

УДК: 621.892.83

Влияние модифицированного графена на триботехнические характеристики электролитических никель-молибденовых покрытий

А.Я. Григорьев¹, Д.М. Гуцев¹, В.Г. Кудрицкий¹, Х.В. Тран², Т.В. Нгуен², Т.В. Фам²,
Ф.Д. Дон², Ф.А. Григорьев¹, Н.К. Мышкин¹

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»,
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь

²Институт материаловедения Вьетнамской академии наук и технологий,
ул. Хоанг Куок Вьет, 18, г. Ханой, Вьетнам

Поступила в редакцию 31.03.2025.

После доработки 15.04.2025.

Принята к публикации 21.04.2025.

Исследовано влияние соосажденного модифицированного группой COOH графена (GrO) на триботехнические характеристики электролитических никель-молибденовых покрытий. Покрытия формировались на поверхности шлифованной высокоуглеродистой стали методом электроосаждения из водного электролита на основе сульфата никеля (NiSO₄) и молибдата натрия (Na₂MoO₄) с дисперсным GrO. Покрытия получали при плотности тока 2,5 А/дм² и концентрациях GrO от 0,05 до 0,2 г/л. Триботехнические испытания показали, что введение GrO в концентрации 0,1 г/л способствует формированию покрытия с равномерной структурой, обеспечивающей минимальный коэффициент трения (0,38—0,45) и ширину дорожки трения (25—110 мкм) при нагрузке 0,25—1,0 Н. Выявлена зависимость триботехнических характеристик от концентрации частиц графена в рабочем растворе: при 0,1 г/л достигается равномерное распределение частиц GrO, что приводит к снижению коэффициента трения на 30—40 % и уменьшению ширины дорожки трения на 40—55 % по сравнению с базовым Ni—Mo покрытием. При увеличении концентрации частиц выше 0,1 г/л наблюдается рост шероховатости покрытий, что очевидно вызвано агломерацией и избыточным включением частиц наполнителя в структуру покрытия, что в совокупности приводит к формированию более грубой и неоднородной поверхности и ухудшающий его триботехнические свойства. Полученные результаты подтверждают перспективность использования GrO в составе электролитических Ni—Mo покрытий для снижения трения и увеличения износостойкости.

Ключевые слова: никель-молибденовые покрытия, электроосаждение, нанонаполнители, оксид графена, трение, износостойкость.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-2-199-206

Адрес для переписки:

Д.М. Гуцев

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»,
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь
e-mail: gucevd@mail.ru

Для цитирования:

А.Я. Григорьев, Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий, Х.В. Тран, Т.В. Нгуен,
Т.В. Фам, Ф.Д. Дон, Ф.А. Григорьев, Н.К. Мышкин.

Влияние модифицированного графена на триботехнические
характеристики электролитических никель-молибденовых покрытий.
Трение и износ.

2025. — Т. 46, № 2. — С. 199—206.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-2-199-206

Address for correspondence:

D.M. Gutsev

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of
Sciences of Belarus,
Kirova str., 32a, Gomel 246050, Belarus
e-mail: gucevd@mail.ru

For citation:

A.Ya. Grigoriev, D.M. Gutsev, U.G. Kudrytski, H.V. Tran, T.V. Nguyen,
T.V. Pham, P.D. Doan, F.A. Grigoriev, and N.K. Myshkin.

[Effect of Modified Graphene on the Tribotechnical Characteristics of
Electrolytic Nickel-Molybdenum Coatings].

Trenie i Iznos.

2025, vol. 46, no. 2, pp. 199—206 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-2-199-206

Effect of Modified Graphene on the Tribotechnical Characteristics of Electrolytic Nickel-Molybdenum Coatings

A.Ya. Grigoriev¹, D.M. Gutsev¹, U.G. Kudrytski¹, H.V. Tran², T.V. Nguyen², T.V. Pham², P.D. Doan², F.A. Grigoriev¹, and N.K. Myshkin¹

¹V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus,
Kirova str., 32a, Gomel 246050, Belarus

²Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology,
Hoang Quoc Viet Str., 18, Cau Giay Distr., Hanoi, Vietnam

Received 31.03.2025.

Revised 15.04.2025.

Accepted 21.04.2025.

Abstract

The effect of co-deposited graphene oxide (GrO) modified with COOH groups on the tribological characteristics of electrolytic nickel-molybdenum coatings has been studied. The coatings were formed on the surface of polished high-carbon steel by electrodeposition from an aqueous electrolyte based on nickel sulfate (NiSO₄) and sodium molybdate (Na₂MoO₄) with dispersed graphene oxide. The coatings were obtained at current densities 2,5 A/dm² and GrO concentrations from 0.05 to 0.2 g/L. Tribotechnical tests have shown that introduction of GrO at a concentration of 0.1 g/L promotes the formation of a coating with a uniform structure, ensuring a minimum friction coefficient (0.38—0.45) and a wear track width (25—110 μm) under a load of 0.25—1.0 N. A dependency of tribological characteristics on the concentration of graphene particles in the working solution was revealed: at 0.1 g/L, a uniform distribution of GrO particles is achieved, leading to a 30—40 % reduction in the friction coefficient and a 40—55 % decrease in wear track width compared to the base Ni—Mo coating. When the particle concentration exceeds 0.1 g/L, an increase in coating roughness is observed, likely caused by agglomeration and excessive inclusion of filler particles in the coating structure, which results in the formation of a rougher and more heterogeneous surface, thereby degrading the tribological properties of the coating. The obtained results confirm the promising use of GrO in the composition of electrolytic Ni-Mo coatings to reduce friction and increase wear resistance.

Keywords: nickel-molybdenum coatings, electrodeposition, nanofillers, graphene oxide, friction, wear resistance.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-2-199-206

Адрес для переписки:

Д.М. Гуцев
Государственное научное учреждение «Институт механики
металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»,
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь
e-mail: gucevd@mail.ru

Для цитирования:

А.Я. Григорьев, Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий, Х.В. Тран, Т.В. Нгуен,
Т.В. Фам, Ф.Д. Дон, Ф.А. Григорьев, Н.К. Мышкин.
Влияние модифицированного графена на триботехнические
характеристики электролитических никель-молибденовых покрытий.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 2. — С. 199—206.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-2-199-206

Address for correspondence:

D.M. Gutsev
V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of
Sciences of Belarus,
Kirova str., 32a, Gomel 246050, Belarus
e-mail: gucevd@mail.ru

For citation:

A.Ya. Grigoriev, D.M. Gutsev, U.G. Kudrytski, H.V. Tran, T.V. Nguyen,
T.V. Pham, P.D. Doan, F.A. Grigoriev, and N.K. Myshkin.
[Effect of Modified Graphene on the Tribotechnical Characteristics of
Electrolytic Nickel-Molybdenum Coatings].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 2, pp. 199—206 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-2-199-206

Список использованных источников

1. Сайфуллин Р.С. Композиционные покрытия и материалы. — М.: Издательство: М.: Химия — 1977
2. Shivendra S. P. [et al.] Nanofillers in Surface Coatings: A Review // *Mor. J. Chem.* — 2015, no. 4, 730—740
3. Andrievski R.A. Films as Nanostructured Materials with Characteristic Mechanical Properties // *Materials Transactions.* — 2001 (42), no. 8, 1471—1473
4. Мурзенко К.В., Брылов И.Ф. Коррозионно- и износостойкость электролитического композиционного покрытия никель – кобальт – алмаз // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* — 2012, № 5, 112—114
5. Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Сафонов С.В. Химико-термическая, электрофизическая обработка металлов, сплавов и гальванических покрытий. — М.: Аргамак-Медиа. — 2013
6. Негматов С.С., Кабулов Б.Д., Шарипов Х.Т., Абед Н.С. Нанотехнологии: получение и применение наночастиц, наноматериалов. — Ташкент: Fan va texnologiya. — 2017
7. Huang Pao-Chang, Hou Kung-Hsu, Wang Gao-Liang, Chen Mao-Lin, and Wang Jee-Ray. Corrosion Resistance of the Ni-Mo Alloy Coatings Related to Coating's Electroplating Parameters // *International Journal of Electrochemical Science.* — 2015 (06), no. 10, 4972—4984. doi: 10.1016/S1452-3981(23)06679-8
8. Kot M., Beltowska-Lehman E., Bigos A., Indyka P., Morgiel J., and Zimowski S. Properties of Electrodeposited Ni-Mo Coatings // *Tribologia.* — 2011 (235), no. 1, 65—72
9. Кулакова И.И., Лисичкин Г.В. Химическое модифицирование графена // *Журнал общей химии.* — 2020 (90), № 7, 1601—1626
10. Ходаков Г.С., Юдкин Ю.П. Седиментационный анализ высокодисперсных систем. — М.: Химия. — 1981
11. Григорьев А.Я., Гуцев Д.М., Зозуля А.П., Ковалева И.Н., Кудрицкий В.Г., Мышкин Н.К., Семенюк М.С. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 // *Трение и износ.* — 2014 (35), № 6, 664—669
12. Farooq S., Aziz H., Ali Shafaqat, Murtaza G. et al. Synthesis of Functionalized Carboxylated Graphene Oxide for the Remediation of Pb and Cr Contaminated Water // *International Journal of Environmental Research and Public Health.* — 2022 (19), 1—8

References

1. Sajfullin R.S. Kompozicionnye pokrytiya i materialy. — M.: Izdatel'stvo: M.: Himiya — 1977 (in Russian)
2. Shivendra S. P. [et al.] Nanofillers in Surface Coatings: A Review // *Mor. J. Chem.* — 2015, no. 4, 730—740
3. Andrievski R.A. Films as Nanostructured Materials with Characteristic Mechanical Properties // *Materials Transactions.* — 2001 (42), no. 8, 1471—1473
4. Murzenko K.V., Brylov I.F. Korrozionno- i iznosostojkost' elektroliticheskogo kompozicionnogo pokrytiya nikel' – kobal't –almaz // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki.* — 2012, № 5, 112—114 (in Russian)
5. Gadalog V.N., Petrenko V.R., Safonov S.V. Himiko-termicheskaya, elektrofizicheskaya obrabotka metallov, splavov i gal'vanicheskikh pokrytij. — M.: Argamak-Media. — 2013 (in Russian)
6. Negmatov S.S., Kabulov B.D., Sharipov H.T., Abed N.S. Nanotekhnologii: poluchenie i primeneniye nanochastic, nanomaterialov. — Tashkent: Fan va texnologiya. — 2017 (in Russian)
7. Huang Pao-Chang, Hou Kung-Hsu, Wang Gao-Liang, Chen Mao-Lin, and Wang Jee-Ray. Corrosion Resistance of the Ni-Mo Alloy Coatings Related to Coating's Electroplating Parameters // *International Journal of Electrochemical Science.* — 2015 (06), no. 10, 4972—4984. doi: 10.1016/S1452-3981(23)06679-8
8. Kot M., Beltowska-Lehman E., Bigos A., Indyka P., Morgiel J., and Zimowski S. Properties of Electrodeposited Ni-Mo Coatings // *Tribologia.* — 2011 (235), no. 1, 65—72
9. Kulakova I.I., Lisichkin G.V. Himicheskoe modifitsirovaniye grafena // *Zhurnal obshchej himii.* — 2020 (90), № 7, 1601—1626 (in Russian)
10. Hodakov G.S., Yudkin Yu.P. Sedimentatsionnyy analiz vysokodispersnykh sistem. — M.: Himiya. — 1981 (in Russian)
11. Grigoriev A.Y., Gutsev D.M., Zozulya A.P., Kovaliova I.N., and Kudritskii V.G. Reciprocating MTU-2K7 Millitribometer // *Journal of Friction and Wear.* — 2014 (35), no. 6, 455—459
12. Farooq S., Aziz H., Ali Shafaqat, Murtaza G. et al. Synthesis of Functionalized Carboxylated Graphene Oxide for the Remediation of Pb and Cr Contaminated Water // *International Journal of Environmental Research and Public Health.* — 2022 (19), 1—8

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.

Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.

Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: FWJ@tut.by