

УДК 620.178.162

## Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному газоабразивному изнашиванию

А.А. Артемьев, Д.В. Прияткин, И.В. Зорин, В.И. Лысак

Волгоградский государственный технический университет,  
просп. им. Ленина, 28, г. Волгоград 400005, Россия

Поступила в редакцию 26.03.2024.

После доработки 08.08.2024.

Принята к публикации 12.08.2024.

Разработана методика и установка для испытаний материалов на стойкость к газоабразивному изнашиванию при нормальной и повышенных до 1000 °С температурах. Результаты испытаний позволяют сделать обоснованный выбор наплавочных материалов для восстановления рабочих поверхностей деталей тягодутьевых машин, промышленных вентиляторов, засыпных устройств доменных печей, газотурбинных установок и другого оборудования. Определены зависимости величины износа некоторых наплавленных сплавов от температуры испытаний, скорости газоабразивного потока и угла его атаки поверхности образцов. Показано, что в условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания при малых углах атаки и повышенной скорости абразивных частиц целесообразно применение эвтектических сплавов с пониженным содержанием дорогостоящих карбидообразующих элементов и углерода, а при больших углах атаки и низкоскоростном абразиве — жаростойких и жаропрочных сталей аустенитного класса. Установлено, что наибольшей стойкостью к газоабразивному изнашиванию при нормальной температуре среди испытанных обладает зарубежный наплавленный сплав 600X23B7M7B2C2ФТ, характеризующийся самым высоким уровнем легирования и объемной долей упрочняющих фаз. При повышении температуры испытаний до 600 °С его износостойкость снижается в 2,5 раза, уступая показателю экспериментального сплава 280X14H6Г6M3T2B2. Методом электронно-ионной микроскопии изучены процессы деструкции тонких поверхностных слоев сплавов, позволившие оценить влияния их структурно-фазового состава на механизмы высокотемпературного изнашивания. Изучение характера изнашивания сплава 280X14H6Г6M3T2B2 показало, что под ударным воздействием абразива происходит формирование трещин в пластинчатых карбидах  $Me_3C_2$  и  $Me_7C_3$ , однако высокая пластичность легированного никелем аустенита снижает вероятность выкрашивания образующихся осколков. При этом мелкие карбиды  $(Ti, Nb, Mo)_x C_y$  и  $Mo_2C$  компактной формы сдерживают пластическую деформацию аустенитно-карбидной эвтектики без разрушения.

**Ключевые слова:** методика испытаний, газоабразивный износ, температура, износостойкость, наплавленный сплав, структура, карбиды, аустенит.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-289-299

**Адрес для переписки:**

А.А. Артемьев  
Волгоградский государственный технический университет,  
просп. им. Ленина, 28, г. Волгоград 400005, Россия  
e-mail: Artspace5@yandex.ru

**Для цитирования:**

А.А. Артемьев, Д.В. Прияткин, И.В. Зорин, В.И. Лысак.  
Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному газоабразивному изнашиванию.  
Трение и износ.  
2024. – Т. 45, № 4. – С. 289–299.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-289-299

**Address for correspondence:**

A.A. Artem'ev  
Volgograd State Technical University,  
Lenin Avenue, 28, Volgograd 400005, Russia  
e-mail: Artspace5@yandex.ru

**For citation:**

A.A. Artem'ev, I.V. Zorin, D.V. Priyatkin, and V.I. Lysak.  
[Methodology for Testing Welded Alloys for Resistance to High-Temperature Gas-Abrasive Wear].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 4, pp. 289–299 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-289-299

# Methodology for Testing Welded Alloys for Resistance to High-Temperature Gas-Abrasive Wear

A.A. Artem'ev, I.V. Zorin, D.V. Priyatkin, and V.I. Lysak

Volgograd State Technical University,  
Lenin Avenue, 28, Volgograd 400005, Russia

Received 26.03.2024.

Revised 08.08.2024.

Accepted 12.08.2024.

## Abstract

We developed a methodology and setup for testing materials for resistance to gas-abrasive wear at normal and elevated temperatures up to 1000 °C. The test results allow us to choose welding materials for restoring the working surfaces of components in drawbench machines, industrial fans, charging devices for blast furnaces, gas turbine installations, and other equipment. We determined the wear rate of certain welded alloys based on the test temperature, gas-abrasive flow velocity, and the attack angle of the specimen surface. We elucidated that under conditions of high-temperature gas-abrasive wear at small attack angles and increased velocity of abrasive particles, it is advisable to use eutectic alloys with reduced content of expensive carbide-forming elements and carbon. At large attack angles and low-speed abrasion, heat-resistant steels and heat-resistant austenitic-class steels are recommended. Among the tested materials, welded alloy C6,0Cr23Nb7Mo7W2Si2VT exhibited the highest resistance to gas-abrasive wear at normal temperature, characterized by the highest level of alloying and a volumetric fraction of strengthening phases. As the test temperature increased to 600 °C, its wear resistance decreased by 2.5 times, indicating inferior performance compared to the experimental alloy C2,8Cr14Ni6Mn6Mo3Ti2Nb2. The destruction processes of thin surface layers of alloys were studied using electron-ion microscopy, allowing us to assess the influence of their structural-phase composition on the mechanisms of high-temperature wear. The study of the wear characteristics of alloy C2,8Cr14Ni6Mn6Mo3Ti2Nb2 revealed that under the impact of abrasive, cracks form in the plate-like carbides  $Me_3C_2$  and  $Me_7C_3$ . However, the high ductility of nickel-alloyed austenite reduces the likelihood of splintering of the formed fragments. Additionally, fine compact carbides  $(Ti, Nb, Mo)_x C_y$  and  $Mo_2C$  restrain plastic deformation of the austenitic–carbide eutectic without causing destruction.

**Keywords:** testing methodology, gas-abrasive wear, temperature, wear resistance, welded alloy, structure, carbides, austenite.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-289-299

---

### Адрес для переписки:

А.А. Артемьев  
Волгоградский государственный технический университет,  
просп. им. Ленина, 28, г. Волгоград 400005, Россия  
e-mail: Artspace5@yandex.ru

### Для цитирования:

А.А. Артемьев, Д.В. Прияткин, И.В. Зорин, В.И. Лысак.  
Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к  
высокотемпературному газозабразивному изнашиванию.  
Трение и износ.  
2024. — Т. 45, № 4. — С. 289–299.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-289-299

---

### Address for correspondence:

A.A. Artem'ev  
Volgograd State Technical University,  
Lenin Avenue, 28, Volgograd 400005, Russia  
e-mail: Artspace5@yandex.ru

### For citation:

A.A. Artem'ev, I.V. Zorin, D.V. Priyatkin, and V.I. Lysak.  
[Methodology for Testing Welded Alloys for Resistance to  
High-Temperature Gas-Abrasive Wear].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 4, pp. 289–299 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-289-299

## Список использованных источников

1. Шумилов А.А., Штанько П.К., Гордиенко В.Н. Разработка наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей тягодутьевых машин тепловых электростанций // Вестник СевНТУ. — 2010, № 110, 216—218
2. Юзвенко Ю.А. [и др.] Дуговая наплавка деталей засыпного устройства доменной печи // Автоматическая сварка. — 1972, № 2, 59—63
3. Клейс И.Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газоабразивного изнашивания // Трение и износ. — 1980, № 2, 263—271
4. Полярус Е.Н., Уманский А.П., Стельмах А.У. [и др.] Влияние состава материалов на механизм их высокотемпературного газоабразивного изнашивания // Вестник двигателестроения. — 2017, № 2, 149—152
5. Gee M.G. and Hutchings I.M. General Approach and Procedures for Erosive Wear Testing // Measurement Good Practice Guide. — 2002, no. 51, 42
6. Жудра А.П. Исследование износостойкости композиционных сплавов в условиях газоабразивного износа при повышенных температурах // Автоматическая сварка. — 2014, № 11, 31—34
7. Kleis I. and Kulu P. Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control. — London: Springer. — 2008
8. Badisch E. [et al.] Wear Behaviour of Hardfaced Fe-Cr-C Alloy and Austenitic Steel under 2-Body and 3-Body Conditions at Elevated Temperature // Tribology International. — 2010 (43), no. 7, 1234—1244
9. Higuera Hidalgo [et al.] High Temperature Erosion Wear of Flame and Plasma-Sprayed Nickel-Chromium Coatings under Simulated Coal-Fired Boiler Atmospheres // Wear. — 2001, no. 247, 214—222
10. Shimizu K. [et al.] Erosive Wear Properties of High V-Cr-Ni Stainless Spheroidal Carbides Cast Iron at High Temperature // Wear. — 2009 (267), no. 1-4, 104—109
11. Zhang Y. [et al.] Effect of Co Addition on High Temperature Erosive Wear Characteristics of Fe-C-Cr-Mo-W-V Multi-Component White Cast Iron // Materials Transactions. — 2017 (58), no. 6, 927—931
12. Тхабисимов А.Б., Качалин Г.В., Медников А.Ф. [и др.] Экспериментальный стенд для изучения абразивной стойкости конструкционных материалов и защитных покрытий // Естественные и технические науки. — 2013, № 5(67), 234—238
13. Артемьев А.А., Антонов А.А., Соколов Г.Н. [и др.] Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному абразивному изнашиванию // Трение и износ. — 2017 (38), № 3, 247—254
14. Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Лысак В.И. Исследование наплавленного металла системы

Fe-Cr-Ni-Mn-Mo-Ti-Nb-C для работы в условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания // Вопросы материаловедения. — 2022, № 3(111), 17—28

15. Терещенко А.Ф., Шимановский В.П., Юзвенко Ю. А. Исследование струйного износа наплавленного металла // Автоматическая сварка. — 1966, № 11, 32—35

## References

1. Shumilov A.A., Shtan'ko P.K., Gordienko V.N. Razrabotka naplavochnykh materialov dlya povysheniya iznosostojkosti detalej tyagodut'evykh mashin teplovykh elektrostancij // Vestnik SevNTU. — 2010, № 110, 216—218 (in Russian)
2. Yuzvenko Yu.A. [i dr.] Dugovaya naplavka detalej zasypnogo ustrojstva domennoj pechi // Avtomaticheskaya svarka. — 1972, № 2, 59—63 (in Russian)
3. Kleis I.R. Osnovy vybora materialov dlya raboty v usloviyah gazoabrazivnogo iznashivaniya // Trenie i iznos. — 1980, № 2, 263—271 (in Russian)
4. Polyarus E.N., Umanskij A.P., Stel'mah A.U. [i dr.] Vliyanie sostava materialov na mekhanizm ih vysokotemperaturnogo gazoabrazivnogo iznashivaniya // Vestnik dvigatelestroeniya. — 2017, № 2, 149—152 (in Russian)
5. Gee M.G. and Hutchings I.M. General Approach and Procedures for Erosive Wear Testing // Measurement Good Practice Guide. — 2002, no. 51, 42
6. Zhudra A.P. Issledovanie iznosostojkosti kompozicionnykh splavov v usloviyah gazoabrazivnogo iznosa pri povyshennykh temperaturah // Avtomaticheskaya svarka. — 2014, № 11, 31—34 (in Russian)
7. Kleis I. and Kulu P. Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control. — London: Springer. — 2008
8. Badisch E. [et al.] Wear Behaviour of Hardfaced Fe-Cr-C Alloy and Austenitic Steel under 2-Body and 3-Body Conditions at Elevated Temperature // Tribology International. — 2010 (43), no. 7, 1234—1244
9. Higuera Hidalgo [et al.] High Temperature Erosion Wear of Flame and Plasma-Sprayed Nickel-Chromium Coatings under Simulated Coal-Fired Boiler Atmospheres // Wear. — 2001, no. 247, 214—222
10. Shimizu K. [et al.] Erosive Wear Properties of High V-Cr-Ni Stainless Spheroidal Carbides Cast Iron at High Temperature // Wear. — 2009 (267), no. 1-4, 104—109
11. Zhang Y. [et al.] Effect of Co Addition on High Temperature Erosive Wear Characteristics of Fe-C-Cr-Mo-W-V Multi-Component White Cast Iron // Materials Transactions. — 2017 (58), no. 6, 927—931
12. Thabisimov A.B., Kachalin G.V., Mednikov A.F. [i dr.] Eksperimental'nyj stend dlya izucheniya abrazivnoj stojkosti konstrukcionnykh materialov i

- zashchitnyh pokrytij // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. — 2013, № 5(67), 234—238 (in Russian)
13. **Artem'ev A.A., Antonov A.A., Sokolov G.N., and Lysak V.I.** Test Procedure of Cladded Alloys for Resistance Against High Temperature Abrasive Wear // Journal of Friction and Wear. — 2017 (38), no. 3, 225—230
  14. **Priyatkin D.V., Artem'ev A.A., Lysak V.I.** Issledovanie naplavlennogo metalla sistemy Fe-Cr-Ni-Mn-Mo-Ti-Nb-C dlya raboty v usloviyah vysokotemperaturnogo gazoabrazivnogo iznashivaniya // Voprosy materialovedeniya. — 2022, № 3(111), 17—28 (in Russian)
  15. **Tereshchenko A.F., Shimanovskij V.P., Yuzvenko Yu.A.** Issledovanie strujnogo iznosa naplavlennogo metalla // Avtomaticheskaya svarka. — 1966, № 11, 32—35 (in Russian)

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)