



УДК 621.791.75

DOI 10.17073/0368-0797-2023-5-516-521



Оригинальная статья

Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ, ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТВЕРДОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПЛАЗМЕННО-УПРОЧНЕННОЙ СТАЛИ 65Г

И. М. Косанова¹, А. Т. Канаев¹, Т. А. Толкынбаев²,
М. А. Джаксымбетова², Т. Е. Сарсембаева¹

¹ Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина (Казахстан, 010000, Астана, пр. Женис, 62)

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Казахстан, 010008, Астана, ул. Сатпаева, 2)

✉ ind_jm@mail.ru

Аннотация. Проведены исследования структуры, показателей твердости и трещиностойкости до и после плазменной обработки стали марки 65Г лемешной части плуга. В результате плазменной обработки получен модифицированный слой с повышенной в 3,6 раза твердостью в интервале 980 – 3558 HV. Металлографические исследования показали, что перлитно-ферритная структура исходного металла вследствие плазменной закалки превращается в игольчатый мартенсит с высокими твердостью и прочностью. Усталостную трещину на образцах создавали на вибраторе Дроздовского. Перед выращиванием усталостной трещины на боковую поверхность образца наносились боковые V-образные надрезы различной глубины. Относительная длина трещины λ изменялась в пределах от 0,27 до 0,65. По результатам испытаний на сжатие установлено небольшое перемещение трещин в закаленных образцах в диапазоне 1,3 – 5,6 мм. Исходные неупрочненные образцы находятся в более хрупком состоянии, чем закаленные, соответственно наблюдается значительное разрушение их в условиях нанесения искусственной трещины. Проведенная оценка образцов стали 65Г на трещиностойкость путем испытания на ударный изгиб с последующим осциллографированием показала, что плазменная закалка способствует торможению увеличения трещины за счет роста ударной вязкости. Таким образом, применение плазменной закалки эффективно при поверхностном упрочнении стали марки 65Г, в частности лемехов плуга, которые постоянно подвергаются механическим воздействиям, трению и износу.

Ключевые слова: сталь, твердость, плазменная обработка, поверхностный слой, микротвердость, оценка трещиностойкости, испытание на ударный изгиб

Для цитирования: Косанова И.М., Канаев А.Т., Толкынбаев Т.А., Джаксымбетова М.А., Сарсембаева Т.Е. Исследование изменения структуры, показателей твердости и трещиностойкости плазменно-упрочненной стали 65Г. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(5):516–521. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-516-521>

CHANGES IN STRUCTURE, HARDNESS AND CRACK RESISTANCE OF PLASMA-STRENGTHENED STEEL 65G

I. M. Kossanova¹, A. T. Kanayev¹, T. A. Tolkyrbayev²,
M. A. Jaxymbetova², T. E. Sarsembaeva¹

¹ S. Seifullin Kazakh AgroTechnical University (62 Zhenis Ave., Astana 010000, Republic of Kazakhstan)

² L.N. Gumilev Eurasian National University (2 Satpaeva Str., Astana 010008, Republic of Kazakhstan)

✉ ind_jm@mail.ru

Abstract. The present paper describes the research of structure, hardness and crack resistance indicators before and after plasma treatment of 65G steel of a ploughshare part. As a result of plasma treatment, we obtained the modified layer with increased hardness in the range of 980 – 3558 HV with increase in 3.6 times. Metallographic studies showed that pearlitic-ferritic structure of the original metal transforms into needle martensite with high hardness and strength due to plasma hardening. It is recommended to determine the impact toughness by the Drozdowski method, in which a fatigue crack is pre-created on a special vibrator. Also, before the fatigue crack was grown, lateral V-shaped notches of different depths were made on the sample lateral surface. The relative crack length, λ , varied from 0.27 to 0.65. According to the results of compression tests, it was found that there was a small movement of cracks in the hardened samples in the range from 1.3 to 5.6 mm. The initial unstrengthened samples are in a more brittle state than the quenched ones, and accordingly, significant fracture is observed in the conditions of artificial cracking. The evaluation of 65G steel samples for crack resistance by impact bending tests with subsequent oscillographing showed that plasma hardening inhibits crack growth

by increasing impact toughness. Thus, the use of plasma hardening is effective in surface hardening of 65G steel, in particular ploughshares which are constantly exposed to mechanical stresses, friction and wear.

Keywords: steel, hardness, plasma treatment, surface layer, microhardness, crack resistance assessment, impact bending test

For citation: Kossanova I.M., Kanayev A.T., Tolkynbayev T.A., Jaxymbetova M.A., Sarsembaeva T.E. Changes in structure, hardness and crack resistance of plasma-strengthened steel 65G. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):516–521.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-516-521>

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в Казахстане в целях повышения качества машин и агрегатов проводятся исследования прочностных характеристик, полученных при плазменной закалке поверхности тяжело нагруженных деталей. Для улучшения показателей прочности, в частности, твердости, износостойкости и трещиностойкости, целесообразно применять перспективный метод плазменной обработки [1; 2]. Данный способ воздействует на поверхностный слой деталей, не приводя металл к деформациям, и дает возможность получать на поверхности изделия модифицированный слой с высокими прочностными характеристиками. Изменение структуры и свойств поверхностного слоя происходит в условиях сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения ($10^3 - 10^5$ К/с) и кратковременности воздействия на обрабатываемый материал [3 – 5].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования выбрана сталь 65Г лемешной части плуга, которая служит для подрезания пласта почвы и постоянно подвергается трению и износу [6; 7].

Вырезку темплетов осуществляли на отрезном станке Labotom-3 фирмы Struers (Швейцария). В процессе резания образец и отрезной диск охлаждались водой со специальным лубрикантом, исключая окисление [8; 9]. После вырезки образцов соответствующих размеров определен химический состав стали на содержание легирующих элементов с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора Niton XL2 (табл. 1).

Плазменное упрочнение проводили на установке плазменной закалки УДГЗ-200. Данная установка основывается на закаливании объектов плазменной дугой косвенного действия, что позволяет разогревать поверхность размером 1 – 2 мм и не приводит к внутренним деформациям деталей [10 – 12].

Поверхность стали исследовали с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss с увеличением 200.

Твердость на поверхности образцов измеряли на твердомере макро Виккерса Wilson VH 1150 при нагрузке на индентор 30 кг.

Испытания на ударный изгиб осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 9454 – 78 с измерением

величины ударной вязкости. Данный метод основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра. Ударные испытания проводили на маятниковом копре КМ-30. Были изготовлены ударные образцы размером 6,5×11,5×55 мм. Усталостную трещину на образцах создавали на вибраторе Дроздовского. При этом относительная длина трещины λ изменялась в пределах от 0,27 до 0,65 [13 – 15]. Оценку ударной вязкости в условиях гарантированной плоской деформации проводили на образцах с двумя дополнительными боковыми V-образными надрезами, глубина которых составляла 1,0 мм. Оценка ударной вязкости на образцах с боковыми надрезами дает возможность определять уровень удельной работы распространения трещины при разрушении в условиях плоско-деформированного состояния (ПДС) [16 – 18].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Металлографические исследования показали, что механические свойства (прочность, твердость, трещиностойкость) плазменно-закаленных деталей определяются формой, размерами и ориентацией субзерен (рис. 1).

В результате структурно-фазового исследования установлено, что основной металл состоит из перлитных зерен и феррита. При плазменной закалке они превращаются в игольчатый мартенсит с высокой твердостью и трещиностойкостью [19; 20].

Таблица 1

Результаты спектрального анализа образцов стали 65Г

Table 1. Results of spectral analysis of 65G steel samples

Номер образца	Содержание легирующих элементов, % (по массе)	$\pm 2\sigma$
1	0,840 Mn	0,122 Mn
2	0,676 Mn	0,113 Mn
3	0,757 Mn; 0,142 Cu	0,127 Mn; 0,069 Cu
4	0,640 Mn; 0,104 Cr	0,112 Mn; 0,043 Cr
5	0,551 Mn	0,102 Mn
6	0,585 Mn	0,102 Mn
7	1,03 Mn	0,130 Mn
8	0,739 Mn; 0,148 Ti	0,116 Mn; 0,064 Ti
9	0,684 Mn	0,103 Mn

Таблица 2

**Результаты измерений твердости
на поверхности образцов стали 65Г**

*Table 2. Results of hardness measurements
on the surface of 65G steel samples*

Номер образца	Наличие плазменной обработки на участке замера	HV ₃₀			Среднее значение HV ₃₀
		1	2	3	
1	Без обработки	484,7	422,7	653,6	520,3
	С обработкой	1519,7	1780,2	2398,5	1899,5
2	Без обработки	764,6	762,9	698,3	741,9
	С обработкой	3423,5	2476,8	1931,1	2610,5
3	Без обработки	609,0	640,0	621,0	623,3
	С обработкой	2348,0	1483,9	1766,8	1866,2
4	Без обработки	553,4	354,4	855,3	587,7
	С обработкой	3554,3	4589,2	3467,7	3870,4
5	Без обработки	368,5	345,1	368,2	360,6
	С обработкой	554,1	686,0	900,5	713,5
6	Без обработки	418,6	355,3	344,4	372,8
	С обработкой	980,8	2418,5	2832,3	2077,2
7	Без обработки	404,5	370,4	361,7	378,9
	С обработкой	1407,2	960,5	860,7	1076,1
8	Без обработки	998,3	453,1	1287,9	913,1
	С обработкой	1133,4	1317,6	2302,8	1584,6

по каждому образцу взято среднее значение твердости до и после закалки. Наблюдается увеличение твердости в среднем в 3,6 раза.

Далее была проведена оценка трещиностойкости плазменно-упрочненной стали путем испытания на ударный изгиб с последующим осциллографированием. Значения ударной вязкости закаленных образцов составили 127, 116, 110, 104, 98, 106, 94 и 102 Дж/см².

На рис. 2 представлены результаты исследований зависимости ударной вязкости от длины трещины. Наблюдается постепенное увеличение ударной вязкости при увеличении трещины-инициатора.

По результатам работ на излом и разрушение рассчитана основная характеристика динамических испытаний – ударная вязкость КСТ.

На рис. 3 показаны результаты оценки ударной вязкости образцов стали 65Г до и после плазменной закалки. Наблюдается динамичный рост КСТ после плазменной закалки, что свидетельствует о том, что она способствует торможению дальнейшего увеличения трещины за счет увеличения КСТ. Таким образом, исходные образцы находятся в более хрупком состоянии, чем закаленные, соответственно, отмечается значи-

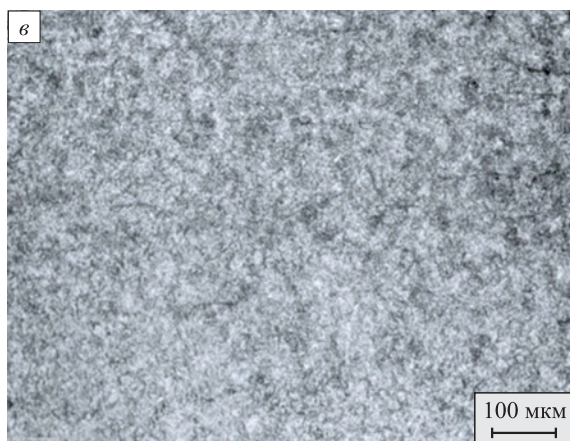
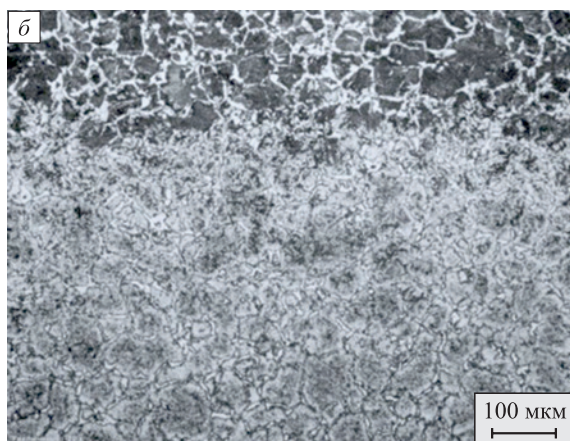
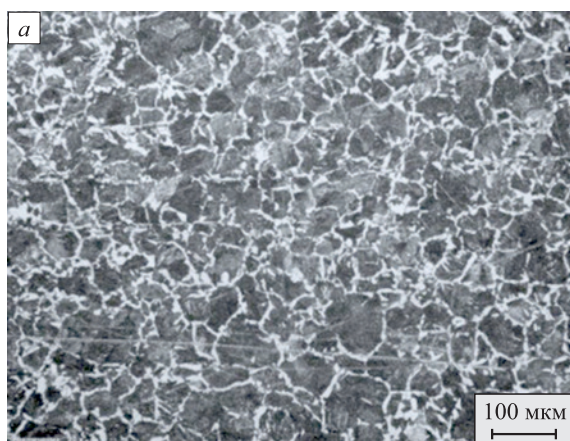


Рис. 1. Металлографическая структура стали 65Г после поверхностной плазменной закалки:

a – основной металл; *б* – переходной слой; *в* – закаленный слой

Fig. 1. Metallographic structure of 65G steel after surface plasma hardening:

a – base metal; *б* – transition layer; *в* – hardened layer

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

В табл. 2 показаны результаты измерений твердости до и после плазменной обработки образцов стали 65Г.

Представленные данные свидетельствуют о значительном повышении твердости образцов стали 65Г за счет плазменной закалки. На основании трех измерений

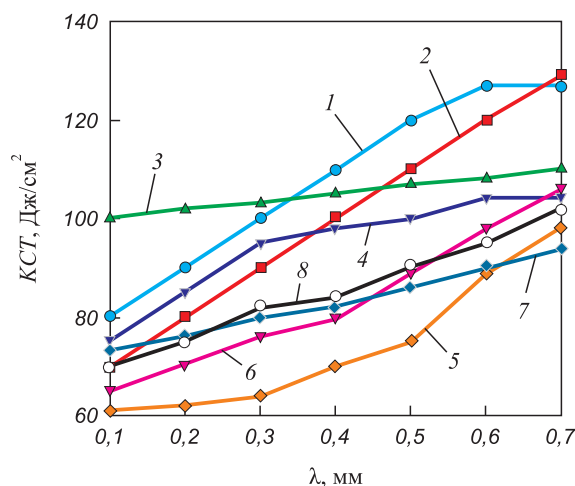


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости от длины трещины (образцы 1 – 8)

Fig. 2. Dependence of impact strength on crack length (samples 1 – 8)

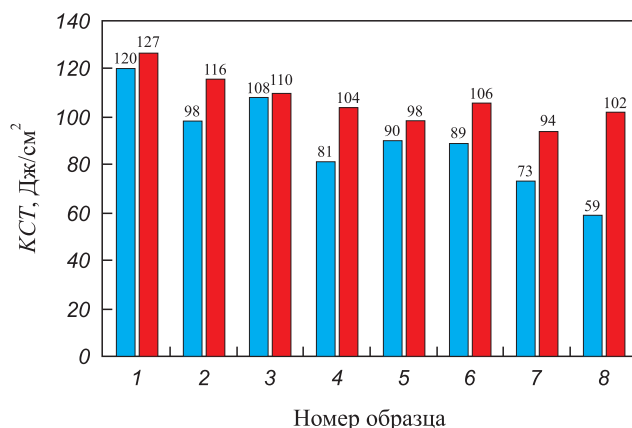


Рис. 3. Диаграмма динамической трещиностойкости исходных (■) и закаленных (■) образцов

Fig. 3. Diagram of dynamic crack resistance of initial (■) and hardened (■) samples

тельное разрушение их в условиях плоской деформации [21; 22].

При испытаниях образцов на сжатие наблюдалось перемещение трещин в диапазоне от 1,3 – 5,6 мм при линейной нагрузке до 120 кН (рис. 4, 5).

В результате перемещения трещин видно, что площадь живого сечения образца уменьшилась незначительно и, соответственно, наблюдается рост работы разрушения A_p (рис. 4, 5).

Выводы

Металлографические исследования стали 65Г показали, что при ее поверхностной плазменной закалке в упрочненной зоне толщиной 2 мм формируется градиентно-слоистая структура с изменяющейся твердостью в интервале 980 – 3558 HV. Также наблюдается

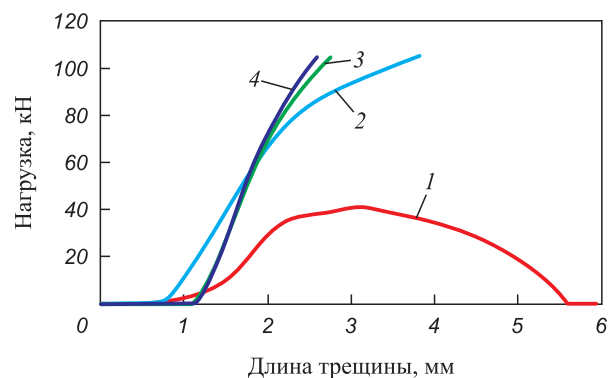


Рис. 4. Длина трещин при линейной нагрузке (закаленные образцы 1 – 4)

Fig. 4. Cracks' length at linear load (hardened samples 1 – 4)

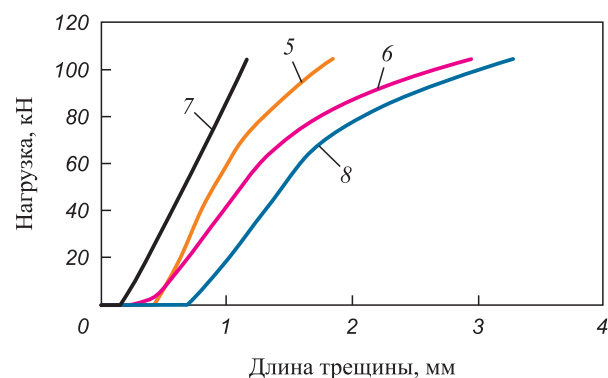


Рис. 5. Длина трещин при линейной нагрузке (закаленные образцы 5 – 8)

Fig. 5. Cracks' length at linear load (hardened samples 5 – 8)

увеличение микротвердости до 3,6 раз, что является более высоким показателем в сравнение с другими видами закалок, например, электроплазменной, где увеличение твердости было зафиксировано в 2,16 раз.

Результаты исследований ударной вязкости и ударных трещин показали, что упрочнение плазменной дугой препятствует динамическому росту трещин в поверхностном слое.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтвердили целесообразность применения закалки плазменной дугой при упрочнении поверхностного слоя тяжело нагруженных деталей, в частности, стали 65Г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kossanova I.M., Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Akhmedyanov A.U., Kirgizbayeva K.Zh. Effect of electrolytic-plasma surface treatment on structure, mechanical, and tribological properties of grade 1 wheel steel. *Metallurgist*. 2022;66(7):69–73. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01393-0>
2. Korotkov V.A. Influence of plasma quenching on the wear resistance of 45 and 40X steel. *Russian Engineering*

- Research. 2016;36(11):916–919.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X16110125>
3. Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Kossanova I.M. Quantitative assessment of the yield stress of ferrite-pearlitic steels by structure parameters. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2021;3(447):65–71.
<https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.64>
4. Xiang Y., Yu D., Cao X., Liu Y., Yao J. Effects of thermal plasma surface hardening on wear and damage properties of rail steel. *Journal of Engineering Tribology*. 2017;232(7):787–796. <https://doi.org/10.1177/1350650117729073>
5. Jaxymbetova M., Kanayev A., Kossanova I., Mazur I., Akhmedyanov A., Kirgizbayeva K. Improvement of the mechanical properties of reinforcing bar steel by combined deformation-heat treatment. *International Review of Mechanical Engineering*. 2022;16(9):460–466.
<https://doi.org/10.15866/ireme.v16i9.21521>
6. Токтарбаева Г.М., Алпысбаев С.К., Рахадиллов Б.К., Сатбаева З.А., Жапарова М.С. Влияние электролитно-плазменного упрочнения поверхности на структуру и свойства стали 40ХН. *Вестник ВКГТУ*. 2020;87(1):200–205.
Toktarbayeva G.M., Alpysbayev S.K., Rakhadilov B.K., Satbayeva Z.K., Zhaparova M.S. Effect of electrolyte-plasma surface hardening on the structure and properties of 40KhN steel. *Vestnik VKGTU*. 2020;87(1):200–205. (In Russ.).
7. Petrov S.V., Saakov A.G. Technology and equipment for plasma surface hardening of heavy-duty parts. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017;17(3):363–378.
<https://doi.org/10.1081/AMP-120005382>
8. Korotkov V.A., Ananyev S.A., Shekurov A.V. Investigation of the effect of the cooling rate on the structure and mechanical properties of metal in plasma quenching. *Welding International*. 2014;28(2):140–142.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2013.796665>
9. Q'Donnelly B.E., Reuben R.L., Baker T.N. Quantitative assessment of strengthening parameters in ferrite-pearlite steels from microstructural measurements. *Metals Technology*. 2013;11(1):45–51.
<https://doi.org/10.1179/030716984803274837>
10. Ramazanov Zh.M., Kirgizbayeva K.Zh., Akhmedyanov A.U., Jaxymbetova M.A. Influence of the process of microplasma treatment in electrolyte solutions on the oxide coating properties. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(12):709–721.
11. Yong X., Yu D., Li Q., Huabei P., Xiuquan C., Jin Ya. Effects of thermal plasma jet heat flux characteristics on surface hardening. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;226(12):238–246.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.022>
12. Bespalova A., Lebedev V., Florenkova O., Knysh A. Increasing efficiency of plasma hardening by local cooling of surface by air with negative temperature. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019;4(12):52–57.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176825>
13. Yan M.F., Chen B.F., Li B. Microstructure and mechanical properties from an attractive combination of plasma nitriding and secondary hardening of M50 steel. *Applied Surface Science*. 2018;455:1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.213>
14. Esfandiari M., Dong H. Plasma surface engineering of precipitation hardening stainless steels. *Surface Engineering*. 2006;22(2):86–92.
<https://doi.org/10.1179/174329406X98368>
15. Martynov V., Brzhozovsky B., Zinina E., Yankin I., Susskiy A. Fluctuations in the process plant as a quality assessment criterion of low-temperature plasma hardening process. *Procedia Engineering*. 2017;176:451–460.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.344>
16. Semboshi S., Iwase A., Takasugi T. Surface hardening of age-hardenable Cu–Ti alloy by plasma carburization. *Surface and Coatings Technology*. 2015;283:262–267.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.003>
17. Lebrun J.P. Plasma-assisted processes for surface hardening of stainless steel. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. 2015;6(16):615–632.
<https://doi.org/10.1533/9780857096524.4.615>
18. Околович Г.А., Шарикова Т.Г., Петрова Е.В. Повышение долговечности инструмента в условиях взаимного влияния износа и усталости стали. *Ползуновский вестник*. 2015;(2):33–36.
Okolovich G.A., Sharikova T.G., Petrova E.V. Increasing durability of the tool under mutual influence of wear and fatigue of steel. *Polzunovskii vestnik*. 2015;(2):33–36. (In Russ.).
19. Расщупкин В.П., Акимов В.В. Усталостная прочность и износостойкость высокомарганцевистой стали. *Омский научный Вестник*. 2006;35(2):78–80.
Rasshupkin V.P., Akimov V.V. Fatigue strength and wear resistance of high manganese steel. *Omskii nauchnyi Vestnik*. 2006;35(2):78–80. (In Russ.).
20. Mohd I., Zahari T. Surface hardening of tool steel by plasma arc with multiple passes. *International Journal of Technology*. 2014;5(1):79–87.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v5i1.156>
21. Zhao K., Yan G., Li J., Guo W., Gu J., Li Ch. The resistance to wear and thermal cracking of laser surface engineered P20 steel. *Metallic Materials*. 2023;13(1):97–105.
<https://doi.org/10.3390/coatings13010097>
22. Medina L., Marcus V.T., Paschalidou M., Lindwall G., Riekehr L. Enhancing corrosion resistance, hardness, and crack resistance in magnetron sputtered high entropy CoCrFeMnNi coatings by adding carbon. *Materials and Design*. 2021;205:109–121. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109711>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Индира Муратовна Косанова, магистр, докторант, Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина
ORCID: 0000-0002-9092-8982
E-mail: ind_jm@mail.ru

Indira M. Kossanova, Master Student, Doctoral, S. Seifullin Kazakh AgroTechnical University
ORCID: 0000-0002-9092-8982
E-mail: ind_jm@mail.ru

Амангельды Токешович Канаев, д.т.н., профессор кафедры стандартизации, метрологии и сертификации, Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина

ORCID: 0000-0002-2530-038X

E-mail: aman-kanaev2012@yandex.ru

Темірхан Анапияевич Толкынбаев, д.т.н., профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

ORCID: 0000-0002-8549-3064

E-mail: temtol1961@mail.ru

Макпал Адликановна Джаксымбетова, старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

ORCID: 0000-0002-3345-4071

E-mail: dzhaksymbetov@list.ru

Толкын Ержановна Сарсембаева, к.т.н., старший преподаватель, Казахский агротехнический университет имени Сакена Сейфуллина

ORCID: 0000-0002-7674-313X

E-mail: tolkyn-adil@mail.ru

Amangel'dy T. Kanaye, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Standardization, Metrology and Certification, S. Seifullin Kazakh AgroTechnical University

ORCID: 0000-0002-2530-038X

E-mail: aman-kanaev2012@yandex.ru

Temirkhan A. Tolkynbayev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University

ORCID: 0000-0002-8549-3064

E-mail: temtol1961@mail.ru

Makpal A. Jaxymbetova, Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University

ORCID: 0000-0002-3345-4071

E-mail: dzhaksymbetov@list.ru

Tolkyn E. Sarsembaeva, PhD, Senior Lecturer, S. Seifullin Kazakh Agro-technical University

ORCID: 0000-0002-7674-313X

E-mail: tolkyn-adil@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

И. М. Косанова – оценка трещиностойкости плазменно-упрочненной стали, статистическая обработка полученных данных.

А. Т. Канаев – постановка задачи, анализ результатов исследований, формулировка выводов.

Т. А. Толкынбаев – комплексное металлографическое и электронно-микроскопическое исследование.

М. А. Джаксымбетова – измерение твердости стали, табличное и графическое представление результатов.

Т. Е. Сарсембаева – описание результатов, формулировка выводов, критический анализ литературы.

I. M. Kossanova – assessment of crack resistance of plasma-hardened steel, statistical processing of the obtained data.

A. T. Kanaye – statement the problem, analysis of the research results, formulation of the conclusions.

T. A. Tolkynbayev – complex metallographic and electron microscopic testing.

M. A. Jaxymbetova – measurement of steel hardness, tabular and graphical representation of the results.

T. E. Sarsembaeva – description of the results, formulation of the conclusions, critical literary analysis.

Поступила в редакцию 16.04.2023

После доработки 28.07.2023

Принята к публикации 04.09.2023

Received 16.04.2023

Revised 28.07.2023

Accepted 04.09.2023