

УДК 66.099.6, 535.8

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-869-874

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЧЕРНЕНИЯ МОЛИБДЕНА

Ю.В. Федосов, А.С. Шубин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: shubin.as@bk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.06.19, принята к печати 15.07.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Федосов Ю.В., Шубин А.С. Усовершенствование технологии чернения молибдена // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 869–874. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-869-874

Аннотация

Предмет исследования. В работе исследованы различные методы получения покрытий на молибдене и жаропрочных материалах. Предложен способ усовершенствования технологии чернения молибдена. Рассмотрены способы получения черных светопоглощающих покрытий. **Метод.** Первый метод подразумевает выдержку образца в дистиллированной воде в течение некоторого времени после предварительной обработки, а второй — ее отсутствие. В ходе эксперимента взятые образцы подвергались трехступенчатой обработке, включающей травление в водном растворе, содержащем HCl и HF в течении десяти минут. После этого образцы погружались в емкость с раствором молибдата аммония, в которой проводилось нанесение покрытия электрохимическим способом. **Основные результаты.** Полученное в ходе эксперимента черное покрытие имеет достаточно большую стойкость: смывается только концентрированной кислотой (например, азотной), устойчиво к действию щелочи, а также с трудом удаляется при крацевании. На первом образце покрытие не является долговечным и со временем отслаивается от поверхности образца. При использовании усовершенствованной технологии с течением времени на покрытии также образовывались трещины, но само покрытие от поверхности образца не отслаивалось. Образцы хранились в нормальных условиях. Исследование деградации полученных покрытий на образцах проводилось с помощью электронного микроскопа Inspect SEM FEI. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть применены при создании новых образцов оптической аппаратуры, в частности, для нанесения светопоглощающего покрытия на молибденовые детали. Также работа может служить основой для дальнейшего усовершенствования технологии чернения молибдена.

Ключевые слова

молибден, технология, чернение, светопоглощающее покрытие, оптические детали

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-869-874

IMPROVEMENT OF MOLYBDENUM BLACKENING TECHNOLOGY

Yu.V. Fedosov, A.S. Shubin

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: shubin.as@bk.ru

Article info

Received 03.06.19, accepted 15.07.19
 Article in Russian

For citation: Fedosov Yu. V., Shubin An. S. Improvement of molybdenum blackening technology. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 869–874 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-869-874

Abstract

Subject of Research. The paper considers various methods for coating synthesis on molybdenum and heatproof materials. We propose the method of molybdenum blackening technology improvement. **Method.** The first method involves holding the sample in deionized water for some time after pretreatment, and the second one is characterized by its absence. During the experiment, the samples were taken three-stage treatment comprising etching in an aqueous solution containing HF and HCl for ten minutes. After that, the samples were immersed in a container with an ammonium molybdate solution, where the deposition of coating was carried out by electrochemical method. **Main Results.** The studied black coating is high resistant, in particular, it can be washed out only using the strong acid (for instance, the nitric acid) and can not be eliminated with alkali solution as well as wire brushing. But the first sample coating is short-lived and it comes off the sample surface in course of time. During the second experiment with the modified technology the applied coating becomes cracked eventually, but it does not break away from the surface. The coated samples were stored at normal temperature and pressure. The study of coated samples deterioration was carried out by Inspect SEM FEI scanning electronic microscope. **Practical Relevance.** The study results can be used for design

of optical equipment new samples, in particular, for applying light-absorbing coating on molybdenum parts. The following black molybdenum coating technology improvement can be based on this work as well.

Keywords

molybdenum, technology, blackening, light absorbing coating, optical parts

Введение

В современном мире тугоплавкие металлы играют большую роль во многих отраслях промышленности и в повседневной жизни. Такие металлы имеют температуру плавления от 1850 °С. Такой характеристикой, в частности, обладают такие металлы, как ниобий, рений, молибден, тантал, вольфрам и т. д. [1]. Их применяют при изготовлении ламп накаливания, электронных ламп [2], мобильных телефонов, лазерных станков [3], компьютеров или ядерных реакторов. Их также используют в качестве легирующих элементов в сплавах с другими металлами для улучшения комплекса эксплуатационных или технологических свойств.

Отметим, что в производстве применение находят металлы в чистом виде, например, молибден [4] и его сплавы, которые наряду с прочими металлами вольфрамовой группы используются наиболее часто в радиоэлектронной промышленности, химическом машиностроении для изготовления различных испарителей в вакуумной технике [5] или при производстве инфракрасных лазеров. При этом для применения молибденовых зеркал в инфракрасных лазерах может потребоваться наличие на их частях светопоглощающих покрытий, способы нанесения которых на молибден на сегодняшний день изучены недостаточно. Таким образом, целью данной работы стало усовершенствование технологии чернения молибдена. В процессе работы над статьей было изучено несколько экспериментов по нанесению различных покрытий на молибден.

Обзор существующих методов нанесения покрытий на молибден

В работе [6] описан метод контактной цементации для изготовления карбидных покрытий на молибдене. Суть данного метода заключается в том, что тугоплавкий металл подвергается горячему прессованию «углеродной губкой» (такой, например, как чугуны или высокоуглеродистая сталь), которая содержит промежуточные атомы углерода. При этом в данной статье описаны два эксперимента, в ходе которых молибден подвергался горячему прессованию с чугуном: либо при 1100 °С (что способствовало появлению на поверхности молибдена двух слоев вида «Fe–Mo–C» и «Mo–C»), либо при 900 °С (оптимальный вариант, при котором образуется только один слой «Mo–C»). При горячем прессовании по определенному методу и выдерживанию в течение 10 ч покрытие получается керамическим с толщиной в 1,8 мкм. Вместо чугуна можно использовать и другие материалы, например, углеродистую сталь. Однако данный метод был применен только на текстурированном молибдене, но не были рассмотрены варианты его применения на готовых деталях (например, оптических). В случае, если имеется оптическая деталь, нанесение такого покрытия может быть затруднено, поскольку при обжиге, а тем более при прессовании структура и форма детали могут быть изменены. Кроме того, остается неясным вопрос о том, возможно ли применение описанного метода для различных сплавов молибдена, не уточнен температурный режим обработки, длительность выдержки в печи и прессования. Также неизвестно, будет ли описанное покрытие изменять свои свойства в дальнейшем. Покрытия, полученные с использованием «углеродной губки» и технология их нанесения требуют дополнительных исследований.

В работе [7] был рассмотрен процесс нанесения на молибден многофазного керамического покрытия «Mo–Si–B» плазменно-дуговым способом [8]. Данное покрытие наносилось с целью повышения стойкости поверхности молибдена к окислению. Этот эксперимент продемонстрировал значительное улучшение стойкости к окислению покрытия «Mo–Si–B» при 1300 °С в атмосфере. Однако указанные пропорции порошков покрытия «Mo–Si–B» использовались только для конкретного образца (пластины молибдена с чистотой 99,9 % и размерами 120×45×15 мм), которые были предварительно подвергнуты ультразвуковой очистке в этиловом спирте в течение 10 мин с последующей обработкой при 400 °С в течение 30 мин. Таким образом, данный эксперимент не дает четкого понятия о том, какие пропорции порошков требуются для изготовления покрытия на деталях больших размеров, как поведет себя готовая деталь, состоящая из молибденового сплава, при обработке при большей температуре и т. п. Также дуговой метод был рассмотрен и проведен только с использованием определенного оборудования и определенной оснастки, и остается неясным, можно ли применять данный метод с использованием иного оборудования. Кроме того, поскольку испытания на циклическое окисление были произведены только одним методом (в трубчатой печи при 1300 °С в течение 30 ч, периодически образец извлекали, охлаждали до комнатной температуры, измеряли изменение массы, а затем помещали обратно в печь), данный эксперимент не дает однозначного понятия, как именно покрытие поведет себя при ином методе окисления.

Работа [9] описывает изготовление многослойного композитного антиокислительного покрытия «CrSi₂/MoSi₂/SiC–Mo₂C» на поверхности молибдена методом трехступенчатой цементации. При таком способе нанесения образуется два слоя покрытия: внешний (состоящий из CrSi₂, MoSi₂ и SiC) и переходный (состоящий из Mo₂C, который соединяет внешний слой и поверхность молибдена). Испытания образцов на

изотермическое окисление проводили в муфельной печи при 500 и 1600 °С. Однако технология нанесения данного покрытия также рассмотрена только для образца молибдена, имеющего определенные размеры, который был предварительно очищен ультразвуком с помощью этанола и сушки при 110 °С в течение 2 ч. В статье не указано, можно ли использовать данный метод по отношению к деталям больших размеров, состоящих из сплавов на основе молибдена или, например, оптических деталей. Также не приведена формула для определения пропорций порошков для нанесения покрытия на детали и не указано, возможно ли использовать данный метод нанесения покрытия на поверхности образцов, обработанных способом, отличным от указанного в статье.

Дальнейшее исследование различного рода покрытий и способов их нанесения было направлено на изучение именно светопоглощающих покрытий. В частности, были изучены способы чернения таких химически стойких материалов, как нержавеющей стали, имеющей малое количество легирующих добавок [10], и нержавеющей стали, в состав которой входили значительные количества хрома или никеля [11, 12]. Однако такие способы чернения неприменимы в отношении молибдена.

Для более глубокого понимания таких методов авторами был рассмотрен японский патент, описанный в справочном руководстве по гальванотехнике, который предлагает следующий способ окрашивания хромоникелевой стали в черный цвет. После обычной подготовки детали оксидируют в 50 %-ном растворе NaOH, содержащем 20–30 г/л NiCl_2 и 30–55 г/л Na_2S , при температуре 130 °С в течение 2–5 мин. Затем детали сушат и протирают. Пленка получается прочная, красивого черного цвета. При концентрации щелочи ниже 45 % температура раствора снижается и качество пленок ухудшается. Однако данный метод также требует дополнительного изучения, так как в патенте не раскрывается, какие именно были использованы детали, каких размеров, какой формы и т.д. Кроме того, остается неясным, как повлияет на качество пленки повышение концентрации раствора и повышение температуры во время выдержки.

Описание предлагаемого метода и результаты исследований

В работе [13] был описан метод нанесения черных покрытий на медь с использованием парамолибдата аммония. Отличительной особенностью такого покрытия является максимальный коэффициент поглощения светового излучения и возможность наносить его на готовые детали, например, оптические. Суть данного метода заключается в том, что образец, предварительно прошедший обработку, выдерживают в растворе молибдата аммония.

Однако молибден – химически очень стойкий материал, имеющий весьма низкую реакционную способность (см. работу [14], где было рассмотрено взаимодействие молибдена с разными химическими элементами). В ходе экспериментов использовались молибденовые образцы, представляющие собой пластины размерами 60×10×1 мм (химический состав образцов, исследованный с помощью электронного микроскопа указан в таблице), которые предварительно прошли обработку, состоящую из следующих последовательных шагов: предварительной механической зачистки, промывки спиртом и промывки дистиллированной водой. Далее было выполнено травление образца в водном растворе, содержащем 2,5 % HCl и 2,5 % HF в течение 10 мин. После этого образец погружался в емкость с дистиллированной водой, в которой он выдерживался в течение 4 ч. Затем образец перемещался в ванну с раствором молибдата аммония (рис. 1), где на него электрохимическим способом наносилось покрытие [15] в течение 10 минут. Концентрация раствора составляла 8 моль/л. При этом образец выступал в качестве катода, а анодом служила платиновая проволока площадью 204 мм², разность потенциалов составляла 7–10,5 В при силе тока в пределах 800 мА/л. Одновременно выполнялся контроль pH раствора и его поддержание на уровне 4,5.

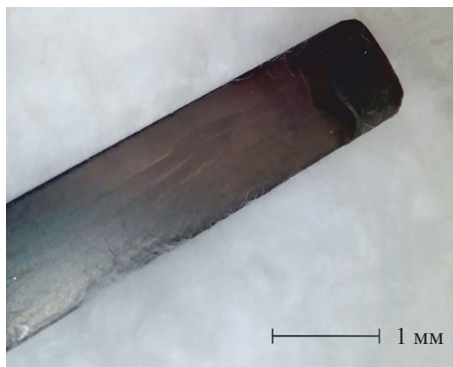


Рис. 1. Фотография второго образца сразу после нанесения на него покрытия

После нанесения покрытия образец высушивали 15 мин в сушильном шкафу 2В-151 и проводили исследование полученного покрытия с использованием сканирующего электронного микроскопа Inspec SEM FEI.

Таблица. Химический состав образцов

Элементы	Содержание частиц на миллион	Погрешность, %
Mo	99,10000	0,06000
Al	0,18500	0,00900
Rh	0,17500	0,01700
Na	0,14300	0,01900
K	0,12200	0,00600
Sn	0,06030	0,00610
Ca	0,05440	0,00270
Ag	0,04350	0,00670
Pr	0,02300	0,00670
I	0,01610	0,00680
Zn	0,01610	0,00200
W	0,01310	0,00470
Mn	0,01240	0,00140
Fe	0,01000	0,00170
Cu	0,01000	0,00190
Er	0,00910	0,00330
Co	0,00570	0,00120

В результате получилось черное покрытие, имеющее достаточно большую стойкость, в частности, смывающееся только концентрированной кислотой (например, азотной), устойчивое к действию щелочи, а также с трудом удаляющееся при крацевании. Однако это покрытие не является долговечным и со временем отслаивается от поверхности образца (рис. 2). Фотографирование процесса деградации покрытия происходило спустя 2 недели после нанесения.

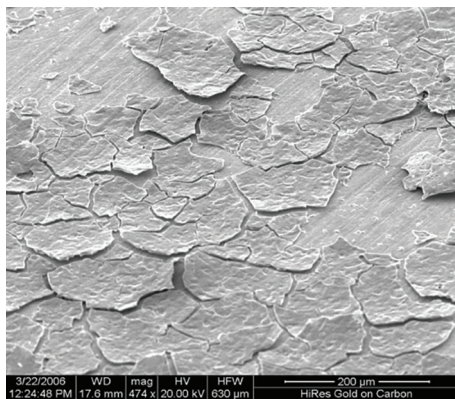


Рис. 2. Фотография поверхности первого образца после деградации покрытия

После анализа проведенного эксперимента было принято решение изменить технологию нанесения покрытия и провести второй эксперимент. Для этого был взят аналогичный образец молибдена, который прошел предварительную обработку и травление так же, как и первый образец. Далее этот образец был помещен в емкость с раствором молибдата аммония (концентрация раствора оставалась прежней) для промывки в течение 2 мин, причем контроль значения водородного показателя производился в процессе промывки. После промывки образец перемещали во вторую емкость с точно таким же раствором молибдата аммония, время выдержки в которой составляло 2 мин, а затем перемещали его в третью емкость, где и происходило нанесение покрытия электрохимическим путем в течение 10 мин так же, как это было описано ранее (рис. 1). Далее, как и в первый раз, образец высушивали и осуществляли фотографирование его поверхности после деградации покрытия (рис. 3). Стоит отметить, что деградация покрытия и в первом, и во втором экспериментах происходила без механических воздействий при нормальных условиях без засвечивания образца. При этом из сравнения рис. 2 и 3 видно, что после второго эксперимента с течением времени на покрытии также образовывались трещины, но само покрытие при этом не отставало от поверхности образца в отличие от покрытия, нанесенного в ходе первого эксперимента.

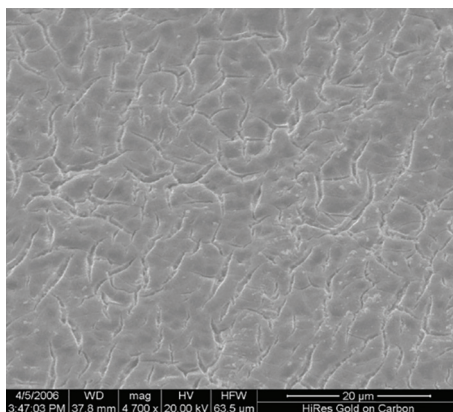


Рис. 3. Фотография поверхности второго образца после деградации покрытия

Стоит отметить, что все ранее разработанные методы получения черных покрытий на тугоплавких металлах не подходят для применения на молибденовых деталях, в том числе оптических, или деталях, требующих аккуратного обращения. Иначе говоря, разработанный авторами метод с применением электрохимического метода и раствора молибдата аммония оказался наиболее подходящим для оптических деталей и позволил получать достаточно стойкие черные покрытия.

Заключение

В рассматриваемой работе были изучены различные методы получения покрытий на молибдене и жаропрочных материалах, а также усовершенствование технологии чернения молибдена. В частности, рассмотрены способы получения черных светопоглощающих покрытий. В ходе исследования был проведен эксперимент по нанесению черного светопоглощающего покрытия на молибден двумя методами, один из которых имеет промежуточную стадию выдержки образца в дистиллированной воде, а второй предполагает ее отсутствие. В первом методе контроль параметров нанесения покрытия осуществлялся во время его нанесения, а в ходе второго — до нанесения покрытия. При нанесении покрытия образцы подвергались трехступенчатой обработке, включающей травление в водном растворе, содержащем HCl и HF в течение 10 мин, а затем образцы погружались в ванну с раствором молибдата аммония, после чего происходило нанесение покрытия электрохимическим способом. После нанесения покрытия образцы выдерживались в течение двух недель при нормальных условиях, после чего полученное покрытие исследовалось при помощи сканирующего электронного микроскопа. При этом полученное черное покрытие имеет достаточно большую стойкость — в частности, смывается только концентрированной кислотой (например, азотной), устойчиво к действию щелочи, а также с трудом удаляется при крацевании. Однако на первом образце это покрытие долговечным не являлось и со временем отслаивалось от поверхности образца. По результатам первого эксперимента был сделан вывод об исключении из технологии промежуточного этапа — выдержки образца после травления в дистиллированной воде, после чего был проведен второй эксперимент по нанесению покрытия. Исследования показали, что с течением времени на покрытии также образовывались трещины, но само покрытие при этом не отслаивалось от поверхности образца.

Подводя итог, стоит отметить, что все ранее разработанные методы получения черных покрытий на тугоплавких металлах не подходят для применения на молибденовых деталях, в том числе оптических, или деталях, требующих аккуратного обращения. Иначе говоря, разработанный нами метод с применением электрохимического метода и раствора молибдата аммония оказался наиболее подходящим для оптических деталей и позволил получать достаточно стойкие черные покрытия. Результаты работы могут быть применены при создании новых образцов оптической аппаратуры, в частности, для нанесения светопоглощающего покрытия на молибденовые детали. Также работа может служить основой для дальнейшего совершенствования технологии чернения молибдена.

Литература

1. Тугоплавкие материалы в машиностроении: Справочник / Под ред. заслуж. деят. науки и техники РСФСР д-ра техн. наук А.Т. Туманова и д-ра техн. наук К.И. Портного. М.: Машиностроение, 1967. 392 с.
2. Гендин Г.С. Всё о радиолампах. М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 296 с. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1258).
3. Роль зеркал в работе лазерных станков [Электронный ресурс]. URL: <https://daloto.ru/poleznye-materialy/rol-zerkal-v->

References

1. *Refractory materials in mechanical engineering*. Handbook / Ed. by A.T. Tumanov, K.I. Portnoi. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967, 392 p. (in Russian)
2. Gendin G.S. *All about radio tubes*. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2002, 296 p. (in Russian)
3. *The role of mirrors in the operation of laser machines. Design documentation*. Available at: <https://daloto.ru/poleznye-materialy/rol-zerkal-v-rabote-lazernogo-co2-stanka> (accessed: 04.05.2019). (in Russian)

- rabote-lazernogo-co2-stanka, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 04.05.2019).
- Molybdenum [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sharrettsplating.com/base-materials/molybdenum>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 02.05.2019).
 - Иванов В.И. Вакуумная техника. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 129 с.
 - Zhao Z., Hui P., Wang T., Xu Y., Zhong L., Zhao M., Yang D., Wei R. Fabrication of Mo₂C coating on molybdenum by contact solid carburization [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433218322190>. Яз. англ. (дата обращения: 03.04.2019). doi: 10.1016/j.apsusc.2018.08.083
 - Deng X., Zhang G., Wang T., Ren S., Shi Y., Bai Z., Cao Q. Microstructure and oxidation resistance of a multiphase Mo-Si-B ceramic coating on Mo substrates deposited by a plasma transferred arc process [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218326476>. Яз. англ. (дата обращения: 03.04.2019). doi: 10.1016/j.ceramint.2018.09.182
 - Плазменно-дуговой метод [Электронный ресурс]. URL: https://www.autowelding.ru/publ/professionalno_o_pajke/napylenie_pokrytij/plazmenno_dugovoj_metod_naneseniya_pokrytij/30-1-0-429, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 04.05.2019).
 - Jiang Y., Gong Q., Cai Z., Shao Y., Zhuang D., Liang J. Fabrication of CrSi₂/MoSi₂/SiC–Mo₂C gradient composite coating on Mo substrate and the stabilizing effect of Cr on the coating's anti-oxidation properties [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897215303133>. Яз. англ. (дата обращения: 03.04.2019). doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.10.015
 - Blackening stainless steel. Developments [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002605760280767X?via%3Dihub>. Яз. англ. (дата обращения: 03.05.2019). doi: 10.1016/S0026-0576(02)80767-X
 - Takadom J. Black coatings: a review [Электронный ресурс]. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00646463/document>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 03.05.2019).
 - Reghuraj A.R., Saju K.K. Black oxide conversion coating on metals: A review of coating techniques and adaptation for SAE 420A surgical grade stainless steel [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/320657156_Black_oxide_conversion_coating_on_metals_A_review_of_coating_techniques_and_adaptation_for_SAE_420A_surgical_grade_stainless_steel, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 11.05.2019). doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.219
 - González F., Barrera C.E., Rosas R.C. Photothermal selective coatings of black molybdenum // Revista Mexicana de Ingeniería Química. 2010. V. 9. N 1. P. 79–83.
 - Shabalin I.L. Molybdenum [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/267331380_Molybdenum, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 03.05.2019). doi: 10.1007/978-94-007-7587-9_7
 - Якшин Е.Э., Федосов Ю.В. Некоторые способы химического чернения молибдена // Сборник трудов IV Всероссийского конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 7-10 апреля 2015 г.). 2015. С. 425–429.
 - Molybdenum*. Available at: <https://www.sharrettsplating.com/base-materials/molybdenum> (accessed: 02.05.2019).
 - Ivanov V.I. *Vacuum engineering*. St. Petersburg, ITMO University, 2016, 129 p. (in Russian)
 - Zhao Z., Hui P., Wang T., Xu Y., Zhong L., Zhao M., Yang D., Wei R. *Fabrication of Mo₂C coating on molybdenum by contact solid carburization*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433218322190> (accessed: 03.04.2019). doi: 10.1016/j.apsusc.2018.08.083
 - Deng X., Zhang G., Wang T., Ren S., Shi Y., Bai Z., Cao Q. *Microstructure and oxidation resistance of a multiphase Mo-Si-B ceramic coating on Mo substrates deposited by a plasma transferred arc process*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218326476> (accessed: 03.04.2019). doi: 10.1016/j.ceramint.2018.09.182
 - Plasma-arc method*. Available at: https://www.autowelding.ru/publ/professionalno_o_pajke/napylenie_pokrytij/plazmenno_dugovoj_metod_naneseniya_pokrytij/30-1-0-429 (accessed: 04.05.2019). (in Russian)
 - Jiang Y., Gong Q., Cai Z., Shao Y., Zhuang D., Liang J. *Fabrication of CrSi₂/MoSi₂/SiC–Mo₂C gradient composite coating on Mo substrate and the stabilizing effect of Cr on the coating's anti-oxidation properties*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897215303133> (accessed: 03.04.2019). doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.10.015
 - Blackening stainless steel. Developments*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002605760280767X?via%3Dihub> (accessed: 03.05.2019). doi: 10.1016/S0026-0576(02)80767-X
 - Takadom J. *Black coatings: a review*. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00646463/document> (accessed: 03.05.2019).
 - Reghuraj A.R., Saju K.K. *Black oxide conversion coating on metals: A review of coating techniques and adaptation for SAE 420A surgical grade stainless steel*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/320657156_Black_oxide_conversion_coating_on_metals_A_review_of_coating_techniques_and_adaptation_for_SAE_420A_surgical_grade_stainless_steel (accessed: 11.05.2019). doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.219
 - González F., Barrera C.E., Rosas R.C. Photothermal selective coatings of black molybdenum. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2010, vol. 9, no. 1, pp. 79–83.
 - Shabalin I.L. *Molybdenum*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267331380_Molybdenum. (accessed: 03.05.2019). doi: 10.1007/978-94-007-7587-9_7
 - Yakshin E.E., Fedosov Yu.V. Some methods of chemical blackening of molybdenum. *Proc. of the IV All-Russian Congress of Young Scientists (St. Petersburg, 07-10.04.2015)*, 2015, pp. 425–429. (in Russian)

Авторы

Федосов Юрий Валерьевич — кандидат технических наук, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57194080548, ORCID ID: 0000-0003-1869-0081, Yf01@yandex.ru

Шубин Антон Сергеевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-5518-1177, shubin.as@bk.ru

Authors

Yury V. Fedosov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57194080548, ORCID ID: 0000-0003-1869-0081, Yf01@yandex.ru

Anton S. Shubin — student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-5518-1177, shubin.as@bk.ru