

УДК 620.181.5

Комплексное исследование влияния однократного высокоэнергетического лазерного импульса на износостойкость стали Р6М5

И.А. Пинахин¹, С.К. Шарма², М.А. Ягмуров¹, С.С. Врублевская¹, М.А. Шпак¹

¹Северо-Кавказский федеральный университет,
просп. Кулакова, 2, г. Ставрополь 355029, Россия

²Департамент металлургии и материаловедения, Индийский технологический институт (ИИТ) Патна,
Бихата, Бихар - 801106, Индия

Поступила в редакцию 14.08.2024.

После доработки 05.02.2025.

Принята к публикации 14.02.2025.

Исследовано изменение микроструктуры и дефектности структуры (на примере плотности дислокаций) образцов из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5, облучённых однократным высокоэнергетическим лазерным импульсом и влияние этих изменений на абразивную износостойкость исследуемого материала. Установлено, что предлагаемая лазерная обработка существенно влияет на микроструктуру облучённых образцов. Это выражается в частичном перераспределении и растворении «тяжёлых» карбидов типа Me_6C , содержащих вольфрам и молибден в матрице материала (мартенсите). При этом конфигурация «тяжёлых» карбидов Me_6C расположена между формулами $Fe_3(W,Mo)_3C - Fe_4(W,Mo)_2C$. При помощи программы анализа изображений Thixomet было определено, что количество зёрен «тяжёлых» карбидов Me_6C в объёмном отношении снизилось в 1,30—1,58 раза в зависимости от расстояния от исследуемой точки до места облучения образца. На основании результатов рентгенофазового анализа было определено изменение дефектности структуры на примере плотности дислокаций. Результаты испытаний на абразивный износ показали, что имеет место повышение износостойкости облучённых образцов в 1,58—2,48 раза в зависимости от расстояния от исследуемой точки до места облучения образца. При этом значение наибольшей износостойкости (в 2,48 раза) достигается при наибольших изменениях микроструктуры и дефектности структуры, что соответствует расстоянию от исследуемой точки до места облучения образца равному 20 миллиметров. Полученные результаты позволяют рекомендовать применение метода микроструктурного анализа для назначения оптимальных режимов лазерного упрочнения материалов.

Ключевые слова: износостойкость, упрочнение, лазер, режущие инструменты, быстрорежущая сталь, абразивный износ, ударная волна, микроструктурный анализ, рентгеноструктурный анализ, рентгенофазовый анализ.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-40-48

Адрес для переписки:

И.А. Пинахин
Северо-Кавказский федеральный университет,
просп. Кулакова, 2, г. Ставрополь 355029, Россия
e-mail: ipinakhin@list.ru

Address for correspondence:

I.A. Pinahin
North Caucasus Federal University,
Kulakova Avenue, 2, Stavropol 355029, Russia
e-mail: ipinakhin@list.ru

Для цитирования:

И.А. Пинахин, С.К. Шарма, М.А. Ягмуров, С.С. Врублевская,
М.А. Шпак.
Комплексное исследование влияния однократного высокоэнергетического лазерного импульса на износостойкость стали Р6М5.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 1. — С. 40—48.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-40-48

For citation:

I.A. Pinahin, S.K. Sharma, M.A. Yagmurov, S.S. Vrublevskaia, and
M.A. Shpak.
[Comprehensive Study of the Single High-Energy Laser Pulse Effect
on the Wear Resistance of R6M5 Steel].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 1, pp. 40—48 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-40-48

Comprehensive Study of the Single High-Energy Laser Pulse Effect on the Wear Resistance of R6M5 Steel

I.A. Pinahin¹, S.K. Sharma², M.A. Yagmurov¹, S.S. Vrublevskaia¹, and M.A. Shpack¹

¹North Caucasus Federal University,
Kulakova Avenue, 2, Stavropol 355029, Russia

²Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology (IIT) Patna,
Bihata, Bihar - 801106, India

Received 14.08.2024.

Revised 05.02.2024.

Accepted 14.02.2025.

Abstract

The researches of microstructure changes and structural defects (using the example of dislocation density) of samples made of high-speed steel R6M5 and irradiated with a single high-energy laser pulse as well as the effect of these changes on the abrasive wear resistance of the studied material are presented in the article. It was found that the proposed laser treatment significantly affects the microstructure of the irradiated samples. This is expressed in the almost complete disappearance of the banded distribution of carbides in the samples, which indicates a partial redistribution and dissolution of “heavy” carbides of the Me_6C type containing tungsten and molybdenum in the material matrix (martensite). In this case, the configuration of “heavy” Me_6C carbides is located between the formulas $Fe_3(W,Mo)_3C - Fe_4(W,Mo)_2C$. Also, exposure to a high-energy laser pulse leads to an increase in the quantity and size of secondary carbides in the alloy matrix, significantly enriched in tungsten and molybdenum. In addition, there is a change in the type of vanadium carbides from Me_2C to VC, accompanied by a significant decrease in the amount of molybdenum and tungsten in it. Using the Thixomet image analysis program, it was determined that the number of grains of “heavy” Me_6C carbides in terms of volume decreased by 1.30—1.58 times, depending on the distance from the point of interest to the irradiation place of the sample. At the same time, the average size and direction (anisotropy) of the material grains has not changed. The results of X-ray phase analysis showed that after treatment, the number of main phases of the samples remained practically unchanged in distribution, but there was an increase in the responses intensity. Based on the above, the change in the structure defectiveness was determined using the example of dislocation density. The results of abrasive wear tests showed that there is an increase in the wear resistance of irradiated samples by 1.58—2.48 times, depending on the distance from the point of interest to the irradiation place of the sample. In this case, the value of the greatest wear resistance (2.48 times) is achieved with the greatest microstructure changes and structure defectiveness, which corresponds to the distance from the point of interest to the irradiation place of the sample equal to 20 millimeters. The obtained results allow us to recommend the use of the microstructural analysis method for assigning optimal modes of laser hardening of materials.

Keywords: wear resistance, hardening, laser, cutting tools, high-speed steel, abrasive wear, shock wave, microstructural analysis, X-ray diffraction analysis, X-ray phase analysis.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-40-48

Адрес для переписки:

И.А. Пинахин
Северо-Кавказский федеральный университет,
просп. Кулакова, 2, г. Ставрополь 355029, Россия
e-mail: ipinakhin@list.ru

Address for correspondence:

I.A. Pinahin
North Caucasus Federal University,
Kulakova Avenue, 2, Stavropol 355029, Russia
e-mail: ipinakhin@list.ru

Для цитирования:

И.А. Пинахин, С.К. Шарма, М.А. Ягмуров, С.С. Врублевская,
М.А. Шпак.
Комплексное исследование влияния однократного высокоэнергетического лазерного импульса на износостойкость стали Р6М5.
Трение и износ.

2025. — Т. 46, № 1. — С. 40—48.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-40-48

For citation:

I.A. Pinahin, S.K. Sharma, M.A. Yagmurov, S.S. Vrublevskaia, and
M.A. Shpack.
[Comprehensive Study of the Single High-Energy Laser Pulse Effect
on the Wear Resistance of R6M5 Steel].
Trenie i Iznos.

2025, vol. 46, no. 1, pp. 40—48 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-39-47

Список использованных источников

1. Пинахин И.А., Шарма С.К., Ягмуров М.А., Врублевская С.С., Шпак М.А. Взаимосвязь износостойкости быстрорежущей стали Р6М5 и деформаций, возникающих при лазерном упрочнении // Трение и износ. — 2023 (44), № 2, 158—166
2. Zhao K., Yan G., Li J., Guo W., Gu J., and Li C. The Resistance to Wear and Thermal Cracking of Laser Surface Engineered P20 Steel // Coatings. — 2023 (13), no. 1, 97
3. Моисеев В. Ф., Григорьев С. Н. Инструментальные материалы. — Москва: МГТУ «Станкин» (ООО Информ-Софт). — 2005
4. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., and Sheffler M. Modification of Structure and Properties of Steel R6M5 at Electrolyte Plasma Treatment // Advanced Materials Research. — 2013 (601), 64—68
5. Ke R., Hu C., Zhong M., Wan X., and Wu K. Grain Refinement Strengthening Mechanism of an Austenitic Stainless Steel: Critically Analyze the Impacts of Grain Interior and Grain Boundary // J. Mater. Res. Technol. — 2022, no. 17, 2999—3012
6. Rezaayat M., Moradi M., and Mateo A. Nanosecond Pulsed Laser Surface Processing of AISI 301LN Steel: Effect on Surface Topography and Mechanical Properties // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2023, no. 128, 3025—3040
7. Solic S., Cajner F., and Leskovsek V. Effect of Deep Cryogenic Treatment on Mechanical and Tribological Properties of PM S390 MC High-Speed Steel // MP Materials Testing. — 2012, no. 10, 688—693
8. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов (МиТОМ). — Москва. — 2008, № 11(641), 18—27
9. Пинахин И.А., Черниговский В.А., Брацихин А.А., Ягмуров М.А., Владыкина Ю.А. Комплексное исследование изменения износостойкости быстрорежущей стали Р6М5 после объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) // Трение и износ. — 2019 (40), № 3, 304—309
10. Козлов Э.В., Иванов Ю.Ф., Симонов П.С. и др. Фазовый состав и тонкая структура стали Р6М5 // Ползуновский альманах. — 2004, № 4, 47—51
11. Kumar V., Verma R., Kango S., and Sharma V.S. Recent Progresses and Applications in Laser-Based Surface Texturing Systems // Mater. Today Commun. — 2021, no. 26, 101736
12. Пинахин И.А., Шагров М.Н., Ягмуров М.А., Врублевская С.С., Даржания А.Ю., Шпак М.А. Повышение износостойкости однокарбидных твердых сплавов после объемного импульсного лазерного упрочнения // Трение и износ. — 2020 (41), № 6, 745—751
13. Rezaayat M., Roa J.J., and Mateo A. Effect of Laser Surface Texturing on Schmid Factor and Plastic Deformation Mechanisms on AISI 301LN Steel // Metals. — 2023, no. 13, 1789
14. Cordovilla F., García-Beltrán Á., Dominguez J., Sancho P., and Ocaña J.L. Numerical-Experimental Analysis of the Effect of Surface Oxidation on the Laser Transformation Hardening of Cr–Mo Steels // Appl. Surf. Sci. — 2015, no. 357, 1236—1243
15. Mohamed H., Ataiwi A., and Dawood J. Mechanical Properties of Martensitic Stainless Steel (AISI420) Subjected to Conventional and Cryogenic Treatments // Eng. Technol. J. — 2020, no. 38, 1096—1105

References

1. Pinahin I.A., Sharma S.K., Yagmurov M., Vrublevskaya S., and Shpack M. Correlation between Wear Resistance of High-Speed Steel R6M5 and Deformations Arising during Laser Hardening // Journal of Friction and Wear. — 2023 (44), no. 2, 158—166
2. Zhao K., Yan G., Li J., Guo W., Gu J., and Li C. The Resistance to Wear and Thermal Cracking of Laser Surface Engineered P20 Steel // Coatings. — 2023 (13), no. 1, 97
3. Moiseyev V. F., Grigor'yev S. N. Instrumental'nyye materialy. — Moskva: MGTU "Stankin" (ООО Inform-Soft). — 2005 (in Russian)
4. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., and Sheffler M. Modification of Structure and Properties of Steel R6M5 at Electrolyte Plasma Treatment // Advanced Materials Research. — 2013 (601), 64—68
5. Ke R., Hu C., Zhong M., Wan X., and Wu K. Grain Refinement Strengthening Mechanism of an Austenitic Stainless Steel: Critically Analyze the Impacts of Grain Interior and Grain Boundary // J. Mater. Res. Technol. — 2022, no. 17, 2999—3012
6. Rezaayat M., Moradi M., and Mateo A. Nanosecond Pulsed Laser Surface Processing of AISI 301LN Steel: Effect on Surface Topography and Mechanical Properties // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2023, no. 128, 3025—3040
7. Solic S., Cajner F., and Leskovsek V. Effect of Deep Cryogenic Treatment on Mechanical and Tribological Properties of PM S390 MC High-Speed Steel // MP Materials Testing. — 2012, no. 10, 688—693
8. Kremnev L.S. Theory of alloying and the creation of heat-resistant tool steels and alloys on its basis // Metal science and heat treatment of metals (MiTOM). — Moscow. — 2008, no. 11(641), 18—27 (in Russian)
9. Pinahin I.A., Chernigovsky V.A., Bratskhin A.A., Yagmurov M.A., and Vladykina Yu.A. Improving Wear Resistance of Fast-Cutting Steel R6M5 after a Volume Pulse Laser Strength // Journal of Friction and Wear. — 2019

- (40), no. 3, 304—309
10. **Kozlov E.V., Ivanov Yu.F., Simonov P.S. and others.** Phase composition and fine structure of R6M5 steel // Polzunovsky almanac. — 2004, no. 4, 47—51 (in Russian)
 11. **Kumar V., Verma R., Kango S., and Sharma V.S.** Recent Progresses and Applications in Laser-Based Surface Texturing Systems // Mater. Today Commun. — 2021, no. 26, 101736
 12. **Pinahin I.A., Shagrov M.N., Yagmurov M.A., Vrublevskaya S.S., Darzhaniya A.Yu., and Shpak M.A.** Wear Resistance Increase of Single-Carbide Hard Alloys after Bulk Pulse-Laser Hardening // Journal of Friction and Wear. — 2020 (41), no. 6, 554—558
 13. **Rezayat M., Roa J.J., and Mateo A.** Effect of Laser Surface Texturing on Schmid Factor and Plastic Deformation Mechanisms on AISI 301LN Steel // Metals. — 2023, no. 13, 1789
 14. **Cordovilla F., García-Beltrán Á., Dominguez J., Sancho P., and Ocaña J.L.** Numerical-Experimental Analysis of the Effect of Surface Oxidation on the Laser Transformation Hardening of Cr–Mo Steels // Appl. Surf. Sci. — 2015, no. 357, 1236—1243
 15. **Mohamed H., Ataiwi A., and Dawood J.** Mechanical Properties of Martensitic Stainless Steel (AISI420) Subjected to Conventional and Cryogenic Treatments // Eng. Technol. J. — 2020, no. 38, 1096—1105

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