

УДК 67.047+620.178.143.34+620.178.162.4

## Реализация структурно-морфологических принципов износостойкости для повышения трибологических характеристик сталей

С.А. Беспалов<sup>1</sup>, З.А. Дурягина<sup>2</sup>, В.Н. Уваров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Президиум НАН Украины,  
ул. Владимирская, 54, г. Киев 01601, Украина

<sup>2</sup>Национальный университет «Львовская политехника»,  
ул. Степана Бандеры, 12, г. Львов 73013, Украина

<sup>3</sup>Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Академика Вернадского, 36, г. Киев 03142, Украина

Поступила в редакцию 21.05.2021.

После доработки 17.02.2022.

Принята к публикации 21.02.2022.

В работе предложены принципы организации износостойких микроструктур, основанные на закономерностях связи характера структурообразования с геометрией трибологического контакта. Их реализация позволяет целенаправленно регулировать фазовый состав поверхностных слоёв конструкционных и инструментальных сталей, обеспечивая высокое сопротивление износу. На примере стали 40Х показано, что морфология карбидной фазы является одним из основных факторов, влияющих на равновесную шероховатость, структурно-геометрические параметры и несущую способность поверхности контакта, формирующихся в процессе трения и сказывающихся на её трибологических свойствах. Установлено, что формирование гетерогенной по строению и механическим характеристикам микроструктуры стали 08Г2С в литом состоянии приводит к значительному уменьшению её износа по сравнению с гомогенной, а увеличение дисперсности дендритных колоний способствует повышению износостойкости литого материала. Показано, что формирование вместо крупных тугоплавких легированных карбидов дисперсного мартенсита с остатками этих карбидов способствует существенному повышению износостойкости стали Х6ВФ.

**Ключевые слова:** контактное взаимодействие, износостойкость, сталь, температура закалки, фазовый состав, склерометрия, пакетный и игольчатый мартенсит, морфология карбидной фазы, дендритная структура.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-1-77-91

**Адрес для переписки:**

С.А. Беспалов  
Президиум НАН Украины,  
ул. Владимирская, 54, г. Киев 01601, Украина  
e-mail: bepalov@nas.gov.ua

**Address for correspondence:**

S.A. Bepalov  
Presidium of NAS of Ukraine,  
Vladimirskaya street, 54, Kiev, 01601, Ukraine  
e-mail: bepalov@nas.gov.ua

**Для цитирования:**

С.А. Беспалов, З.А. Дурягина, В.Н. Уваров.  
Реализация структурно-морфологических принципов износостойкости для повышения трибологических характеристик сталей.

Трение и износ.  
2022. – Т. 43, № 1. – С. 77–91.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-1-77-91

**For citation:**

S.A. Bepalov, Z.A. Duriagina, and V.N. Uvarov.  
[Implementation of Structural and Morphological Wear Resistance Principles for Steels Tribological Characteristics Increasing].  
*Trenie i Iznos*.

2022, vol. 43, no. 1, pp. 77–91 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-1-77-91

# Implementation of Structural and Morphological Wear Resistance Principles for Steels Tribological Characteristics Increasing

S.A. Bespalov<sup>1</sup>, Z.A. Duriagina<sup>2</sup>, and V.N. Uvarov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Presidium of NAS of Ukraine,  
Vladimirskaya street, 54, Kiev, 01601, Ukraine

<sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University,  
Stepana Bandery street, 12, Lvov, 73013, Ukraine

<sup>3</sup>G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics,  
Academician Vernadsky Boulevard, 36, Kiev, Ukraine

Received 21.05.2021.

Revised 17.02.2022.

Accepted 21.02.2022.

## Abstract

The principles of wear-resistant microstructures organization based on relationship regularities between the structure formation nature and the tribological contact geometry are proposed. Their implementation makes it possible to purposefully regulate the phase composition of the structural and tool steels surface layers for providing high wear resistance. Using 40X steel as an example it is shown that the carbide phase morphology is one of the main factors affecting the equilibrium roughness, structural and geometric parameters and the bearing capacity of the contact surface, which are formed during friction and affect its tribological properties. Formation the heterogeneous in microstructure and mechanical characteristics of cast 08Г2С steel leads to significant decrease its wear compared to the homogeneous one. Increase of dendritic colonies dispersion contributes to increase of cast material wear resistance. Formation instead large refractory alloyed carbides the dispersed martensite with remnants of these carbides contributes to significant increase of X6ВФ steel wear resistance.

**Keywords:** contact interaction, wear resistance, steel, hardening temperature, phase composition, sclerometry, lath and needle-like martensite, carbide phase morphology, dendritic structure.

DOI:10.32864/0202-4977-2022-43-1-77-91

---

### Адрес для переписки:

С.А. Беспалов  
Президиум НАН Украины,  
ул. Владимирская, 54, г. Киев 01601, Украина  
e-mail: bespalov@nas.gov.ua

### Address for correspondence:

S.A. Bespalov  
Presidium of NAS of Ukraine,  
Vladimirskaya street, 54, Kiev, 01601, Ukraine  
e-mail: bespalov@nas.gov.ua

### Для цитирования:

С.А. Беспалов, З.А. Дурягина, В.Н. Уваров.  
Реализация структурно-морфологических принципов износостойкости для повышения трибологических характеристик сталей.  
Трение и износ.

2022. – Т. 43, № 1. – С. 77–91.  
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-77-91

### For citation:

S.A. Bespalov, Z.A. Duriagina, and V.N. Uvarov.  
[Implementation of Structural and Morphological Wear Resistance Principles for Steels Tribological Characteristics Increasing].  
*Trenie i Iznos*.

2022, vol. 43, no. 1, pp. 77–91 (in Russian).  
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-77-91

## Список использованных источников

1. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (износ и безызносность). — М.: Издательство МСХА. — 2001
2. **Силаев Б.М.** Трибология деталей машин в маловязких смазочных средах. — Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2008
3. **Польцер Г., Майсснер Ф.** Основы трения и изнашивания / пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова; под ред. М.Н. Добычина. — М.: Машиностроение. — 1984
4. **Жуков А.А., Сильман Г.И., Эпштейн Л.З.** Структура стали и чугуна и принцип Шарпи // Известия АН СССР. Металлы. — 1971, № 2, 145—152
5. **Шпагин А.И.** Антифрикционные сплавы. — М.: Metallurgizdat. — 1956
6. **Петрова Л.Г., Александров В.А., Демин П.Е., Дробков В.П.** Формирование композиционных наноструктурных покрытий на стальных деталях методами химико-термической обработки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2010, № 51, 7—13
7. **Баглюк Г.А., Позняк Л.А.** Порошковые износостойкие материалы на основе железа. I. Материалы, полученные спеканием и пропиткой // Порошковая металлургия. — 2001, № 1-2, 44—53
8. **ГОСТ 21318-82.** Изменение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. — М.: Издательство стандартов. — 1983
9. **Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И.** Механика дискретного фрикционного контакта. — Минск: Навука і тэхніка. — 1990
10. **Рапопорт Л.С., Рыбакова Л.М.** Влияние структурного состояния поверхностных слоев на процессы трения и изнашивания // Трение и износ. — 1987 (8), № 6, 1038—1043
11. **Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.** Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение. — 1981
12. **Яковлева С.П., Махарова С.Н., Винокуров Г.Г., Мордовской П.Г., Стручков Н.Ф.** Повышение износостойкости и рельеф поверхности трения ферритно-перлитной стали, наноструктурированной мегапластической деформацией // Фундаментальные исследования. Раздел «Технические науки». — 2013, № 10 (часть 15), 3451—3455
13. **Волосевич П.Ю., Беспалов С.А.** Склерометрия и ее возможности в комплексном выявлении особенностей распределения элементов структуры, их механических характеристик и размерных параметров // Металлофизика и новейшие технологии. — 2004 (26), № 3, 343—359
14. **Гринберг Е.М., Алексеев А.А., Новикова Е.Ю., Яровицкая А.А., Галкин А.Ф.** Влияние условий охлаждения на уровень остаточных напряжений и перераспределение углерода в аустените и мартенсите при закалке среднеуглеродистых сталей // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2015 (12), № 1, 104—112
15. **Штремель М.А., Андреев Ю.Г., Козлов Д.А.** Строение и прочность пакетного мартенсита // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1999, № 4, 10—15
16. **Барабонова И.А., Афанасьева Л.Е.** Структура и свойства градиентно-упрочненной быстрорежущей стали // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. — 2015, № 1, 21—30
17. **Елагина О.Ю.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. — М.: Университетская книга. — 2009
18. **Попова Н.А.** Эволюция дислокационного ансамбля, внутренние поля напряжений и фазовые превращения при пластической деформации сталей с различной структурой: дис. ... канд. техн. наук: спец. 01.04.07 «Физика конденсированного состояния». — Томский государственный архитектурно-строительный университет. — 2005
19. **Беспалов С.А.** Структура та зносостійкість відновленого гребеня вагонного колеса // Металознавство та обробка металів. — 2009, № 4, 3—7
20. **Карабарин Д.А., Тарасов Г.Ф.** Термическое упрочнение сталей для повышения абразивной износостойкости // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2013 (1), № 9, 16—17
21. **Modi O.P., Mondal D.P., Prasad V.K. et al.** Abrasive Wear behavior of a High Carbon Steel: Effects of Microstructure and Experimental Parameters and Correlating with Mechanical Properties // Mater. Sci. Eng. A. — 2003 (343), nos. 1-2, 235—242
22. **Беспалов С.А., Волосевич П.Ю.** Про закономірності формування зносостійких станів в інструментальних легованих сталях // Металознавство та обробка металів. — 2006, № 2, 37—43

## References

1. **Garkunov D.N.** Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost'). — M.: Izdatel'stvo MSKHA. — 2001 (in Russian)
2. **Silaev B.M.** Tribologiya detalej mashin v malo-vyazkikh smazochnyh sredah. — Samara: Izdatel'stvo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. — 2008 (in Russian)
3. **Polcer G., Majssner F.** Osnovy treniya i iznashivaniya / per. s nem. O.N. Ozerskogo, V.N. Pal'yanova; pod red. M.N. Dobychina. — M.: Mashinostroenie. — 1984 (in Russian)
4. **Zhukov A.A., Sil'man G.I., Epshtejn L.Z.** Struktura stali i chuguna i princip Sharpi // Izvestiya AN SSSR. Metally. — 1971, № 2, 145—152 (in Russian)
5. **Shpagin A.I.** Antifrikcionnye splavy. — M.: Metallurgizdat. — 1956 (in Russian)
6. **Petrova L.G., Aleksandrov V.A., Demin P.E., Drobkov V.P.** Formirovanie kompozicionnyh

- nanostrukturnyh pokrytij na stal'nyh detalyah metodami himiko-termicheskoy obrabotki // Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. — 2010, № 51, 7—13 (in Russian)
7. **Baglyuk G.A., Poznyak L.A.** Poroshkovye iznosostojkie materialy na osnove zheleza. I. Materialy, poluchennyye spekaniiem i propitkoj // Poroshkovaya metallurgiya. — 2001, № 1-2, 44—53 (in Russian)
  8. **GOST 21318-82.** Izmenenie mikrotverdosti carapaniem almaznymi nakonechnikami. — M.: Izdatel'svo standartov. — 1983 (in Russian)
  9. **Sviridenok A.I., Chizhik S.A., Petrokovec M.I.** Mekhanika diskretnogo frikcionnogo kontakta. — Minsk: Navuka i tekhnika. — 1990 (in Russian)
  10. **Rapoport L.S., Rybakova L.M.** Vliyanie strukturnogo sostoyaniya poverhnostnyh sloev na processy treniya i iznashivaniya // Trenie i iznos. — 1987 (8), № 6, 1038—1043 (in Russian)
  11. **Demkin N.B., Ryzhov E.V.** Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin. — M.: Mashinostroenie. — 1981 (in Russian)
  12. **Yakovleva S.P., Maharova S.N., Vinokurov G.G., Mordovskoy P.G., Struchkov N.F.** Povyshenie iznosostojkosti i rel'ef poverhnosti treniya ferritno-perlitnoy stali, nanostrukturirovannoy megaplasticheskoy deformaciej // Fundamental'nye issledovaniya. Razdel «Tekhnicheskie nauki». — 2013, № 10 (chast' 15), 3451—3455 (in Russian)
  13. **Volosevich P.Yu., Bepalov S.A.** Sklerometriya i eyo vozmozhnosti v kompleksnom vyyavlenii osobennostej raspredeleniya elementov struktury, ih mekhanicheskikh harakteristik i razmernykh parametrov // Metallofizika i novejschie tekhnologii. — 2004 (26), № 3, 343—359 (in Russian)
  14. **Grinberg E.M., Alekseev A.A., Novikova E.Yu., Yarovickaya A.A., Galkin A.F.** Vliyanie usloviy ohlazhdeniya na uroven' ostatochnykh napryazhenij i pereraspredelenie ugleroda v austenite i martensite pri zakalke sredneuglerodistykh stalej // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. — 2015 (12), № 1, 104—112 (in Russian)
  15. **Shtremel' M.A., Andreev Yu.G., Kozlov D.A.** Stroenie i prochnost' paketnogo martensita // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 1999, № 4, 10—15 (in Russian)
  16. **Barabonova I.A., Afanas'eva L.E.** Struktura i svoystva gradientno-uprochnennoy bystrorezhushchej stali // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. — 2015, № 1, 21—30 (in Russian)
  17. **Elagina O.Yu.** Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti detalej mashin. — M: Universitetskaya kniga. — 2009 (in Russian)
  18. **Popova N.A.** Evolyuciya dislokacionnogo ansamblya, vnutrennie polya napryazhenij i fazovye prevrashcheniya pri plasticheskoy deformacii stalej s razlichnoj strukturoj: dis. ... kand. tekhn. nauk: spec. 01.04.07 «Fizika kondensirovannogo sostoyaniya». — Tomskij gosudarstvennyj arhitekturo-stroitel'nyj universitet. — 2005 (in Russian)
  19. **Bepalov S.A.** Struktura ta znosostijkist' vidnovlenogo grebenya vagonnogo koleasa // Metalloznavstvo ta obrobka metaliv. — 2009, № 4, 3—7 (in Ukraine)
  20. **Karabarin D.A., Tarasov G.F.** Termicheskoe uprochnenie stalej dlya povysheniya abrazivnoj iznosostojkosti // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики. — 2013 (1), № 9, 16—17 (in Russian)
  21. **Modi O.P., Mondal D.P., Prasad B.K. et al.** Abrasive Wear behavior of a High Carbon Steel: Effects of Microstructure and Experimental Parameters and Correlating with Mechanical Properties // Mater. Sci. Eng. A. — 2003 (343), nos. 1-2, 235—242
  22. **Bepalov S.A., Volosevich P.Yu.** Pro zakonomirnosti formuvannya znosostijkikh staniv v instrumental'nykh legovanih stalyah // Metalloznavstvo ta obrobka metaliv. — 2006, № 2, 37—433 (in Ukraine)

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](mailto:FWJ@tut.by)