



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 621.791.042.3

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА УПРОЧНЕНИЕ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БЕЗКОБАЛЬТОВОЙ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА НИКЕЛЬХРОМОВОЙ ОСНОВЕ

Евгений Николаевич Еремин ¹, Никита Кузьмин ²,
Александр Сергеевич Лосев ³, Сергей Александрович Бородин ⁴,
Иван Андреевич Пономарёв ⁵

1, 2, 3, 4, 5 Омский государственный технический университет, Омск, Россия

¹ weld_techn@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7357-8194>

² kuzmin1995nikita@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0002-5357-1619>

³ alesha-los@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7970-4219>

⁴ savorodikhin@omgtu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8038-9551>

⁵ don_13@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8016-3616>

Аннотация. Исследовано влияние кремния на упрочнение и износостойкость мартенситностареющей стали системы Fe-Ni-Cr-Mo-Ti-Al. Металл для исследований получали наплавкой порошковой проволокой Н7Х6М2ТЮ легированной кремнием. Установлено, что средняя твердость такого металла после наплавки составляет 37 HRC, после старения – 53 HRC. Степень упрочнения в результате старения достигает 43 %. Микротвердость матрицы находится в пределах 729–776 HV, а упрочняющих фаз – 903–947 HV. Показано, что такой металл обладает достаточно высокой износостойкостью. Его значение массового износа после старения за испытание составляет $2,83 \times 10^{-3}$ г, а значение линейного износа – $6,21 \times 10^{-3}$ мм, что в 1,8 раза меньше, чем у стали без кремния. Выявлен комплекс дисперсных фаз, выделившихся после старения, определяющий упрочнение и износостойкость такой стали. По результатам проведенных исследований сделан вывод, о том, что порошковая проволока Н7Х6М2С2ТЮ может быть использована для наплавки деталей, работающих в условиях трения металла о металл.

Ключевые слова: наплавка, никельхромовая сталь, порошковая проволока, легирование, износостойкость, дюрOMETрические свойства, упрочняющие фазы.

Для цитирования: Влияние кремния на упрочнение и износостойкость безкобальтовой мартенситностареющей стали на никельхромовой основе / Е. Н. Еремин [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 218–223. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.038. EDN: <https://elibrary.ru/NGYCCZ>.

Original article

EFFECT OF SILICON ON HARDENING AND WEAR RESISTANCE OF COBALT-FREE MARTENSITIC-AGING NICKEL-CHROMIUM-BASED STEEL

Evgenii N. Eremin ¹, Nikita Kuzmin ², Aleksandr S. Losev ³,
Sergei A. Borodikhin ⁴, Ivan A. Ponomarev ⁵

1, 2, 3, 4, 5 Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ weld_techn@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7357-8194>

² kuzmin1995nikita@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0002-5357-1619>

³ alesha-los@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7970-4219>

⁴ savorodikhin@omgtu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8038-9551>

⁵ don_13@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8016-3616>

Abstract. The effect of silicon on the hardening and wear resistance of martensitic aging steel of the Fe-Ni-Cr-Mo-Ti-Al system has been studied. The metal for the research was obtained by surfacing with a powder wire Ni7Cr6Mo2TiAl alloyed with silicon. It was found that the average hardness of such a metal after surfacing is 37 HRC, after aging - 53 HRC. The degree of hardening as a result of aging reaches 43 %. The microhardness of the matrix is in the range of 729-776 HV, and the hardening phases are 903-947 HV. It is shown that such a metal has a sufficiently high wear resistance. Its value of mass wear after aging, per test, is 2.83×10^{-3} g, and the value of linear wear is 6.21×10^{-3} mm, which is 1.8 times less than that of steel without silicon. A complex of dispersed phases released after aging has been

© Еремин Е. Н., Кузьмин Н., Лосев А. С., Бородин С. А., Пономарёв И. А., 2025

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА УПРОЧНЕНИЕ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БЕЗКОБАЛЬТОВОЙ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА НИКЕЛЬХРОМОВОЙ ОСНОВЕ

identified, which determines the hardening and wear resistance of such steel. Based on the results of the conducted research, it was concluded that the Ni7Cr6Mo2Si2TiAl powder wire can be used for surfacing parts operating under conditions of metal-on-metal friction.

Keywords: surfacing, nickel chrome steel, powder wire, alloying, wear resistance, durometric properties, hardening phases.

For citation: Eremin, E.N., Kuzmin, N., Losev, A.S., Borodikhin, S.A. & Ponomarev, I.A. (2025). Effect of silicon on hardening and wear resistance of cobalt-free martensitic-aging nickel-chromium-based steel. Polzunovskiy vestnik, (3), 218-223. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.038. EDN: <https://elibrary.ru/NGYCCZ>.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения ресурса работы деталей оборудования металлургического и машиностроительного назначения связана в значительной мере с упрочнением их поверхности износостойкими материалами, обладающими особыми механическими и эксплуатационными свойствами.

Одной из наиболее распространенных технологий поверхностного упрочнения деталей машиностроения является нанесение износостойких покрытий дуговой наплавкой порошковыми проволоками [1–3].

Среди большого разнообразия материалов, наплавляемых порошковыми проволоками, находят применение и мартенситно-стареющие стали [4–6]. В результате несложной термической обработки – старения, в таких сталях имеет место эффект вторичного твердения (упрочнения), обусловленный выделением в мартенсите дисперсных частиц. Наиболее изучены высокопрочные стали с высокой концентрацией никеля, кобальта и молибдена системы Fe-Ni-Co-Mo-Ti-Al [7–9]. Однако эффективность применения таких материалов низка вследствие их высокой стоимости.

Более перспективны экономнолегированные мартенситно-стареющие стали (МСС) также с эффектом вторичного твердения [10, 11].

В работах [8, 9] также изучена возможность замены кобальта в мартенситно-стареющих сталях дру-

гими элементами. Установлено, что использование вместо кобальта, хрома в сочетании с титаном и алюминием увеличивает упрочнение железоникелевого мартенсита при старении. Показано, что изменяя содержание молибдена, титана, алюминия можно получать стали с высокой прочностью. Для обеспечения мартенситной матрицы такие стали содержат 6–10 % Ni и 4–6 % Cr. Для создания эффекта вторичного твердения такую сталь легируют молибденом до 3 % и титаном с алюминием до 1 %. Но даже при таком легировании их твердость и износостойкость невысока.

Дополнительное легирование такой стали кремнием в концентрации до 2 % [9, 12, 13] может повысить степень её упрочнения и износостойкость.

Исходя из вышеизложенного можно полагать, что перспективной композицией экономнолегированной мартенситно-стареющей стали может быть система Fe-Ni-Cr-Mo-Si-Ti-Al. В связи с этим, представляет интерес исследования упрочнения такой стали и особенности её износостойкости в результате старения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являлись две композиции низкоуглеродистой мартенситно-стареющей стали Н7Х6М2ТЮ как с кремнием, так и без него, полученных наплавкой порошковыми проволоками, расчетные составы которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные составы экспериментальных порошковых проволок, %

Table 1 – Calculated compositions of experimental powder wires, %

Состав	Количественный состав порошковой проволоки, %							Fe порошок
	Ni	Cr	Mo	FeSi	FeAl	FeTi	Na ₂ SiF ₆	
1	7,5	6,5	2,5	0	2,0	5,0	0,3	23,8
2	7,5	6,5	2,5	2,5	2,0	5,0	0,3	21,2

Термическую обработку (старение) проводили при температуре 550 °С и выдержке в течение 2 ч [9, 14].

Металлографию исследуемых составов проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer A1m (Carl Zeiss).

Степень упрочнения устанавливали по результатам измерения твердости металла после наплавки и старения на приборе Металаб 452. Микротвердость матрицы и фазовых составляющих структуры металла определяли на приборе Shimadzu HNMV-2 при нагрузке 10 г.

Концентрацию основных легирующих элементов в металле определяли на оптико-эмиссионном спектрометре Искролайн 300 и анализаторе МЕТАВАК-CS30.

Испытания на износ осуществляли по схеме палец – вращающийся диск, на машине трения УМТ-2168. На диск производилась кольцевая наплавка валика с твердостью 60 HRC. После шлифовки валика по его поверхности осуществлялся контакт с образцами в виде пальца, торец которого наплавлялся исследуемым составом.

Таблица 2 – Содержание элементов в исследуемых составах, %

Table 2 – The content of elements in the studied compositions, %

№ п/п	C	Ni	Cr	Mo	Si	Ti	Al	Fe
1	0,12	7,11	6,02	2,02	0,1	1,67	0,44	ост.
2	0,16	7,08	6,05	2,09	1,86	1,62	0,61	ост.

Наличие углерода в исследуемых составах объясняется переходом его в наплавленный металл из компонентов порошковой проволоки и металла подложки. Возможный переход в наплавленный металл других элементов не определялся. Установлено, что средняя твердость металла состава 1 после наплавки составляет 35 HRC, а состава 2 – 37 HRC. После старения твердость металла состава 1 возросла до 44 HRC, а состава 2 – до 53 HRC. Степень упрочнения в результате старения для состава 1 до-

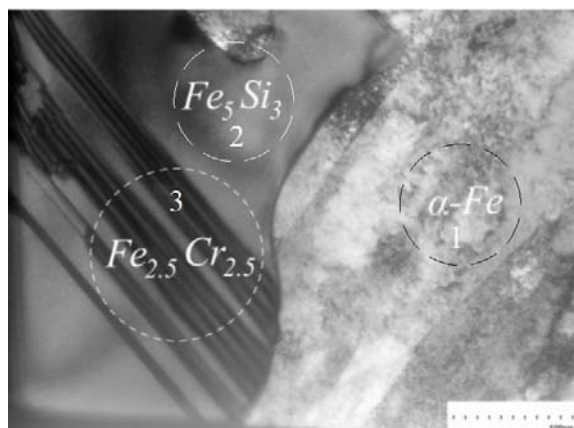
стигает 27 %, а для состава 2 – 43 %. Как видно, металл, легированный кремнием по эффекту вторичного твердения, значительно превосходит металл, в который не вводился кремний, что и подтвердило высказанное ранее предположение о его положительном влиянии. В связи с этим дальнейшие исследования были проведены с составом 2 (H7X6M2C2TЮ).

Результаты испытаний на изнашивание металла состава 2 после старения приведены в таблице 3.

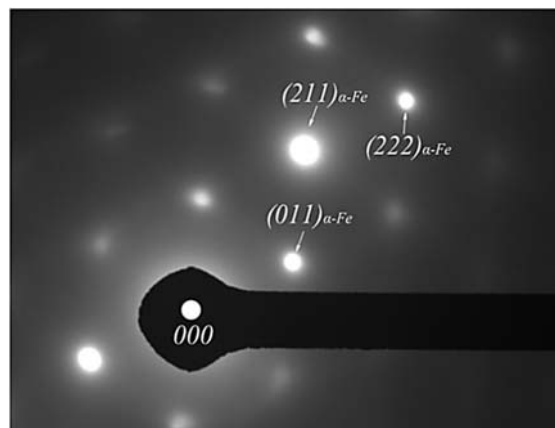
Таблица 3 – Износостойкость наплавленного металла состава 2 после старения

Table 3 – Wear resistance of the deposited metal of composition 2 after aging

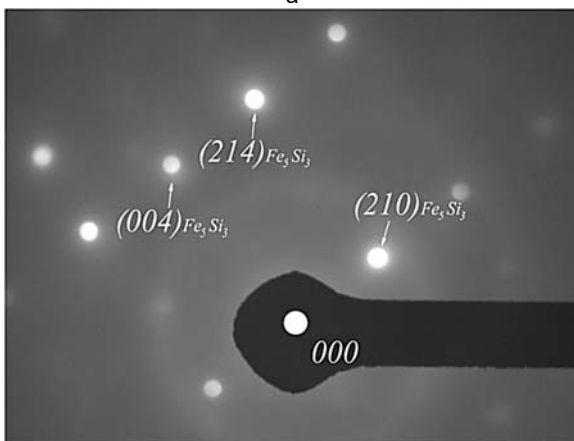
Путь трения S, м	Относительный массовый износ ($\times 10^{-3}$), г/м	Массовый износ ($\times 10^{-3}$), г	Относительный износ по длине ($\times 10^{-3}$), мм	Изменение длины Δl ($\times 10^{-3}$), мм
0–113	0,02	0,02	0	0
113–226	0,06	0,08	0,03	0,03
226–339	0,41	0,49	0,62	0,65
339–452	0,34	0,83	0,86	1,51
452–565	0,36	1,19	0,74	2,25
565–678	0,33	1,52	0,80	3,05
678–791	0,38	1,90	0,94	3,99
791–904	0,30	2,20	0,71	4,70
904–1017	0,32	2,52	0,71	5,41
1017–1130	0,31	2,83	0,80	6,21
0–1130	0,34	2,83	0,77	6,21



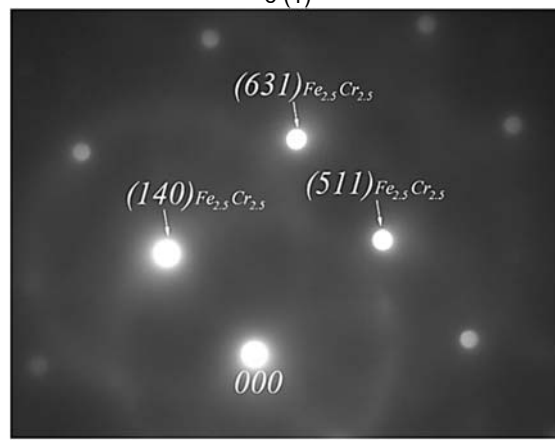
а



б (1)



б (2)



б (3)

Рисунок 1 – Тонкая структура первого участка: а) общий вид характерного участка структуры; б) основные рефлексы с микродифракции структуры (рис. 3, а): б (1) – фаза α-Fe, б (2) – фаза Fe₅Si₃, б (3) – фаза Fe_{2.5}Cr_{2.5}

Figure 1 – The thin structure of the first section: a) general view of the characteristic section of the structure; b) basic reflexes with microdiffraction of the structure (see Fig. 3, a): b (1) - phase α-Fe, b (2) - phase Fe₅Si₃, b (3) - phase Fe_{2.5}Cr_{2.5}

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА УПРОЧНЕНИЕ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БЕЗКОБАЛЬТОВОЙ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА НИКЕЛЬХРОМОВОЙ ОСНОВЕ

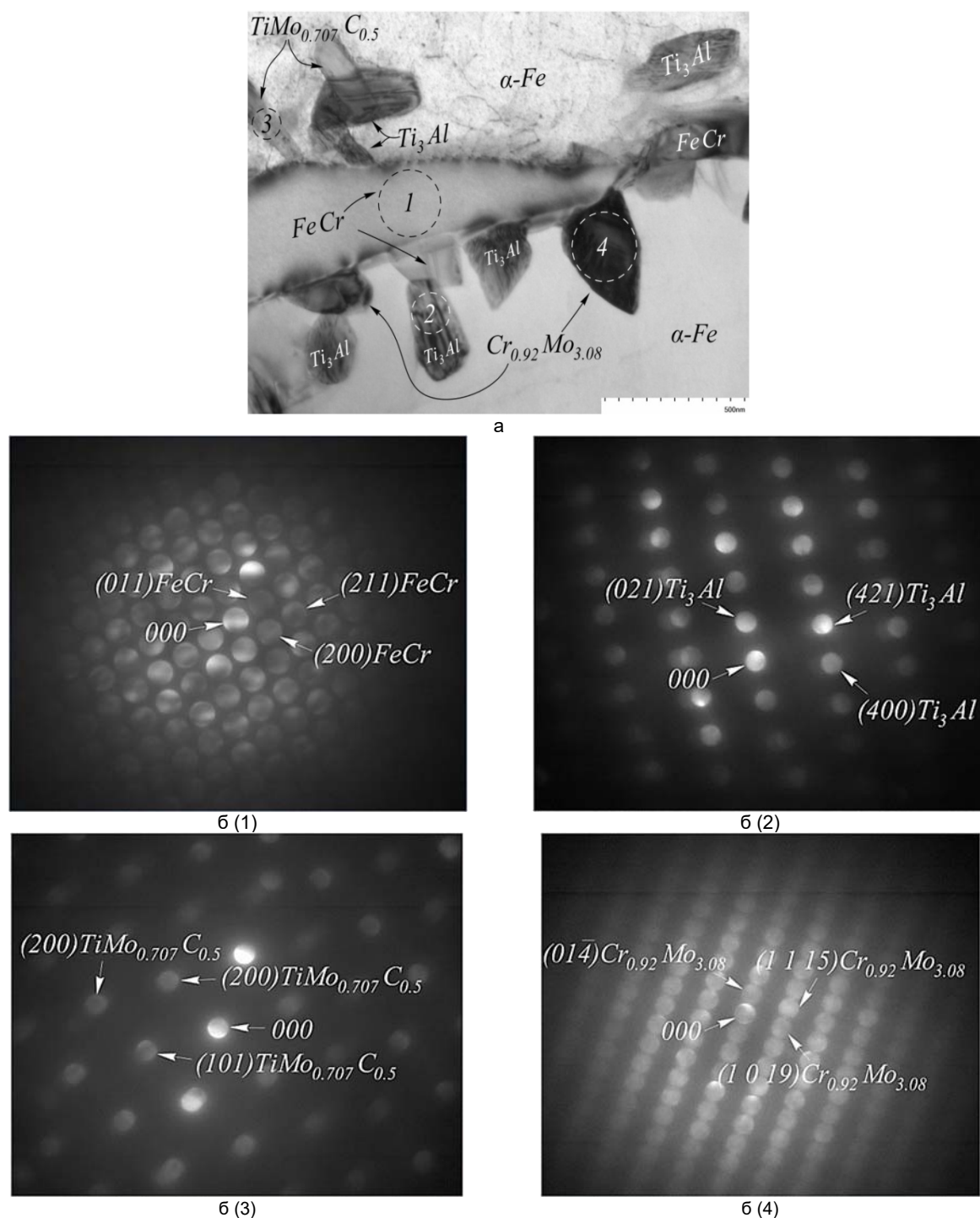


Рисунок 2 – Тонкая структура второго участка: а) общий вид характерного участка структуры; б) основные рефлексы с микродифракции структуры (рис. 4, а): б (1) – фаза FeCr, б (2) – фаза Ti_3Al ; б (3) – фаза $TiMo_{0.707}C_{0.5}$, б (4) – фаза $Cr_{0.92}Mo_{3.08}$

Figure 2 – The thin structure of the second section: a) general view of the characteristic section of the structure;

b) basic reflexes with microdiffraction of the structure (see Fig. 4, a): b (1) - phase FeCr,

b (2) - phase Ti_3Al ; b (3) - phase $TiMo_{0.707}C_{0.5}$, b (4) - phase $Cr_{0.92}Mo_{3.08}$

Анализ результатов, представленный в таблице 3, показывает, что исследуемый металл имеет достаточно высокую износостойкость и по сравнению со сталью без кремния выше в 1,8 раза, и даже несколько превышает износостойкость ряда инструмен-

тальных сталей, например, таких как 50XHM и 30X2B8Ф.

На этапе приработки средний массовый износ металла составляет $0,02 \times 10^{-3}$ г. За испытание средние значения относительного массового износа составили $0,34 \times 10^{-3}$ г/м, а линейного износа – $0,77 \times 10^{-3}$ мм/м.

За весь цикл испытания массовый износ составил $2,83 \times 10^{-3}$ г, при этом износ по длине достиг $6,21 \times 10^{-3}$ мм.

В тоже время износостойкость стали определяется составом образующихся фаз, строением выделившихся частиц, характером их распределения в матрице [7, 13, 15]. В связи с этим были проведены исследования микротвердости структурных составляющих и тонкой структуры исследуемого металла.

Установлено, что микротвердость матрицы такого металла находится в пределах 729–776 HV, упрочняющих фаз в пределах 903–947 HV, в то время как для металла, не легированного кремнием, она составляет 584–608 HV и 716–789 HV соответственно.

Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что основой структуры исследуемого металла после старения является мартенсит. В структуре отмечены 6 видов соединений фазовых составляющих, в основном топологически плотноупакованных.

Обнаружено два характерных микроучастка тонкой структуры металла, полученных просвечивающей электронной микроскопией. Общий вид тонкой структуры первого участка размером 80×100 мкм с расположением областей сканирования приведен на рисунке 1.

Анализ тонкой структуры и микродифракций с её областей показывают, что основу матрицы составляет реечный мартенсит. В структуре наблюдается большая доля глобулярной составляющей (высокотемпературная мартенситная фаза нереечного строения). По границам с α -Fe наблюдаются обширные выделения пластинчатых прямоугольных соединений η -фазы Fe_5Si_3 размером 1000×1500 нм, обладающих высокой твердостью и σ -фазы на основе высокопрочного интерметаллида $\text{Fe}_{2,5}\text{Cr}_{2,5}$ в виде длинных иголок, размер которых превышает 2000 нм.

Общий вид тонкой структуры второго участка размером 80×100 мкм с расположением областей сканирования приведен на рисунке 2.

На этом участке в мартенситной матрице обнаружены соединения σ -фазы FeCr , стержневой формы протяженностью свыше 2000 нм, окруженных со всех сторон большим количеством мелких частиц, размером 75×150 нм интерметаллидов алюминидов титана α_2 -фазы Ti_3Al высокой твердости. Кроме того наблюдаются более крупные частицы размером до 150×300 нм интерметаллида $\text{Cr}_{0,92}\text{Mo}_{3,08}$ и частицы размером до 50×150 нм сложного карбида $\text{TiMo}_{0,707}\text{C}_{0,5}$.

Полученные результаты показывают, что особенностью упрочнения стали, полученной наплавкой порошковой проволокой H7X6M2C2TЮ в результате старения, является выделение в мартенситной матрице большого количества интерметаллических соединений называемых, топологически плотноупакованными фазами [16]. Преобладающими соединениями являются крупные частицы η -фазы силицида железа и σ -фазы системы Fe-Cr. По-видимому, в большей степени именно они и усиливают эффект дисперсионного твердения мартенситностареющей стали. Кроме того, вследствие снижения растворимости элементов в α -Fe в стали, содержащей кремний [9], выделяется большое количество частиц других соединений, таких как интерметаллиды с участием Ti, Al, Cr, Mo и сложного карбида с участием Mo и Ti. Известно, что такие соединения в комплексе значительно усиливают эффект вторичного твердения стали и её износостойкость [7, 9, 13, 15, 17]. Это объясняется тем, что в условиях пластического деформирования поверхности, выявленные интерметаллидные соединения, являются препятствием для скольжения дислокаций [18, 19].

Таким образом, упрочнение мартенситностареющей стали полученной наплавкой порошковой проволокой H7X6M2C2TЮ определяется доминирующими крупными частицами высокой твердости соединений систем Fe-Si и Fe-Cr в комплексе с частицами меньших размеров соединений систем Ti-Al, Cr-Mo, Ti-Mo-C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Твердость состаренной мартенситностареющей стали, полученной наплавкой порошковой проволокой H7X6M2TЮ легированной кремнием, достигает 53 HRC при степени упрочнения в 43 %.

2. Повышение износостойкости такой стали в результате старения обусловлена образованием мартенситной матрицы с микротвердостью до 776 HV, упрочненной комплексом интерметаллидных топологически плотноупакованных соединений, в большей степени железа, кремния и хрома и в меньшей степени титана, алюминия и молибдена с микротвердостью, достигающей 947 HV.

3. Порошковая проволока H7X6M2C2TЮ может быть использована для нанесения износостойких покрытий на детали, работающие при трении металла о металл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов : книга. Киев : Екотехнологія, 2004. 159 с.
2. Юзвенко Ю.А., Кирилук Г.А. Наплавка порошковой проволокой : науч.-техн. о-во машиностроит. пром-сти. ун-т техн. прогресса в машиностроении : заоч. курсы повышения квалификации ИТР по технологии и оборудованию сварочного производства. М. : Машиностроение, 1973. 45 с.
3. Соколов Г.Н., Лысак В.И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей : монография. Волгоград : ВолГТУ, 2005. 283 с.
4. Кальянов В.Н., Багров В.А. Мартенситностареющие стали для наплавки штампов // Сварочное производство. 2003. № 2. С. 35–37.
5. Кондратьев И.А., Рябцев И.А., Черняк Я.П. Порошковая проволока для наплавки слоя мартенситностареющей стали // Автоматическая сварка. 2006. № 4. С. 50–53.
6. Рябцев И.А., Кусков Ю.М., Рябцев И.И. Наплавочный сплав с повышенным эффектом вторичного твердения // Материаловедение. 2006. № 12. С. 37–41.
7. Sha W., Guo Z. Maraging Steels: Modeling of Microstructure, Properties and Applications. Cambridge : Woodhead Publishing, 2009. 216 p.
8. Бодяко М.Н., Астанчик С.А., Ярошевич Г.Б. Мартенситностареющие стали. Минск : Наука и техника, 1976. 246 с.
9. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситностареющие стали : книга. М. : Металлургия, 1970. 224 с.
10. Бирман С.Р. Экономнолегированные мартенситностареющие стали : книга. М. : Металлургия, 1974. 208 с.
11. Малинов Л.С., Малинов В.Л. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии : книга. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2007. 346 с.
12. Кардонский В.М. Кремний в мартенситностареющей стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1970. № 7. С. 2.
13. The effect of microstructure on abrasive wear of hard facing alloys / Buchely M.F. [et al.] // Wear. 2005. 259. pp. 52–61. DOI: 10.1016/j.wear.2005.03.002.

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА УПРОЧНЕНИЕ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БЕЗКОБАЛЬТОВОЙ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА НИКЕЛЬХРОМОВОЙ ОСНОВЕ

14. Carson C. Heat Treating of Maraging Steels // Heat Treating of Irons and Steels. 2014. Volume 4D, pp. 468–480. DOI: 10.31399/asm.hb.v04d.a0005948.

15. Llorca J., Gonzalez C. Microstructural factors controlling the strength and ductility of particle-reinforced metal-matrix composites // J. mech. phys. solids. 1998. 46. Pp. 1–28. DOI: 10.1016/S0022-5096(97)00038-0.

16. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали : учебник для вузов. М. : Металлургия, 1985. 408 с.

17. Effect of hard second phase on cavitation erosion of Fe-Cr-Ni-C alloys / Di M.G. [et al.] // Wear. 2005. V. 258. pp. 596–603. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.019.

18. Korshunov L.G., Makarov A.V., Chernenko N.L. Ultrafine structures formed upon friction and their effect on the tribological properties of steels // Phys. Met. And Metallography. 2000. V. 90. Suppl. 1. pp. 548–558.

19. Hirth I.P., Rigney D.A. The application of dislocation concepts in friction and wear // Dislocations in Solids. Edited by F.R.N. Nsbarro. 1983. V. 6. Chapter 25. pp. 3–54.

Информация об авторах

Е. Н. Еремин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудование и технологии машиностроительных производств» Омского государственного технического университета.

Н. Кузьмин – ассистент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств» Омского государственного технического университета.

А. С. Лосев – старший преподаватель кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств» Омского государственного технического университета.

С. А. Бородин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств» Омского государственного технического университета.

И. А. Пономарёв – старший преподаватель кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств» Омского государственного технического университета.

REFERENCES

1. Riabtsev, I.A. (2004). Surfacing of machine parts and mechanisms. Kiev : Ekotekhnologiya. 159. (In Russ.).

2. IUzvenko, Iu.A., Kiriliuk, G.A. (1973). Surfacing with powder wire : scientific and technical about mechanical engineering. prom-sti. un-t tech. progress in mechanical engineering. part-time. advanced training courses for IT specialists in welding technology and equipment. M. : Mashinostroenie. 45. (In Russ.).

3. Sokolov, G.N., Lysak, V.I. (2005). Surfacing of wear-resistant alloys on press dies and tools for hot deformation of steels : monograph. Volgograd : VSTU. 283. (In Russ.).

4. Kalianov, V.N., Bagrov, V.A. (2003). Martensitic aging steels for surfacing stamps. *Welding International*. 2. 35-37. (In Russ.).

5. Kondratev, I.A., Riabtsev, I.A. Cherniak, Ia.P. (2006). Powder wire for surfacing a layer of martensitic aging steel. *The Paton Welding Journal*. 4. 50-53. (In Russ.).

6. Riabtsev, I.A., Kuskov, Iu.M., Riabtsev, I.I. (2006). Surfacing alloy with increased secondary hardening effect. *Materials science*. 12. 37-41.

7. Sha, W., Guo, Z. Maraging Steels: Modeling of Microstructure, Properties and Applications. Cambridge : Woodhead Publishing, 2009. 216 p.

8. Bodyako, M.N., Astanchik, S.A., Yaroshevich, G.B. (1976). Martensitic aging steels. Minsk : Nauka i tekhnika. 246. (In Russ.).

9. Perkass, M.D., Kardonskij, V.M. (1970). High-strength martensitic aging steels. M. : Metallurgiya. 224. (In Russ.).

10. Birman, S.R. (1974). Economically alloyed martensitic aging steels. M. : Metallurgiya. 208. (In Russ.).

11. Malinov, L.S., Malinov, V.L. (2007). Economically alloyed alloys with martensitic transformations and hardening technologies. Harkov : NNC HFTI. 346. (In Russ.).

12. Kardonskij, V.M. (1970). Silicon in martensitic aging steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 7. 2-6. (In Russ.).

13. Buchely, M.F. [et al.]. (2005). The effect of microstructure on abrasive wear of hard facing alloys. *Wear*. 259. 52-61. DOI: 10.1016/j.wear.2005.03.002.

14. Carson, C. (2014). Heat Treating of Maraging Steels. *Heat Treating of Irons and Steels*. Volume 4D. 468-480. DOI: 10.31399/asm.hb.v04d.a0005948.

15. Llorca, J., Gonzalez, C. (1998). Microstructural factors controlling the strength and ductility of particle-reinforced metal-matrix composites. *J. mech. phys. solids*. 46. 1-28. DOI: 10.1016/S0022-5096(97)00038-0.

16. Goldshtein, M.I., Grachev, S.V., Veksler, Iu.G. (1985). Special steels : textbook for universities. M. : Metallurgiya. 408. (In Russ.).

17. Di, M.G. [et al.]. (2005). Effect of hard second phase on cavitation erosion of Fe-Cr-Ni-C alloys. *Wear*. 258. 596-603. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.019.

18. Korshunov, L.G., Makarov, A.V., Chernenko, N.L. (2000). Ultrafine structures formed upon friction and their effect on the tribological properties of steels. *Phys. Met. And Metallography*. 90. 1. 548-558.

19. Hirth, I.P., Rigney, D.A. (1983). The application of dislocation concepts in friction and wear. *Dislocations in Solids*. Edited by F.R.N. Nsbarro. 6. Chapter 25. 3-54.

Information about the authors

E.N. Eremin - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Equipment and Technologies of Machine-building Industries of Omsk State Technical University.

N. Kuzmin - Assistant of the Department Equipment and Technologies of machine-building industries of Omsk State Technical University.

A.S. Losev - Senior lecturer at the Department of Equipment and Technologies of machine-building industries of Omsk State Technical University.

S.A. Borodikhin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Equipment and Technologies of Machine-building industries of Omsk State Technical University.

I.A. Ponomarev - Senior lecturer at the Department of Equipment and Technologies of machine-building industries of Omsk State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 19 Nov 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.