

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЧУГУННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ДИФфуЗИОННЫМИ КАРБИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Веселовский Александр Александрович, кандидат технических наук, докторант кафедры «Технология и организация технического сервиса»

ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ

354079, Челябинская обл., г. Челябинск, Проспект Ленина 76, E-mail: a_a_ves@mail.ru

Ключевые слова: покрытие, чугун, колесо, износ, зубчатая передача

Статья посвящена повышению износостойкости зубчатых передач применением вместо стальных зубчатых колес, изготавливаемых из цементуемых марок сталей, зубчатых колес из высокопрочного чугуна марки ВЧ 60 с термодиффузионными карбидными покрытиями. Элементы - диффузаны выбраны по степени карбидообразования и твердости образуемых покрытий: ванадий – для формирования высокотвердых, хром - для средних по твердости покрытий и марганец – для низких по твердости покрытий. Покрытия сформированы на прямозубых зубчатых колесах, являющихся задней передачей легкового автомобиля. Установка для исследований включала в себя тяговое устройство - асинхронный электродвигатель, располагающийся на станине токарного станка, с помощью которого осуществлялось вращение коробки передач с включенной задней скоростью. Выходной вал коробки передач был зажат в патрон станка. Кинематика выключенного станка обеспечивала требуемый момент сопротивления. Через заданное число циклов коробку разбирали, зубчатую пару извлекали и проводили металлографические исследования. Выявляли остаточную толщину покрытия и линейный износ, на основании полученных экспериментальных данных строили графические зависимости линейного износа от числа циклов нагружения. Для сравнительной оценки в данном виде исследований проводили эксперименты по измерению линейного износа цементуемой стали 20ХГН после цементации и последующей закалки и исследования закаленного чугуна марки ВЧ 60. Выяснилось, что наивысшей износостойкостью в данном виде исследований обладают ванадиевые покрытия, чуть ниже износостойкость у хромовых покрытий и на третьем месте - марганцевые покрытия. Худшую износостойкость наблюдали у стали 20ХГН. На основании полученных экспериментальных данных были определены эмпирические закономерности интенсивности изнашивания покрытий от их твердости по Бринелю и диаметра полученного отпечатка.

Введение

Чугун по многим свойствам превосходит конструкционные углеродистые марки сталей [1]. 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 от трения. Однако в условиях абразивного, гидроабразивного и ударно-абразивного видов изнашивания стойкость чугуновых изделий значительно уступает стойкости стальных изделий после химико-термической и последующих термических обработок [2]. Но создание

поверхностных диффузионных высокотвердых карбидных покрытий на поверхности чугуновых деталей делает их конкурентами стальным деталям после указанной выше обработки. А достаточный запас углерода в чугуне делает возможным восстановление первоначальных размеров и свойств деталей [3 - 6].

По твердости образующихся карбидов при диффузии в чугуновую поверхность их условно можно разделить на высокотвердые (выше 20000 МПа), средней твердости (15000...19000 МПа) и низкой твердости (10000...14000 МПа). Чем выше сила карбидообразования, тем выше твердость образующихся карбидов. Но, предусматривая термодиффузионные карбидные покрытия чугуновой поверхности, следует учитывать их хрупкость,

которая находится в прямо пропорциональной зависимости от твердости покрытий.

У деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания с малым изменением динамики нагружения, исследовали физико-механические и эксплуатационные характеристики высокотвердых покрытий, выполненных на базе сильных карбидообразующих элементов. Представителем этой группы является ванадий [7].

При гидроабразивном, абразивном видах изнашивания, при наличии знакопеременных нагрузок следует применять покрытия средней твердости, имеющие под своей основой переходную зону, демпфирующую ударную нагрузку [8]. Такие покрытия более пластичны, способны выдерживать циклические нагрузки. Элементом-представителем этой группы является хром.

Если доминирующим видом износа является ударно-абразивный, то следует использовать элементы, образующие в чугунах покрытия, сочетающие в себе относительно высокие показатели твердости и пластичности. Таким элементом является марганец. Марганец легирует цементит, а его свойство расширять область аустенита приводит к созданию между упрочняющей фазой пластической составляющей (аустенита), способной упрочняться наклепом при ударном характере нагружения [9].

Материалы и методы исследований

Для формирования износостойких термодиффузионных покрытий, полученных диффузией ванадия, хрома и марганца в высокопрочный чугун ВЧ60 использовали ферросплавы, содержащие данные компоненты:

- феррованадий марки ФВд50У03, содержащий не менее 50 % ванадия;
- феррохром высокоуглеродистый марки ФХ800 с содержанием хрома более 65 %;
- ферромарганец марки ФМн88 со средним содержанием марганца 88 %, ГОСТ 4755-91.

Ферросплавы измельчали в порошок до получения фракций размером менее 2 мм. В качестве инертного наполнителя использовали окись алюминия, активатором процесса являлся хлористый аммоний. Реакционная порошковая шихта состояла из 60 % ферросплава, 36 % инертного наполнителя и 4 % хлористого аммония.

Объектом исследования явилась прямозубая цилиндрическая зубчатая пара,

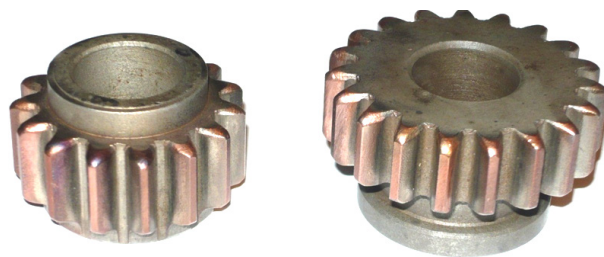


Рис. 1 - Исследуемая зубчатая пара

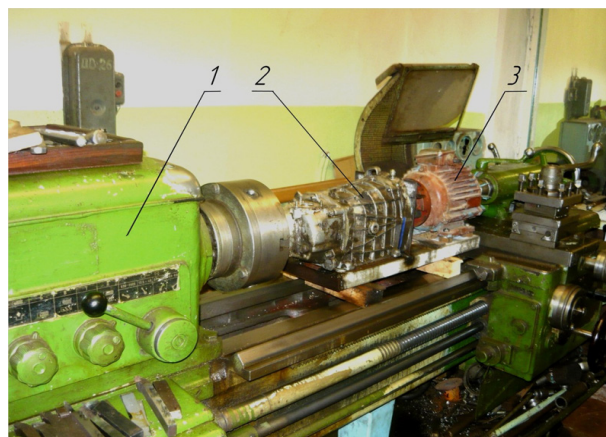


Рис. 2 - Установка для исследований чугунных шестерен на износ: 1 - токарный станок 16К20; 2 - четырехступенчатая коробка передач; 3 - асинхронный электродвигатель

изготовленная из высокопрочного чугуна ВЧ60 (рис. 1).

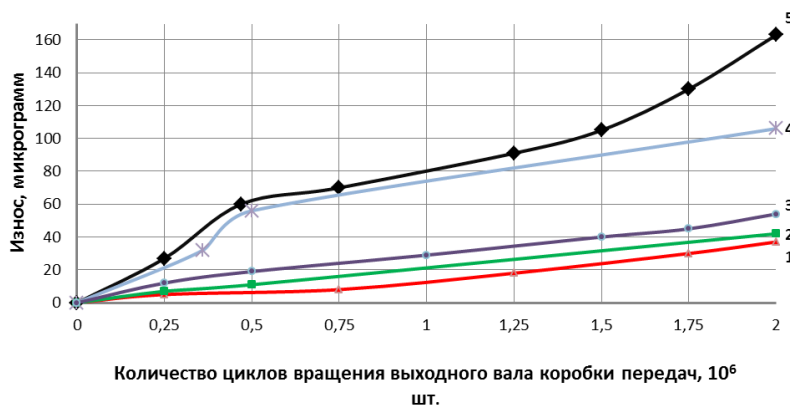
Зубчатые колеса помещали в контейнер, куда засыпали порошковую шихту, заполняя оставшийся объем. При этом создавался плавкий затвор. Затем контейнер нагревали до температуры 1000 °С, после чего проводили изотермическую выдержку в течение 5 часов при ванадировании и в течение 10 часов - при формировании хромовых и марганцевых покрытий.

После процесса контейнер остывал на воздухе, затем его разбирали, а колеса очищали от остатков шихты.

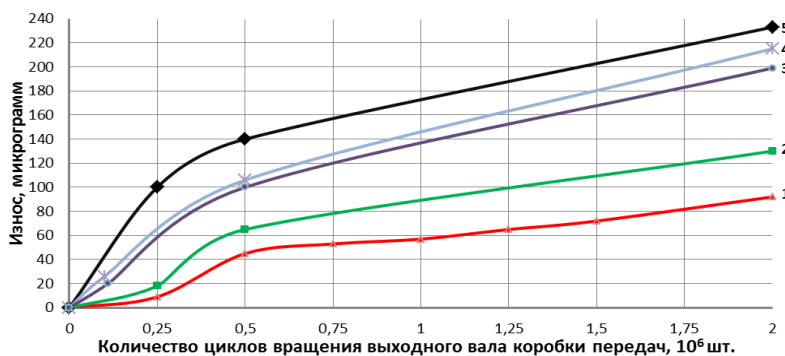
При данном процессе формировалось диффузионное покрытие толщиной 35...55 мкм, которое увеличивало исходные размеры зубчатых колес. Для улучшения процессов приработки и снижения риска развития питтинга на рабочие поверхности зубьев поверх карбидного покрытия механическим путем (металлическими щетками) было нанесено внешнее медное покрытие.

Исследование износостойкости полученных покрытий зубчатых пар проводили на установке, фотография которой приведена на рис. 2.

Зубчатые колеса из чугуна ВЧ60 с покрытием устанавливали в коробку передач, входной



а)



б)

Рис. 3 - Зависимость от количества циклов вращения выходного вала коробки передач величины износа рабочих поверхностей зубьев шестерни (а) и зубчатого колеса (б) с покрытиями: 1 - V; 2 - Cr; 3 - Mn; 4 - высокопрочный чугун ВЧ60 после закалки; 5 - зубчатые колеса, изготовленные из стали 20ХГН после цементации и последующей закалки в масле

вал которой через муфту соединяли с асинхронным электродвигателем с частотой вращения 50 с-1, а выходной вал входил в зацепление с патроном станка. Кинематика отключенного станка обеспечивала момент сопротивления при вращении 7,84 Н·м. Во время исследований в коробке передач была включена задняя скорость, так как исследуемая пара входит в состав задней передачи.

Перед началом исследований проводили приработку на холостом ходу (без зацепления с патроном станка). Исследования проводили с интервалом 2,5·10⁵ оборотов выходного вала, по истечении которых коробку разбирали, а затем проводили металлографические исследования остаточной толщины покрытия на зубьях.

Результаты исследований

На основании проведенных исследований чугунных зубчатых колес с карбидными покрытиями ванадием, хромом и марганцем были получены результаты, графическая интерпретация

которых представлена на рис. 3.

В исследуемой зубчатой паре зубчатое колесо является паразитным и, следовательно, входит в зацепление не только с шестерней, но и со смежным колесом. Если число контактов для шестерни составляет 106 циклов, то для паразитного колеса - 3·106 циклов. Наличие данного факта, а также значительной разницы в ширине зубьев шестерни и колеса (в 2 раза) объясняет повышенный износ зубчатого колеса по сравнению с входящей в зацепление с ним шестерней.

По данным рисунка 3 можно сделать вывод, что ванадиевое покрытие обладает самой высокой износостойкостью, далее по мере ее уменьшения – хромовое и марганцевое покрытия. Самый высокий темп износа у стальных колес, которые традиционно применяются в данной коробке передач. Высокопрочный чугун ВЧ60 после закалки имеет несколько меньший износ, что связано с наличием графита в структуре, выполняющего роль антифрикционного материала.

На основании полученных экспериментальных данных были определены эмпирические закономерности, позволяющие оценить интенсивность износа.

Коэффициент интенсивности напряжений, , может быть определен следующим образом [10]:

$$K_{IC} = \left(\frac{2,3 \cdot \sin \frac{\varphi}{2}}{c} \right) \frac{F}{a^{0,5}} \cdot \lg \left(\frac{4,5a}{l_m} \right), \quad (1)$$

где а - половина диагонали отпечатка от пирамиды Виккерса, м; l_m - глубина полученного отпечатка, м; F - сила, действующая на пирамиду при определении твердости, Н; φ - половина угла при вершине пирамиды Виккерса, град., с - параметр, зависящий от условий проведения эксперимента.

Для расчетов принимают φ = 680 и с = 3, а - измеряют при помощи металлографического микроскопа, l_m получают в результате вычислений.

$$K_{IC} = \left(\frac{2,3 \cdot \sin \frac{68}{2}}{3} \right) \cdot \frac{0,49}{(3,15 \cdot 10^{-3})^{0,5}} \cdot \lg \left(\frac{4,5 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3}}{1,3 \cdot 10^{-3}} \right) = 1232,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}. \quad (2)$$

Показатели износостойкости зубчатых элементов с покрытиями

Зубчатый элемент	Покрытие	K_{IC} МПа·м ^{0,5}	f	I_h	ψ
шестерня	ванадий	1232,8	0,3	$9,34 \cdot 10^{-10}$	4,87
колесо	ванадий	1232,8	0,3	$1,68 \cdot 10^{-9}$	4,91
шестерня	хром	395,4	0,3	$1,70 \cdot 10^{-9}$	5,92
колесо	хром	395,4	0,3	$2,12 \cdot 10^{-9}$	5,99
шестерня	марганец	374,0	0,29	$2,33 \cdot 10^{-9}$	5,58
колесо	марганец	374,0	0,29	$2,83 \cdot 10^{-9}$	5,55

Скорость износа зубьев шестерни с ванадиевым покрытием при исследованиях в течение 98 ч и износе 10 мкм, согласно экспериментальным данным,

$$v_H = \frac{10}{98} = 0,102 \text{ мкм/ч}$$

Проскальзывание шестерни относительно сопряженного с ним зубчатого колеса можно найти по следующей формуле:

$$u = u_1 - u_2, \quad (3)$$

где u_1 – линейная скорость шестерни, мм/ч; u_2 – линейная скорость колеса, мм/ч.

$u = 1925 \text{ об/мин} \cdot 45 \text{ мм} - 1600 \text{ об/мин} \cdot 53 \text{ мм} = 1825 \text{ мм/мин} = 109500 \text{ мм/ч}$,

где 45 мм и 53 мм – радиусы начальных окружностей зубчатых колес.

Интенсивность износа

$$I_h = \frac{v_H}{u}, \quad (4)$$

$$I_h = \frac{0,102 \cdot 10^{-3}}{109500} = 9,3 \cdot 10^{-10}$$

Коэффициент трения между зубьями колес при проскальзывании, может быть определен по формуле, предложенной И.В. Крагельским [10]:

$$f = 0,47 \sqrt{\frac{2h}{d}}, \quad (5)$$

где h – глубина отпечатка от вдавливания алмазной пирамиды, м; d – диагональ полученного отпечатка, м

Подставив в формулу (5) результат измерения d и вычисления h , получили:

$$f = 0,47 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,3}{6,3}} = 0,3$$

С учетом коэффициента интенсивности напряжений интенсивность износа можно определить из следующей формулы [10]:

$$I_h = \left(\frac{0,678 H V d^{0,5} f^{0,68}}{K_{IC}} \right)^\psi \quad (6)$$

Прологарифмировав левую и правую часть формулы (6), выразим показатель степени:

$$\psi = \lg I_h / \lg \left(\frac{0,678 H V d^{0,5} f^{0,68}}{K_{IC}} \right). \quad (7)$$

При подстановке в формулу (7) экспериментальных значений и значений, которые были получены выше расчетным путем, получаем $\psi = 4,87$.

Аналогично проводили расчет для зубчатого колеса с ванадиевым покрытием, а также для зубчатых пар с хромовым и марганцевым покрытиями. Результаты расчетов представлены в таблице.

На основе представленных в таблице результатов можно сделать вывод, что наилучшей трещиностойкостью обладают ванадиевые покрытия, а наихудшей – марганцевые.

Заключение

1. Проведенными исследованиями зубчатых колес из чугуна ВЧ60, прошедших термодиффузионное насыщение, закалку и нанесение внешнего антифрикционного покрытия, установлено, что износостойкость шестерни и колеса соответственно с ванадиевым покрытием в 5...12 и 3...3,5 раза, с хромовым в 4...6 и в 2,5 раза, с марганцевым в 2...3 раза и в 1,1...1,5 раза выше традиционно применяемых в данной коробке передач стальных зубчатых колес (20ХГН) после цементации и закалки.

2. Большой износ паразитного зубчатого колеса в сравнении с шестерней связан с большим числом контактов и меньшей шириной зубьев.

Библиографический список

1. Юдников, А. С. Эффективное упрочнение деталей почвообрабатывающей техники – актуальная проблема в сельском хозяйстве / А. С. Юдников, Ю. А. Рыжих // Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т.102. – С. 34-38.

2. Симкин, А. З. Повышение износостойкости деталей, изготавливаемых из высокопрочного чугуна технологическими методами : спец. 05.02.08 - технология машиностроения : автореферат диссертации на соискание ученой

степени кандидата технических наук / Симкин Альберт Зямович, Брянский ГТУ.- Брянск, 1997. – 16 с.

3. Коломейченко, А. В. Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами : спец. 05.20.03 - технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве: автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук / Коломейченко Александр Викторович. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – Москва, 2011. – 32 с.

4. Тихомиров, В. П. Прогнозирование ресурса зубчатых передач / В. П. Тихомиров : монография. – Москва : Машиностроение, 2007. – 148 с. (ISBN 978-5-94275-383-2)

5. Ильин, В. К. Восстановление и упрочнение деталей машин методами диффузионной металлизации : спец. 05.20.03 - технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ильин Владимир Кузмич. Казанский аграрный университет. - Казань, 2003. – 240 с.

6. Гусейнов, А. Г. Повышение работоспособности деталей машин и аппаратуры путем восстановления и упрочнения диффузионной

металлизацией : спец. 05.16.08 - технология машиностроения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гусейнов Алекпер Гюльахмед Оглы. Московский Государственный Социальный университет. - Москва, 2002. – 312 с.

7. Веселовский, А. А. Повышение срока службы чугунных деталей гидроцилиндров : монография / А. А. Веселовский. – Москва : Инфра-Инженерия, 2019. – 140 с. (ISBN 978-5-9729-0289-7)

8. Веселовский, А. А. Повышение износостойкости чугунных деталей зубчатых и червячных передач : монография / А. А. Веселовский. – Москва : Инфра-Инженерия, 2019. – 240 с. (ISBN 978-5-9729-0290-3)

9. Величко, А. Г. Диффузионное легирование марганцем горячедеформируемых порошковых сталей : спец. 05.16.06 - порошковая металлургия и композиционные материалы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Величко Александр Григорьевич. ЮРГПУ (НПИ). - Новочеркасск, 2005. – 136 с.

10. Колесников, Ю. В. Механика контактного разрушения / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. – Москва : Наука, 1989 – 224 с.

RESEARCH OF WEAR RESISTANCE OF IRON GEAR WHEELS WITH DIFFUSE CARBIDE LAYER

Veselovsky A. A.

FSBEI HE South-Ural SAU, Lenin avenue 76, Chelyabinsk, Chelyabinsk region, Russia, 354079, E-mail: a_a_ves@mail.ru

Key words: layer, iron, wheel, wear, gear drive

The article is concerned with wear resistance increase of saw-tooth enclosed drives applying instead of iron gear wheels, made from cement steel quality, gear wheels from high-duty cast iron of HF 60 with thermodiffusion carbide layer. Elements- diffusants were chosen according to level of carbide forming and hardness of formed layers- vanadium- for forming very hard, chrome-medium according to coating and manganese- for low layers according to coating hardness. Layers are formed on spur gears, which are reverse gear of light vehicle. Setting for research included draw gear- asynchronous electric drive, placed on lathe-bed with the help of which rotation of gear shift transmission with powered reverse gear was done. Transmission output shaft was pressed into chunk. Kinematic of disconnected machine provided necessary moment resistance. Through given number of cycles the box was taken down, gear set was removed and metal graphic research was carried out. Residual layer thickness and linear wear were diagnosed, on the basis of obtained experimental data we built characteristic curves of linear wear from number of stress cycles. For comparative evaluation in this type of research we carried out experiments on measurement of linear wear of case – hardening steel 20 ChGn after cementation and further quenching and research of hardened cast iron HF mark 60. It was found out that the highest quality wearing in this type of research vanadium layers have, slightly lower quality wear chromium plate have and on the 3rd place manganese layers. The worst quality wear we observed in steel 20 ChGn. On the basis of obtained –experimental data empirical regularities of wear rate of layers from their Brinnel hardness and diameter of obtained copy were determined.

Bibliography

1. Yudnikov, A. S. Effective strengthening of tillage equipment parts is an actual problem in agriculture / A. S. Yudnikov, Yu. A. Ryzhikh // Words of GOSNITI. – 2010. – V.102. - P. 34-38.
2. Simkin, A. Z. Increasing the wear resistance of parts made of high-strength cast iron by technological methods: spec. 05.02.08 - mechanical engineering technology: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Simkin Albert Zyamovich, Bryansk STU.- Bryansk, 1997. – 16 p.
3. Kolomeychenko, A. V. Technologies for increasing the durability of machine parts by restoring and strengthening work surfaces using combined methods: spec. 05.20.03: technologies and means of maintenance in agriculture: abstract for the degree of doctor of technical sciences / Kolomeychenko Alexander Victorovich. SSC RF FGUP «NAMI». – Moscow, 2011. – 32 p.
4. Tikhomirov, V. P. Predicting endurance of gears / V. P. Tikhomirov : monograph. – Moscow : Engineering, 2007. – 148 p. (ISBN 978-5-94275-383-2)
5. Ilyin, V. K. Restoration and strengthening of machine parts by diffusion metallization methods : spec. 05.20.03 - technologies and means of maintenance in agriculture: dissertation for the degree of doctor of technical sciences / Ilyin Vladimir Kuzmich. Kazan agrarian university. - Kazan, 2003. – 240 p.
6. Guseynov, A. G. Improving the performance of machine parts and equipment by restoring and strengthening with diffusion metallization : spec. 05.16.08 - mechanical engineering technology: dissertation for the degree of doctor of technical sciences / Guseynov Alekper Gulakhmed Ogly. Moscow State Social University. - Moscow, 2002. – 312 p.
7. Veselovsky, A. A. Increasing the service life of cast iron hydraulic cylinder parts: monograph / A. A. Veselovsky. – Moscow : Infra-Engineering, 2019. – 140 p. (ISBN 978-5-9729-0289-7)
8. Veselovsky, A. A. Increasing wear resistance of cast iron parts of gears and screw gears : monograph / A. A. Veselovsky. – Moscow : Infra-Engineering, 2019. – 240 p. (ISBN 978-5-9729-0290-3)
9. Velichko, A. G. Diffusion alloying of hot-formed powder steels with manganese: spec. 05.16.06 - powder metallurgy and composite materials : the dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences / Velichko Aleksandr Grigoryevich. SRSPU (NPI). - Novocheerkassk, 2005. – 136 p.
10. Kolesnikov, Yu. V. Mechanics of contact failure / Yu. V. Kolesnikov, E. M. Morozov. – Moscow : Science, 1989 – 224 p.