

УДК 669.15-194;621.879.064

Влияние химического состава и температуры отпуска металла зубьев ковшей экскаватора на их эксплуатационные свойства

О.В. Швецов, Б.С. Ермаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., д. 29, литера Б, г. Санкт-Петербург 195251,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, Россия

Поступила в редакцию 04.08.2025.

Снижение металлоёмкости инструмента, применяемого при добыче твёрдых ископаемых, напрямую связано с его износостойкостью. В работе проведены исследования, направленные на получение научно обоснованных требований к выбору материала для зубьев ковшей экскаваторов. Цель работы — определение оптимального химического состава и конечной термической обработки для обеспечения необходимого комплекса механических свойств металла зубьев ковшей экскаватора для использования в различных условиях эксплуатации.

Опытные образцы сталей производили в индукционных печах ёмкостью до 120 кг. Термическую обработку металла проводили в закалочном масле при высоком или низком отпуске. Для испытаний на износостойкость использовали схему трения, при которой закреплённый в шпинделе станка образец совершает поперечное движение и одновременно вращается вокруг своей оси.

Самые высокие прочностные показатели у стали с 0,4 % С (1720 МПа временное сопротивление) по сравнению с 0,3 % С (1680 МПа) при одном уровне пластических характеристик. Анализ результатов испытаний на износостойкость, показал наиболее жёсткие условия износа при использовании абразиве SiC размерностью 200 мкм (66—71 м/г; 82—89 м/г). Высокая твёрдость стали после закалки и низкого отпуска гарантирует лучшую сопротивляемость износу 130—133 м/г, по сравнению с закалкой и высоким отпуском 95—110 м/г. Основными механизмами износа при изнашивании является микрорезание и пластическое оттеснение.

Учитывая результаты исследований и условия применения ковшей экскаваторов при добыче различных горных пород, для зубьев ковшей рекомендованы следующие стали: сталь 30ХГНМФЛ для условий, где необходима высокая износостойкость и хладостойкость; сталь 40Х2ГН2МФЛ (№ 3) для более умеренного климата. Низкий отпуск после закалки стали рекомендуется для более умеренного климата, для обеспечения хладостойкости необходима закалка и высокий отпуск.

Ключевые слова: легированная сталь, хладостойкость, износостойкость, микрорезание, оттеснение, механические свойства, микроструктура, твёрдость.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-467-475

Адрес для переписки:

О.В. Швецов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., д. 29, литера Б, г. Санкт-Петербург 195251,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, Россия
e-mail: Shvec_off@mail.ru

Для цитирования:

О.В. Швецов, Б.С. Ермаков.
Влияние химического состава и температуры отпуска металла зубьев ковшей экскаватора на их эксплуатационные свойства.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 5. — С. 467—475.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-467-475

Address for correspondence:

O.V. Shvetsov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Politekhnicheskaya Street, 29, Building B, Akademicheskoye Municipal
District, Saint Petersburg 195251, Russia
e-mail: Shvec_off@mail.ru

For citation:

O.V. Shvetsov and B.S. Ermakov.
[The Influence of Chemical Composition and Tempering Temperature of Metal Teeth of Excavator Buckets on Their Operational Properties].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 467—475 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-467-475

The Influence of Chemical Composition and Tempering Temperature of Metal Teeth of Excavator Buckets on Their Operational Properties

O.V. Shvetsov and B.S. Ermakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Politekhnikeskaya str., 29, Building B, Akademicheskoye Municipal District, Saint Petersburg 195251, Russia

Received 04.08.2025.

Abstract

Mining of solid minerals is associated with increased metal consumption of the tool used, which is associated with wear resistance, therefore, in order to reduce the metal consumption of the industry, it is necessary to increase the wear resistance of the tool. The matrix structure for excavator bucket teeth is martensite, but as a rule, not only the hardness determines the metal's ability to resist wear, but also a certain proportion of plasticity and viscosity. An analysis of operational experience provides some information regarding the durability of teeth with various mechanical properties, but there are still no scientifically sound requirements for the choice of material for excavator bucket teeth.

The aim of the work is to determine the optimal chemical composition and final heat treatment to provide the necessary set of mechanical properties of the metal teeth of the excavator buckets, depending on the operating conditions.

Experimental samples were produced in induction furnaces with a capacity of up to 120 kg. The heat treatment of the samples consisted of quenching in oil and high or low tempering for each sample. The wear resistance test was carried out on an installation representing a sample fixed in the spindle of the machine, which makes a transverse movement and simultaneously rotates around its axis.

Steel with 0.4 % C (1720 MPa temporary resistance) has the highest strength indicators compared to 0.3 % C (1680 MPa) at the same level of plastic characteristics. An analysis of the wear resistance test results showed the most severe wear conditions for SiC abrasives with a dimension of 200 microns (66—71 m/g; 82—89 m/g). The high hardness of the steel after quenching and low tempering guarantees better wear resistance of 130—133 m/g, compared with quenching and high tempering of 95—110 m/g. The main mechanisms of wear during wear are micro-cutting and plastic extrusion.

Taking into account the established requirements for steels for excavator bucket teeth, the corresponding 30KHGNMFL (No. 1) steels are recommended for various rock conditions, where high wear resistance and cold resistance are required, and 40KH2GN2MFL (No. 3) steel for a more temperate climate. Low tempering after quenching is recommended for a more temperate climate, quenching and high tempering are necessary to ensure cold resistance.

Keywords: alloy steel, cold resistance, wear resistance, micro-cutting, displacement, mechanical properties, microstructure, hardness.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-467-475

Адрес для переписки:

О.В. Швецов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., д. 29, литера Б, г. Санкт-Петербург 195251,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, Россия
e-mail: Shvec_off@mail.ru

Для цитирования:

О.В. Швецов, Б.С. Ермаков.
Влияние химического состава и температуры отпуска металла
зубьев ковшей экскаватора на их эксплуатационные свойства.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 5. — С. 467—475.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-467-475

Address for correspondence:

O.V. Shvetsov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Politekhnikeskaya Street, 29, Building B, Akademicheskoye Municipal
District, Saint Petersburg 195251, Russia
e-mail: Shvec_off@mail.ru

For citation:

O.V. Shvetsov and B.S. Ermakov.
[The Influence of Chemical Composition and Tempering Temperature
of Metal Teeth of Excavator Buckets on Their Operational Properties].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 467—475 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-467-475

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Слепцов О.И., Шульгинов Б.С., Михайлов В.Е., Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера. — Новосибирск: Наука. — 2012
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Доценко В.А. Абразивные изнашивания бурильного инструмента. — М.: Наука. — 1995
3. Yue Zhao, Abbas Taheri, Murat Karakus, Zhongwei Chen, et al. Effects of Water Content, Water Type and Temperature on the Rheological Behaviour of Slag-Cement and Flyash-Cement Paste Backfill // International Journal of Mining Science and Technology. — 2020 (30), no. 3, 271—278
4. Ivanov S.L., Ivanova P.V., and Kuvshinkin S.Yu. Estimation of Operating Time of Quarry Excavators of Perspective Model Range in Real Operating Conditions // Journal of Mining Institute. — 2020 (242), 228—233
5. Galata L.A., Ermakov B.S., Kancev R.G., and Karzina J.S. The Influence of Microstructure Quality on the Efficiency of Bucket Teeth of Career Excavators // Key Engineering Materials. — 2023 (941), 107—112
6. Ермаков Б.С., Вологжанина С.А., Ермаков С.Б., Швецов О.В. Причины ускоренного выхода из строя коронок ковшей экскаваторов при эксплуатации в условиях Арктических регионов // Черные металлы. — 2024, № 9, 37—43
7. Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Ermakov S.B., and Vologzhanina S.A. Investigation of the Influence of Cast Microstructure on the Operability of the Crown of a Quarry Excavator // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. — 2025 (1), № 469, 59—71
8. Шамония, В.П., Михайловский А.И., Ковальчук В.А., Благих Б.М. Долговечность зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-8 в условиях Норильска // Горный журнал. — 1966, № 7, 53—56
9. Jie Li, Liuji Xu, Yu Feng, Shubo Wu et al. Hardening Mechanism of High Manganese Steel during Impact Abrasive Wear // Engineering Failure Analysis. — 2023 (154), 107716. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107716
10. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. — М: Metallurgy. — 1979
11. Meshkov A.A., Kazanin O.I., and Sidorenko A.A. Improving the Efficiency of the Technology and Organization of the Longwall Face Move during the Intensive Flat-Lying Coal Seams Mining at the Kuzbass Mines // Journal of Mining Institute. — 2021 (249), no. 5, 342—350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3
12. Берштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка стали: Учебник. В 3-х т. — М: Metallurgy. — 1983
13. Barrett Ch. and Massalsky T. Structure of Metals. — Metallurgy. — 1984
14. Солнцев Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы:

учебник для вузов. — Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ. — 2020

15. Korchynsky M. Advanced Metallic Structural Materials and a New Role for Microalloyed Steels // Materials Science Forum. — Trans. Tech. Publications Ltd. — 2005 (500), 471—480

References

1. Sleptsov O.I., Shulginov B.S., Mikhailov V.E., Sivtsev M.N., and Sleptsov G.N. Improving the Strength of Welded Metal Structures of Mining and Transport Equipment in the North. — Novosibirsk: Nauka. — 2012 (in Russian)
2. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Dotsenko V.A. Abrasive Wear of Drilling Tools. — Moscow: Nauka. — 1995 (in Russian)
3. Yue Zhao, Abbas Taheri, Murat Karakus, Zhongwei Chen, et al. Effects of Water Content, Water Type and Temperature on the Rheological Behaviour of Slag-Cement and Flyash-Cement Paste Backfill // International Journal of Mining Science and Technology. — 2020 (30), no. 3, 271—278
4. Ivanov S.L., Ivanova P.V., and Kuvshinkin S.Yu. Estimation of Operating Time of Quarry Excavators of Perspective Model Range in Real Operating Conditions // Journal of Mining Institute. — 2020 (242), 228—233
5. Galata L.A., Ermakov B.S., Kancev R.G., and Karzina J.S. The Influence of Microstructure Quality on the Efficiency of Bucket Teeth of Career Excavators // Key Engineering Materials. — 2023 (941), 107—112
6. Ermakov B.S., Vologzhanina S.A., Ermakov S.B., and Shvetsov O.V. Causes of Accelerated Failure of Excavator Bucket Teeth Crowns when Operating in Arctic Regions // Chernye Metally. — 2024, № 9, 37—43 (in Russian)
7. Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Ermakov S.B., and Vologzhanina S.A. Investigation of the Influence of Cast Microstructure on the Operability of the Crown of a Quarry Excavator // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. — 2025 (1), № 469, 59—71
8. Shamonya V.P. Durability of the Teeth of Buckets Excavators EKG-8 in the Conditions of Norilsk // Mining Journal. — 1966, 53—56 (in Russian)
9. Jie Li, Liuji Xu, Yu Feng, Shubo Wu et al. Hardening Mechanism of High Manganese Steel during Impact Abrasive Wear // Engineering Failure Analysis. — 2023 (154), 107716. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107716
10. Davydov N.G. High-Manganese Steel. — Moscow: Metallurgy. — 1979 (in Russian)
11. Meshkov A.A., Kazanin O.I., and Sidorenko A.A. Improving the Efficiency of the Technology and Organization of the Longwall Face Move during the Intensive Flat-Lying Coal Seams Mining at the Kuzbass Mines // Journal of Mining Institute. — 2021 (249), no. 5, 342—350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3

12. **Berstein M.L.** Metallurgy and Heat Treatment of Steel: Textbook. In 3 vol. — Moscow: Metallurgy. — 1983 (in Russian)
13. **Barrett Ch. and Massalsky T.** Structure of Metals. — Metallurgy. — 1984
14. **Solntsev Yu.P.** Cold-Resistant Steels and Alloys: Textbook for Universities. — Saint Petersburg: Khimizdat. — 2020 (in Russian)
15. **Korchynsky M.** Advanced Metallic Structural Materials and a New Role for Microalloyed Steels // Materials Science Forum. — Trans. Tech. Publications Ltd. — 2005 (**500**), 471—480

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