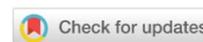


# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.793

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-250-256>

## Тонкая структура стали после микродугового молибденирования

 М.С. Степанов  , Ю.М. Домбровский 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ [stepanovms@yandex.ru](mailto:stepanovms@yandex.ru)

EDN: BECKGZ

### Аннотация

**Введение.** В условиях современного производства важной задачей является повышение надежности и долговечности стальных изделий. Для решения этой проблемы целесообразно создавать на их поверхности высокопрочные износостойкие покрытия, формируемые методом диффузионного насыщения металла карбидообразующими элементами. Традиционные способы получения таких покрытий отличаются значительной продолжительностью — до 8 и более часов. Для ускорения процесса формирования в литературе предложены различные методы, основанные на применении высокоэнергетического воздействия на материал (лазерного, плазменного и т.д.), однако они требуют использования сложного и дорогостоящего оборудования. В настоящей работе рассмотрен способ получения высокотвердого покрытия на основе молибдена методом микродугового легирования, который заключается в воздействии на обрабатываемое стальное изделие, погруженное в угольный порошок, мультипликативных микродуговых разрядов, возникающих между поверхностью металла и окружающей порошковой средой при пропускании электрического тока. Этот метод позволяет значительно интенсифицировать процесс диффузионного поверхностного насыщения, отличается простотой и низкой энергоемкостью. Свойства получаемых покрытий в основном определяются их тонкой структурой, поэтому исследование этой структуры представляет собой актуальную задачу. Таким образом, целью работы было изучение особенностей тонкой структуры поверхностного слоя стали после микродугового молибденирования.

**Материалы и методы.** В качестве источника молибдена для диффузионного насыщения использовали обмазку, содержащую мелкодисперсный порошок молибдата аммония и электропроводный гель в качестве связующего в объемном соотношении 1:1. Обмазку наносили на поверхность цилиндрических образцов диаметром 12 мм и длиной 35 мм, изготовленных из стали 20, после чего их погружали в металлический контейнер с угольным порошком с размером частиц 0,4–0,6 мм. Через данный порошок пропускали электрический ток в течение 6 минут, при этом поверхностная плотность тока составляла 0,53 А/см<sup>2</sup>. Для исследований тонкой структуры стали использовали микроскоп Neophot-21, дифрактометр ARL X'TRA-435, сканирующий электронный микроскоп ZEISS CrossBeam 340 с рентгеновским микроанализатором и сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator.

**Результаты исследования.** После микродугового молибденирования стальных образцов образуется покрытие, обладающее многослойным строением и сложным фазовым составом. На поверхности материала обнаруживается слаботравящийся слой толщиной 50–55 мкм, под которым расположен науглероженный слой с эвтектоидной структурой толщиной около 200 мкм, а еще ниже сохраняется исходная феррито-перлитная структура. Основа слаботравящегося слоя представляет собой дисперсную феррито-карбидную смесь, содержащую около 47 мас. % Мо и имеющую микротвердость 8–9 ГПа. В этом слое расположены карбидные включения размером до 5 мкм, содержащие 94 мас. % Мо и обладающие микротвердостью до 21 ГПа. Рельеф поверхности характеризуется наличием карбидных включений размером 3–5 мкм, а также множественными наноразмерными включениями, выступающими над поверхностью шлифа на высоту от 10 до 150–200 нм.

**Обсуждение.** Результаты исследования, полученные с использованием металлографического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновского фазового анализа и атомно-силовой микроскопии, показали, что при микродуговом молибденировании стали формируется диффузионный слой, содержащий наноразмерные частицы карбидной фазы, достигающие объёмной доли до 70 %, расположенные в основе слоя, представляющего собой феррито-карбидную эвтектоидную смесь. Количественная оценка упрочняющего влияния этих частиц подтвердила, что наличие таких частиц, характеризующихся высокой микротвердостью, и обуславливает высокую твердость образующегося покрытия.

**Заключение.** Микродуговое молибденирование стали представляет собой эффективный метод получения покрытий, обладающих выдающимися эксплуатационными характеристиками. Полученные вследствие этого покрытия не только отличались высокой твердостью за счет наноразмерных карбидных частиц, расположенных в феррито-карбидной основе, но и демонстрировали улучшенные механические свойства. Это делает их перспективными для применения в различных отраслях, где требуются высокая износостойкость и долговечность изделий. Результаты исследований показывают, что использование данного метода значительно сокращает время обработки и позволяет избежать применения дорогостоящего оборудования, что делает его более доступным для промышленного внедрения.

**Ключевые слова:** модифицирование поверхности стали, создание молибденированного покрытия, формирование диффузионного слоя

**Благодарности.** Авторы благодарят сотрудников редакции и рецензентов за внимание, проявленное к публикации и ценные замечания, которые позволили улучшить ее содержание.

**Для цитирования.** Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Тонкая структура стали после микродугового молибденирования. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):250–256. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-250-256>

*Original Empirical Research*

## Fine Steel Structure after Microarc Molybdenum Steel Saturation

Makar S. Stepanov  , Yurii M. Dombrovskii 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 [stepanovms@yandex.ru](mailto:stepanovms@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** In modern production, it is important to increase reliability and durability of steel products. One way to achieve this is by creating high-hardness, wear-resistant coatings on their surface. These coatings can be formed using the method of diffusion saturation, which involves the introduction of carbide-forming elements into the metal. Traditional methods for creating these coatings are time-consuming, taking up to 8 hours or more. To accelerate this process, researchers have proposed using high-energy methods such as laser and plasma treatments. However, these methods require specialized equipment that can be expensive. In this paper, we consider a method for creating a high-hardness molybdenum-based coating by microarc alloying. This method involves exposing a processed steel product immersed in coal powder to multiplicative microarc discharges that occur between the metal surface and the surrounding powder medium. The discharges are generated when an electric current is passed through them. This method allows for a significant increase in the process of diffusive surface saturation. It is characterized by simplicity and low energy consumption. The properties of the resulting coatings are primarily determined by their fine structure. Therefore, studying this structure is a crucial task. The aim of this research was to investigate the features of the fine structure of the steel surface layer after microarc molybdenum plating.

**Materials and Methods.** A coating containing finely dispersed ammonium molybdate powder and an electrically conductive gel as a binder in a volume ratio of 1:1 was used as a source of molybdenum for diffusion saturation. The coating was applied to the surface of cylindrical samples made of 20 steel with a diameter of 12 mm and a length of 35 mm. Then they were immersed in a metal container with a carbon powder with a particle size 0.4–0.6 mm. An electric current was passed through this powder for 6 minutes, with a surface current density of 0.53 A/cm<sup>2</sup>. A Neophot-21 microscope, an ARL X'TRA-435 diffractometer, a ZEISS CrossBeam 340 scanning electron microscope with an X-ray microanalyzer, and a NanoEducator scanning probe microscope were used to study the fine structure of steel.

**Results.** After microarc molybdenum saturation of steel samples, a coating with a multilayer structure and a complex phase composition was formed. On the surface of the material, there was a slightly etched layer with a thickness of 50–55 μm, under which there was a carbonized layer with eutectoid structure and a thickness of approximately 200 μm, and the original ferrite-pearlite structure was preserved lower. The base of the slightly etched layer was a dispersed ferrite-carbide mixture containing about 47% wt. % of Mo and having a microhardness of 8–9 GPa. This layer contained carbide inclusions up to 5 μm in size, containing 94 wt. % of Mo and having microhardness up to 21 GPa. The surface relief was characterized by the presence of carbide inclusions of 3–5 μm in size, as well as multiple nanoscale inclusions protruding above the surface to a height of 10 to 150–200 nm.

**Discussion.** The results of the study, obtained using metallographic analysis, scanning electron microscopy, X-ray phase analysis and atomic force microscopy, showed that during microarc molybdenum steel saturation, a diffusion layer was formed containing nanoscale particles of the carbide phase. These particles reached a volume fraction of up to 70% and were located at the base of the layer. This layer was a ferrite-carbide eutectoid mixture. A quantitative assessment of the strengthening effect of these particles confirmed that the presence of such particles, characterized by high microhardness, determines the high hardness of the resulting coating.

**Conclusion.** Microarc molybdenum steel saturation is an effective method for creating coatings with exceptional performance characteristics. These coatings are characterized not only by their high hardness, due to the presence of nanoscale carbide particles located in a ferrite-carbide base, but also by their improved mechanical properties. This makes them promising for use in various industries where high wear resistance and durability of products are required. The research findings indicate that microarc molybdenum steel saturation significantly reduces processing time and avoids the use of expensive equipment, which makes it more affordable for industrial implementation.

**Keywords:** modification of the steel surface, creation of a molybdenum coating, formation of a diffusion layer

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the Editorial board of the journal and the reviewers for their attentive attitude to the article and the comments that improved its quality.

**For citation.** Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Fine Steel Structure after Microarc Molybdenum Steel Saturation. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):250–256. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-250-256>

**Введение.** В условиях современного производства постоянно возрастают требования к надежности и долговечности стальных изделий, особенно тех, которые работают в сложных условиях эксплуатации. Традиционным методом решения данной задачи является формирование на их поверхности диффузионных покрытий, обладающих повышенной твердостью и износостойкостью [1, 2]. Сюда следует отнести покрытия карбидного типа, полученные при диффузионном насыщении стали хромом [3], вольфрамом [4], молибденом и другими карбидообразующими элементами [5]. Существенным недостатком этой технологии является её значительная продолжительность — более 8 часов. Ускорить диффузионное насыщение возможно, если применять высокоэнергетическое воздействия на материал, например, плазменное [6], ионно-плазменное [7], лазерное [8, 9], электроискровое [10], а также нагрев с использованием термоэмиссионных эффектов [11]. Перечисленные технологии эффективны, но требуют сложного и дорогостоящего оборудования. В этой связи неоспоримым преимуществом отличается метод микродугового поверхностного легирования [12], при котором нагрев и диффузионное насыщение стального изделия происходит в металлическом контейнере с угольным порошком. При этом нагрев протекает за счёт микродуг, возникающих в результате пропуска электрического тока в цепи: источник питания – контейнер – угольный порошок – стальное изделие. Ускорение процесса диффузионного насыщения достигается за счет воздействия на материал микродуговых разрядов, возникающих между поверхностью изделия и угольным порошком. Очевидная простота данной технологии в совокупности с низкой энергоемкостью не требуют дополнительных доказательств её преимущества.

Покрытия карбидного типа, содержащие молибден, широко применяются в машиностроении. Молибденирование проводят нагревом в порошках химических соединений на основе молибдена или ферромольбдена, а также в газовой среде галогенидов молибдена, либо в расплавах на основе молибдата натрия. Процесс молибденирования осуществляют при 1000–1200 °С, в течение не менее 6–7 ч. Применение метода микродугового легирования для получения таких покрытий позволит значительно сократить длительность процесса, поэтому изучение свойств покрытий, полученных с использованием микродугового нагрева, является актуальной задачей [13, 14]. Основным фактором, определяющим свойства покрытий такого типа, является наличие в их структуре частиц карбидной фазы. В этом контексте целью настоящей работы стало изучение особенностей тонкой структуры поверхностного слоя стали после микродугового молибденирования.

**Материалы и методы.** Микродуговое молибденирование выполняли в обмазке, из порошка молибдата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$  в электропроводном геле в объемном соотношении 1:1. Обмазку наносили на поверхность образцов из стали диаметром 12 мм и длиной 35 мм, которые погружали в металлический контейнер с угольным порошком дисперсностью 0,4–0,6 мм, и пропускали электрический ток в течение 6 минут в цепи источник – контейнер – угольный порошок – образец. Для достижения требуемой температуры процесса молибденирования, плотность тока на поверхности образцов составляла 0,53 А/см<sup>2</sup>.

После диффузионного насыщения изготавливали поперечный микрошлиф путём его заливки эпоксидной смолой в цилиндрические оправки с помощью которых обеспечивалась строгая перпендикулярность поверхности шлифа его продольной оси. Далее образцы шлифовались на шлифовальных бумагах зернистостью от Р480 до Р2500, и полировались сначала оксидом хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  марки ОХА-0 по ГОСТ 2912–79 и окончательно алмазной пастой марки АМ с зернистостью порошка 3/2 по ГОСТ 25593–83. После удаления остатков пасты этиловым спиртом проводили химическое травление реактивом Ржешотарского (4 %-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте).

Микроструктуру изучали на микроскопе Neophot-21 с цифровой приставкой TourCam Xcam0720P-HDMI. Рентгенофазовый анализ — на дифрактометре ARL X'TRA-435 в Cu-K $\alpha$  излучении. Твердость диффузионного слоя измерялась микротвёрдомером ПМТ-3 при нагрузках 0,490 и 0,196 Н. Содержание молибдена в слое определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEISS CrossBeam 340 с рентгеновским микроанализатором Oxford Instruments X-max 80. Рельеф поперечного шлифа диффузионного слоя изучали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NanoEducator в режиме постоянной силы.

**Результаты исследования.** Металлографическим анализом на поверхности образцов после микродугового молибденирования выявлено слаботравящееся покрытие толщиной 50–55 мкм. Под ним обнаружен науглероженный слой с перлитной структурой толщиной около 200 мкм, далее — исходная структура. Покрытие состоит из дисперсной феррито-карбидной смеси, содержащей карбидные включения размером до 5 мкм. Микротвердость основы слоя составляет 8–9 ГПа, карбидных включений — до 21 ГПа (рис. 1).

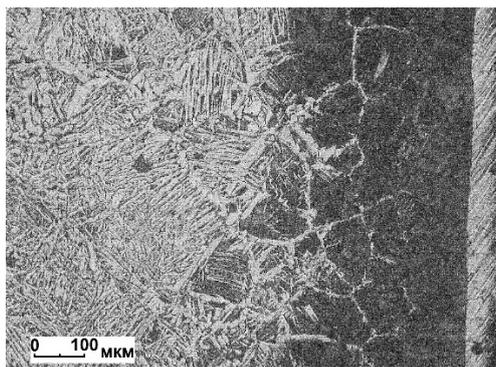


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя стали 20 после микродугового молибденирования

Результаты измерения массовой доли молибдена (рис. 2) представлены в таблице 1. Из полученных данных видно, что содержание молибдена в различных точках покрытия отличается, а само покрытие имеет неоднородный состав.

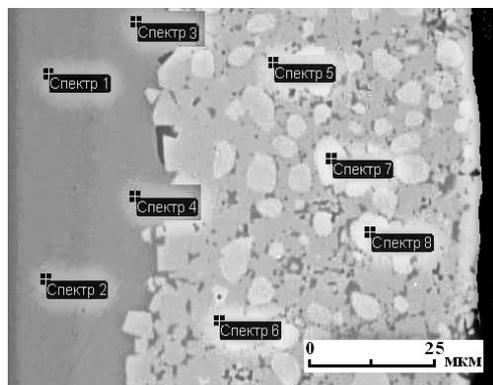


Рис. 2. Структура молибденированного покрытия в отраженных электронах

Таблица 1

Концентрация С диффузанта в отдельных точках покрытия

№	1	2	3	4	5	6	7	8
С, масс. %	—	—	3,1	3,3	46,8	47,0	93,9	94,1

В точках 1 и 2 молибден отсутствует. Далее формируется переходная зона твердого раствора молибдена, содержащая около 3 % Мо. Толщина диффузионного слоя составляет 50–55 мкм. Он состоит из основы (спектры 5, 6) с расположенными в ней округлыми включениями (спектры 7, 8). Как видно из таблицы 1, в основе содержится примерно 47 % Мо, и поэтому она может представлять собой интерметаллид Fe<sub>3</sub>Mo<sub>2</sub> или карбиды (Fe,Mo)<sub>3</sub>C [15, 16]. Во включениях (спектры 7, 8) содержится примерно 94 % Мо, что соответствует карбидной фазе Mo<sub>2</sub>C [16, 17].

Образование таких карбидов в поверхностном слое подтверждено с помощью рентгеновского фазового анализа (рис. 3).

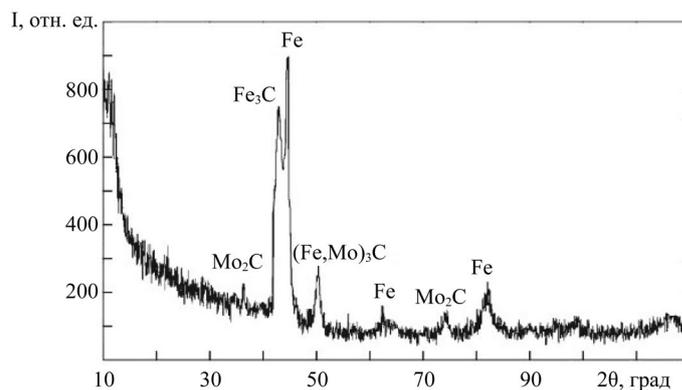
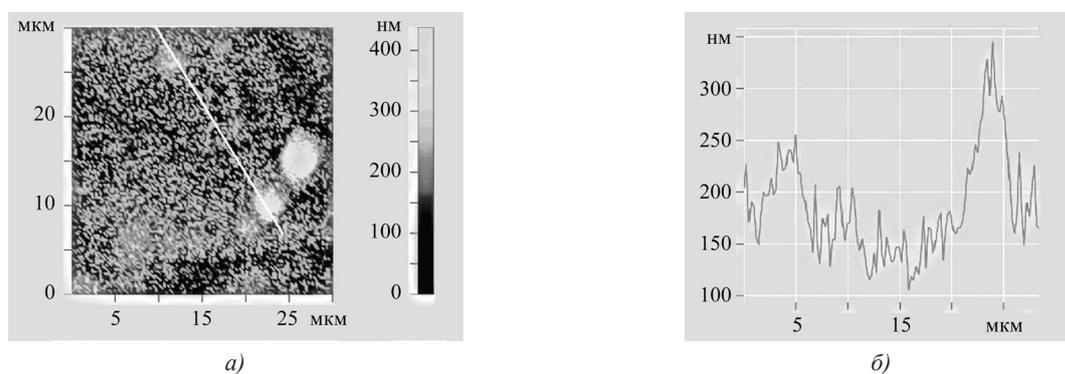
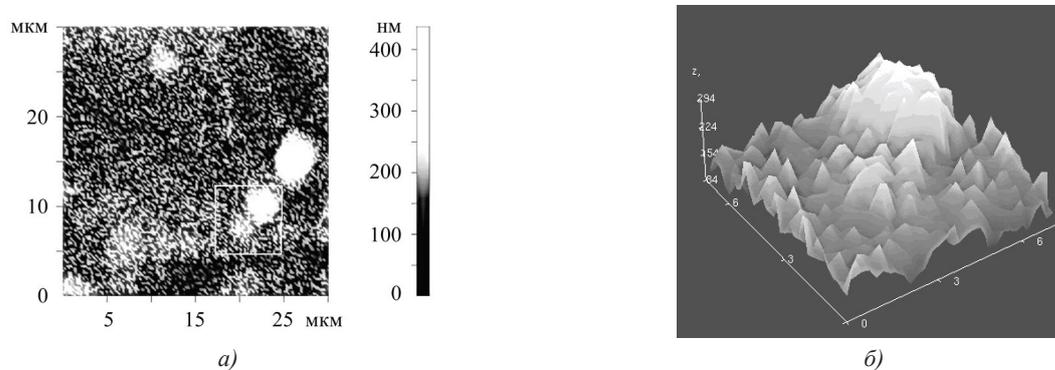


Рис. 3. Дифрактограмма молибденированного покрытия

Высокая микротвердость основы покрытия может объясняться формированием в ней наноразмерных карбидных частиц, что было подтверждено результатами атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 4, 5).


 Рис. 4. Рельеф поверхности образца: *a* — сечение по направлению 1; *б* — профиль, соответствующий данному сечению

 Рис. 5. Изображение поверхности стали, полученное методом АСМ: *a* — 2D-изображение; *б* — 3D-изображение

Таким образом, в структуре покрытия обнаружены карбидные включения размером до 5 мкм, а также множественные наноразмерные включения, которые выступают над плоскостью поверхности образца. Такие включения имеют более высокую твердость по сравнению с остальными структурными составляющими.

Для количественной оценки упрочняющего влияния этих частиц целесообразно использовать правило аддитивности твердости, в соответствии с которым твердость  $H_{AB}$  двухфазного сплава можно представить в виде суммы твердости  $H_A$  и  $H_B$  составляющих фаз  $A$  и  $B$ , взятых в их объемных долях  $V_A$  и  $V_B$ :

$$H_{AB} = H_A \cdot V_A + H_B \cdot V_B. \quad (1)$$

В качестве фазы  $A$  выступает дисперсная феррито-карбидная смесь, как основа диффузионного слоя, в качестве фазы  $B$  — наноразмерные карбидные включения. Для расчета по формуле (1) использовали следующие исходные данные:  $H_A = 3\,000$  МПа,  $H_B = 23$  ГПа, значения  $V_A$  и  $V_B$  определены по методике [18] и приняты равными:  $V_A = 0,73$ ;  $H_B = 0,27$ . Откуда получено:  $H_{AB} = 8\,400$  МПа, что согласуется с результатами измерения интегральной микротвердости диффузионного слоя.

**Обсуждение.** Полученные данные подтвердили возможность ускоренного получения высокотвердого молибденового покрытия на стали с использованием метода микродугового поверхностного легирования. При общей толщине покрытия 50–55 мкм оно имеет сложное строение по глубине и состоит дисперсной ферритокарбидной смеси микротвердостью 8–9 ГПа, с включениями относительно крупных частиц карбидной фазы размером до 5 мкм (микротвердо-

стью до 21 ГПа), и множественных наноразмерных включений. Далее следует науглероженный слой с перлитной структурой толщиной около 200 мкм, переходящий в исходную структуру стали 20. Расчетная оценка упрочняющего влияния таких наноразмерных включений подтвердила, что их наличие обуславливает высокую микротвердость основы покрытия. Следует отметить, что полученное значение микротвердости основы покрытия превышает ее значение, которое достигается при применении традиционных методов молибденирования. Можно предположить, что образование наноразмерных включений карбидной фазы при микродуговом молибденировании происходит под воздействием многочисленных микродуговых разрядов, возникающих между поверхностью стали и прилегающим угольным порошком в процессе протекания электрического тока. Однако физические процессы, происходящие при таком воздействии, требуют отдельного рассмотрения и могут быть одним из направлений для будущих исследований.

**Заключение.** Микродуговое поверхностное легирование может быть использовано для получения высокотвердых покрытий на стали методом молибденирования. Исследование тонкой структуры покрытия показало, что оно имеет сложный фазовый состав: дисперсную ферритно-карбидную смесь с многочисленными мелкими и наноразмерными карбидными включениями, что придаёт покрытию высокую микротвердость. Под ним расположен науглероженный слой с перлитной структурой, а далее — исходная структура стали. Полученные результаты могут быть полезны при разработке технологий поверхностного упрочнения стальных изделий, таких как инструменты и детали машин, работающих в сложных условиях.

### Список литературы / References

1. Mittemeijer EJ, Somers MAJ (eds.). *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Woodhead Publishing; 2015. 827 p.
2. Wang RJ, Qian YY, Liu J. Structural and Interfacial Analysis of WC92–Co8 Coating Deposited on Titanium Alloy by Electrospark Deposition. *Applied Surface Science*. 2024;228(1–4):405–409. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.043>
3. Guryev MA, Guryev AM, Ivanov SG, Chernykh EV. Influence of the Chemical Composition of Steel on the Structure and Properties of Diffusion Coatings Obtained by Simultaneous Saturation of Structural Steels with Boron, Chromium, and Titanium. *Physics of the Solid State*. 2023;65(1):62–65. <https://doi.org/10.1134/S1063783423700014>
4. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Создание покрытий карбидного типа при микродуговом термодиффузионном вольфрамирании стали. *Материаловедение*. 2018;(1):20–25.
5. Stepanov MS, Dombrovskiy YuM. Deposition of Carbide-Type Coatings during Micro-Arc Thermomdiffusion Tungstening of Steel. *Materialovedenie*. 2018;(1):20–25. (In Russ.)
6. Yu-Hsien Liao, Fan-Bean Wu. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Refractory Molybdenum-Tungsten Nitride Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2024;476:130154. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130154>
7. Калита В.И., Комлев Д.И., Радюк А.А., Михайлова А.Б., Демин К.Ю., Румянцев Б.А. Исследование структуры и микротвердости плазменного покрытия из аустенитной стали после фрикционной обработки. *Металлы*. 2024;(3):32–42.
8. Kalita VI, Komlev DI, Radyuk AA, Mikhailova AB, Demin KYu, Rumyantsev BA. Investigation of the Structure and Microhardness of Plasma Coatings Made of Austenitic Steel after Friction Treatment. *Metally*. 2024;(3):32–42. (In Russ.)
9. Кудряков О.В., Варавка Н.В., Забияка И.Ю., Ядрец Э.А., Караваяев П.В. Морфология и генеалогия структурных дефектов в вакуумных ионно-плазменных покрытиях. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(3):269–279. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279>
10. Kudryakov OV, Varavka VN, Zabiyaika IYu, Yadrets EA, Karavaev VP. Morphology and Genealogy of Structural Defects in Vacuum Ion-Plasma Coatings. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(3):269–279 <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279>
11. Шабурова Н.А., Пашкеев К.Ю., Мясоедов В.А. Сравнительный анализ структуры и свойств хромокобальтового покрытия, полученного диффузионным насыщением и лазерной наплавкой. *Материаловедение*. 2024;(6):12–20. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2024-0-6-12-20>
12. Shaburova NA, Pashkeev KYu, Myasoedov VA. Comparative Analysis of Structure and Properties of Chromocobalt Coating Applied by Diffusion Saturation and Laser Surfacing. *Materialovedenie*. 2024;(6):12–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2024-0-6-12-20>
13. Liexin Wu, Li Meng, Yueyue Wang, Shuhuan Zhang, Wuxia Bai, Taoyuan Ouyang, et al. Effects of Laser Surface Modification on the Adhesion Strength and Fracture Mechanism of Electroless-Plated Coatings. *Surface And Coatings Technology*. 2022;429:127927. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127927>
14. Химухин С.Н., Еремина К.П., Хе В.К. Структура комбинированных интерметаллидных покрытий электроискровых покрытий на стали 45. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024;(11):20–27. <https://doi.org/10.30906/mitom.2024.11.20-27>
15. Khimukhin SN, Eremina KP, Khe VK. Structure of Combined Intermetallide Electrospark Coatings on Steel 45. *Metallavedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2024;(11):20–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/mitom.2024.11.20-27>
16. Shaburova NA. Chromium Plating of Steel Parts Using the Thermoemission Field. *Materials Physics and Mechanics*. 2024;52(3):154–160. [https://doi.org/10.18149/MPM.5232024\\_14](https://doi.org/10.18149/MPM.5232024_14)
17. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Пустовойт В.Н. Микродуговое диффузионное насыщение стали углеродом и карбидообразующими элементами. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017;(5(743)):45–49.

Stepanov MS, Dombrovskii YuM, Pustovoit VN. Microarc Diffusion Saturation of Steel with Carbon and Carbide-Forming Elements. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* 2017;(5(743)):45–49. (In Russ.)

13. Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Thermodynamic Analysis of Carbide Layer Formation in Steel with Microarc Saturation by Molybdenum. *Steel in Translation*. 2016;46(2):79–82. <https://doi.org/10.3103/S0967091216020169>

14. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Микродуговое молибденирование стали с использованием молибдата аммония. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):47–53. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-47-53>

Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Microarc Molybdenum Steel Saturation Using Ammonium Molybdate. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):47–53. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-47-53>

15. Калинин Б.А., Платонов П.А., Тузов Ю.В., Чернов И.И., Штромбах Я.И. Конструкционные материалы ядерной техники. В кн: *Физическое материаловедение*, т. 6. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; 2021. 736 с.

Kalin BA, Platonov PA, Tuzov YuV, Chernov II, Strombakh YaI. Structural Materials of Nuclear Engineering. In: *Physical Materials Science*, vol. 6. Moscow: National Research Nuclear University MEPHI; 2021. 736 p. (In Russ.)

16. Kobernik NV, Pankratov AS, Mikheev RS, Orlik AG, Sorokin SP, Petrova VV, et al. Application of Chromium Carbides in Surfacing Materials Intended for Obtaining of Abrasion Resistant Coatings. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;(9):64–68. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-9-64-68>

17. Алешин Н.П., Коберник Н.В., Панкратов А.С., Петрова В.В. Термодинамическое моделирование образования карбидов хрома в наплавленном металле. *Вестник машиностроения*. 2020;(7):67–71. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-7-67-71>

Aleshin NP, Kobernik NV, Pankratov AS, Petrova VV. Thermodynamic Modeling of the Formation of Chromium Carbides in the Surfaced Metal. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;(7):67–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-7-67-71>

18. Волков Н.В., Скрытний В.И., Филиппов В.П., Яльцев В.Н. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов. В кн: *Физическое материаловедение*, т. 3. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; 2021. 800 с.

Volkov NV, Skrytny VI, Filippov VP, Yaltsev VN. Methods for Studying the Structural and Phase State of Materials. In: *Physical Materials Science*, vol. 3. Moscow: National Research Nuclear University MEPHI; 2021. 800 p. (In Russ.)

#### **Об авторах:**

**Макар Степанович Степанов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [stepanovms@yandex.ru](mailto:stepanovms@yandex.ru)

**Юрий Маркович Домбровский**, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [yurimd@mail.ru](mailto:yurimd@mail.ru)

#### **Заявленный вклад авторов:**

**М.С. Степанов:** разработка концепции, создание и подготовка рукописи, визуализация результатов исследования и полученных данных.

**Ю.М. Домбровский:** осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи**

#### **About the Authors:**

**Makar S. Stepanov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Quality Management, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [stepanovms@yandex.ru](mailto:stepanovms@yandex.ru)

**Yurii M. Dombrovskii**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [yurimd@mail.ru](mailto:yurimd@mail.ru)

#### **Claimed Contributorship:**

**MS Stepanov:** conceptualization, writing – original draft preparation, visualization.

**YuM Dombrovskii:** investigation, experiments.

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 03.06.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 30.06.2025

**Принята к публикации / Accepted** 06.07.2025