, Candidate of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Plant Protection and Chemistry, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Russian Federation, 390044, Ryazan, Kostycheva st.1), e-mail: chimic57@mail.ru

Uspensky Ivan Alekseevich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Russian Federation, 390044, Ryazan, Kostycheva st.1), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, e-mail: ivan.uspenckij@yandex.ru

Yukhin Ivan Aleksandrovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Automobile and Tractor Engineering and Thermal Power Engineering, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Russian Federation, 390044, Ryazan, Kostycheva st.1), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, e-mail: yuival@rambler.ru

Fomin Sergey Denisovich, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Center for Scientometric Analysis and International Indexing Systems, Professor of the Department of Mechanics, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetsky Prospekt, 26), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7910-9284>, e-mail: fsd_58@mail.ru

Pukhov Evgeniy Vasilievich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Russian Federation, 390044, Ryazan, Kostycheva st.1), e-mail: puma231@yandex.ru

Kutyraev Aleksander Andreevich, laboratory assistant at the Department of Engineering Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Russian Federation, 390044, Ryazan, Kostycheva st.1), e-mail: kutyraev@bk.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-36

DIGITAL TWIN OF THE CHASSIS OF ELECTRIC AGRICULTURAL VEHICLE

Aksenov A. G., Ovcharenko A. S., Dmitriev K. S., Kondrakhov D. D., Volkov A. O.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM
Moscow, Russian Federation

Corresponding author E-mail: kir0597@yandex.ru

Received 15.03.2024

Submitted 20.05.2024

Summary

The article presents the results of simulation testing of a digital twin of the chassis of an electric cargo vehicle for agricultural purposes: overcoming a 50 mm hole and accelerating from a standstill. The results of the study substantiated the characteristics of the suspension elements of an electric vehicle and determined the fulfillment of the conditions for smooth running in the oscillation range of 1.5-2.5 Hz.

Abstract

Introduction. The article is devoted to the study and optimization of the chassis parameters of an electric cargo vehicle, depending on road conditions in the process of performing the transport task of an agricultural enterprise, using the method of simulation modeling. **Object:** study of a digital twin of the suspension of a sample vehicle to optimize its technical characteristics. **Methods.** Based on the developed mathematical model of the suspension of an electric vehicle and its calculated characteristics, a simulation model of the chassis of an electric cargo vehicle was compiled. The simulation model contains parameters of road surface roughness, as well as the specified speed and longitudinal acceleration of the digital twin. The objects of research were the elastic-damping characteristics of the suspension elements of an electric vehicle. **Results.** The results of simulation tests of a digital twin of an electric vehicle chassis when passing an obstacle in the form of a 50 mm hole are presented, and the case of maximum acceleration of an electric vehicle from a standstill of 3 m/s² is also considered. The result of the simulation was the dependence of the movement of the body along the vertical axis z' (m/s) and the rate of change in the angle of inclination of the body in the longitudinal plane (swaying of the body) θ' (rad/s), on the time of passing the obstacle. The analysis of the operation of the suspension of an electric vehicle substantiated the characteristics obtained by calculation. The suspension of an electric vehicle allows for smooth operation in the range of 1.5-2.5 Hz.

Keywords: simulation modeling, digital twin of the vehicle, electric transport.

Citation. Aksenov A. G., Ovcharenko A. S., Dmitriev K. S., Kondrakhov D. D., Volkov A. O. Digital twin of the chassis of electric agricultural vehicle. *Proc. of the Lower Volga Agro University Comp.* 2024. 3(75). 309-320 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-36.

Author's contribution. Authors of this research paper has directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. Authors of this paper has read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.