

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ДИФфуЗИОННЫМ КАРБИДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

А.А. Веселовский¹, И.П. Трояновская^{2,3}, В.В. Ерофеев³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Новоуральск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

³Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, Россия

В работе исследуются напряженно-деформируемое состояние зубчатой пары из высокопрочного чугуна ВЧ 60 с диффузионным покрытием. Мы исследовали три типа диффузионного покрытия: с ванадием, хромом и марганцем. Термодиффузионные покрытия формировались посредством химико-термической обработки исследуемых элементов в контейнере с плавким затвором из порошковой засыпки. Толщина покрытий для всех случаев составляла 50–60 мкм. После зубчатые колеса с покрытием подвергались закалке в защитном слое. Температура повторного нагрева составляла 920–930 °С. В качестве защитной среды (флюса) использовался сплав оксида ванадия, имеющий температуру плавления 675 °С. Это позволило сформировать высокую твердость в покрытиях и переходной от покрытия зоне. Поверх диффузионного покрытия посредством металлических щеток наносилось внешнее механическое покрытие. Исследование напряженно-деформированного состояния исследуемой зубчатой передачи проводилось методом математического моделирования с использованием пакета Ansys. Решение контактной задачи позволило получить закон распределения нормальных и касательных напряжений по сечению зубьев. В результате установлено, что максимальные контактные напряжения в полости зубьев сосредоточены в слое термодиффузионного покрытия, прочностные характеристики которого в несколько раз превышают характеристики основного материала зуба колеса. Уровень касательных напряжений под диффузионным слоем оказался в два раза ниже, чем в самом слое. В результате снизился риск образования лунки у основания зубьев и поверхностных трещин, которые быстро приводят к потере работоспособности зубчатого зацепления.

Ключевые слова: зубчатая пара, чугун, покрытия, касательные напряжения, прочность, Ansys.

Введение

Зубчатые колеса являются основным элементом трансмиссий любого транспортного средства: автомобилей, тракторов, комбайнов и других. Их долговечность оказывает значительное влияние на ресурс машины. Долговечность зубчатых колес зависит от: режима эксплуатации трансмиссии, точности изготовления и сборки ее узлов, климатических условий эксплуатации, качества и степени загрязнения трансмиссионного масла [1, 2].

Вибрации, возникающие в зубчатой передаче по причине нарушения профиля зубьев, приводят к возникновению динамических нагрузок. Так, отклонение от эвольвенты на 0,3 мм приводит к динамическим нагрузкам в диапазоне 118–147 кН [3]. Это в 4–5 раз превышает ударные нагрузки в новом зубчатом редукторе [4].

Исследования жесткости главных тракторных передач [5–7] показали, что деформация подшипников вызывает перекосяк в зацеплении зубчатых колес. Результатом этого является неравномерное распределение нагрузки и, как следствие, неравномерный по ширине износ зубьев. Около 65–75 % дефектов тракторных шестерен приходится на износ зубьев по толщине [8–9]. Около 34 % зубчатых колес сельскохозяйственных тракторов «Беларусь» выходят из строя по причине предельного износа зубьев по толщине [10] и только 21 % по причине усталостного выкрашивания [11].

Расчет и конструирование

Большое влияние на работоспособность зубчатых передач оказывает запыленность среды. Работа трансмиссий при запыленности окружающего воздуха приводит к износу уплотнений и попаданию внутрь коробок передач абразивных частиц почвы. Абразивные частицы способствуют дополнительному износу рабочих поверхностей зубьев колес [12].

В настоящее время широкое применение получила замена стальных колес на чугунные колеса с высокопрочным термодиффузионным покрытием [13]. Использование высокопрочных покрытий значительно влияет на характер распределения напряжений по толщине зубчатого колеса и повышает их работоспособность [14, 15].

Цель работы: определить величину и характер распределения нормальных и касательных напряжений в основе и местах контакта зубьев при наличии высокопрочного покрытия.

1. Материалы и методы формирования диффузионного покрытия

Объектом исследований была выбрана прямозубая зубчатая пара с модулем 2,5, числом зубьев шестерни 15 и числом зубьев колеса 19. Основным материалом зубчатого колеса был высокопрочный чугун марки ВЧ 60. Для повышения поверхностной прочности зубчатые колеса подверглись процессу термодиффузии в порошковой среде [16]. Для сравнения были рассмотрены три разных покрытия: ванадием, хромом и марганцем. Состав порошковой среды включал:

1. Инертный наполнитель реакционной порошковой засыпки – оксид алюминия (ГОСТ 8136-76);
2. Активатор диффузии – хлористый аммоний (ГОСТ 2210-73);
3. ФеррованадийФВд 50У03 (содержание ванадия не менее 50 %) – для ванадиевых покрытий (ГОСТ 27130-94);
4. Ферромарганец ФМн88 (содержание марганца 88 %) – для марганцевых покрытий (ГОСТ 4755-91);
5. Феррохром ФХ800 или ФХ850 (содержание хрома не менее 65 %) – для хромовых покрытий.

Процесс насыщения проводился в специальной камере нагрева с порошковой средой (рис. 1). Упрочняемые чугунные зубчатые колеса 3 помещались в репорту 2 и засыпались до 85–90 % объема репорты реакционной порошковой средой 6. Контейнер нагревался в муфельной печи 1 до температуры 1000–1050 °С. При формировании ванадиевых покрытий процесс нагрева длился 5 часов. При формировании хромовых и марганцевых покрытий выдержка составляла до 10 часов. Для обеспечения равномерности упрочняемого поверхностного покрытия одновременно с нагревом происходило вращение зубчатых колес. Толщина термодиффузионного покрытия имела толщину 5–15 мкм [17, 18].

Для улучшения процессов приработки чугунных зубчатых колес с высокотвердыми покрытиями поверх диффузионного покрытия механическим способом с использованием металлических щеток наносилось внешнее алюминиевое покрытие (рис. 2). Вращающаяся металлическая щетка сдираала фрагменты с алюминиевого образца и размазывала их по рабочим поверхностям зубьев [19]. Это позволяло выровнять шероховатость после термодиффузионного насыщения и увеличить пятно контакта. Общая толщина покрытия составляла 50–60 мкм.

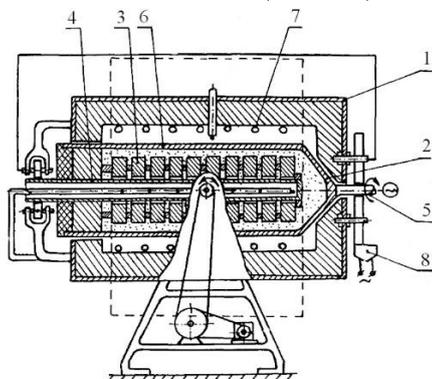


Рис. 1. Установка для порошкового термодиффузионного насыщения [18]: 1 – камера нагрева; 2 – репорта; 3 – чугунные зубчатые колеса; 4 – трубка; 5 – вал; 6 – порошковая среда; 7 – блок электронагревателя; 8 – вибратор

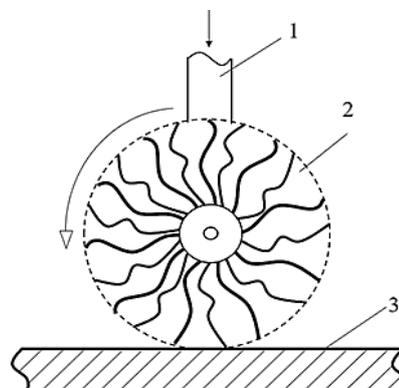


Рис. 2. Схема механического нанесения алюминиевого покрытия: 1 – Al-донор; 2 – металлическая щетка; 3 – упрочняемая поверхность изделия

2. Методы оценки напряженно-деформируемого состояния

При расчете на прочность зубчатых зацеплений согласно ГОСТ [20] максимальные нормальные напряжения σ_H возникают в полюсе зацепления, а максимальные касательные напряжения σ_F наблюдаются у основания ножки зуба (рис. 3).

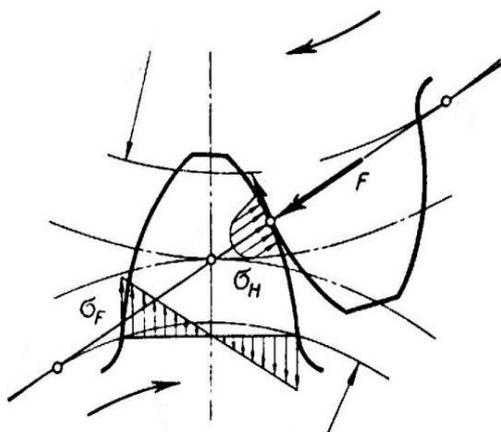


Рис. 3. Эпюры нормальных σ_H и касательных напряжений σ_F в зубчатом зацеплении

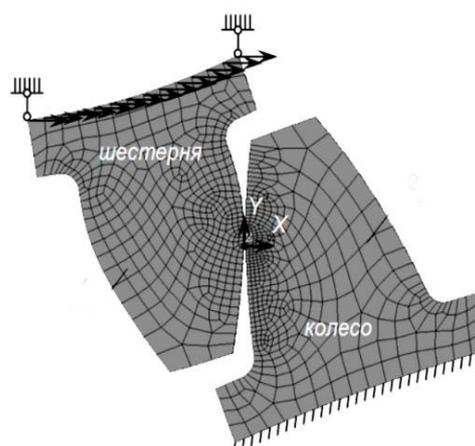


Рис. 4. Моделирование контакта зубчатой пары в пакете Ansys

В настоящее время широкое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). Он позволяет не только определить максимальные напряжения, но и учесть закон распределения напряжений по глубине материала зуба шестерни [21].

Для исследования напряженно-деформированного состояния чугунной зубчатой передачи с термодиффузионным покрытием использовался пакет ANSYS [22]. При этом зубчатое колесо закреплялось неподвижно, а к шестерне прикладывался крутящий момент, величина которого создавала критические напряжения для основных не упрочненных объемов металла зубьев. Качественная структурированная сетка позволяет учесть сложную эвольвентную поверхность зуба (рис. 4).

3. Результаты численного эксперимента

Расчет напряженно-деформируемого состояния показал, что максимальные напряжения наблюдаются у основания ножки зуба, где осуществляется первоначальное касание, иногда ударного характера и в верхней части головки зуба шестерни в направлении вращения (рис. 5, 6).

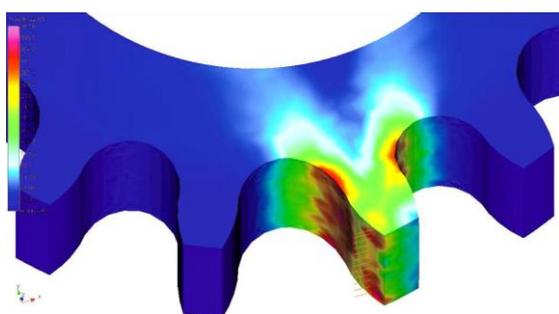


Рис. 5. Напряженное состояние зубчатой шестерни при контакте с колесом

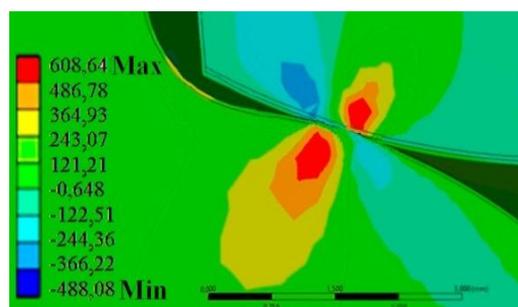


Рис. 6. Напряжения в контакте зубчатой пары с термодиффузионным покрытием из марганца

Распределение контактных напряжений в полюсе зацепления показывает распространение зоны критических напряжений (красной зоны) от поверхности вглубь на величину, не превышающую 1–2 мм. Максимальные касательные напряжения сосредоточены в поверхностном термодиффузионном слое, под которым они становятся в 2 раза меньше. Качественный характер распределения напряжений одинаков при всех видах поверхностного упрочнения. Однако значения напряжений значительно отличаются (см. таблицу).

Расчет и конструирование

Диапазон изменения напряжений (МПа) в контакте зубчатой пары при различных типах упрочняющего покрытия

Тип покрытия	Ванадием	Хромом	Марганцем
Max	725,09	752,11	608,78
Min	-718,25	-715,10	-488,08

Из таблицы видно, что максимальный уровень напряжений приходится на термодиффузионное покрытие ванадием и хромом.

Более детальное исследование строения и твердости материала в глубь зуба шестерни показало, что он представляет собой трехслойную структуру (рис. 7) [18, 23]:

- 1) высокотвердый карбидный диффузионный слой толщиной 0,05–0,06 мм;
- 2) переходная зона легированного диффузантом чугуна, представляющая собой легированный износостойкий чугун с плавным понижением твердости от карбидного слоя до основы чугуна;
- 3) зона закаленного высокопрочного чугуна шириной не менее 5 мм в зависимости от вида закалки.

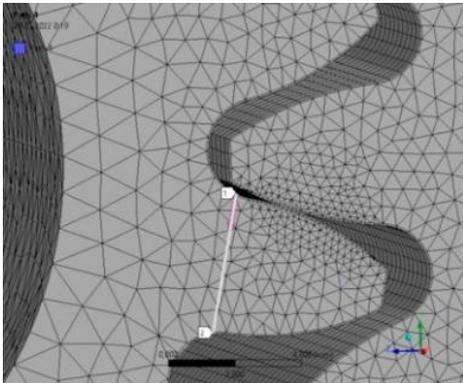


Рис. 7. Расположение линии исследования напряжений

Анализ распределения напряжений по толщине зуба (рис. 8) показывает, что максимальные контактные напряжения во впадине зубьев сосредотачиваются в созданном термодиффузионном покрытии, прочностные характеристики которого в несколько раз выше характеристик основы зуба колеса. Уровень касательных напряжений во впадине под диффузионным слоем примерно в два раза ниже, чем в самом слое. Высокая твердость поверхностных диффузионных слоев и высокое их сопротивление растягивающе-сжимающим нагрузкам снижает риск образования лунки у основания зубьев и поверхностных трещин, которые быстро приводят к потере работоспособности зубчатого зацепления.

Поскольку матрица высокопрочного чугуна изначально имела перлитную структуру (0,8 %) и представляла инструментальную сталь У8, то после закалки в масле здесь наблюдается бейнитная структура с твердостью HRC 45-55.

Высокотвердые покрытия на зубчатых колесах сглаживают эпюры касательных и нормальных напряжений в точках приложения, разгружая тем самым опасные места возникновения трещин.

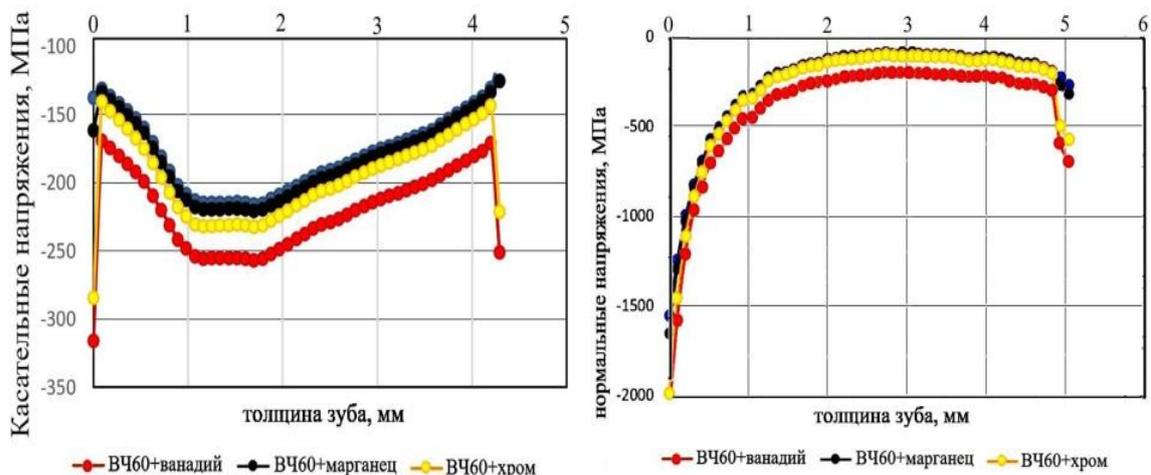


Рис. 8. Распределение напряжений по толщине зуба

Заключение

Зона распределения максимальных касательных напряжений в глубь материала зуба незначительна. Опасные контактные напряжения располагаются в упрочненной зоне, имеющей более высокие показатели прочности, следовательно, становятся менее опасными для данного режима нагружения. Диффузионное насыщение чугунных зубчатых колес карбидообразующими элементами и последующая закалка приводят к увеличению ресурса работы чугунных зубчатых зацеплений. Поверхностное упрочнение шестерен способствует:

- снижению риска возникновения трещин,
- увеличению равномерности распределения касательных напряжений вдоль рабочей поверхности зуба,
- снижению риска образования шейки и вероятности поломок самих зубьев.

Литература

1. Sun, S. Analysis of sensible random factors that influence gear reliability / S. Sun et al. // *Applied Mechanics and Materials*. – 2011. – Vol. 80–81. – P. 913–916. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.913>
2. Захарик, Ю.М. Прогнозирование долговечности зубчатых колес на основе метода конечных элементов / Ю.М. Захарик и др. // *Грузовик*. – 2009. – № 3. – С. 30–34.
3. Машнев, М.М. О восстановлении эвольвентного профиля зубьев колес тяговых передач тепловозов / М.М. Машнев и др. // *Труды МИИТ*. – 1999. – № 638 М. – С. 56–68.
4. Wasilewski, M.R. Study of the Dynamic Load of the Tractor Transmission / M.R. Wasilewski, V.A. Aleksandrov // *AIP Conference Proceedings*. – 2021. – Vol. 2340. – No. 030005. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0047252>
5. Чудновский, Е.Е. Исследование жесткости главной передачи трактора в зависимости от износа подшипников / Е.Е. Чудновский // *Труды ГОСНИТИ*. – 1995. – № 43 М. – С. 81–86.
6. Li, Z. Circular arc gear reliability study based on modified FOSM method / Z. Li, Y.-C. Bo // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 760–762. – P. 2216–2219. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.760-762.2216>
7. Баякин, В.Б. Исследование жёсткости зубьев двух и трёхпарного зацепления / В.Б. Баякин и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2016. – Т. 18. – № 4–6. – С. 1013–1020.
8. Василевский, М.Р. К вопросу о динамической нагруженности трансмиссии трактора «Кировец К-4» / М.Р. Василевский, В.А. Александров // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2020. – № 232. – С. 142–151.
9. Буйносов, А.П. Влияние износа элементов тяговой передачи на долговечность привода грузовых электровозов / А.П. Буйносов, А.Т. Шаранов // *Транспорт Урала*. – 2021. – № 1 (68). – С. 61–63.
10. Волгин, И.В. Износы и дефекты шасси трактора «Беларусь» / И.В. Волгин // *Труды ГОСНИТИ*. – 1998. – № 15 М. – 15 с.
11. Бондаренко, С.Н. Характер и причины разрушения шестерен дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин / С.Н. Бондаренко и др. // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. – 2001. – № 54. – С. 127–133.
12. Янзин, В.М. Запыленность воздуха в зоне работы трансмиссии трактора / В.М. Янзин, Е.В. Янзина // *Материалы конференции: «Инновационные достижения науки и техники АПК»*. – Кинель. – 2020. – С. 436–439.
13. Baek, S.-M. Improvement of Gear Durability for an 86 kW Class Agricultural Tractor Transmission by Material Selection / S.-M. Baek et al. // *Agriculture (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12(2). – No. 123. – URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020123>
14. Гузанов, Б.Н. Влияние поверхностного упрочнения на надежность и работоспособность зубчатых колес / Б.Н. Гузанов, Г.Н. Мигачева, М.Ю. Большакова // *Вестник машиностроения*. – 2005. – № 9. – С. 56–59.

15. Погодаев, Л.И. Повышение надежности зубчатых передач путем электроэрозионной обработки поверхности зубьев / Л.И. Погодаев и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 7. – С. 3–13.
16. Troyanovskaya, I. Investigation of Al-V Coatings Produced by the Thermo-Reactive Diffusion Method / I. Troyanovskaya et al. // Materials Science and Technology (United Kingdom). – 2022. – Vol. 38(11). – P. 734–741. – URL: <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2063476>
17. Коньгин, А.А. Повышение износостойкости зубчатых передач нанесением антифрикционных полимерных покрытий / А.А. Коньгин, Г.А. Пулюшина // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2019. – № 29. – С. 43–47.
18. Veselovsky, A.A. Predicting the Thickness of the Hardening Coating During Diffusion Metallization of Cast Iron / A.A. Veselovsky et al. // Materials Research Proceedings. – 2022. – vol. 21. – P. 51–55. – URL: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-9>
19. Veselovsky, A.A. Improving the Quality of Friction Surface by Applying Antifriction Materials to Them / A.A. Veselovsky et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 949. – No. 012133. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012133>
20. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Расчет на прочность. – М.: Изд-во стандартов. – 1988. – 125 с.
21. Sun, S. Gear reliability design using probability finite element method based on response surface / S. Sun et al. // Applied Mechanics and Materials. – 2010. – Vol. 34–35. – P. 7–12. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.7>
22. Булюкова, Ф.З. Практикум по работе в системе инженерных расчетов ANSYS WORKBENCH / Ф.З. Булюкова, Е.В. Шестакова // учебное пособие. – Уфа. – 2020. Часть 2. – 275 с.
23. Liu, X.-J. Microstructure and hardness of vanadium carbide coatings prepared by thermal diffusion process on different steel substrate / X.-J. Liu, H.-C. Wang // CailiaoRechuliXuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment. – 2010. – Vol. 31(1). – P. 150–154.17.

Веселовский Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра «Технологии машиностроения», г. Новоуральск, a_a_ves@mail.ru.

Трояновская Ирина Павловна, доктор технических наук, профессор, кафедра «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, профессор, кафедра «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, trpavb3@mail.ru.

Ерофеев Валерий Владимирович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, ervv52@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 октября 2022 г.

STRESS-STRAIN STATE OF A GEAR FROM HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH DIFFUSION CARBIDE COATING

A.A. Veselovsky¹, a_a_ves@mail.ru.

I.P. Troyanovskaya^{2,3}, tripav63@mail.ru

V.V. Erofeev³, ervv52@mail.ru

¹National Research Nuclear University "MEPHI", Novouralsk, Russian Federation

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

³South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article investigates the stress-strain state of a gear pair made of high-strength cast iron VCh 60 with a diffusion coating. We investigated three types of diffusion coating: with vanadium, chromium or manganese. Diffusion coatings were formed by chemical-thermal treatment of the studied elements in a container with a fusible seal from a powder filling. The coating thickness in all cases was 50–60 μm. The coated gears were then hardened in a protective layer. The reheat temperature was 920–930 °C. Vanadium oxide alloy with a melting point of 675°C was used as a protective medium (flux). This made it possible to form high hardness in the coatings and the transition zone from the coating. An external mechanical coating was applied over the diffusion coating using metal brushes. The study of the stress-strain state of the gear wheel was carried out by mathematical modeling using the Ansys package. The solution of the contact problem made it possible to obtain the law of distribution of normal and shear stresses over the section of the teeth. As a result, it was found that the maximum contact stresses in the cavity of the teeth are concentrated in the layer of thermal diffusion coating, the strength characteristics of which are several times higher than the characteristics of the base material of the wheel tooth. The level of shear stresses under the diffusion layer turned out to be two times lower than in the layer itself. As a result, the risk of pitting at the base of the teeth and surface cracks, which quickly lead to loss of gearing performance, has been reduced.

Key words: gear pair, cast iron, coatings, shear stresses, strength, Ansys.

References

1. Sun S. et al. Analysis of sensible random factors that influence gear reliability. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, vol. 80–81, pp. 913–916. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.913>
2. Zakharik J.M. Forecasting of durability of toothwheels on the basis of final elements method. *Truck*, 2009, vol. 3, pp. 30–34. (in Russ.).
3. Mashnev M.M. et al. On the restoration of the involute profile of the teeth of the traction gears of diesel locomotives. *Proceedings Moscow Institute of Transport Engineers*, 1999, iss. 638 M, pp. 56–68. (in Russ.).
4. Wasilewski M.R., Aleksandrov V.A. Study of the Dynamic Load of the Tractor Transmission. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2340, no. 030005. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0047252>
5. Chudnovsky E.E. Investigation of the rigidity of the main transmission of the tractor depending on the wear of the bearings. *Proceedings of the State Scientific Research Institute of Technology*, 1995, iss. 43 M, pp. 81–86. (in Russ.)
6. Li Z., Bo Y.-C. Circular arc gear reliability study based on modified FOSM method. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 760–762, pp. 2216–2219. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.760-762.2216>
7. Balyakin V. et al. Investigation of the stiffness of teeth of two and three gear pairs. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, iss. 4–6, pp. 1013–1020. (in Russ.)
8. Wasilewski M.R., Aleksandrov V.A. On the issue of dynamic loading of the Kirovets K-4 tractor transmission *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, iss. 232, pp. 142–151. (in Russ.)

9. Buynosov A.P., Sharapov A.T. Influence of wear of traction transmission elements on life of drives of freight electric locomotives. *Ural transport*, 2021, vol. 1 (68), pp. 61–63. (in Russ.)
10. Volgin I.V. Wear and defects of the chassis of the tractor “Belarus”. *Proceedings of the State Scientific Research Institute of Technology*, 1998, iss. 15 M, 15 p. (in Russ.)
11. Bondarenko S. Character and gear failure causes of construction and agricultural machinery. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University*, 2001, iss. 54, pp. 127–133. (in Russ.)
12. Yanzin V.M., Yanzina E.V. Dust content of the air in the operation zone of the tractor transmission. *Materials of the conference: Innovative achievements of science and technology of the agro-industrial complex*, 2020, pp. 436–439. (in Russ.)
13. Baek S.-M. Improvement of Gear Durability for an 86 kW Class Agricultural Tractor Transmission by Material Selection. *Agriculture (Switzerland)*. 2022, vol. 12(2), no. 123. – URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020123>
14. Guzanov B.N., Migacheva G.N., Bolshakova M.Yu. Effect of superficial hardening on reliability and efficiency of gears. *Bulletin of mechanical engineering*, 2005, vol. 9, pp. 56–59. (in Russ.)
15. Pogodayev L.I. Increasing the reliability of gears by electroerosive machining of the tooth surface. *Assembly in mechanical engineering, instrument making*, 2014, vol. 7, pp. 3–13. (in Russ.)
16. Troyanovskaya I. Investigation of Al-V Coatings Produced by the Thermo-Reactive Diffusion Method. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 2022, vol. 38(11), pp. 734–741. – URL: <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2063476>
17. Konygin A.A., Pilyushina G.A. Improvement of wear resistance of gears applying a friction reducing polymer coatings. *New materials and technologies in mechanical engineering*, 2019, vol. 29, pp. 43–47. (in Russ.)
18. Veselovsky A.A. Predicting the Thickness of the Hardening Coating During Diffusion Metallization of Cast Iron. *Materials Research Proceedings*, 2022, vol. 21, pp. 51–55. – URL: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-9>
19. Veselovsky A.A. Improving the Quality of Friction Surface by Applying Antifriction Materials to Them. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 949, no. 012133. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012133>
20. GOST 21354-87. *Peredachi zubchatyye tsilindricheskiye evol'ventnyye. Raschet na prochnost'*. [Transmission gear cylindrical involute. Strength calculation]. Moscow: Standards Publishing House. 1988. 125 p.
21. Sun S. Gear reliability design using probability finite element method based on response surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, vol. 34–35, pp. 7–12. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.7>
22. Bulyukova F.Z., Shestakova E.V. *Praktikum po rabote v sisteme inzhenernykh raschetov ANSYS WORKBENCH* [Workshop on work in the system of engineering calculations ANSYS WORKBENCH. Textbook]. Ufa. 2020. Part 2. 275 p. (in Russ)
23. Liu X.-J., Wang H.-C. Microstructure and hardness of vanadium carbide coatings prepared by thermal diffusion process on different steel substrate. *Cailiao Rechuli Xuebao. Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, vol. 31(1), pp. 150–154.

Received 27 October 2022

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Веселовский, А.А. Напряженно-деформированное состояние зубчатой передачи из высокопрочного чугуна с диффузионным карбидным покрытием / А.А. Веселовский, И.П. Трояновская, В.В. Ерофеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 13–20. DOI: 10.14529/engin220402

FOR CITATION

Veselovsky A.A., Troyanovskaya I.P., Erofeev V.V. Stress-strain state of a gear from high-strength cast iron with diffusion carbide coating. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 13–20. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220402