

Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 1 (41). С. 59-66

Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2022; (1-41): 59-66

Научная статья

УДК 621.791:669.13

Код ВАК 05.20.03

DOI: 10.52463/22274227\_2022\_41\_59

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Александр Александрович Веселовский<sup>1✉</sup>, Анатолий Егорович Немцев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>a\_a\_ves@mail.ru

<sup>2</sup>nemcev.nsk@yandex.ru

**Аннотация.** Целью исследований являлась разработка способа снижения сил трения в контакте зацепления зубчатых колес из высокопрочного чугуна машин и механизмов АПК с термодиффузионными покрытиями карбидообразующими элементами – ванадием, хромом и марганцем. **Научная новизна.** Научная новизна состоит в применении термодиффузионных методов упрочнения, в результате повышается твердость контактных поверхностей зубьев зубчатых передач мелко модульных (менее 3) чугунных зубчатых колес, а условия приработки облегчаются внешним антифрикционным покрытием, сглаживающим исходную шероховатость поверхности, а применение канавок позволяет дополнительно увеличить работоспособность на 5-10%. **Методика.** Испытаниям подвергалась чугунная прямозубая зубчатая пара с модулем, равным 4, являющаяся задней скоростью автомобиля ВАЗ 2107. Зубчатые колеса подвергались диффузионному насыщению из порошковой среды, содержащей основные диффузаны (ванадий, хром и марганец) в виде ферросплавов, инертным наполнителем являлась окись алюминия, активатором – хлористый аммоний. Затем колеса закаливались в масле с повторного нагрева в среде расплава оксида ванадия, имеющего температуру плавления 675<sup>o</sup>C и являющегося инертным к материалу покрытий. В упрочненных таким образом зубчатых колесах на рабочие поверхности зубьев наносились канавки под углом 29-31<sup>o</sup> к боковой поверхности зуба, в форме полукруга. Канавки имели глубину, рав-

ную толщине диффузионного слоя и были меньше ширины зуба, для удержания антифрикционного материала, который в последующем их заполнял. Подготовленные таким образом зубчатые колеса подвергались испытаниям на износ в сборе в коробке передач. **Результаты.** Испытания чугунных колес после термодиффузионного насыщения хромом, ванадием и марганцем (без использования канавок с антифрикционным материалом) выявили, что износостойкость ванадиевых покрытий в 4-4,4 раза, хромовых в 3,5-4 раза и марганцевых в 2-2,5 раза выше износостойкости закаленных зубчатых колес из цементованной и закаленной стали 20ХГН. А наличие канавок в термодиффузионно упрочненных зубчатых чугунных колесах, которые заполняются антифрикционным материалом, например, оловянистой бронзой ОЦС 555, любым известным способом, в частности металлическими щетками (натиранием) или работой в паре с колесом-донором, изготовленным из антифрикционного материала, позволяет увеличить износостойкость зубчатых колес из высокопрочного чугуна относительно термодиффузионно упрочненных, не содержащих канавки на 5-10%.

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, зубчатые колеса, термодиффузионные методы упрочнения, работоспособность.

**Для цитирования:** Веселовский А.А., Немцев А.Е. Способ повышения работоспособности мелко модульных зубчатых колес из высокопрочного чугуна // Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 1 (41). С. 59-66. [https://doi.org/10.52463/22274227\\_2022\\_41\\_59](https://doi.org/10.52463/22274227_2022_41_59)

### Scientific article

## METHOD OF IMPROVING THE PERFORMANCE OF SMALL-MODULE GEARS MADE OF HIGH-STRENGTH CAST IRON

Alexander A. Veselovsky<sup>1✉</sup>, Anatoly E. Nemtsev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Biotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup>a\_a\_ves@mail.ru

<sup>2</sup>nemcev.nsk@yandex.ru

**Abstract.** The aim of the research was to develop a method for reducing friction forces in the engagement of gear wheels made of high-strength cast iron of agricultural machines and mechanisms with the thermal diffusion coatings with carbide-forming elements - vanadium, chromium and manganese. **Scientific novelty.** The scientific novelty consists in the use of thermal diffusion hardening methods, as a result, the hardness of the contact surfaces of the gear teeth of fine-grained (less than 3) cast-iron gears increases, and the running-in conditions are facilitated by an external anti-friction coating that smoothes the initial surface roughness, and the use of grooves makes it possible to further increase performance by 5-10%. **Methodology.** The tests

were carried out on a cast-iron spur gear pair with a module equal to 4, which is the rear speed of the VAZ 2107 car. The gears were subjected to the diffusion saturation from a powder medium containing the main diffusants (vanadium, chromium and manganese) in the form of ferroalloys, aluminum oxide was an inert filler, the activating rum is ammonium chloride. Then the wheels were quenched into oil with reheating in the medium of molten vanadium oxide, which has a melting point of 675<sup>o</sup>C and is inert to the coating material. In gears hardened in this way, grooves were made on the working surfaces of the teeth at an angle of 29-31<sup>o</sup> to the side surface of the tooth, in the form of a semicircle. The grooves had a depth equal to the thickness of the diffusion layer

and were less than the width of the tooth, in order to hold the anti-friction material, which subsequently filled them. Gears prepared in this way were subjected to wear tests as an assembly in the gearbox. **Results.** Tests of cast iron wheels after thermal diffusion saturation with chromium, vanadium and manganese (without the use of grooves with anti-friction material) revealed that the wear resistance of vanadium coatings is 4-4.4 times, chromium coatings 3.5-4 times and manganese coatings 2-2.5 times higher wear resistance of hardened gears made of carburized and hardened steel 20KhGN. And the presence of grooves in thermomdiffusion-hardened gear cast iron wheels, which are filled with the anti-friction material, for example, tin bronze OTS 555,

**Введение.** Современное машиностроение в России невозможно представить без мероприятий, направленных на повышение надежности, конкурентоспособности выпускаемого оборудования [1-10]. Одним из направлений развития конкурентоспособности выпускаемых редукторов, коробок передач и открытых зубчатых зацеплений является снижение их себестоимости за счет применения зубчатых колес из высокопрочного чугуна с термодиффузионным покрытием ванадием, хромом и марганцем [11-12]. Компактная форма графита позволяет увеличить стойкость при изгибающих нагрузках, возникающих при работе силовых зубчатых передач, а наличие графита сферической формы обеспечивает снижение сил трения в контактной зоне.

Однако в условиях абразивного изнашивания, характерного для работы сельскохозяйственных машин, чугунные зубчатые колеса уступают стальным, карбидным, прошедшим химико-термическую и последующую термическую обработки. Но создание высокотвердых карбидных покрытий позволяет защитить поверхность от данного вида износа, так как их твердость превышает твердость основных материалов почвы – кварца и гранита [13,14].

Другим важным преимуществом использования зубчатых колес из высокопрочного чугуна является отсутствие под карбидным покрытием обезуглероженной зоны, последняя наблюдается при нанесении такого рода покрытий на стальные детали. Мягкая, обезуглероженная зона увеличивает риск продавливания покрытия при попадании в контактную зону твердых недобимых частиц.

Актуальность метода диффузионной металлизации для ремонта изношенных деталей сельскохозяйственных машин. Применением диффузионных покрытий для процессов упрочнения и восстановления деталей занимались авторы работы для деталей сельскохозяйственной техники. В качестве упрочняющих элементов были выбраны бор и хром. Исследования проводились на стальных деталях, и в качестве

by any known method, in particular, with metal brushes (rubbing) or working in tandem with a donor wheel made of anti-friction material, allows to increase the wear resistance of gears made of high-strength cast iron relative to thermo-diffusion hardened, not containing grooves by 5-10%.

**Keywords:** high-strength cast iron, gears, thermal diffusion methods of hardening, performance.

**For citation:** Veselovsky A.A., Nemtsev A.E. Method of improving the performance of small-module gears made of high-strength cast iron. Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2022; (1-41): 59-66. (In Russ) [https://doi.org/10.52463/22274227\\_2022\\_41\\_59](https://doi.org/10.52463/22274227_2022_41_59)

метода нанесения был выбран газовый, требующий специального оборудования и материалов. Увеличение толщины созданных покрытий и приобретение прочностных свойств достигалось электромеханической обработкой, что также требует специального оборудования и расходных материалов.

Упрочнение и восстановление чугунных деталей трения, анализ последующей их стойкости, влияние элементов упрочнения и т.д. в настоящее время исследован не полностью. Кроме того, все разработанные и исследованные способы диффузионного насыщения и повторного восстановления покрытий являются недоступными в экономическом плане для предприятий, эксплуатирующих сельскохозяйственную технику. Содержание и затраты на эксплуатацию такого оборудования не менее затратные, требуют брендовых марок расходных материалов, квалифицированных кадров для эксплуатации и др. Поэтому в настоящий момент в ремонтных участках такие методы восстановления утраченной работоспособности не получили распространение.

Применение метода диффузионного насыщения из порошков в корне меняет ситуацию. Это связано с минимальным технологическим оформлением ремонтных участков, доступностью и дешевизной используемых материалов, простотой технологического процесса, что делает данный способ доступным и эффективным в условиях ремонтных производств. В качестве основного оборудования в зависимости от габаритных размеров упрочняемых деталей можно использовать либо лабораторные муфельные, либо полупромышленные камерные печи с выкатным подом. Контейнеры и реторты могут быть изготовлены из подручных материалов.

В качестве основных материалов для диффузии используется отсев ферросплавов (мелочь), который практически не пригоден в металлургическом производстве без специальной подготовки, оксид алюминия, являющийся инертным наполнителем, исключаящий процессы комкования реактивов и обеспечивающий

равномерное их распределение по всему реакционному объему, и хлористый аммоний-активатор процесса, который широко используется в гидрометаллургии.

Как указывалось выше, чугун как материал по многим свойствам превосходит конструкционные углеродистые марки сталей. Он незаменим в условиях сухого трения скольжения, где графитовые включения являются смазывающим материалом и трения со смазкой, особенно в условиях аварийного завершения работ, когда пустоты от графитовых включений, выходящие наружу, являются резервуарами для смазки, откуда она вытекает в зону трения при ее дефиците и разогреве поверхностей трения.

Однако в условиях абразивного, гидроабразивного и ударно-абразивного видов изнашивания стойкость чугуновых изделий значительно уступает стойкости стальных. Но создание поверхностных диффузионных высокотвердых карбидных покрытий на поверхности чугуновых деталей делает их конкурентными стальным, прошедшими в свою очередь термическую или химико-термическую обработку. А достаточный запас углерода в чугуне делает возможным повторное восстановление первоначальных размеров и свойств.

Учитывая характер работы сельскохозяйственной техники и виды узлов трения, содержащие чугуновые детали, были определены направления исследований. Для деталей, работающих в условиях абразивного вида изнашивания с малым изменением динамики нагружения, предполагалось исследовать физико-механические и эксплуатационные характеристики высокотвердых покрытий на базе сильных карбидообразующих элементов. Представителем этой группы элементов выбран ванадий по указанным выше причинам.

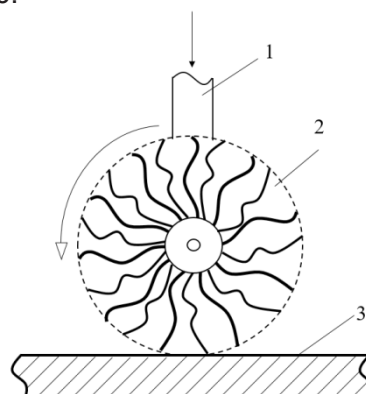
При коррозионно-механическом, гидроабразивном, абразивном видах износа при знакопеременных нагрузках следует применять покрытия средней твердости, имеющие под своей основой переходную зону, демпфирующую ударную нагрузку. Такие покрытия более пластичны в сравнении с ванадиевыми, но менее твердые. Представителем этой группы диффузантов может служить хром.

Если доминирующим видом износа является ударно-абразивный, то следует использовать элементы, образующие в чугунах покрытия, сочетающие в себе высокие показатели твердости и пластичности. Таким элементом является марганец. Марганец не образует собствен-

ных карбидов и лишь легирует цементит, а его свойство стабилизировать (расширять) область аустенита приводит к созданию между упрочняющей фазой пластической составляющей, способной упрочняться наклепом при ударном характере нагружения.

Для улучшения процессов приработки упрочненных чугуновых деталей, исключений резких толчков на начальных этапах и взамен дорогостоящей операции тонкого шлифования в настоящей работе рассмотрен вопрос нанесения внешних антифрикционных покрытий поверх диффузионных механическим способом – металлическими щетками (рисунок 1) или с применением деталей-доноров, изготовленных из антифрикционного материала, работающих в сопряжении с упрочненной деталью. При этом материал с детали-донора переносится на упрочненную деталь, залечивает исходную шероховатость и увеличивает пятно контакта сопряжений.

В качестве металла-донора могут использоваться алюминий, медь, бронза, баббиты и др. антифрикционные материалы. Нанесение внешних антифрикционных покрытий является финишной операцией подготовки деталей к эксплуатации или консервации перед отправкой потребителю.



1 – металл-донор; 2 – металлическая щетка; 3 – покрываемая поверхность изделия  
Рисунок 1 – Схема нанесения антифрикционных покрытий металлическими щетками

**Методика.** Для испытаний была изготовлена из высокопрочного чугуна ВЧ 60 зубчатая пара, являющаяся задней скоростью автомобиля ВАЗ 2107 (рисунок 2).

Исследуемые зубчатые колеса подвергали химико-термической обработке – термодиффузионному насыщению ванадием, хромом или марганцем в порошковой засыпке с последующей закалкой с повторного нагрева в распла-



ве оксида ванадия (5), имеющего температуру плавления  $675^{\circ}\text{C}$  и являющегося абсолютно инертным к материалам покрытий.

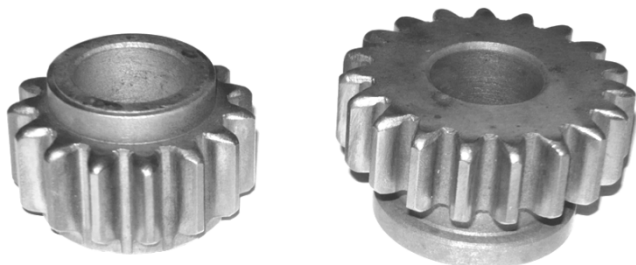
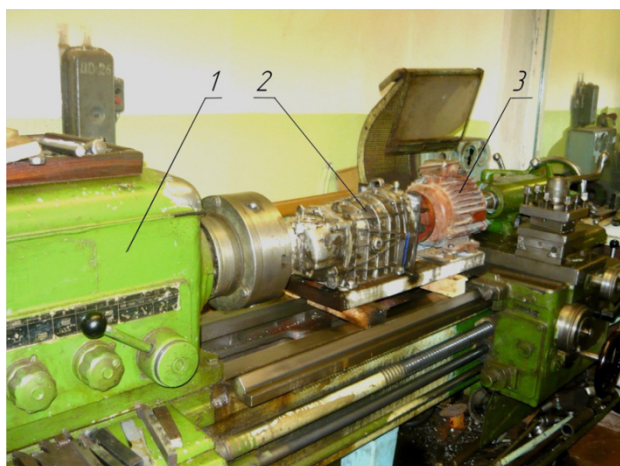


Рисунок 2 – Исследуемая зубчатая передача

Механические испытания проводились на установке, фотография которой представлена на рисунке 3.



1–токарный станок 16К20; 2 – коробка передач; 3 – асинхронный электродвигатель

Рисунок 3 – Фотография испытательной установки на износостойкость

Коробка передач устанавливалась на станину токарного станка (см. рисунок 2), входной вал через муфту крепился к валу электродвигателя, а выходной был зажат в патроне токарного станка, кинематика которого обеспечивает нагружающий момент сопротивления  $7,84 \text{ Н}\cdot\text{м}$  (станок выключен). Базовое число циклов испытаний составляло  $5 \cdot 10^6$  циклов вращения выходного вала коробки передач, после чего исследуемая зубчатая пара отправлялась на металлографический анализ оставшейся толщины покрытия.

Для изучения процессов приработки упрочненных зубчатых колес с внешними антифрикционными покрытиями, нанесенными механическим путем, были выбраны зубчатые

колеса с наиболее твердым и износостойким покрытием, полученным после термодиффузионного ванадирования и последующей закалки в масле. На хромированные и марганцированные зубчатые пары антифрикционные покрытия целесообразно наносить либо гальваническим методом, либо любым из известных тепловых методов (плазменным, газовым, лазерным и т.д.), так как хромовые и марганцевые слои менее склонны к окислению.

Изготовленные из высокопрочного чугуна ВЧ 60 прямозубые колеса с термодиффузионными карбидными слоями после закалки, поверх которых были нанесены механические покрытия алюминия, бронзы (ОЦС 5-5-5), меди, исследовались на изменение величины шероховатости рабочих частей зубьев в исходном состоянии, после нанесения механического покрытия поверх диффузионного и после приработки колес в паре без нагрузки.

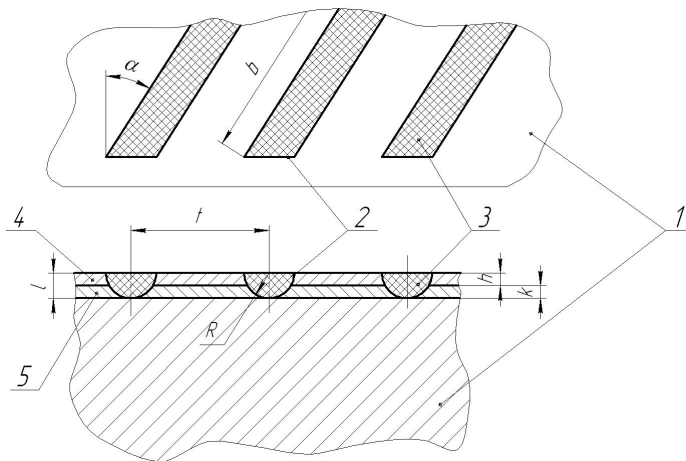
Для испытаний использовали три контактные пары с различным типом поверхностного покрытия и одинаковым внутренним термодиффузионным ванадированным слоем.

Цель проводимых исследований заключалась в выборе антифрикционных покрытий, обеспечивающих наименьший параметр шероховатости после приработки колес в паре, позволяющих получать большую площадь контакта зубьев и равномерную приработку лежащего внизу карбидного слоя без сколов и выкрашивания.

Для дальнейшего снижения влияния сил трения, помимо нанесения механического покрытия из антифрикционного материала металлическими щетками на контактные поверхности зубьев, в месте контакта зубчатых колес на рабочих поверхностях зубьев были нанесены специальные канавки глубиной, равной толщине диффузионного слоя, содержащие в себе антифрикционный материал (рисунок 4).

Длина поперечной канавки  $b$  во всех случаях меньше ширины зуба, причем поперечные канавки 2 располагаются под углом  $\alpha$  к перпендикуляру, соединяющему боковые поверхности зуба без выхода канавки за пределы ширины зубчатого колеса.

Величина шага  $t$  поперечных канавок назначается в зависимости от условий нагружения зубчатой передачи и условий ее работы. В случае консистентной смазки зубчатой передачи шаг следует выбирать меньшей величины, а также уменьшение шага рекомендуется с ростом нагруженности передачи.



1 – фрагмент рабочей поверхности зуба колеса;  
2 – поперечные канавки; 3 – антифрикционный материал; 4 – слой карбидного покрытия; 5 – зона легированного (диффузантом) чугуна [15]

Рисунок 4 – Расположение канавок на рабочих поверхностях зубьев

Угол  $\alpha$  рекомендуется выбирать равным  $29-31^\circ$ . Ограниченная длина канавки удерживает антифрикционный материал от выдавливания через края, а рекомендуемая длина канавки  $b$ , равная  $0,7-0,9$  расстояния между боковыми поверхностями зуба, вдоль линии канавки подает антифрикционный материал на максимальную площадь зацепления зубьев.

Радиус поперечного сечения канавки  $R$ , равный толщине диффузионного слоя  $l$  рекомендуется выбирать в диапазоне  $0,05-0,1$  мм. Ресурс работы таких колес исчисляется выработкой карбидного слоя  $h$  и слоя легированного чугуна  $k$ .

**Результаты.** Результаты измерения шероховатости поверхности колеса и шестерни с термодиффузионным ванадиевым покрытием до и после формирования механического покрытия представлены на рисунках 5 и 6.

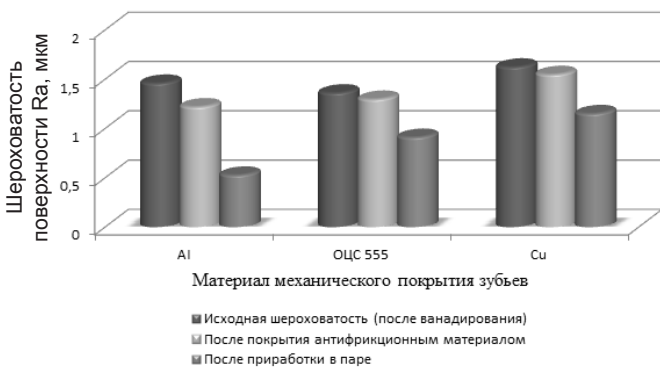


Рисунок 5 – Диаграмма изменения шероховатости поверхности шестерни с антифрикционным покрытием



Рисунок 6 – Диаграмма изменения шероховатости поверхности сопряженного с шестерней зубчатого колеса с антифрикционным покрытием

Исходная шероховатость шестерни перед нанесением алюминия составляет  $R_a = 1,495$  (рисунок 5), после нанесения алюминия  $R_a = 1,22$ . Сопоставление этих показателей позволяет заключить, что алюминий, являясь пластичным материалом, хорошо размазывается по рабочей поверхности зубьев и на этапе нанесения «залечивает» исходную поверхность, полученную после термодиффузионного ванадирования.

Для зубчатого колеса (рисунок 6) шероховатость поверхности зубьев после термодиффузионного ванадирования равна  $R_a = 1,226$ , после нанесения алюминия –  $R_a = 0,998$ . Этот результат подтверждает вывод, сделанный в отношении покрытой алюминием шестерни.

Шероховатость поверхности зуба колеса перед нанесением бронзы ОЦС 5-5-5 составляла  $R_a = 1,702$ , после обработки бронзой –  $R_a = 1,548$  (рисунок 6).

Для шестерни исходная шероховатость составляла  $R_a = 1,361$ , с бронзовым покрытием  $R_a = 1,297$  (рисунок 5).

Сопоставление данных по изменению шероховатости поверхности рабочей поверхности зубьев шестерни и колеса свидетельствует о «залечивании» исходной шероховатости, полученной после термодиффузионного насыщения ванадием, но разница в параметрах до и после обработки не так высока, как в случае покрытия алюминием, что связано, по-видимому, с меньшей пластичностью бронзы по сравнению с алюминием.

Исходная шероховатость покрываемого медью зубчатого колеса (рисунок 6) составляет  $R_a = 1,358$ , после обработки медью –  $R_a = 1,402$ , для шестерни (рисунок 5) до и после соответственно  $R_a = 1,624$  и  $R_a = 1,548$ .

Нанесение меди (механическим способом) на рабочую поверхность зубьев увеличивает исходную шероховатость, имея высокую температуру плавления и высокую вязкость, слабо размазывается по внутренней поверхности зуба и остается в виде отдельных фрагментов, последние раскатываются по поверхности, снижая исходную шероховатость.

Приработка зубьев колес проводилась в паре на установке (см. рисунок 3), выходной вал коробки передач вращался свободно без зацепления с патроном станка, длительность приработки составляла 0,5 часа, после испытаний проводилась оценка шероховатости рабочей поверхности зубьев.

Анализируя полученные результаты состояния рабочих поверхностей зубьев шестерни и колеса с различными механическими покрытиями, можно сделать вывод о том, что самый низкий показатель  $R_a = 0,527$  (для шестерни) и  $R_a = 0,641$  (для колеса) получен для алюминиевой пары, для бронзовой составляет  $R_a = 1,01$  для зубчатого колеса и  $R_a = 0,911$  – для шестерни.

Наименьшими изменениями параметра шероховатости  $R_a$  характеризуются медные покрытия.

Прошедшие приработку зубчатые колеса и шестерни в последующем испытывались на износ. Таким образом, состояние поверхностей зубьев с механическим покрытием после приработки, относительно исходного, составит соответственно в 2,3-2,8 раз; 1,4-1,9 раз и 1,2-1,4 раза ниже зубьев, покрытых алюминиевым,

бронзовым или медным механическим покрытием.

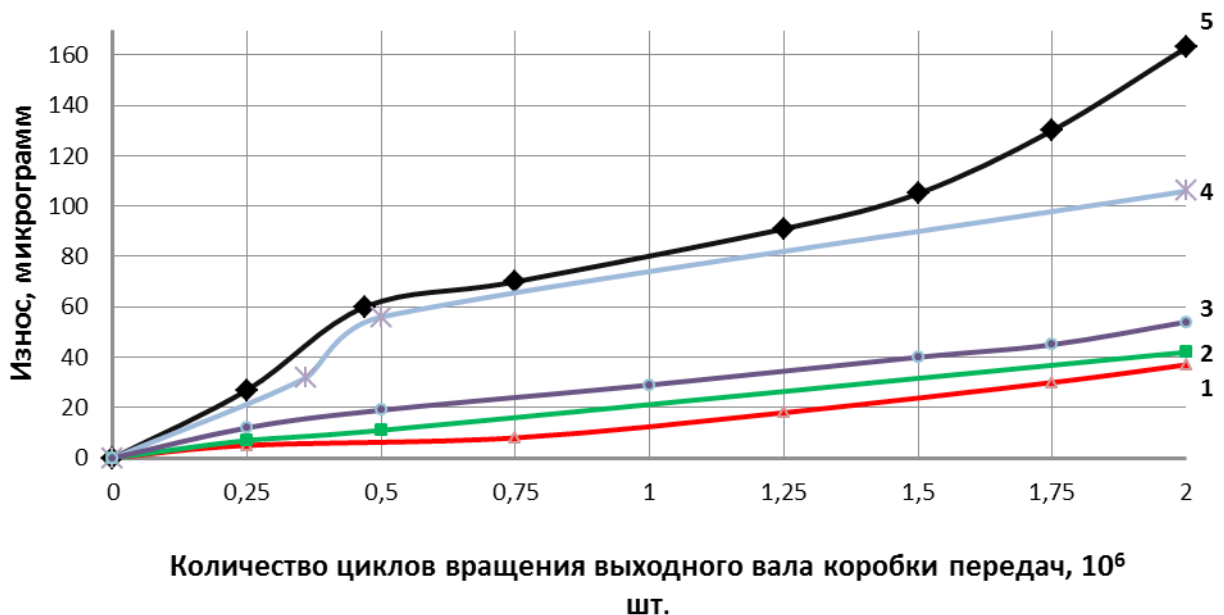
Для сравнения качества подготовленных к дальнейшим испытаниям поверхностей зубчатых колес измерены микронеровности рабочих поверхностей зубьев стальных колес, традиционно используемых в данном виде коробок передач, прошедшие чистовое шлифование зубьев, где шероховатость рабочей поверхности зубьев стальной шестерни составляет  $R_a = 0,522-0,680$ .

Исходя из результатов, следует вывод, что предложенная подготовка поверхности ванадиеванных зубчатых колес из высокопрочного чугуна с применением алюминия полностью соответствует качеству зуба стальной шестерни, для бронзы ОЦС 5-5-5 в 1,7-1,9 раза, для меди – в 2,2- 2,3 раза выше шероховатости стальных после финишного шлифования.

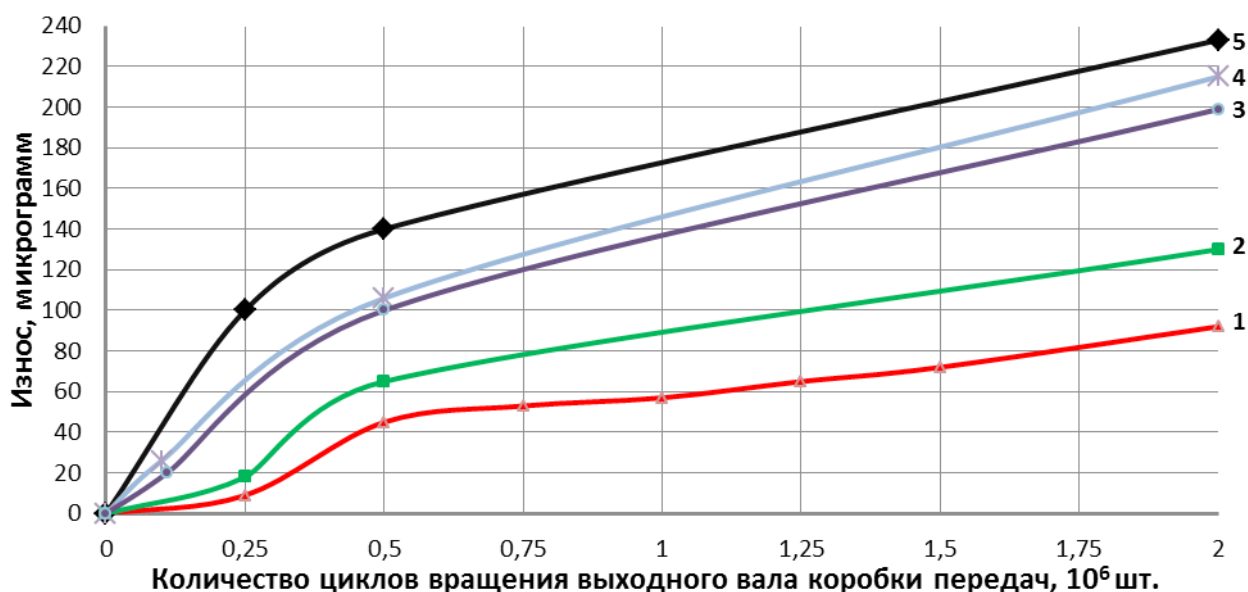
Предложенный способ нанесения мягкопластичных материалов на зубчатые колеса и червяки с последующей приработкой в паре позволяет достичь идентичные, или близкие к этому, результаты качества поверхности зубьев по сравнению с полученными после тонкого шлифования зубьев стальных колес.

По результатам проведенных исследований потери массы шестерни и зубчатого колеса с покрытиями различного рода во время испытаний с использованием токарного станка (рисунок 3) построены зависимости износа от числа циклов вращения выходного вала коробки передач (рисунок 7).

Как видно из результатов (см. рисунок 7),







б

1 – ванадиевое покрытие; 2 – хромовое; 3 – марганцевое; 4 – закаленный ВЧ 60 без покрытия; 5 – колеса (сталь 20ХГН) с цементованным слоем

Рисунок 7 – Износ зубьев шестерни (а) и зубчатого колеса (б)

минимальный износ, а следовательно, и максимальная износостойкость наблюдается у ванадиевых покрытий, на втором месте по износостойкости – хромовые, а на третьем – марганцевые покрытия. Для сравнительной оценки износостойкости в данном виде испытаний исследовались зубчатые колеса из закаленного высокопрочного чугуна без покрытий и стальные колеса из цементованной и закаленной стали 20ХГН. Как видно из рисунка 4, худшая износостойкость наблюдается для стальных колес.

Нанесение канавок, содержащих антифрикционный материал (рисунок 4), позволяет во всех случаях увеличивать износостойкость покрытий на 5-10%.

**Выводы.** 1. Износостойкость зубчатых колес из высокопрочного чугуна с термодиффузионными покрытиями ванадием, хромом и марганцем при испытаниях их в коробке передач по предлагаемой методике соответственно в 4-4,5; 3,5-4; 2-2,5 раз выше износостойкости закаленной стали 20ХГН с цементованным слоем.

2. Применение микроканавок, заполненных антифрикционным материалом – бронзой ОЦС 555, на рабочих поверхностях зубьев позволяет еще увеличить износостойкость на 5-10% за счет снижения трения в зацеплении и улучшения условий приработки.

#### Список источников

- 1 Колейченко А.В. Технология повышения долговечности деталей машин восстановлением рабочих поверхностей комбинированными методами: автореф. на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук: 05.20.03 – технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. М., 2011. 32 с.
- 2 Веселовский А.А. Влияние внешних антифрикционных покрытий на состояние поверхности и приработку упрочненных диффузией чугуновых зубчатых колес // Вестник Курганской ГСХА. 2020. № 2 (34). С. 58-61.
- 3 Юдинов А.С. Эффективное упрочнение деталей почвообрабатывающей техники – актуальная проблема в сельском хозяйстве // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т.102. С. 56-63.
- 4 Веселовский А.А. Повышение срока службы чугуновых деталей зубчатых и червячных передач: монография. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 240 с.
- 5 Мирталипов Р.Ш. Перспективы применения антифрикционных покрытий при восстановлении деталей сельскохозяйственных машин. М.: Институт «Информатротех», 1991. 32 с.
- 6 Черновол М.М. Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями: дис. д-ра техн. наук. М., 1992. 257 с.
- 7 Черноиванов В.И., Андреев В.П. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин. М.: Колос, 1983. 288 с.
- 8 Веселовский А.А. Повышение срока службы чугуновых деталей гидроцилиндров: монография. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 140 с.
- 9 Веселовский А.А. Повышение абразивной стойкости чугуновых деталей машин и механизмов АПК диффузионной металлизацией // Инновации в АПК:

проблемы и перспективы. 2020. № 3 (27). С. 37-42.

10 Кулеева Т.В. Механохимическое поведение высокопрочных чугунов с шаровидным графитом: автореф. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Уфа, 2000. 24 с.

11 Ерохин М.Н. Исследование скоростных и нагрузочных режимов в рядовых условиях эксплуатации и отказов и дефектов деталей редукторных элементов трансмиссии сельскохозяйственных машин: отчет о научно-исследовательской работе. М.: МИИСП, 1988. 166 с.

12 Тихомиров В.П., Горленко О.А. Прогнозирование ресурса зубчатых передач. М.: Машиностроение, 2007. 148 с.

13 Бабичев А.А. Отделочная и упрочняющая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1974. 314 с.

14 Симкин А.З. Повышение износостойкости деталей, изготавливаемых из высокопрочного чугуна технологическими методами: автореф. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Брянск, 1997. 16 с.

15 Способ повышения износостойкости чугунных зубчатых колес: пат. 2516955 Рос. Федерация. № 2012143288/11/ Веселовский А.А.; заявл. 09.10.2012; опублик. 20.05.2014. Бюл. № 14. 3с.

### References

1 Koleichenko A.V. Tekhnologiya povysheniya dolgovechnosti detalei mashin vosstanovleniem rabochikh poverkhnostei kombinirovannymi metodami [Technology for increasing the durability of machine parts by restoring working surfaces by combined methods]. Abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences: 05.20.03 – Technologies and means of maintenance in agriculture. Moscow. 2011. (In Russ).

2 Veselovsky A.A. Vliyanie vneshnikh antifriktsionnykh pokrytii na sostoyanie poverkhnosti i prirabotku uprochnennykh diffuziei chugunnykh zubchatykh kolei [The influence of external antifriction coatings on the state of the surface and the running – in of diffusion-hardened cast iron gears]. Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2020; (2-34): 58-61. (In Russ).

3 Yudinov A.S. Effektivnoe uprochnenie detalei pochvoobrabatyvayushchei tekhniki – aktual'naya problema v sel'skom khozyaistve [Effective hardening of parts of tillage equipment is an urgent problem in agriculture]. Trudy GOSNITI. 2010; (102): 56-63. (In Russ).

4 Veselovsky A.A. Povyshenie sroka sluzhby chugunnykh detalei zubchatykh i chervyachnykh peredach [Increasing the service life of cast-iron parts of gear and worm gears]: monograph. Moscow: Infra-Engineering; 2019. (In Russ).

5 Mirtalipov R.Sh. Perspektivy primeneniya antifriktsionnykh pokrytii pri vosstanovlenii detalei sel'skokhozyaistvennykh mashin [Prospects for the use of anti-friction coatings in the restoration of parts of agricultural machinery]. Moscow: Institute «Informagrotech». 1991. (In Russ).

6 Chernovol M.M. Tekhnologicheskie osnovy vosstanovleniya detalei sel'skokhozyaistvennoi tekhniki kompozitsionnymi pokrytiyami [Technological foundations for the restoration of parts of agricultural machinery with composite coatings]: dissertation for the doctoral degree in technical sciences. Moscow. 1992. (In Russ).

7 Chernoiyanov V.I., Andreev V.P. Vosstanovle-

nie detalei sel'skokhozyaistvennykh mashin [Restoration of parts of agricultural machinery]. Moscow: Kolos; 1983. (In Russ).

8 Veselovsky A.A. Povyshenie sroka sluzhby chugunnykh detalei gidrotsilindrov [Increasing the service life of cast-iron parts of hydraulic cylinders]: monograph. Moscow: Infra-Engineering; 2019. (In Russ).

9 Veselovsky A.A. Povyshenie abrazivnoi stoikosti chugunnykh detalei mashin i mekhanizmov APK diffuzionnoi metallizatsiei [Increasing the abrasive resistance of cast-iron machine parts and mechanisms of the agro-industrial complex by diffusion metallization]. Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives. 2020; (3-27): 37-42. (In Russ).

10 Kuleeva T.V. Mekhanokhimicheskoe povedenie vysokoprochnykh chugunov s sharovidnym grafitom [Mechanochemical behavior of high-strength nodular cast irons: abstract for the degree of candidate of technical sciences]. Ufa. 2000. (In Russ).

11 Erokhin M.N. Issledovanie skorostnykh i nagruzochnykh rezhimov v ryadovykh usloviyakh ekspluatatsii, otkazov i defektov detalei reduktornykh elementov transmissii sel'skokhozyaistvennykh mashin [Investigation of speed and load modes in ordinary operating conditions, failures and defects of parts of gear elements of transmission of agricultural machines]: report on research work. Moscow: MIISP; 1988. (In Russ).

12 Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A. Prognozirovaniye resursa zubchatykh peredach [Forecasting the resource of gears]. Moscow: Mashinostroenie. 2007. (In Russ).

13 Babichev A.A. Otdelochnaya i uprochnyayushchaya obrabotka detalei mashin [Finishing and hardening processing of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie; 1974. (In Russ).

14 Simkin A.Z. Povyshenie iznosostoikosti detalei, izgotavlivaemykh iz vysokoprochnogo chuguna tekhnologicheskimi metodami [Improving the wear resistance of parts made of high-strength cast iron by technological methods]: abstract for the degree of candidate of technical sciences. Bryansk. 1997. (In Russ).

15 Sposob povysheniya iznosostoikosti chugunnykh zubchatykh kolei [Method for increasing the wear resistance of cast iron gears]: patent 2516955 Russian Federation. No. 2012143288 /14/ Veselovsky A.A.; announced on 10.09.2012; published on 20.05.2014. Bulletin. (14). (In Russ).

### Информация об авторах

А.А. Веселовский – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 632664.

А.Е. Немцев – доктор технических наук; AuthorID 394302.

### Information about the authors

A.A. Veselovsky – Candidate of Technical Sciences, Associate professor; AuthorID 632664.

A.E. Nemtsev – Doctor of Technical Sciences; AuthorID 394302.

Статья поступила в редакцию 22.10.2021; одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 24.02.2022.

The article was submitted 22.10.2021; approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 24.02.2022.