

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СТАЛИ ХВГ

А. А. Теплоухов, Н. А. Семенюк, А. Е. Терёхина, С. И. Мотовилов, Д. В. Скакун

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В процессе эксперимента, выполненного в два этапа, было получено тонкопленочное покрытие молибдена на подложке из стали марки ХВГ. Первый этап включал в себя предварительную ионную имплантацию молибдена. Второй этап — это получение методом сбалансированного магнетронного напыления тонкопленочного покрытия молибдена. В процессе исследования методом растровой электронной микроскопии получены микрофотографии, визуально подтверждающие равномерность и однородность тонкопленочного покрытия. Полученные методом зондовой микроскопии значения средней шероховатости поверхности S_a позволяют говорить об ее уменьшении после нанесения тонкопленочного покрытия. Методом энергодисперсионного анализа определена массовая концентрация молибдена на поверхности модифицированной инструментальной стали, которая составила 92,4 %. Получены экспериментальные режимы модификации тонкопленочным покрытием стали марки ХВГ, которые оказывают существенное влияние на среднюю шероховатость и микротвердость ее поверхности. Показано, что используемые в работе экспериментальные режимы позволяют получать упрочнение поверхности стали ХВГ после нанесения тонкопленочного покрытия молибдена с предварительной ионной имплантацией в несколько раз. Определена сила адгезии между тонкопленочным покрытием и подложкой из стали марки ХВГ. Высокие значения адгезии, полученные методом, предложенным Джеральдом Франкелем из Университета штата Огайо, показывают хорошее качество нанесенного покрытия. Все вышеперечисленное говорит о перспективности использования вышеупомянутой методики в машиностроительной отрасли.

Ключевые слова: ионная имплантация, сбалансированное магнетронное напыление, тонкопленочные покрытия, молибден, растровая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, зондовая микроскопия, микротвердость.

Введение

Возрастающие требования к ресурсу и надёжности технических систем, агрегатов, рабочих органов строительных, дорожных машин, обрабатывающему инструменту, актуализируют проблематику работ, связанных с фундаментальными и прикладными исследованиями в области разработки и получения функционально-градиентных материалов (ФГМ) [1–5]. Уменьшение металлоёмкости, повышение их экономичности и качества является одной из основных целей при разработке новых или улучшения существующих инструментов. Инструментальные стали марок ХВГ и их аналоги применяются в машиностроении для изготовления деталей машин и механизмов, инструментов, оснасток. Использование этих марок сталей широко распространено при изготовлении мерительных и калибрующих инструментов, подвергающихся технологическому износу и коррозии в процессе эксплуатации [1]. Поэтому защитой от механического, коррозионного, температурного воздействия является актуальной задачей для действующих производств. Часто для улучшения триботехнических, коррозионных и других свойств материалов достаточно модифицировать лишь поверхностный слой. Способов модификации очень много. В настоящее время актуальным

методом модификации поверхностей является нанесение покрытий в виде тонких слоев различных тугоплавких и термостойких материалов методом ионно-плазменного напыления.

Авторами [2–4] показано, что для улучшения износостойкости, повышения микротвердости и коррозионной стойкости применяется поверхностное модифицирование молибденом, способствующее созданию мелкозернистой структуры. Молибден глубоко проникает в поверхностный слой стали, тем самым, увеличивая ее прочностные характеристики, меняя ее химический состав, который становится более твердым и стойким к коррозии. По результатам анализа литературных источников в качестве модифицирующего материала был выбран молибден и метод модификации — магнетронное напыление с предварительной ионной имплантацией [6, 7].

Цель и объекты исследования

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния модификации поверхностного слоя инструментальной стали ХВГ нанесением тонкопленочного покрытия молибдена методом магнетронного напыления с предварительной ионной имплантацией молибденом на физико-

механические характеристики, в частности микротвердость.

Объектами исследования являются цилиндрические образцы инструментальной стали марки ХВГ без покрытия и модифицированные тонкопленочным покрытием молибдена.

Методика эксперимента

Для получения исследуемых объектов применялось поверхностное модифицирование инструментальной стали ХВГ, тонкопленочным покрытием молибдена методом сбалансированного магнетронного напыления [7] на установке магнетронного напыления ADVAVAS VSM200, с предварительной ионной имплантацией [8] молибдена на установке ННВ, с частотно-импульсным ионным источником «ДИА-На», позволяющих получать пучки ионов любых проводящих материалов с энергиями до 150 кэВ.

Предварительно была проведена пробоподготовка, которая заключалась в механической очистке щеткой и салфеткой, химической очистке образцов в этиловом спирте в ультразвуковой ванне марки WUC-A03H с частотой 4 кГц в течение 10 минут без нагрева, далее аналогичная процедура с ацетоном, для удаления органических соединений и частично солей. Чистка в ультразвуковой ванне марки WUC-A03H изопропиловым спиртом при температуре 40 °С в течение 30 минут, для удаления неорганических соединений.

Ионная имплантация выполнена в следующем режиме: материал катода – молибден, напряжение дуги 380 вольт, напряжение поджига 380 вольт, ускоряющее напряжение 32 киловольт, доза имплантации $2,25 \times 10^{17}$ ион /см², время имплантации 5 минут.

После переноса образца в установку ADVAVAC VSM 200 для дополнительной очистки поверхности и активации поверхностного слоя стальной пластины дополнительно было произведено ионно-плазменное травление на установке ADVAVAC VSM 200 ионами аргона в течение 10 минут с мощностью источника 100 Вт при давлении в камере $1,6 \cdot 10^{-4}$ мБар.

Нанесение тонкопленочного покрытия производилось в плазме тлеющего разряда магнетронным классическим сбалансированным методом в течение 40 минут в рабочей камере с давлением $5,2 \cdot 10^{-3}$ мБар, мощность источника составляла 320 Вт. Расположение между мишенью и образцом плоскопараллельное. Для равномерного нанесения тонкопленочного покрытия молибдена образцы были закреплены в специальной равномерно вращающейся оснастке на расстоянии 90 мм от мишени. Скорость вращения подложки составляла 30 об/мин. В качестве мишени использовался диск диаметром 51 мм толщиной 5мм, из молибдена с чистотой 99,9 %.

С целью удаления влаги с поверхности подложки и улучшения адгезионной прочности между пленкой и подложкой был произведен нагрев подложки до температуры 150 °С.

При выполнении работы были использованы апробированные экспериментальные методы исследования поверхности (зондовая и электронная микроскопия), микротвердометрия, а также элементного состава (энергодисперсионный анализ).

Поверхности исходных, а также модифицированных поверхностей образцов исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ)

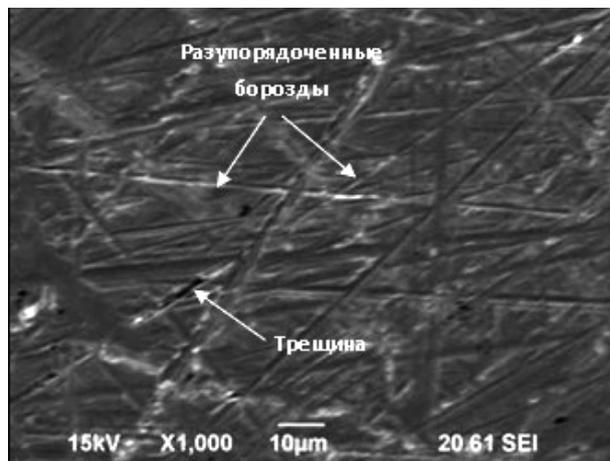


Рис. 1. Изображение исходной поверхности стального образца марки ХВГ при увеличении в 1000 раз
Fig. 1. Image of the original surface of a steel sample of the KhVG grade at a magnification of 1000 times

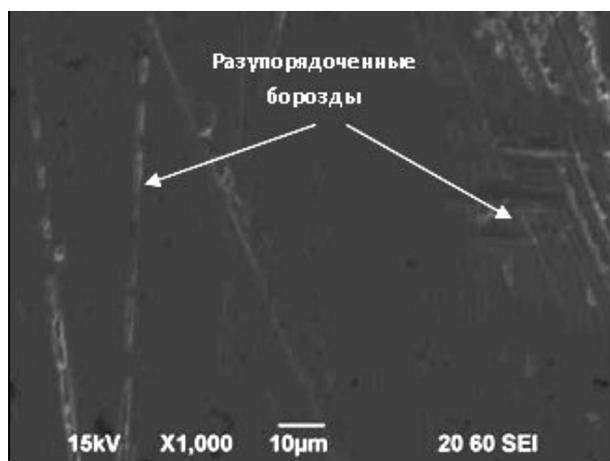


Рис. 2. Изображение поверхности стального образца марки ХВГ, модифицированного тонкопленочным покрытием молибдена при увеличении в 1000 раз
Fig. 2. Image of the surface of a steel sample of the KhVG grade modified with a thin-film coating of molybdenum at a magnification of 1000 times

с применением энергодисперсионного анализа (ЭДА) на электронном сканирующем микроскопе JEOL-5700 в режиме высокого вакуума. Тип сигнала — вторичные электроны (SEI). Процесс осуществлялся под ускоряющим напряжением в диапазоне 15 кВ, увеличение составило 1000. Шероховатость поверхности определялась с помощью сканирующего зондового микроскопа NTEGRA Prima контактным методом. Для измерения характеристик был использован зонд НА_пс/Pt01. Обработка результатов производилась с помощью математического пакета SPIP и программой Gwyddion.

Микротвердость исходного и модифицированного образцов определялась методом Виккерса с помощью прибора ПМТ-3М.

Величину адгезии вычисляли по методике Франкея [9, 10].

Результаты экспериментов

На рис. 1 представлен снимок исходной поверхности образца из инструментальной стали марки ХВГ.

Таблица 1. Состав поверхностного слоя образцов
Table 1. Composition of the surface layer of the samples

Образец	Концентрация, масс. %			
	[Mo]	[Fe]	[O]	[C]
Исходная поверхность	—	92,95	1,85	5,2
Поверхность, модифицированная молибденом	92,4	1,1	1,7	4,8

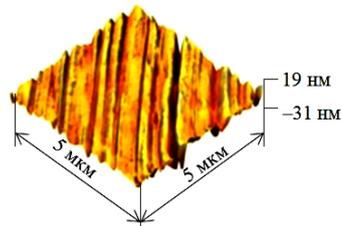


Рис. 3. Топография поверхности (изображения рельефа в АСМ-режиме размером 5×5 мкм) исходного образца из инструментальной стали марки ХВГ

Fig. 3. Surface topography (relief images in AFM mode, 5×5 μm in size) of the initial sample made of KhVG tool steel

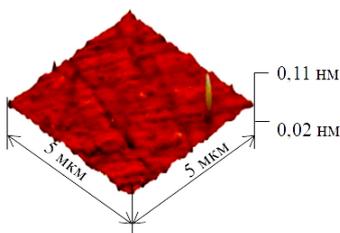


Рис. 4 Топография поверхности (изображения рельефа в АСМ-режиме размером 5×5 мкм) образца из инструментальной стали марки ХВГ с 40-минутным напылением молибдена

Fig. 4. Surface topography (relief images in AFM mode, 5×5 μm in size) of a sample made of tool steel of the HVG grade, with 40-minute molybdenum sputtering

Данная поверхность характеризуется наличием разупорядоченных борозд и трещин, полученных путем механического воздействия.

На рис. 2 представлен снимок поверхности образца из инструментальной стали, модифицированной молибденом.

Из рис. 2 видно, что поверхность образца из инструментальной стали марки ХВГ, модифицированной тонкопленочным покрытием молибдена, также характеризуется наличием разупорядоченных борозд и трещин, однако в меньшей степени, чем для исходного образца.

В табл. 1 приведены данные о химическом составе образцов как исходной поверхности, так и после нанесения тонкопленочного покрытия, полученные методом растровой электронной микроскопии с помощью метода энергодисперсионного анализа [11 – 14].

Таблица 2. Параметры шероховатости
Table 2. Roughness parameters

Параметры	Образец	
	Исходная поверхность	Поверхность, модифицированная молибденом
Средняя шероховатость поверхности, Sa, нм	167	85

Таблица 3. Параметры микротвердости
Table 3. Microhardness parameters

Параметры	Образец	
	Исходная поверхность	Поверхность, модифицированная молибденом
Микротвердость (HV), ед.	320	2900*

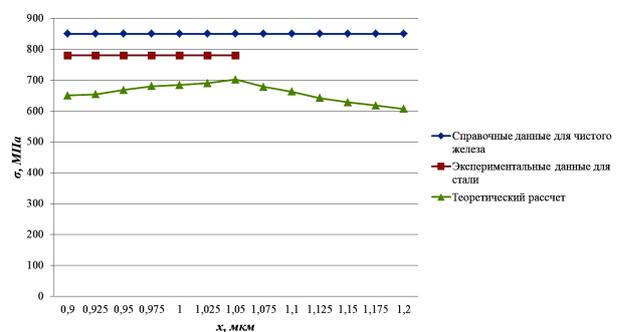


Рис. 5. Зависимость силы адгезии от толщины покрытия молибдена на подложку

Fig. 5. Dependence of adhesion force on the thickness of the molybdenum coating on the substrate

С помощью сканирующего зондового микроскопа NTEGRA Prima в режиме контактной атомно-силовой микроскопии (к-АСМ) получены топографии поверхности исходного образца из инструментальной стали марки ХВГ и модифицированной молибденом (рис. 3, 4).

Результаты обработки математическим пакетом SPIP и программой Gwyddion приведены в табл. 2.

С помощью микротвердомера ПМТ-3М были получены значения микротвердости исходного и модифицированного тонкопленочным покрытием молибдена образцов из инструментальной стали марки ХВГ. В табл. 3 представлены результаты, усредненные по 20 значениям микротвердости.

Из табл. 3 видно что, после нанесения тонкопленочного покрытия молибдена на инструментальной стали марки ХВГ, микротвердость поверхностного слоя образца увеличилась в несколько раз. Значок* показывает, что количественные значения можно рассматривать условно, так как, согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, для толщин покрытий порядка сотен нанометров может возникнуть неопределенность погрешности. Тем не менее очевиден значительный рост значения микротвердости.

По методике Франкеля [9] были получены экспериментальные значения для стали марки ХВГ. Из литературных данных взяты значения адгезии пленки молибдена на стальную поверхность. Теоретические значения определены по методике [10].

Результаты исследований и расчетов силы адгезии приведены на рис. 5.

Обсуждение результатов

Как исходная поверхность, так и поверхность после модифицирования, представленные на рис. 1 и рис. 2, характеризуются наличием разупорядоченных борозд. Однако после модифицирования поверхности тонкопленочным покрытием молибдена (рис. 2) визуально наблюдается сглаживание данной поверхности, то есть уменьшением наличия борозд. При этом значительно уменьшается шероховатость поверхности.

Массовая концентрация молибдена на поверхности подложки из инструментальной стали марки ХВГ составила 92,4 % (табл. 1). Наличие железа в элементном составе объясняется тем, что, поскольку глубина сканирования больше толщины пленки, существует вероятность регистрации элементов из-под тонкопленочного покрытия. Наличие кислорода и углерода говорит об образовании оксидов и карбидов молибдена на подложке в рабочей камере.

Величины адгезии теоретических и экспериментальных различаются на 10-12 процентов. При использовании применённых методов можно говорить о сопоставимости результатов [11]. Высокие значения адгезии говорят о достаточно хорошо подобранных технологических режимах [15]. После нанесения тонкопленочного покрытия молибдена на инструментальную сталь марки ХВГ наблюдается значительное повышение микротвердости (табл. 3).

Выводы и заключение

1. Полученные снимки исходной и модифицированной тонкопленочным покрытием молибдена поверхностей образцов из инструментальной стали марки ХВГ показали наличие разупорядоченных борозд и трещин, которые после нанесения тонкопленочного покрытия визуально сгладились и стали менее заметны. Уменьшение значения средней шероховатости поверхности S_a в два раза это верифицирует.

2. Исследование элементного состава методом ЭДА показало наличие молибдена 92,4 % на модифицированном образце из инструментальной стали марки ХВГ, что предполагает наличие однородного тонкопленочного покрытия. Наличие кислорода и углерода с большой долей вероятности предполагает образование оксидов и карбидов молибдена на поверхностном слое.

3. Установлено, что нанесение тонкопленочного покрытия молибдена методом магнетронного напыления способствует значительному росту микротвердости на поверхности образца из инструментальной стали марки ХВГ. После нанесения тонкопленочного покрытия микротвердость образца увеличилась в несколько раз.

4. Использование инструмента с молибденовым покрытием, полученным с предварительной ионной имплантацией и технологическими режимами, использованными в данной статье можно рекомендовать для различных видов оснастки, подвергающихся повышенным механическим воздействиям.

Список источников

1. ГОСТ 5950-2000. Прутки, полосы и мотки из инстру-

ментальной легированной стали. Общие технические условия. Введ. 01-01-2002 // Международный академический вестник. 2015. № 5 (11). С. 86-88.

2. Зинченко С. А. Разработка и внедрение в ОАО «ИЖ-СТАЛЬ» термоциклической обработки инструментальных сталей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 5 (1385). С. 48-50.

3. Большаков В. И., Глушкова Д. Б. Исследование структуры и твердости сталь-молибденового покрытия // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. 2015. № 10. С. 10-15.

4. Taylor S., Modi A., Modi S. C. High-Performance Molybdenum Coating by Wire – HVOF Thermal Spray Process // Journal of Thermal Spray Technology. 2018. Vol. 12. DOI: 10.1007/s11666-018-0706-2.

5. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г. [и др.]. Формирование покрытий из самораспадающегося порошка на основе сталей аустенитного класса с добавлением молибдена // Наука и техника. 2021. № 2. С. 95-100. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-2-95-100.

6. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. Москва: Радио и связь, 1982. 72 с.

7. Dubonosov V., Krichkovskaya L., Petrova I. Magnetron sputtering of metals in the presence of jet gases // Norwegian Journal of development of the international science. 2019. Vol. 26. P. 50-54.

8. Балакин Ю. А., Будник А. А. Разработка технологии комбинированной обработки инструментальной стали с целью повышения ее качества // Международный академический вестник. 2015. № 5 (11). С. 86-88.

9. Seong J., Frankel G. S. Assessment of Coating Adhesion Degradation by Atomic Force Microscopy Scratching // Corrosion. 2012. № 68 (3). P. 032501-1-032501-4. DOI: 10.5006/1.3688500.

10. Постников Д. В., Блесман А. И., Теплоухов А. А., Полюнякин Д. А., Ткаченко Э. А., Тюкин А. В. Адгезия защитных покрытий из молибдена на стальной подложке // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 2. С. 279-282.

11. Теплоухов А. А., Семенюк Н. А., Терехина А. Е., Мотовилов С. И. Исследование тонкопленочного танталового покрытия на подложках из стали марки У8 методом электронной микроскопии // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-22): материалы Регион. молодеж. науч.-практ. конф. (Омск, 21 апр. 2022 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 203-207.

12. Блесман А. И., Рогачев Е. А., Зверев М. А., Теплоухов А. А. Исследование тонкопленочных покрытий молибдена и хрома на конструкционных сталях // Динамика систем, механизмов и машин. 2012. № 2. С. 344-347. EDN: SFWAJZ.

13. Лубнин А. Н., Лебедев Р. В., Ладьянов В. И. [и др.]. Осаждение молибденовых покрытий безводородным методом CVD // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58, № 1. С. 61-69. DOI: 10.31857/S0044185622010144.

14. Тополянский П. А. Исследование ионно-плазменных износостойких покрытий на инструментальных сталях // Металлообработка. 2004. № 1 (19). С. 24-30. EDN: HYSIFR.

15. Солопчук М. С., Абрашов А. А., Григорян Н. С. [и др.]. Защитные адгезионные покрытия на основе оксидов титана и молибдена // Успехи в химии и химической технологии. 2018. № 13. С. 54-56. EDN: YRRXCX.

ТЕПЛОУХОВ Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6836-1254

AuthorID (РИНЦ): 859681

AuthorID (SCOPUS): 57189517666

Адрес для переписки: a.a.lektor@mail.ru

СЕМЕНЮК Наталья Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4143-3715

AuthorID (РИНЦ): 684680

AuthorID (SCOPUS): 57191041061,

Адрес для переписки: sem-natal@mail.ru

ТЕРЁХИНА Анастасия Евгеньевна, аспирант кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9439-5669

AuthorID (РИНЦ): 1216883

Адрес для переписки: terexina28081999@gmail.com

МОТОВИЛОВ Сергей Игоревич, аспирант кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4676-6076

AuthorID (РИНЦ): 1198825

Адрес для переписки: redgord@gmail.com

СКАКУН Дмитрий Викторович, студент гр. Ним-221, радиотехнического факультета ОмГТУ, г. Омск.
Адрес для переписки: skakun_dmitrii@mail.ru

Для цитирования

Теплоухов А. А., Семенюк Н. А., Терёхина А. Е., Мотовилов С. И., Скакун Д. В. Влияние поверхностной модификации на морфологические характеристики и микротвердость стали ХВГ // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 1. С. 95–101. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-95-101.

Статья поступила в редакцию 21.02.2024 г.

© А. А. Теплоухов, Н. А. Семенюк,

А. Е. Терёхина,

С. И. Мотовилов, Д. В. Скакун

THE INFLUENCE OF SURFACE MODIFICATION ON THE MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND MICROHARDNESS OF HVG STEEL

A. A. Teploukhov, N. A. Semenyuk, A. E. Teryokhina, S. I. Motovilov, D. V. Skakun

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

During the experiment, carried out in two stages, a thin-film coating of molybdenum is obtained on substrates made of steel grade HVG. The first stage included preliminary ion implantation of molybdenum. The second stage is the production of a thin-film molybdenum coating by balanced magnetron sputtering. During the study using scanning electron microscopy, microphotographs are obtained that visually confirmed the uniformity and homogeneity of the thin-film coating. The values of average surface roughness S_a is obtained by probe microscopy suggest that it decreases after applying a thin-film coating. Using the energy dispersive analysis method, the mass concentration of molybdenum on the surface of the modified tool steel was determined, which is 92,4 %. Experimental modes of modification of KhVG steel with a thin-film coating have been obtained, which have a significant effect on the average roughness and microhardness of its surface. It has been shown that the experimental modes used in the work make it possible to obtain a strengthening of the surface of HVG steel after applying a thin-film coating of molybdenum, with preliminary ion implantation several times. The adhesion force between the thin-film coating and the HVG steel substrate is determined. High adhesion values obtained using the method proposed by Gerald Frankel from Ohio State University indicate good quality of the applied coating. All of the above indicates the prospects of using the above-mentioned methodology in the mechanical engineering industry.

Keywords: ion implantation, balanced magnetron sputtering, thin film coatings, molybdenum, scanning electron microscopy, energy dispersive analysis, probe microscopy, microhardness.

References

1. GOST 5950-2000. Prutki, polosy i motki iz instrumental'noy legirovannoy stali. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Tool alloy steel bars, strips and coils. General specifications] // Mezhdunarodnyy akademicheskyy vestnik. *International Academic Bulletin*. 2015. No. 5 (11). P. 86–88. (In Russ.).
2. Zinchenko S. A. Razrabotka i vnedreniye v OAO «IZHSTAL» termotsiklicheskoj obrabotki instrumental'nykh staley [Development and implementation at OJSC "IZHSTAL" of thermal cyclic processing of tool steels] // Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015. No. 5 (1385). P. 48–50. (In Russ.).
3. Bolshakov V. I., Glushkova D. B. Issledovaniye struktury i tverdosti stal'-molibdenovogo pokrytiya [The Study of structure and hardness of steel-molibdenum covering] // Vestnik Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitel'stva i arkhitektury. *Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture*. 2015. No. 10. P. 10–15. (In Russ.).
4. Tailor S., Modi A., Modi S. C. High-Performance Molybdenum Coating by Wire-HVOF Thermal Spray Process // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2018. Vol. 12. DOI: 10.1007/s11666-018-0706-2. (In Engl.).
5. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G. [et al.]. Formirovaniye pokrytiy iz samoflyusuyushchegosya poroshka na osnove staley austenitnogo klassa s dobavleniyem molibdena [Forming Coatings from Self-Fluxing Powder Based on Steels of Austenite Class Adding Molybdenum] // *Nauka i tekhnika. Science and Technique*. 2021. No. 2. P. 95–100. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-95-100. (In Russ.).
6. Danilin B. S., Syrchin V. K. Magnetronnyye raspylitel'nyye sistemy [Magnetron sputtering systems]. Moscow, 1982. 72 p. (In Russ.).
7. Dubonosov V., Krichkovskaya L., Petrova I. Magnetron sputtering of metals in the presence of jet gases // *Norwegian Journal of development of the international science*. 2019. Vol. 26. P. 50–54. (In Engl.).
8. Balakin Yu. A., Budnik A. A. Razrabotka tekhnologii kombinirovannoy obrabotki instrumental'noy stali s tsel'yu povysheniya eye kachestva [Development of technology for the combined treatment of tool steel to improve its quality] // Mezhdunarodnyy akademicheskyy vestnik. *International Academic Bulletin*. 2015. No. 5 (11). P. 86–88. (In Russ.).
9. Seong J., Frankel G. S. Assessment of Coating Adhesion Degradation by Atomic Force Microscopy Scratching // *Corrosion*. 2012. № 68 (3). P. 032501-1–032501-4. DOI: 10.5006/1.3688500. (In Engl.).
10. Postnikov D. V., Blesman A. I., Teploukhov A. A., Polonyankin D. A., Tkachenko E. A., Tyukin A. V. Adgeziya zashchitnykh pokrytiy iz molibdena na stal'noy podlozhke [Adhesion of protective coatings of molybdenum on a steel substrate] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2016. No. 2. P. 279–282. (In Russ.).
11. Teploukhov A. A., Semenyuk N. A., Terekhina A. E., Motovilov S. I. Issledovaniye tonkoplenochnogo tantalovogo pokrytiya na podlozhkakh iz stali marki U8 metodom elektronnoy mikroskopii [Study of thin-film tantalum coating on U8 steel substrates by electron microscopy] // *Nanotekhnologii. Informatsiya. Radiotekhnika (NIR-22). Nanotechnologies. Information. Radio Engineering (NIR-22)*. Omsk, 2022. P. 203–207. (In Russ.).

12. Blesman A. I., Rogachev E. A., Zverev M. A., Teploukhov A. A. Issledovaniye tonkopenochnykh pokrytiy molibdena i khroma na konstruktsionnykh stalyakh [Study of thin-film coatings of molybdenum and chromium on structural steels] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2012. No. 2. P. 344–347. (In Russ.).

13. Lubnin A. N., Lebedev R. V., Lad'yanov V. I. [et al.]. Osazhdeniye molibdenovykh pokrytiy bezvodородnym metodom CVD [Hydrogen-free CVD deposition of molybdenum coatings] // *Fizikkhimiya poverkhnosti i zashchita materialov. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2022. Vol. 58, no. 1. P. 61–69. DOI: 10.31857/S0044185622010144. (In Russ.).

14. Topolyanskiy P. A. Issledovaniye ionno-plazmennyykh iznosostoykikh pokrytiy na instrumental'nykh stalyakh [Research of ion-plasma wear-resistant coating on tools] // *Metalloobrabotka. Metalworking*. 2004. No. 1 (19). P. 24–30. EDN: HYSIFR.

15. Solopchuk M. S., Abrashov A. A., Grigoryan N. S. [et al.]. Zashchitnyye adgezionnyye pokrytiya na osnove oksidov titana i molibdena [Protective adhesive coatings based on titanium and molybdenum oxides] // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2018. No. 13. P. 54–56. EDN: YRRXCX. (In Russ.).

TEPLOUKHOV Andrey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 6836-1254

AuthorID (RSCI): 859681

AuthorID (SCOPUS): 57189517666

Correspondence address: a.a.lektor@mail.ru

SEMENYUK Natalya Andreevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4143-3715

AuthorID (RSCI): 684680

AuthorID (SCOPUS): 57191041061

Correspondence address: sem-natal@mail.ru

TERYOKHINA Anastasia Evgenievna, Graduate Student of Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9439-5669

AuthorID (RSCI): 1216883

Correspondence address: terexina28081999@gmail.com

MOTOVILOV Sergey Igorevich, Graduate Student of Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4676-6076

AuthorID (RSCI): 1198825

Correspondence address: redgord@gmail.com

SKAKUN Dmitry Viktorovich, Student, gr. NIm-221 of Radio Engineering Faculty, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: skakun_dmitrii@mail.ru

For citations

Teploukhov A. A., Semenyuk N. A., Teryokhina A. E., Motovilov S. I., Skakun D. V. The influence of surface modification on the morphological characteristics and microhardness of HVG steel // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 1. P. 95–101. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-95-101.

Received February 21, 2024.

© A. A. Teploukhov, N. A. Semenyuk,

A. E. Teryokhina,

S. I. Motovilov, D. V. Skakun