

УДК 621.785.52

Д.Н. Романенко¹, Г.С. Севальнев¹, А.А. Леонов¹,
К.А. Удод², Е.В. Степаненко³

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 18ХГТ ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ И УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Представлены результаты исследований:

– образцов шестерен, изготовленных из стали 18ХГТ (определение толщины цементованного слоя, распределение микротвердости по толщине цементованного слоя, измерение твердости поверхности и сердцевины, анализ микроструктуры цементованного слоя и сердцевины);

– суспензий марок ВАП-2, ВАП-4 и ВФП-5 (определение условной вязкости, массовой доли нелетучих веществ, прочности покрытия при ударе, эластичности покрытия при изгибе, адгезии покрытия, твердости и плотности).

Проведен сравнительный анализ трибологических характеристик твердосмазочных покрытий марок ВАП-2, ВАП-4 и ВФП-5 на образцах из стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки.

Ключевые слова: сталь, шестерни, цементация, твердость, микротвердость, структура, диффузионный слой, износостойкость, твердосмазочное покрытие.

D.N. Romanenko¹, G.S. Sevalnev¹, A.A. Leonov¹,
K.A. Udod², E.V. Stepanenko³

IMPROVING THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF 18KHGT STEEL AFTER CEMENTATION AND HARDENING HEAT TREATMENT

The work presents the results of the following researches:

– samples of gears made of 18KhGT steel (determination of the thickness of the cemented layer, distribution of microhardness over the thickness of the cemented layer, measurement of the surface and core hardness, analysis of the microstructure of the cemented layer and core);

– suspensions of grades VAP-2, VAP-4 and VFP-5 (determination of the conditional viscosity, mass fraction of nonvolatile substances, coating impact strength, coating elasticity in bending, coating adhesion, hardness and density).

There has been performed a comparative analysis of the tribological characteristics of solid lubricating coatings of the VAP-2, VAP-4 and VFP-5 grades on samples of steel 18KhGT after carburizing and hardening heat treatment.

Keywords: steel, gears, carburizing, hardness, microhardness, structure, diffusion layer, wear resistance, solid lubricant coating.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Акционерное общество «Выксунский металлургический завод» [Joint Stock Company «Vyksa Metallurgical Plant»]; e-mail: vzm@vsw.ru

³Публичное акционерное общество «ОДК-Кузнецов» [Public Joint Stock Company «UEC-Kuznetsov»]; e-mail: motor@kuznetsov-motors.ru

Введение

При реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий до 2030 года одним из перспективных направлений материаловедения является повышение эксплуатационных характеристик деталей, которые работают в экстремальных условиях, при интенсивном изнашивании и контактной усталости поверхности [1–3]. Прогрессивным методом повышения эксплуатационной надежности зубчатых колес и шестерен является процесс химико-термической обработки, который позволяет повысить твердость, износостойкость и контактную выносливость поверхности деталей [4–7]. Применение таких видов химико-термической обработки, как цементация или нитроцементация, приводит к формированию в поверхностном слое мелкодисперсной избыточной фазы, состоящей из карбидов или карбонитридов. Диффузионный слой после цементации, состоящий из карбидов, обладает высокой твердостью, износостойкостью и сопротивлением контактной усталости [4–11].

Одной из главных причин преждевременного выхода деталей из строя является износ цементованной поверхности, который зависит от условий работы деталей, вида трения, окружающей среды, наличия или отсутствия смазки в зоне контакта пары трения и т. д. В процессе эксплуатации зубчатые передачи в основном подвергаются адгезионному изнашиванию, которое происходит в результате разрыва масляной пленки и появления контакта между трущимися поверхностями в зубчатых передачах, что приводит к схватыванию металлов при совместном пластическом деформировании. С учетом того, что трущиеся поверхности находятся в постоянном движении, возникающие в местах контакта связи регулярно разрушаются по более слабому металлу. В результате таких схватываний и разрывов происходит перенос металла с одной детали на другую, наволакивание металла на одной из деталей, появление на поверхности рисок, задиров, заедания. Все это также приводит к появлению предпиттинговых трещин, ведущих к образованию питтингов [6–10].

Одним из способов, улучшающих антифрикционные свойства, является нанесение твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена марок ВАП-2, ВАП-4 или ВФП-5 на сопрягающиеся поверхности деталей [11–14].

Исследуемые в данной работе покрытия, которые производят во ФГУП «ВИАМ», рекомендованы для работы на воздухе, в вакууме, в среде минеральных масел, керосиновых топлив, смазок на минеральной основе, гидрожидкостей, синтетических масел типа ВНИИНП-50-1-4Ф и ИПМ-10. Покрытие работоспособно при температурах от -130 до +250 °С [15].

В данной работе проведена оценка применения антифрикционных покрытий марок ВАП-2, ВАП-4 или ВФП-5 для повышения трибологических характеристик стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.3. «Высокопрочные наноструктурированные конструкционные стали и диффузионные покрытия, полученные методами химико-термической обработки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Объектом исследования служили образцы шестерни, изготовленной из стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки. Химический состав стали следующий, % (по массе) [16]:

C	Si	Mn	Cr	Ti	Fe
0,17–0,23	0,17–0,37	0,8–1,10	1,0–1,3	0,03–0,09	Основа

Сталь 18ХГТ применяется для изготовления средненагруженных деталей, в том числе шестерен, работающих при температурах до 250 °С. По сравнению с углеродистыми сталями эта сталь имеет более высокую прочность и глубокую прокаливаемость.

Цементацию и упрочняющую термическую обработку шестерен из стали 18ХГТ выполняли по следующей технологической схеме: цементация в твердом карбюризаторе, высокий отпуск с длительной выдержкой, закалка с последующим охлаждением в масле, низкий отпуск.

Для оценки качества изделий после цементации и упрочняющей термической обработки выполнены следующие исследования образцов шестерен, изготовленных из стали 18ХГТ:

- определение толщины цементованного слоя;
- распределение микротвердости по толщине цементованного слоя;
- измерение твердости поверхности и сердцевины;
- анализ микроструктуры цементованного слоя и сердцевины.

Толщину цементованного слоя определяли по распределению микротвердости от поверхности образца к сердцевине в соответствии с ПИ 1.2.669–2003 «Химико-термическая обработка». За толщину слоя принимали слой с твердостью более 500 НV (не менее 49 HRC).

Измерение микротвердости проводили на нетравленном микрошлифе в соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» на твердомере Durascan 20.

Измерение твердости по Роквеллу проводили в соответствии с ГОСТ 9013–59 «Метод измерения твердости по Роквеллу» на универсальном твердомере DuraVision 300.

Исследование металлографических шлифов после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты проводили в соответствии с ГОСТ 8233–56 «Сталь. Эталоны микроструктуры» на оптическом металлографическом микроскопе Olympus GX-51, оснащенном фотокамерой и программой анализа изображений Analysis, при увеличениях $\times 100$ и $\times 500$.

Условную вязкость определяли в соответствии с ГОСТ 8420–74 «Материалы лакокрасочные. Методы определения условной вязкости» с применением вискозиметра ВЗ-246 с диаметром сопла $4,0 \pm 0,015$ мм вместимостью 100 ± 1 см³. Пробы суспензий отбирали в соответствии с ГОСТ 9980.2–2014 «Материалы лакокрасочные и сырье для них. Отбор проб, контроль и подготовка образцов для испытаний».

Массовую долю нелетучих веществ определяли в соответствии с ГОСТ 31939–2012 «Материалы лакокрасочные. Определение массовой доли нелетучих веществ». Для проведения испытаний применяли: тигли с плоским дном из алюминиевой фольги толщиной 0,2 мм, диаметром 80 мм и высотой бортика 5 мм; весы аналитические АН-220; печь для термической обработки Nabertherm.

Прочность покрытия при ударе определяли на приборе У-1А в соответствии с ГОСТ 4765–73 «Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности при ударе».

Эластичность покрытия при изгибе определяли на приборе ШГ-2 в соответствии с ГОСТ 6806–73 «Материалы лакокрасочные. Метод определения эластичности пленки при изгибе».

Адгезию покрытия определяли в соответствии с ГОСТ 15140–78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии» методом решетчатых надрезов.

Испытанию подвергали пластины из листовой стали марки 08кп толщиной 0,3 мм с однослойным твердосмазочным покрытием после термической обработки (рис. 1).

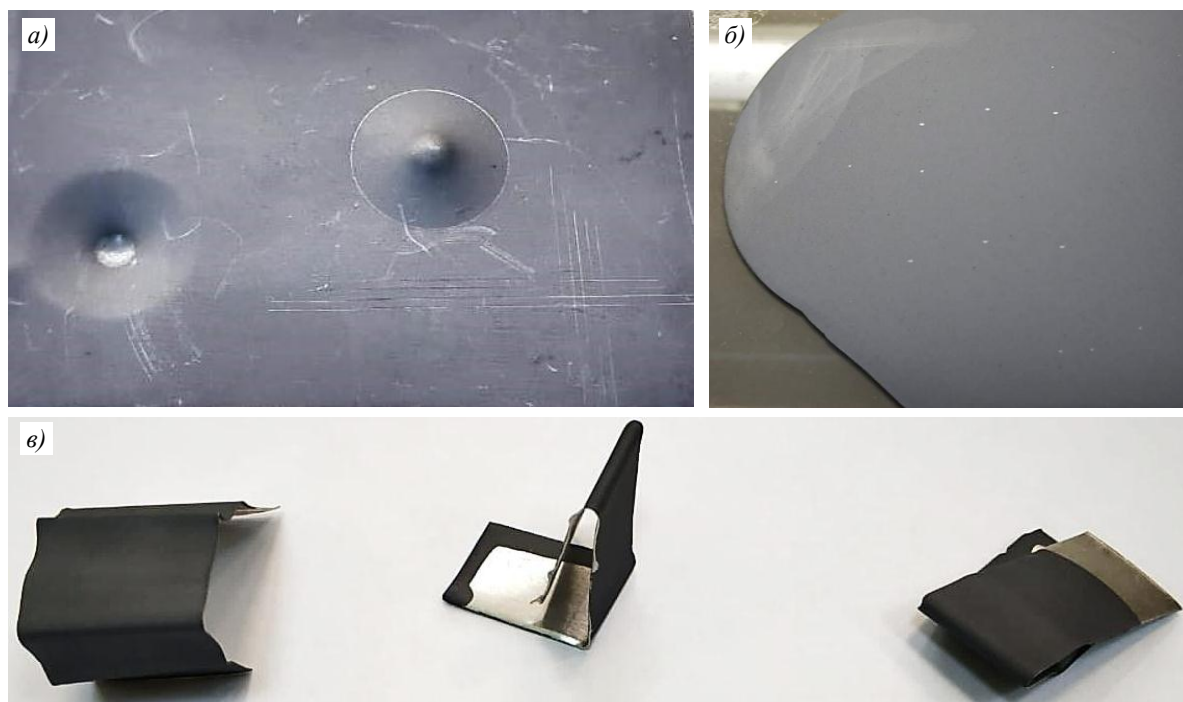


Рис. 1. Пластины с однослойным твердосмазочным покрытием после определения прочности покрытия при ударе (а), твердости пленки (б) и эластичности покрытия при изгибе (в)

Твердость пленки твердосмазочных покрытий оценивали на маятниковом приборе ТМЛ-2124 в соответствии с ГОСТ 5233–89 «Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытий по маятниковому прибору» (маятник – тип А). Для проведения испытаний на стеклянные пластины размером $90 \times 120 \times 1,8$ мм наносили твердосмазочное покрытие в один слой и выполняли измерение в трех местах пластины (рис. 1).

Исследование структуры покрытий проводили на электронном микроскопе Phenom G2 Pro при ускоряющем напряжении 5 кВ и увеличениях $\times 2000$ и $\times 3000$.

Для оценки износостойкости материалов при сухом трении использовали трибометр Nanovea T-50. Испытания проводили по схеме «pin-on-disk» («стержень–диск») при линейной скорости вращения образца $\sim 0,1$ м/с и нагрузке на стержень 10 Н. В качестве контртела использовали шарик диаметром 6 мм из хромистой стали марки 52100 (аналог стали ШХ15), термообработанной на твердость 64 HRC.

Результаты и обсуждение

Исследование микрошлифа, изготовленного из поперечного темплета образца шестерни, прошедшего цементацию и упрочняющую термическую обработку, показало, что диффузионный слой имеет равномерное распределение по всем поверхностям, подвергавшимся цементации (рис. 2).

Толщину цементованного слоя на образце шестерни из стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки измеряли по эвольвенте и впадине зуба:

Поверхность зуба	Толщина слоя, мм
Эвольвента	1,05
Впадина	0,95

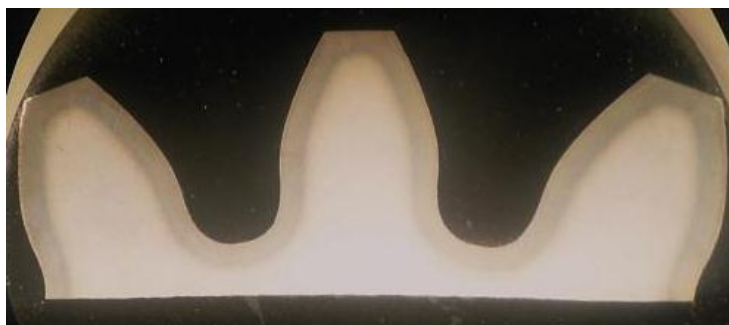


Рис. 2. Распределение цементованного слоя на образце шестерни из стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки

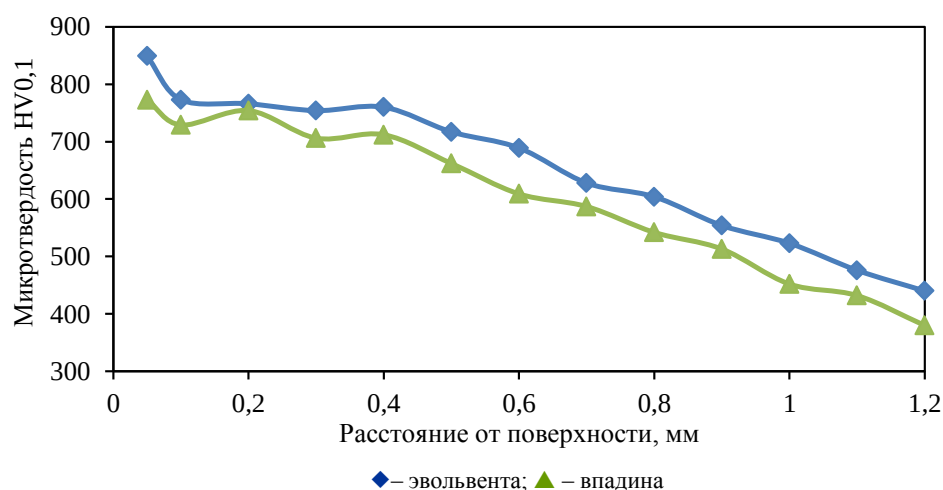


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя на образце шестерни из стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки

Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя представлено на рис. 3.

Твердость поверхности цементованного слоя на образце шестерни из стали 18ХГТ составила 61,3 HRC и сердцевины: 35 HRC.

Микроструктура цементованного слоя образца из стали 18ХГТ после упрочняющей термической обработки представлена на рис. 4, б. После цементации в диффузионном слое формируется мелкодисперсная избыточная фаза на основе железа, хрома и титана на глубину до 0,15 мм (рис. 4, а) предположительно стехиометрического состава: $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$, Cr_{23}C_6 и TiC . Далее по глубине образуется мелкоиглочатый высокоуглеродистый мартенсит (рис. 4, в), а в микроструктуре сердцевины преобладает малоуглеродистый мартенсит (рис. 5).

Для повышения эксплуатационных характеристик стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки на образцах применяли твердосмазочные покрытия марок ВАП-2, ВАП-4 или ВФП-5 и проводили сравнительный анализ. Изготовление суспензий выполняли в условиях ФГУП «ВИАМ» на установке для смешивания пасты и высокодисперсных материалов ДИСПОД-Р185. Суспензии представляют собой композиции на основе дисульфида молибдена и эпоксидного связующего (ВАП-2) с добавлением графита (ВФП-5), а также графита и соединения кадмия (ВАП-4).

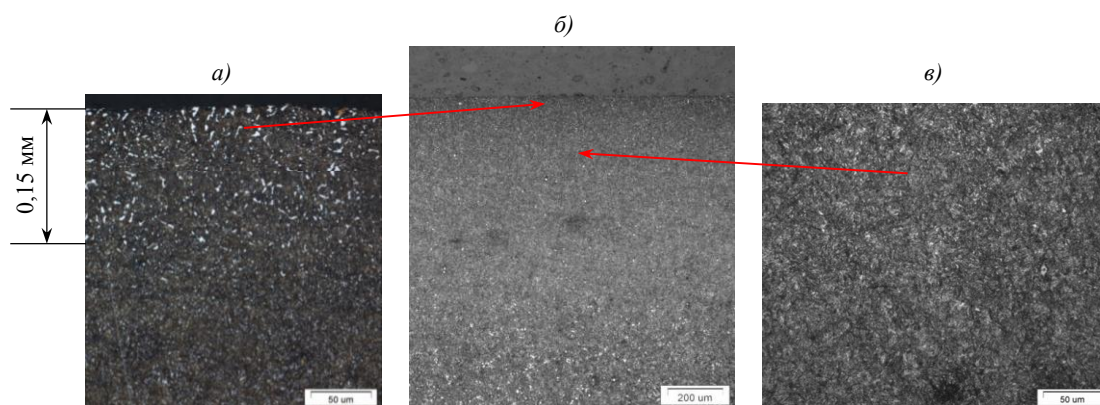


Рис. 4. Микроструктура цементованного слоя образца из стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки

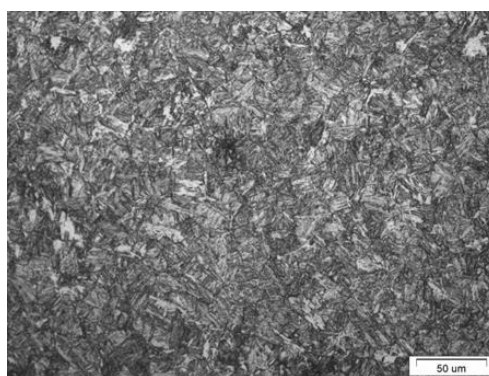


Рис. 5. Микроструктура сердцевины образца из стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки

После смешивания суспензий выполняли контроль готовой продукции на соответствие требованиям ТУ1-595-5-399–2005 «Суспензия ВАП-2», ТУ1-595-5-653–2005 «Суспензия ВАП-4» и ТУ1-595-5-400–2005 «Суспензия ВФП-5».

Приведенные в таблице результаты испытаний показали, что изготовленные суспензии соответствуют требованиям технических условий. Определяли внешний вид покрытий на их основе – все покрытия оказались ровные, матовые, равномерные по окраске и фактуре.

Результаты испытаний суспензий для твердосмазочных покрытий

Суспензия	Условная вязкость, с	Массовая доля нелетучих веществ, %	Прочность покрытия при ударе*, см	Эластичность покрытия при изгибе, мм	Адгезия покрытия, балл	Твердость пленки, усл. ед.	Толщина покрытия, мкм	Плотность суспензии, г/см ³
ВАП-2	17	56,1	50/50	2	1	0,57	15–25	1,29
ВФП-5	14	47,3	50/50	2	1	0,51	15–25	1,12
ВАП-4	18	48,6	50/50	2	1	0,53	15–25	1,16

* В числителе – прочность при прямом ударе, в знаменателе – при обратном ударе.

Структуры покрытий ВАП-2, ВФП-5 и ВАП-4 на образцах из стали 18ХГТ после термической обработки представлены на рис. 6. Покрытие ВАП-2 представляет собой матрицу из эпоксидного лака и армирующего наполнителя – дисульфида молибдена

(рис. 6, а). Пластинчатая структура дисульфида молибдена благоприятно влияет на процесс трения в зоне контакта. Дополнительное армирование покрытия ВФП-5 графитом (рис. 6, б) позволяет снизить коэффициент трения пары трения и повысить стабильность работы. Для более высоконагруженных пар трения разработан состав ВАП-4, включающий три армирующих компонента (рис. 6, в). Введение в состав покрытия кадмиевого соединения сохраняет низкий коэффициент трения и повышает уровень воспринимаемых нагрузок. После нанесения и последующей полимеризации покрытия марок ВАП-2, ВФП-5 и ВАП-4 обладают высокой адгезией к поверхности (1 балл).

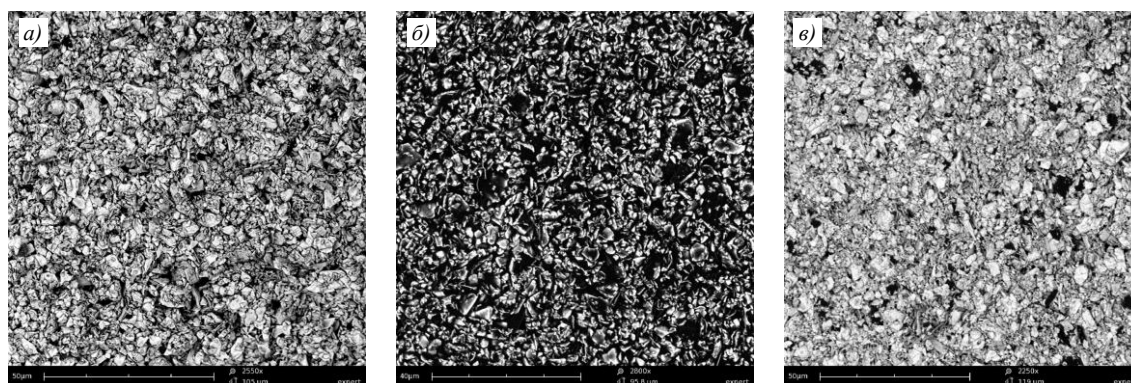


Рис. 6. Структуры твердосмазочных покрытий марок ВАП-2 (а), ВФП-5 (б) и ВАП-4 (в)

Для исследования трибологических характеристик сформированных покрытий ВАП-2, ВФП-5 и ВАП-4 проведены испытания на износостойкость в условиях сухого трения по схеме «стержень–диск». Результаты измерений записывали с помощью датчиков фрикционной силы пары трения «образец–контртело» и датчика глубины износа LVDT, а затем выводили на диаграмму зависимости параметров от времени. Результаты измерений коэффициента трения представлены на рис. 7, удельной интенсивности изнашивания стали 18ХГТ с применением покрытий ВАП-2, ВФП-5 и ВАП-4 – на рис. 8.

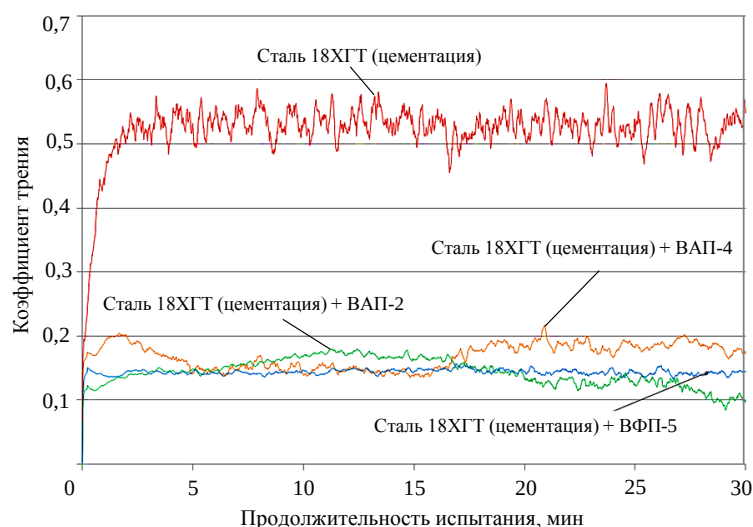


Рис. 7. Изменение коэффициента трения во времени при испытании на износ образцов из стали 18ХГТ с твердосмазочными покрытиями ВАП-2, ВФП-5 и ВАП-4 после термической обработки

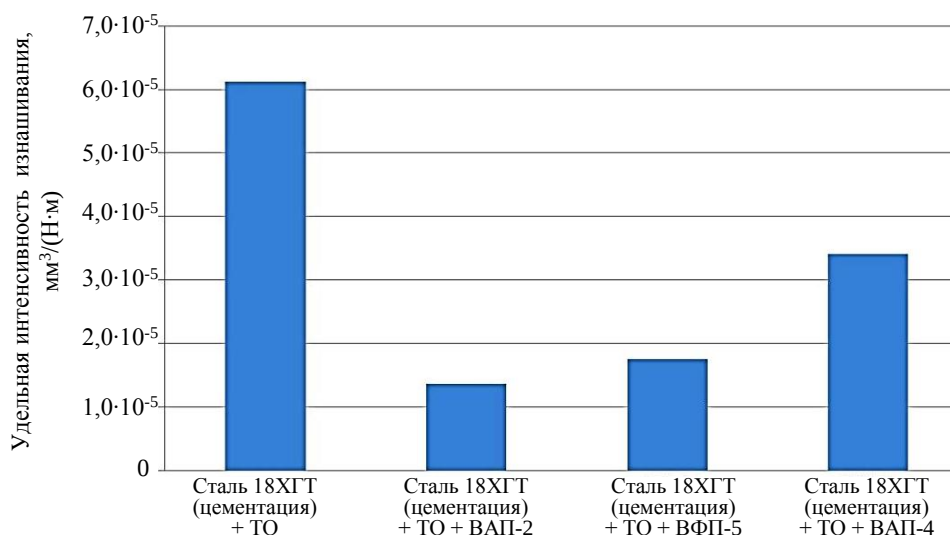


Рис. 8. Удельная интенсивность изнашивания образцов в зависимости от вида комбинированной обработки (ТО – термообработка)

Результаты испытаний на износ образцов в условиях сухого трения показали эффективность применения комбинированной обработки: цементации для создания твердой подложки и нанесения твердосмазочного покрытия. При работе пар трения высокую стабильность по коэффициенту трения показало применение покрытия ВФП-5, содержащего дополнительно графит. В данной паре трения зафиксирован наименьший максимальный коэффициент трения: 0,186. Различие по удельной интенсивности изнашивания образцов с покрытием ВАП-2 и ВФП-5 невелико, что может быть объяснено количеством компонентов в составе покрытия – увеличение их количества может незначительно повышать интенсивность изнашивания. Такой результат можно наблюдать на покрытии ВАП-4, имеющем в составе три армирующих компонента. Негативное влияние на удельную интенсивность изнашивания может оказывать также твердое мелкодисперсное соединение кадмия. Однако данное покрытие может выдерживать больший уровень нагрузок по сравнению с покрытиями ВАП-2 и ВФП-5.

Заключения

Для повышения эксплуатационных свойств (износостойкость и контактная выносливость) стали 18ХГТ применяют цементацию и упрочняющую термическую обработку. Исследования микроструктуры и микротвердости показали, что после цементации и окончательной термической обработки на образце шестерни по эвольвенте зуба сформировался диффузионный слой толщиной 1,05 мм, по впадине – 0,95 мм. В условиях сухого трения сталь обладает повышенной износостойкостью, но при этом и высоким значением коэффициента трения. Применение твердосмазочных покрытий марок ВАП-2, ВАП-4 или ВФП-5 позволяет снизить коэффициент трения и уменьшить удельную интенсивность изнашивания.

Структуры покрытий ВАП-2, ВФП-5 и ВАП-4 представляют собой пластины дисульфида молибдена в эпоксидной матрице, дополнительно армированной графитом и соединением кадмия. Применение дополнительных компонентов позволяет повысить уровень триботехнических свойств покрытий. Полимеризованные твердосмазочные покрытия марок ВАП-2, ВАП-4 или ВФП-5 на поверхности стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки обладают высокой адгезией к поверхности (1 балл).

Результаты испытаний на износ в условиях сухого трения показали, что наиболее стабильным и низким коэффициентом трения обладает покрытие ВФП-5, которое дополнительно содержит графит. Нанесение покрытия ВАП-2 позволило снизить удельную интенсивность изнашивания по сравнению с другими покрытиями, что может быть связано с количеством компонентов в составе покрытия. Наибольшим коэффициентом трения и удельной интенсивностью изнашивания поверхности обладает покрытие ВАП-4, что может быть связано с количеством компонентов и содержанием в составе покрытия кадмиевого соединения. Однако это покрытие может выдерживать более высокий уровень нагрузок при работе пары трения.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. №1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. №4. С. 331–334.
4. Smirnov A.E., Shevchenko S.Y., Shchipunov V.S., Kunyayev V.E., Sevalnev G.S. Special Features of the Carbonitriding of Parts of Instrument Bearings Designed for Extreme Service Conditions // Metal Science and Heat Treatment. 2016. Vol. 58. No. 5–6. P. 287–292.
5. Smirnov A.E., Semenov M.Yu., Mokhova A.S., Sevalnev G.S. Use of combined methods of successive carburizing and nitriding of martensitic steels in low-pressure atmospheres // Metal Science and Heat Treatment. 2020. Vol. 62. No. 1–2. P. 127–132.
6. Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементуемых деталей. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
7. Козловский И.С. Химико-термическая обработка шестерен. М.: Машиностроение, 1970. 232 с.
8. Смирнов А.Е. Оптимизация технологических факторов вакуумной нитроцементации комплексно-легированных сталей мартенситного класса // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. №2. С. 13–19.
9. Громов В.И., Кротов В.Н., Курпякова Н.А., Седов О.В., Дорошенко А.В. Влияние остаточного аустенита на структуру и свойства диффузионного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-3-8.
10. Kolmykov V.I., Romanenko D.N., Abyshv K.I., Bedin V.V. Efficiency of surface hardening by carburizing steel objects operating under abrasive wear conditions // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51. No. 1–2. P. 58–61.
11. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справочник / под ред. Э.Б. Вулгакова. М.: Машиностроение, 1981. 374 с.
12. Горлов Д.С., Скрипак В.И., Мубояджян С.А., Егорова Л.П. Исследование фреттинг-износа твердосмазочного,шликерного и ионно-плазменного покрытий // Труды ВИАМ. 2017. №3 (51). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-7-7.
13. Болсуновская Т.А., Ефимочкин И.Ю., Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П. Влияние марки графита в качестве твердой смазки на триботехнические свойства металлического композиционного материала // Труды ВИАМ. 2018. №7 (67). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-69-77.
14. Горлов Д.С., Щепилов А.В., Заклякова О.В., Гаджихалилова С.И. Влияние типа покрытия на демпфирующую способность // Труды ВИАМ. 2018. №8 (68). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-120-129.
15. Антифрикционные суспензии / Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации. URL: <https://catalog.viam.ru/catalog/suspenszii> (дата обращения: 16.09.2020).
16. ГОСТ 4543–2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 53 с.