

О.В. Швецов¹, Б.С. Ермаков¹, А.К. Андреев²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, Shvec_off@mail.ru

²Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ ДЛЯ ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА

Аннотация

В работе экспериментально исследовано влияние химического состава и режимов термической обработки на износо- и хладостойкость стали для зубьев ковшей экскаваторов. В результате с учётом установленных требований к сталям для зубьев ковшей экскаваторов для условий различных горных пород рекомендованы соответствующие стали 30ХГНМФЛ, где необходима высокая износостойкость и хладостойкость, сталь 40Х2ГН2МФЛ для более умеренного климата. Низкий отпуск после закалки рекомендуется для более умеренного климата, для обеспечения хладостойкости необходима закалка и высокий отпуск.

Ключевые слова: легированная сталь, износостойкость, температура отпуска, твердость, зуб ковша экскаватора.

Введение

Добыча твердых ископаемых сопряжена с повышенной металлоемкостью используемого инструмента [1]. Следовательно, для снижения металлоемкости отрасли необходимо повышать износостойкость инструмента. За износостойкость металла отвечает не только карбиды в стали ну и структурная матрица, которая должна обеспечивать удержание карбидов при эксплуатации [2]. Матричной структурой для зубьев ковшей экскаваторов является мартенсит, но как правило не только твердостью определяется способность металла сопротивляться износу, но и определенная доля пластичности и вязкости [3, 4]. Для повышения прокаливаемости и твердости карбидов и соответственно износостойкости необходимо легировать сталь такими элементами как Cr, Mo, V, Ni и Si. Учитывая процентное содержание легирующих элементов, необходимо выбрать конечную термическую обработку, а именно температуру отпуска.

В работах [5-9] были проанализированы причины разрушений зубьев и показано, что очагом в большинстве случаев являются дефекты - раковины, несплошности и макротрещины. Физическая природа таких дефектов различна и обусловлена как неправильно подобранными режимами выплавки и термообработки, так и неудовлетворительными свойствами применяемого материала (недостаточной трещиностойкостью) [10-16]. Анализ опыта эксплуатации дает некоторую информацию относительно стойкости зубьев с различными механическими свойствами, однако до сих пор не существует научно обоснованных требований к выбору материала для зубьев ковшей экскаваторов.

Таким образом, целью работы является определение оптимального химического состава и конечной термической обработки для обеспечения необходимым комплексом механических свойств металла зубьев ковшей экскаватора в зависимости от условий эксплуатации.

Методы и материалы

Опытные пробы производились в индукционных печах ёмкостью до 120 кг. В качестве шихтового материала использовались армко-железо, а легирование стандартными ферросплавами. Науглероживание производили графитовым боем электродов, для раскисления стали использовали алюминий, а для модифицирования в жидкую сталь вводили кальцийбарийсодержащий сплав КБКА (ТУ 14-127-105-78). Термическая обработка проб заключалась в закалке в масле и высоком или низком отпуске для каждой пробы. Химический состав проб определялся с помощью эмиссионного спектрометра «Искролайн-100», согласно стандарту ГОСТ 54153–2010. Химический состав проб представлен в таблице 1

Таблица 1 - Химический состав стали образцов проб

Материал	Химические элементы, масс. %							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
1	0,31	0,30	1,06	0,90	0,22	0,98	0,003	0,021
2	0,30	0,31	1,16	3,45	0,40	2,47	0,003	0,021
3	0,40	0,34	1,12	2,20	0,38	1,77	0,0028	0,020

Испытание на износостойкость проводилось на установке представляющую закрепленный в шпинделе станка образец совершает поперечное движение и одновременно вращается вокруг своей оси. Благодаря этому образец не только всегда движется по новому абразиву, но и стачивается равномерного, имея неизменную площадь контакта. Стол с закрепленной на нем абразивной бумагой совершает возвратно поступательные движения в горизонтальной плоскости. По окончании испытания измеряется потеря массы образца, отнесенная к длине пробега.

Для испытаний на изнашивание металлических материалов при трении о закреплённые на бумаге абразивные частицы, были выбраны следующие характеристики образцов: диаметр образца 6 мм; длина образца – 40 мм; площадь 0,283 см². В качестве абразива использовали: SiO₂ - оксид кремния (HV 1000) и SiC - карбид кремния (HV 2200). Размер абразивных частиц составлял 70 мкм и 200 мкм. Испытания проводились при начальных температурах +20°C и -80 °C. Путь трения образца был выбран равным 10 м; удельная нагрузка - 175 и 310 Н; скорость скольжения - 10 м/мин. Перед испытаниями и после них проводилось взвешивание образцов на лабораторных весах с точностью до 0,001 г. После этого поверхность образцов рассматривалась под электронным микроскопом SUPRA 55VP WDS с приставкой рентгеноспектрального анализа с целью определения характера и механизма повреждения поверхности образцов. Измерение твердости проводились на твердомере TP 5006 №85 согласно ГОСТ 9013–59. Металлографические исследования образцов проводились с помощью оптического микроскопа Reichert-Jung при увеличении ×500 и приставки для измерения микротвердости MICRO-DUROMAT 4000E согласно ГОСТ 9450–76, метод Виккерса с нагрузкой 180г (HV_{0,18}). Для выявления микроструктуры металла образцов использовали 3% раствор азотной кислоты (HNO₃) в спирте. Определение механических свойств

металла проб проводили на испытательной машине Instron 8801 и на маятниковом копре Instron мод. 600MPX.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний на механические свойства проб представлены на рис. 1.

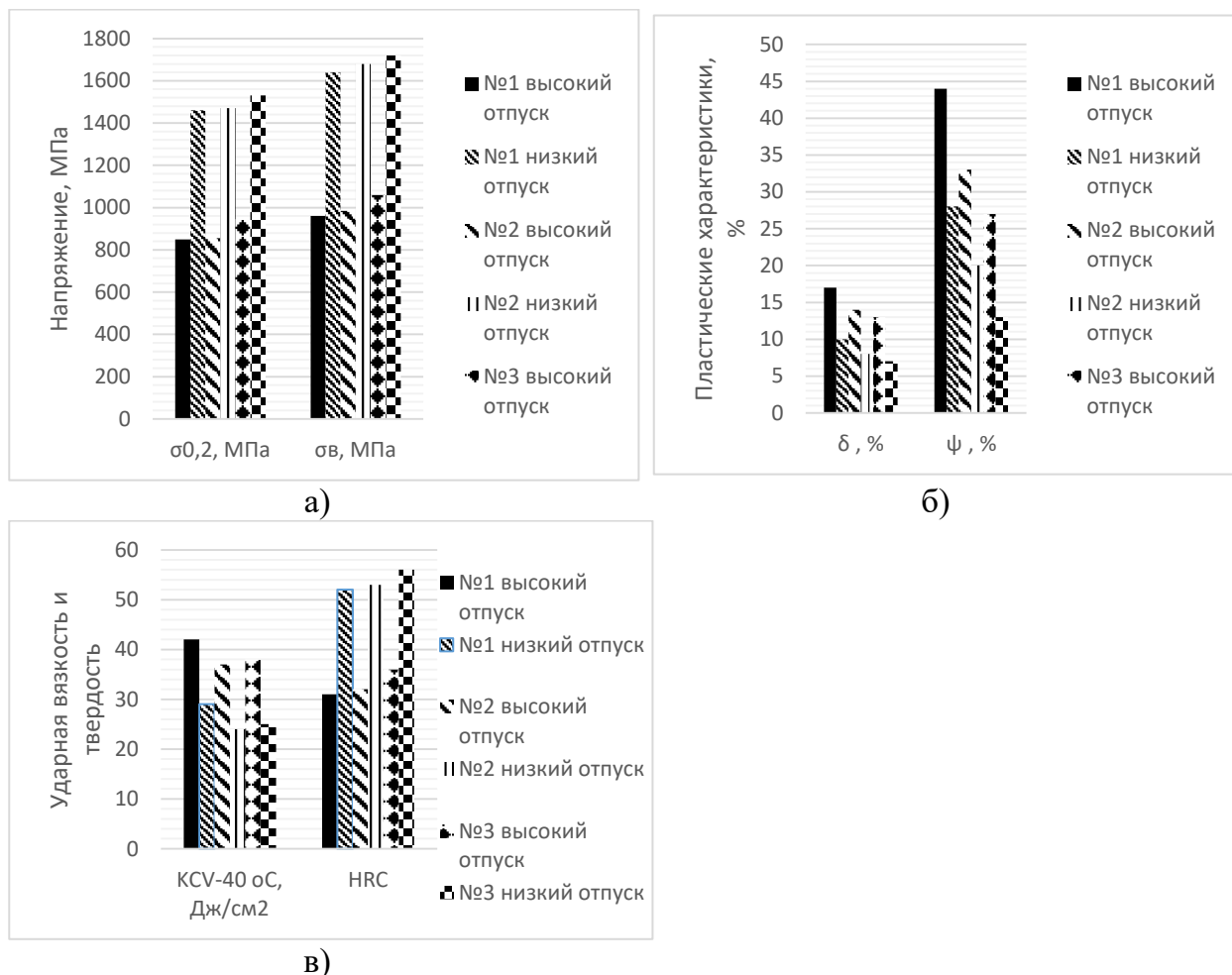


Рисунок 1 – Механические свойства проб: №1 – высокий и низкий отпуск, №2 – высокий и низкий отпуск, №3 – высокий и низкий отпуск; а) предел текучести и временное сопротивление, б) относительное удлинение и сужение, в) ударная вязкость и твердость

Результаты испытаний показали, что в зависимости от содержания углерода, а именно повышение с 0,3 до 0,4 возможно снижение содержание легирующих элементов таких как хром, молибден и никель. При данных изменениях возможно сохранить уровень свойств на одном уровне. Самые высокие прочностные показатели у стали с 0,4 %C (1720 МПа временное сопротивление) по сравнению с 0,3 %C (1680 МПа). Пластические характеристики примерно на одном уровне. Относительно высокий показатель ударной вязкости (29 Дж/см²) у стали с минимальным легированием до 1% Cr и Ni. В результате для подобных марок сталей для эксплуатации твердых пород требуется закалка и низкий отпуск при умеренном климате, при необходимости в хладостойкости режим термической обработки будет закалка и высокий отпуск. Для обеспечения необходимого комплекса свойств, после закалки и отпуска в стали формируется микроструктура, представленная на рис. 2.

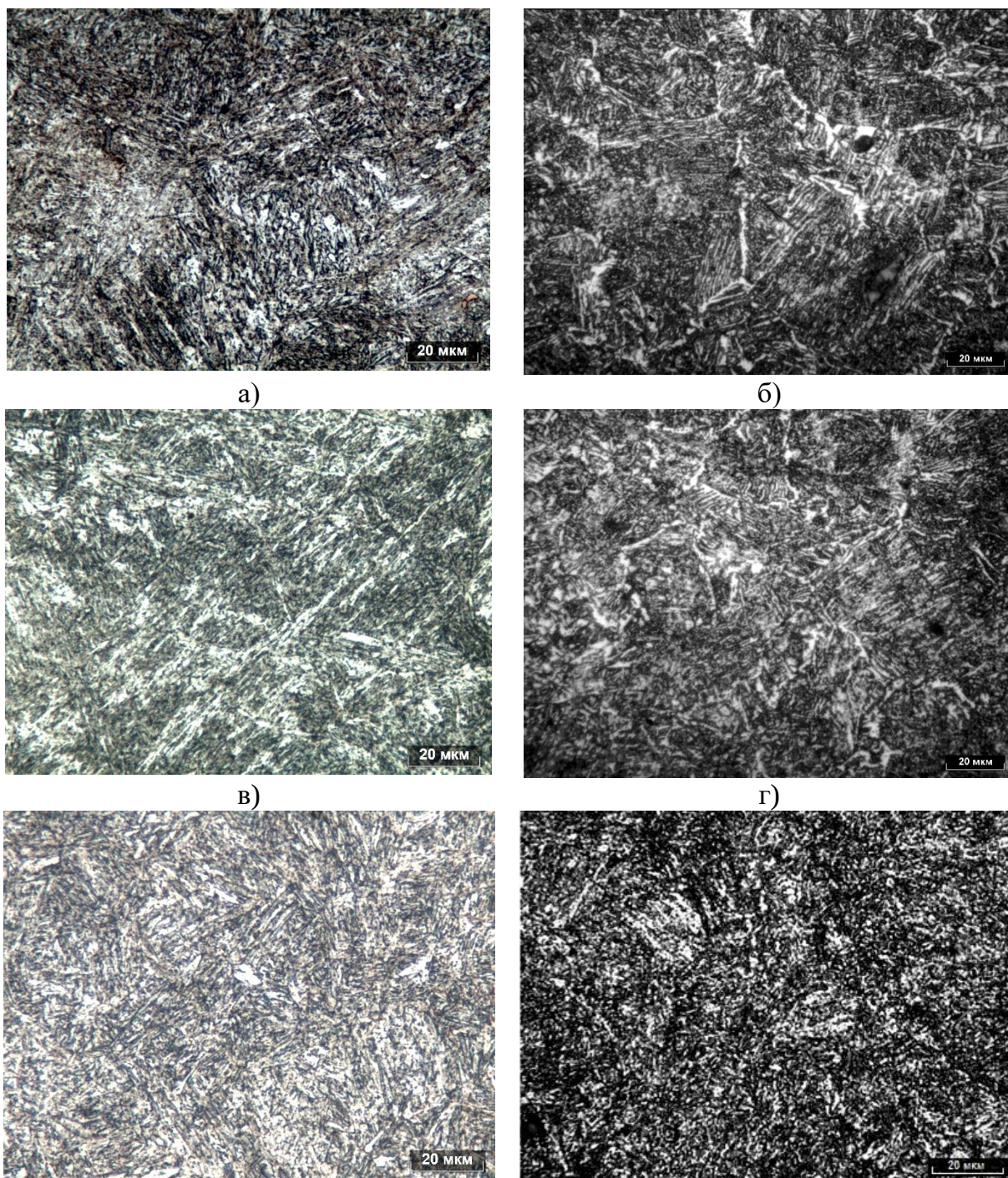


Рисунок 2 – Микроструктура проб: а) низкий отпуск проба №1; б) высокий отпуск проба №1; в) низкий отпуск проба №2; г) высокий отпуск проба №2; д) низкий отпуск проба №3; е) высокий отпуск проба №3

Микроструктура сталей №1, 2 и 3 после низкого отпуска представляет собой мартенсит отпуска, различной дисперсности. У стали №1 дисперсность в среднем 7,2 мкм, у стали №2–5,5 мкм, у стали №3–2,88 мкм. Микроструктура сталей №1-3 после высокого отпуска представляет собой смесь троостита и сорбита разной дисперсностью. У стали №1 дисперсность в среднем 7,8 мкм, у стали №2–6,7 мкм, у стали №3–3,88 мкм.

На рис. 3 представлены гистограммы влияния твердости на износостойкость стали.

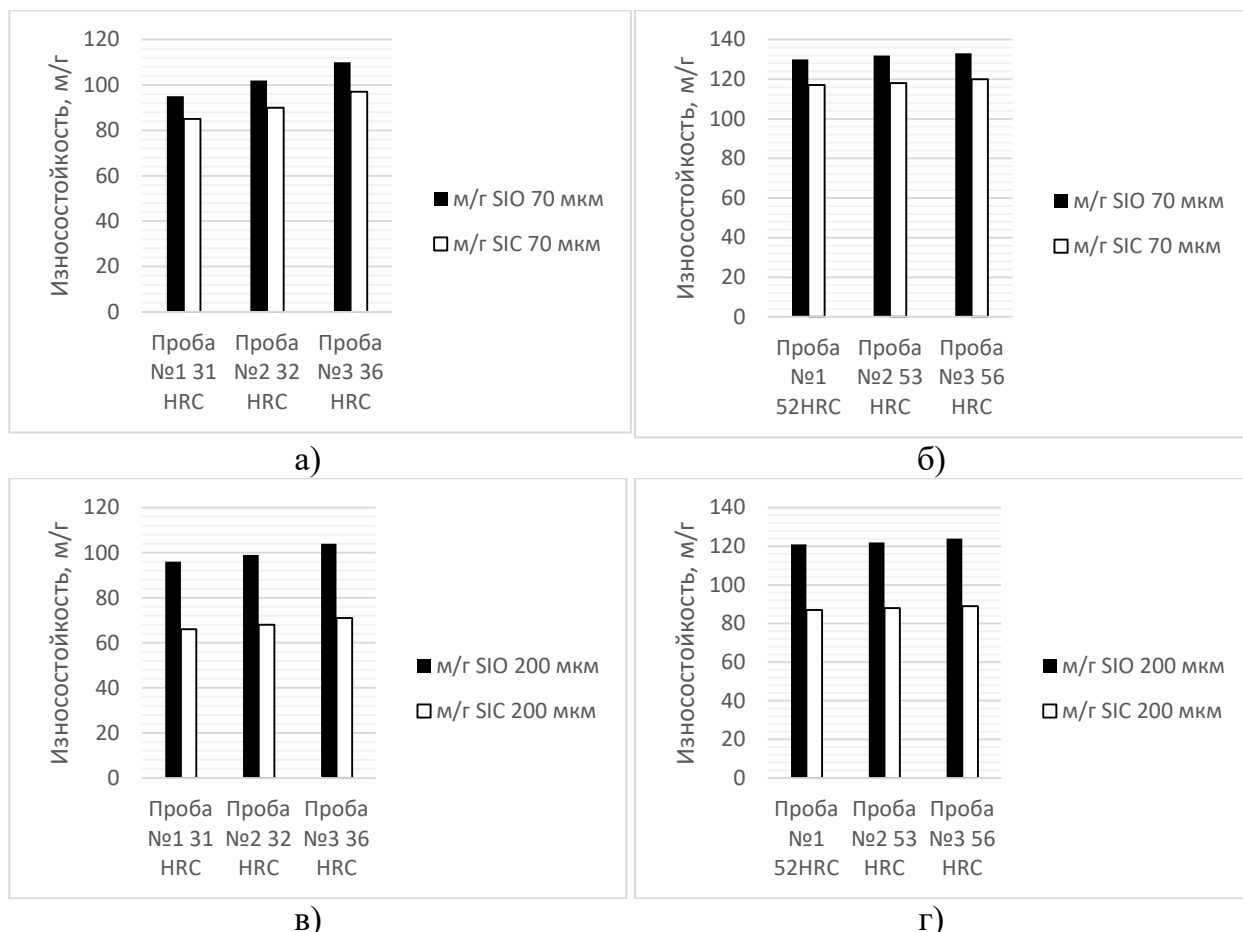


Рисунок 3 – Влияние твердости стали на износостойкость: размер абразива 70 мкм (а,б); 200 мкм (в,г); закалка и высокий отпуск (а,в); закалка и низкий отпуск (б, г).

Анализ результатов показал наиболее жесткие условия износа при абразиве SiC размерностью 200 мкм (66–71 м/г; 82–89 м/г). Высокая твердость стали после закалки и низкого отпуска гарантирует лучшую сопротивляемость износу 130–133 м/г, по сравнению с закалкой и высоким отпуск 95–110 м/г.

Поверхности образцов после проведения испытаний анализировались для определения механизма износа рис. 4.

Механизмы износа делятся на два основных микрорезания и оттеснения. На рис. 4 а фрагмент повреждения, которое образовалось в результате микрорезания с отделением стружки. Грубые риски образовались в результате микрорезания, на рис. 4 б отчетливо видны остатки стружки, которые частично связаны с металлом. На рис. 4 в участки грубых рисков с выявленными механизмами их образования: - в результате микрорезания; - в результате царапания с пластическим оттеснением металла в виде гребешков на боковые стенки рисков. Пластическое оттеснение с внедрением минерала представлено на рис. 4 г. На рис. 4 д преобладают очень мелкие царапины с пластическим оттеснением металла в виде гребня. На рис. 4 е внедрение минерала с малой пластикой оттеснения металла, отчетливо виден хрупкий скол.

Как было показано выше, наиболее опасным механизмом износа является микрорезание, которое представляет собой отделение материала путем образования микростружки. Микростружка формируется в результате однократного воздействия абразивной частицы. Однако несмотря на то, что в грунте минеральные частицы округлены и закреплены недостаточно прочно, если хотя бы в одном из тысячи контактов оно будет реализовано, то этот механизм будет преобладающим.

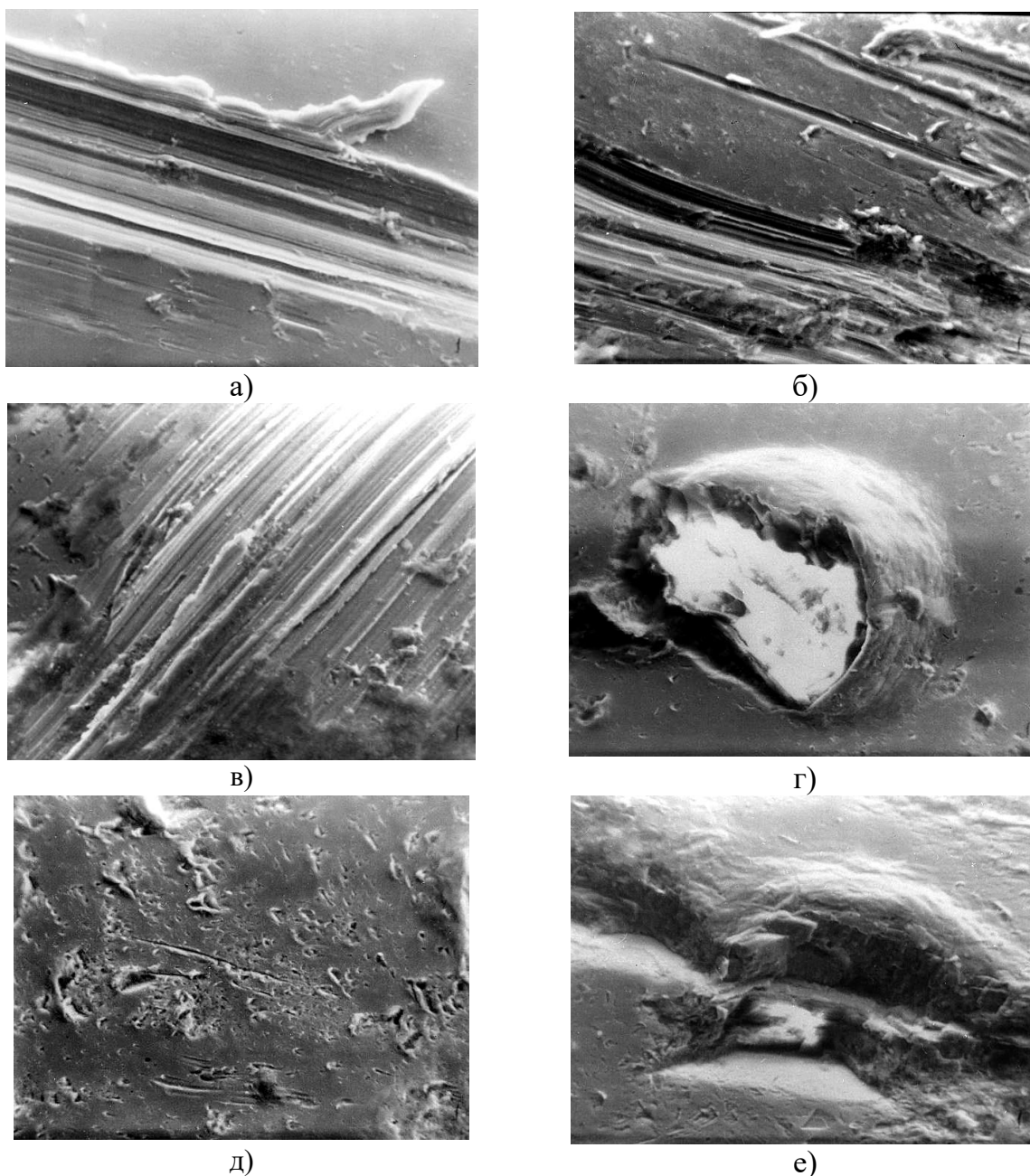


Рисунок 4 – Механизмы износа на поверхности образцов после: микрорезанье (а, б, в); оттеснение металла (г, д, е)

Пластическое оттеснение – в зависимости от относительной глубины внедрения в направлении скольжения абразивной частицы сопровождается возникновением гребешка деформированного металла, который поднимается при относительном движении.

Фрактографическими исследованиями показано, что при увеличении твердости металла происходит переход от микрорезания к пластическому оттеснению, что обуславливает рост износостойкости.

На основании проведенных исследований с учётом установленных требований к сталям для зубьев ковшей экскаваторов для условий различных горных пород рекомендованы соответствующие стали 30ХГНМФЛ (сталь 1), где необходима высокая износостойкость и хладостойкость, сталь 40Х2ГН2МФЛ (проба 3) для более умеренного климата. Низкий отпуск после закалки рекомендуется для более умеренного климата, для обеспечения хладостойкости необходима закалка и высокий отпуск.

Заключение

Установлено, что стали с 0,3–0,4 С легированные хромом, марганцем и никелем после закалки и отпуска обладают требуемым комплексом механических свойств удовлетворяющим условиям эксплуатации зубьев ковшей экскаваторов. Микроструктура в зависимости от отпуска представляет собой мартенсит отпуска или смесь сорбита и троостита разной дисперсностью. Природа абразива и его размерность существенно влияют на скорость изнашивания. Повышение износостойкости за счет повышения твердости стали работает только до определенного уровня затем металл становится хрупким и происходят процессы выкрашивания. исследованиями показано, что при увеличении твердости металла происходит переход от микрорезания к пластическому отеснению, что обуславливает рост износостойкости. С учётом установленных требований к сталям для зубьев ковшей экскаваторов для условий различных горных пород рекомендованы соответствующие стали 30ХГНМФЛ (№ 1), где необходима высокая износостойкость и хладостойкость, сталь 40Х2ГН2МФЛ (№ 3) для более умеренного климата. Низкий отпуск после закалки рекомендуется для более умеренного климата, для обеспечения хладостойкости необходима закалка и высокий отпуск.

Благодарности

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00713, <https://rscf.ru/project/24-29-00713/>»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слепцов, О.И. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера / Б.С. Шульгинов, В.Е. Михайлов, М.Н. Сивцев, Г.Н. Слепцов. – Новосибирск: Наука, 2012. - 201с.
2. Виноградов, В.Н. Абразивные изнашивания бурильного инструмента / Г.М. Сорокин, В.А. Доценко. - М.: Наука, 1995.-206 с.
3. Клейс, И.Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / Х.Г. Уэмыйс. - М.: Машиностроение, 1978.- 168 с.
4. Ivanov, S. L. Estimation of operating time of quarry excavators of perspective model range in real operating conditions / P. V. Ivanova, S. Yu. Kuvshinkin. // Journal of Mining Institute. - 2020. - Т. 242. - Р. 228–233.
5. Galata, L.A. The Influence of Microstructure Quality on the Efficiency of Bucket Teeth of Career Excavators / B.S. Ermakov, R.G. Kancev, J.S. Karzina. // Key Engineering Materials. – 2023. - 941. - Р. 107–112.
6. Ermakov, B.S. Causes of accelerated failure of excavator bucket teeth crowns when operating in Arctic regions / S. A. Vologzhanina, S. B. Ermakov, O. V. Shvetsov. // Chernye Metally. - 2024. - №9. - Р. 37-43.
7. Ermakov, B.S. Investigation of the influence of cast microstructure on the operability of the crown of a quarry excavator / O.V. Shvetsov, S.B. Ermakov, S.A. Vologzhanina. // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES. – 2025. V. 1. № 469. – Р. 59–71.
8. Shamonya, V.P. Durability of the teeth of buckets excavators EKG-8 in the conditions of Norilsk // Mining Journal. – 1966. - Р. 53-56.
9. Чебулаев, В.И. Разрушение зубьев мощных карьерных экскаваторов и методы оценки их хладостойкости. // Прочность сталей, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр. СПб: ЛТИХП. - 1989. -С. 21–26.
10. Давыдов, Н.Г. Высокомарганцевая сталь. – М: Металлургия, 1979. - 176 с.
11. Львов, П.Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. – М: Машгиз, 1962. - 87 с.

12. Берштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали: Учебник. М: Металлургия, 1983. - В 3-х т.
13. Ch. Barrett, Structure of metals / T. Massalsky. Metallurgy, 1984. – 654 с.
14. Солнцев, Ю.П. *Хладостойкие стали и сплавы: учебник для вузов* — Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2020. — 476 с.
15. Korchynsky, M. Advanced metallic structural materials and a new role for microalloyed steels //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd. - 2005. – Т. 500. – P. 471-480.
16. Солнцев, Ю. П. *Материаловедение* / Е. И. Пряхин. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. 784 с

O.V. Shvetsov¹, B.S. Ermakov¹, A.K. Andreyev²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, shvec_off@mail.ru

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF STEEL FOR EXCAVATOR BUCKET TEETH DEPENDING ON THE CHEMICAL COMPOSITION AND TEMPERING TEMPERATURE

Abstract

The effect of the chemical composition and heat treatment modes on the wear and cold resistance of steel for excavator bucket teeth has been experimentally investigated. As a result, taking into account the established requirements for steels for excavator bucket teeth, the corresponding 30KHGNMFL steels are recommended for conditions of various rocks, where high wear resistance and cold resistance are required, and 40KH2GN2MFL 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, wear resistance, tempering temperature, hardness, excavator bucket tooth.