

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ РАБОЧИХ РОЛИКОВ МАЯТНИКОВЫХ МЕЛЬНИЦ: ВЫБОР ИЗНОСОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ УПРОЧНЕНИЯ

Аннотация

В статье представлены способы повышения механических и эксплуатационных свойств износостойких материалов, применяемых для изготовления рабочих роликов маятниковых мельниц в горнодобывающей промышленности. Актуальность работы связана с увеличением срока службы рабочих роликов, что является важным фактором при работе в условиях абразивного износа. Целью обзора является выявление оптимальных материалов и технологий для увеличения срока службы рабочих роликов маятниковых мельниц. Рассмотрены методы исследования микроструктур, термической обработки и трибологические испытания, применяемые для оценки износостойкого высокохромистого чугуна и шарикоподшипниковой стали. В результате исследований установлено, что метод модифицирования и метод нанесения диффузионного слоя комплексным механическим легированием значительно способствуют повышению износостойкости материалов, что помогает уменьшить затраты на дорогостоящее обслуживание и повысить производительность оборудования.

Ключевые слова: износ и срок службы рабочих роликов, комплексное механическое легирование, диффузионный слой, модифицирование.

Введение

Рабочие ролики маятниковых мельниц являются ключевыми элементами оборудования, используемые для измельчения различных материалов в горнодобывающей, цементной, химической и других отраслях промышленности. В процессе эксплуатации ролики подвергаются интенсивному абразивному износу, что приводит к снижению производительности, увеличению затрат на ремонт и к простоям оборудования. Поэтому, повышение срока службы рабочих роликов является актуальной задачей, решение которой позволит значительно снизить затраты на замену дорогостоящих рабочих роликов и повысить эффективность производства.

Помимо оптимального выбора материалов для эффективного повышения срока службы рабочих роликов в мельнице могут быть использованы методы нанесения износостойких покрытий, модифицирование, термическая и химико-термическая обработка, рафинирование и т.д.

Одним из наиболее эффективных способов повышения срока службы рабочих роликов является выбор рациональных материалов, обладающих высокой износостойкостью и [1-2].

Износостойкими материалами для изготовления роликов являются стали и

чугуны системы Fe–Cr–C с содержанием углерода более 2,5 % и с содержанием хрома более 7 %. К таким износостойким материалам относят: углеродистые и легированные стали, инструментальные стали, чугуны и высокохромистые чугуны.

Тем не менее, не все марки сталей и чугунов обладают достаточной износостойкостью для работы в условиях интенсивного абразивного износа. Поэтому, необходимо проводить исследования, направленные на выбор наиболее износостойких марок сталей и чугунов, а также на понимание механизмов упрочнения, способствующих повышению эксплуатационных свойств.

По данным И.И. Цыпина [3] сопротивляемости сталей и чугунов абразивному изнашиванию отводят карбидам – наиболее твердой составляющей структуры. Однако, не меньшее значение имеет и металлическая матрица, которая должна сама по себе противостоять действию абразивных частиц и прочно удерживать карбиды, не допуская усталостного выкрашивания.

Методы и материалы

При решении поставленных задач в работе использовался комплексный метод, включающий теоретические и экспериментальные исследования авторов. Теоретическое исследование осуществлено методами ретроспективного, графического, статистического исследования. Основные результаты эмпирического исследования получены следующими методами: модифицирование и нанесение диффузионного слоя Nb+Ti с помощью комбинированного процесса механического легирования.

Liqiang Gong и др. [5] изучили влияние модифицирования на измельчение первичных карбидов и повышение износостойкости заэвтектического высокохромистого чугуна с содержанием 35% Cr и 4.0% C.

Образцы высокохромистого чугуна были отлиты с различным составом модифицирующих элементов: образец M1 без модифицирования, M2 – модифицированный N, M3 – модифицированный N + RE-Mg и M4 – модифицированный N + Ti + V + RE-Mg), химический состав которых приведен в табл.1. Часть образцов подвергались термической обработке – закалке при 1050°C с последующим охлаждением на воздухе.

Таблица 1 – Состав заэвтектического высокохромистого чугуна (мас. %) [5]

	C	Cr	Mn	Mo	Si	Cu	N	RE-Mg	Ti	V	Fe
M1	4.0	35.0	0.5	1.0	1.2	1.0	-	-	-	-	ост.
M2	4.0	35.0	0.5	1.0	1.2	1.0	0.15	-	-	-	ост.
M3	4.0	35.0	0.5	1.0	1.2	1.0	0.15	0.6	-	-	ост.
M4	4.0	35.0	0.51	1.0	1.2	1.0	0.15	0.6	0.3	0.2	ост.

Для оценки структуры и фазового состояния образцов были использованы методы оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (SEM) с энергодисперсионным спектрометром (EDS), просвечивающей электронной микроскопии (TEM), рентгеновской дифракции (XRD). При оценке твердости по Роквеллу (HRC) использован твердомер с нагрузкой 150А. Измерение проводилось в 10 случайных точках на поверхности образца, затем рассчитывалось среднее значение. Испытания на износ проводились в трибометре «кольцо-колодка» (ММ-200). Параметры испытаний были в следующих значениях: частота оборотов 200 об/мин, нагрузка 250 Н, время испытания 2 часа. После испытания на износ проводили анализ площадки трения с помощью SEM и измеряли шероховатость поверхности с помощью 3D лазерной конфокальной микроскопии (определяли

ширину и глубину борозд износа.

Говоря о повышении износостойкости шарикоподшипниковой стали автором Xincheng Xie и др. [15] предложен новый подход по упрочнению стальных мелющих шаров из стали ШХ15 диаметром 8 мм, с химическим составом представленным в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав шарикоподшипниковой стали ШХ15 (мас. %) [15]

C	Mn	Cr	Si	S	P	Fe
1.0	0.3	1.51	0.22	0.002	0.003	ост.

На первом этапе, на шары наносили подложку из диффузионного слоя Nb+Ti и далее формировали покрытие с помощью комбинированного процесса механического легирования (см. рис. 1а). На втором этапе покрытие удаляли путем обработки шаров раствором $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (см. рис. 1б).

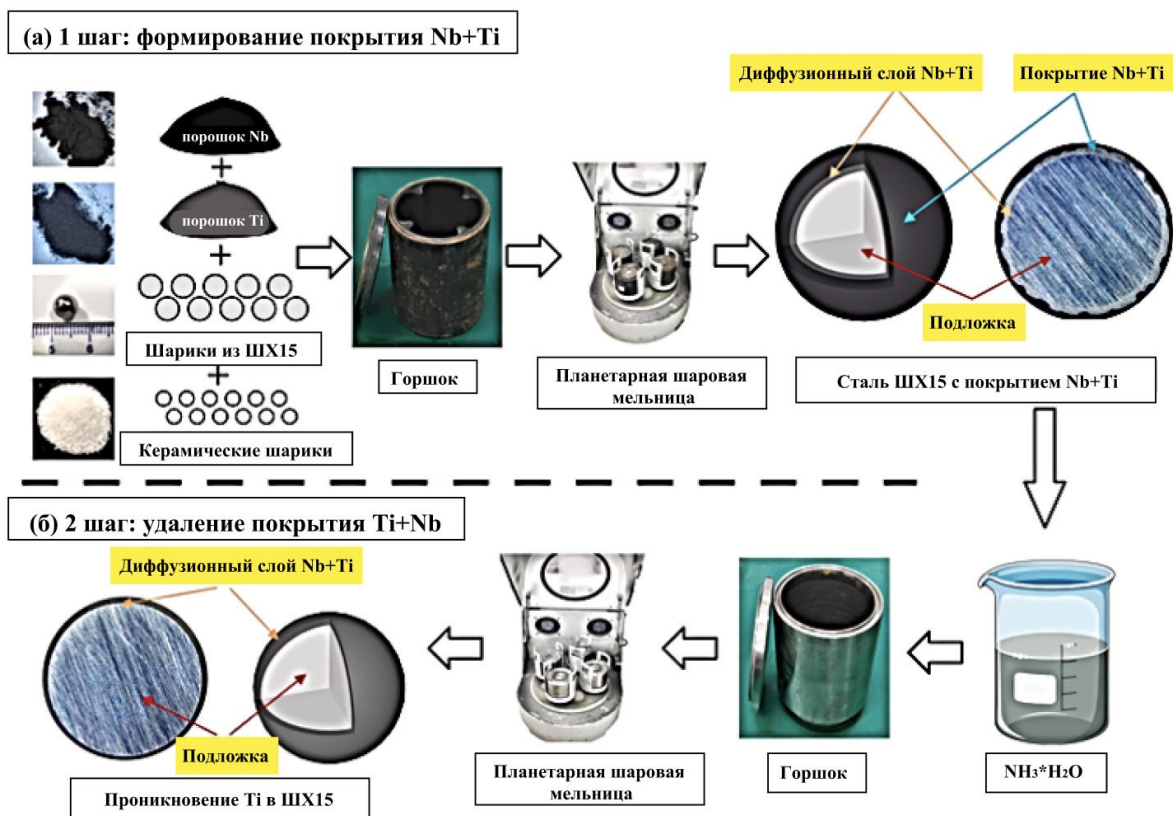


Рисунок 1 – Схема получения диффузионного слоя Nb+Ti на поверхности стальных шариков из стали ШХ15. (а) 1 шаг – формирование покрытия Nb+Ti; (б) 2 шаг – удаление покрытия Nb+Ti [15]

Для повышения вязкости и сопротивления разрушению мелющие шары были подвергнуты термической обработке, включающей аустенизацию с последующей закалкой в масле и отпуском. Данная предварительная обработка была направлена на оптимизацию механических свойств подложки перед нанесением покрытия. Предварительно обработанные шары из стали ШХ15 помещались в планетарную шаровую мельницу с порошками ниобия и титана, а также керамическими мелющими телами для нанесения покрытия методом механического легирования. Процесс проводился циклически (20 минут работы, 10 минут охлаждения) для предотвращения перегрева и контроля нанесения покрытия. Циклический подход минимизировал термические эффекты и способствовал равномерному распределению энергии удара. После механического легирования композитные

шарики обрабатывали водным раствором аммиака (рис.2) для удаления поверхностного слоя Nb+Ti и формирования диффузионно-упрочненной зоны в подложке из стали ШХ15. Стальные шарики, прошедшие подготовку, механическое легирование и обработку аммиаком, обозначены как «МАР», а для сравнения использован "UP" – шарики только после термообработки. Эта номенклатура позволила различать модифицированные и немодифицированные образцы.

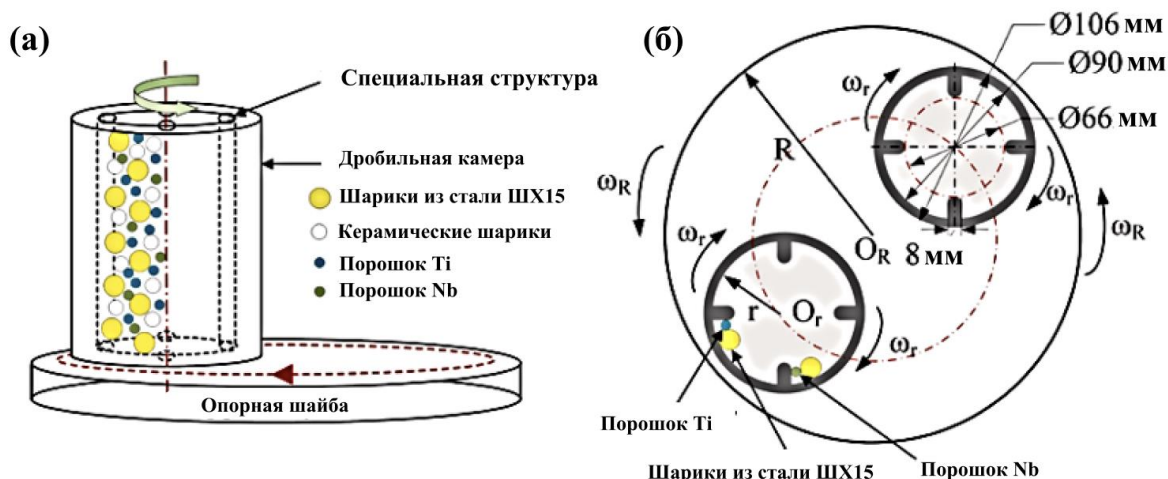


Рисунок 2 – (а) схема механической шаровой мельницы; (б) вид сверху на шаровую мельницу [15]

Образцы МАР и UP были очищены этанолом, разрезаны методом электроэрозионной резки и отполированы. Для анализа зерна и дислокаций были использованы: сканирующий электронный микроскоп (Gemini SEM 300, ZEISS) с энергодисперсионным спектрометром (EDS); трехмерный измерительный микроскоп Micro 1000 (RAPHAEL OPTECH); профилометр (XM200, Luoyang Bearing Research Institute). Микротвердость измеряли микротвердомером Vickers (HV-1000, ZHIJIN) при нагрузке 1,96 Н и времени нагружения 10 с. Остаточные напряжения определены тестером остаточных напряжений (EDGE, GNR). Испытания на трение и износ проведены на многофункциональной машине MVP-2A (Jinan Hengxu) при комнатной температуре, 200 °С и 400 °С (схема "шар-диск", 30 об/мин, 40 Н, 100 мин). Морфологию следов износа анализирована с помощью SEM.

Результаты и обсуждения

Дифрактограммы образцов [5] высокохромистых чугунов (в литом состоянии и после термообработки при 1050 °С) состояли в основном из карбидов типа M_7C_3 , $M_{23}C_6$, мартенсита и остаточного аустенита. SEM-изображения (рис.3), в сочетании с данными дифрактометрии показали, что микроструктура высокохромистого чугуна после термообработки при 1050 °С включала первичные, эвтектические и вторичные карбиды, мартенсит, остаточный аустенит и небольшое количество TiC и VC. При добавлении модификаторов N и N + RE-Mg измельчали первичные карбиды, причем комбинированная модификация N + RE-Mg давала более выраженный эффект. Комбинированная добавка N + RE-Mg + Ti + V приводила к еще более мелкому и равномерному распределению первичных карбидов благодаря гетерогенной кристаллизации и адсорбционному измельчению.

Данные для высокохромистого чугуна (рис.4) показали незначительное возрастание микротвердости с увеличением степени модификации. Максимальная микротвердость наблюдалась у образца М4 после комбинированной модификации

(62.5 HRC). Это связано с измельчением карбидов, увеличением их объемной доли (с 55.88% до 62.47%), а также твердорастворным упрочнением матрицы модифицирующими элементами.

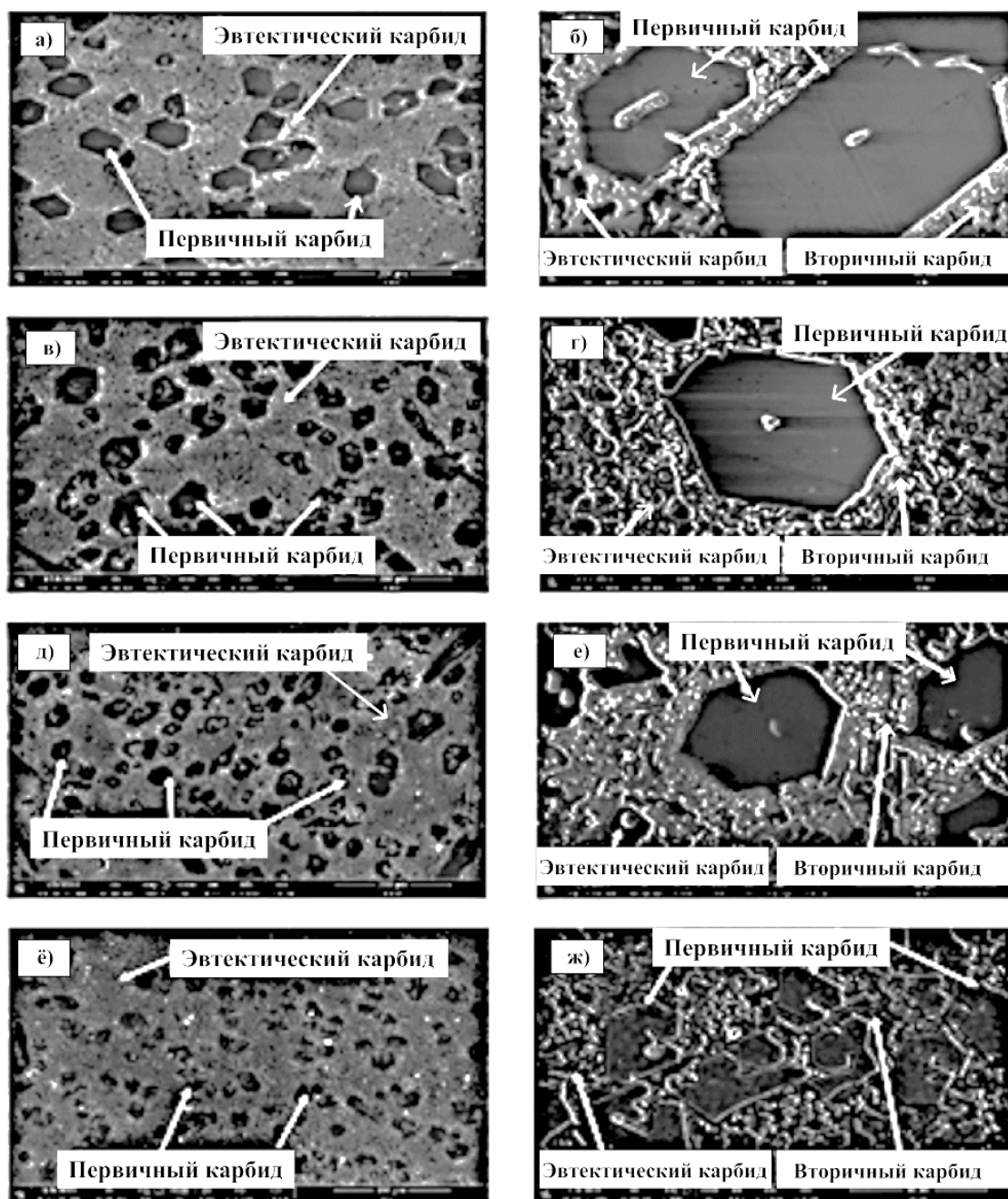


Рисунок 3 – SEM-изображения различных модификаций высокохромистого чугуна после термообработки при 1050 С (а, б) М1 (в, г) М2 (д, е) М3 (ё, ж) М4 [5]

При испытании на износ при сухом скольжении, наблюдали увеличение износостойкости образца М4.

Коэффициент трения при сухом скольжении (рис.5) характеризовался стадиями приработки и установившегося износа [6]. На начальном этапе испытания, происходил быстрый рост коэффициента трения из-за увеличения площади контакта между образцом и контртелом (кольцом) [7-8]. Неровности на поверхности образца были деформированы и разрушены. По мере стабилизации площади контакта и сглаживания микровыступов износ переходили в установившуюся стадию, связанную с образованием адгезионного слоя [9-11].

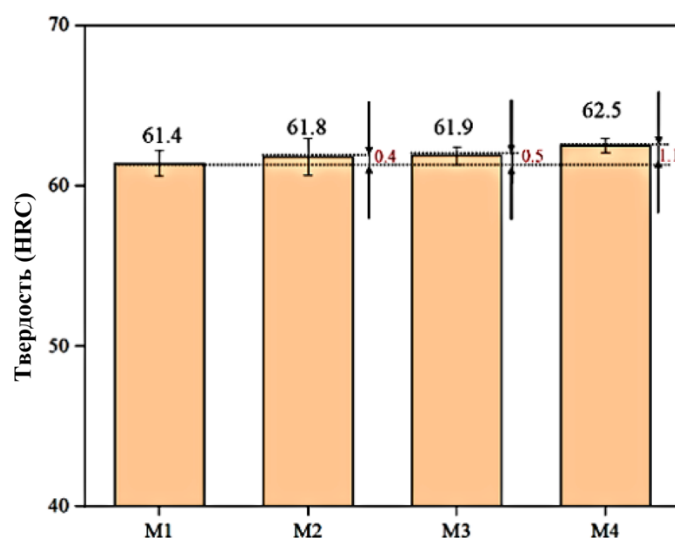


Рисунок 4 – Микротвердость различных модификаций высокохромистого чугуна после термообработки при 1050 °С [5]

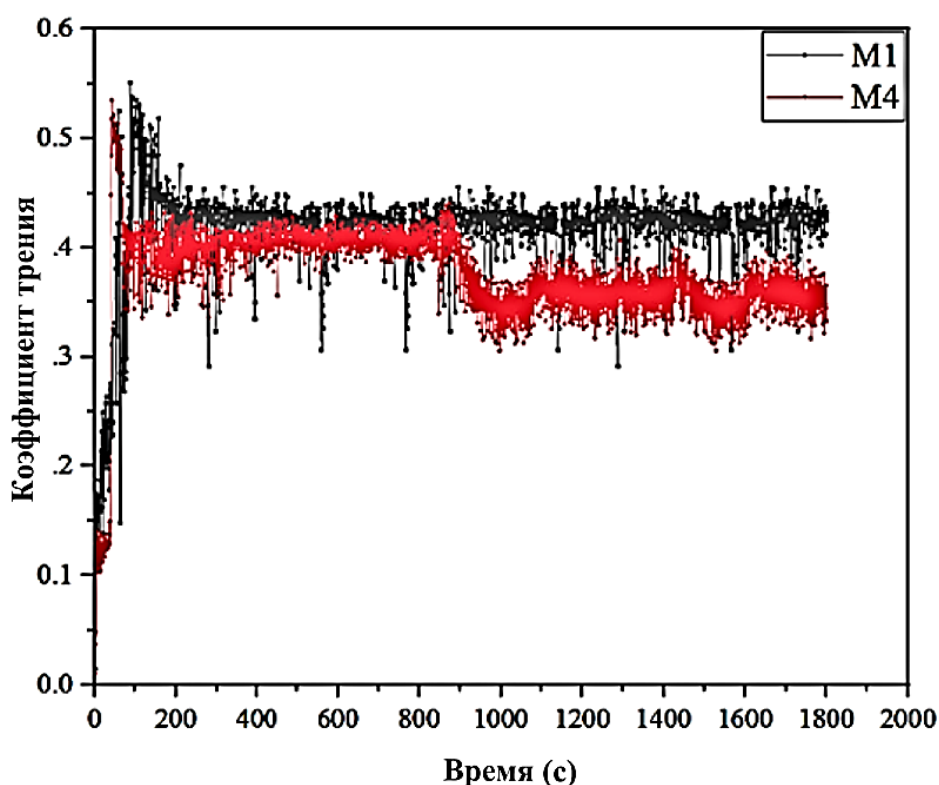


Рисунок 5 – Коэффициент трения в реальном времени для заэвтектического высокохромистого чугуна, термически обработанного при 1050 °С. (M1– образец без модифицирования, M4 –образец с композиционным модифицированием) [5].

По данным исследования [15] для шарикоподшипниковой стали микроскопия поперечных сечений и EDS-сканирование показало образование диффузионного слоя Ti+Nb на глубине 12.4-17.5 мкм. Механизм формирования слоя включал микро ковку и холодную сварку порошков Ti и Nb, с последующим удалением рыхлого покрытия раствором $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Образцы MAP демонстрировали измельчение зерен и увеличение плотности дислокаций. Объем износа MAP значительно снижен по сравнению с UP (на 66.06% при 400 °С, (рис.6), что связано с более высокой твердостью и соответствует закону Архарда.

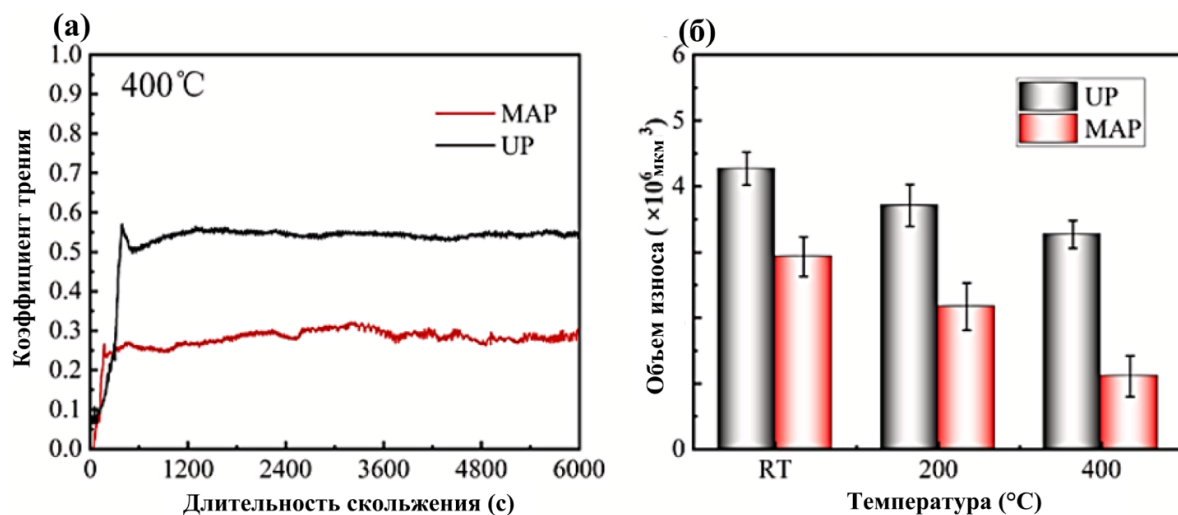


Рисунок 6 – (а) – коэффициент трения при температуре 400 С; (б) – объемный износ при различных температурах для образцов UP и MAP [15]

Диаметр пятна износа у MAP меньше, чем у UP (на 23.62% при 400 °C, (рис.6), а поверхность образцов MAP имела меньше частиц износа и бороздок. EDS-анализ частиц износа выявил наличие Fe и O, а также Ti и Nb в MAP, что указывало на окисление и присутствие диффузионного слоя, обеспечивающего повышенную износостойкость.

Заключение

В настоящем исследовании были сделаны следующие выводы:

1. Модифицирование высокохромистого чугуна элементами N, Ti, V и RE-Mg приводило к измельчению первичных карбидов за счет гетерогенной кристаллизации и адсорбции модификаторов.
2. Измельчение зерен и первичных карбидов способствовало повышению микротвердости, остаточных напряжений, а также высокотемпературной износостойкости высокохромистого чугуна.
3. Установлено, что метод модифицирования и метод нанесения диффузионного слоя комплексным механическим легированием значительно улучшают механические и эксплуатационные свойства износостойких материалов. Данные методы позволяют увеличить срок службы рабочих роликов в условиях абразивного износа.

Оба метода показали перспективность в упрочнении материалов, однако требуют дальнейшего изучения для оптимизации процессов и улучшения характеристик. Общая тенденция – измельчение структуры (карбидов или зерен) положительно влияет на износостойкость материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брыков, М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное издание / М.Н. Брыков, В.Г. Ефременко, А.В. Ефременко. - Херсон: Гринь Д.С., 2014. - 364 с.
2. Вязников, Н.Ф. Легированная сталь: Конспект лекций, Часть вторая химический состав, термическая обработка и свойства стали различного назначения / Вязников Н.Ф. - Ленинградский ордена Ленина Политехнический институт имени м. И. Калинина, 1970. - 98 с.
3. Цыпин, И.И. Белые износостойкие чугуны / И.И. Цыпин. - М.: Металлургия, 1983. - 176 с.

4. Зыкова, А.П., Исследование износостойкости чугуна ИЧХ28Н2 при комплексном модифицировании / А.П.Зыкова, А.В. Чумаевский, Д.В. Лычагин, И.А. Курзин, С. Ю. Тарасов, Т.В. Демент // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. - Т. 56, No 12/2. - С.116-120.
5. Liqiang, Gong. Refinement of primary carbides and improvement of wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron after modification / G. Liqiang, F. Hanguang, Y. Penghui ang, Ji Xiaoliang, Yin Wenhong, Lin Jian // Journal of materials research and technology. – 2023. - pp. 5724-5742.
6. Gou, J. Dry sliding wear behavior of FeCrCeB hardfacing alloy modified with nano-CeO₂ and its mechanisms of modification / J. Gou, Y Wang, Y. Zhang, C. Wang, G. Wang // Wear. – 2021. - pp. 484-489.
7. Mokhtari, M. Transversely isotropic viscoelastic materials: contact mechanics and friction / M. Mokhtari, DJ. Schipper, N. Vleugels, JW. Noordermeer // Tribol Int. – 2016. – pp. 97-101.
8. Jiang, J. Unraveling the origin of the excellent high-temperature oxidation resistance of an AlCrFeNiTi complex concentrated alloy / J. Jiang, S. Zhao, L. Jingjing, Z. Yinghao // Corrosion Science. - 2023. – pp. 111-116.
9. Tyagi, R. Effect of martensite content on friction and oxidative wear behavior of 0.42 Pct carbon dualphase steel / R. Tyagi, S. Nath, S. Ray // Metall Mater Trans. - 2002. № 33(11). – pp. 347-368.
10. Penghui, Y. Wear behavior of CADI obtained at different austenitizing temperatures. / Y. Penghui, F. Hanguang, Z. Xiangwei, L. Jia // Tribol Int. – 2019. - № 140. - pp. 105876.
11. Chenchen, W. et al. Multifunctional GO-based hydrogel coating on Ti-6Al-4V Alloy with Enhanced Bioactivity, Anticorrosion and Tribological Properties against Cortical Bone / W. Chenchenя, Z. Kechao, G. Yanchun, H. Sheng // Tribology Int. – 2023. - pp. 184-188.
12. Agustina, M. The effect of thermal processing and chemical composition on secondary carbide precipitation and hardness in high-chromium cast irons / M. Agustina Guitar, U. Pranav Nayak, Dominik Britz and Frank Mućklich // International Journal of Metalcasting. – 2020. - Volume 14, Issue 3. - pp. 756 -765.
13. Lukas, Widder High-temperature abrasion resistance and wear mechanisms of chilled high-chromium cast irons / Lukas Widder, Harald Rojacz, Markus Buscher and Markus Varg. // Modern Materials and Manufacturing. – 2021. – pp. 1-5.
14. Михайлов, Л.В. Исследование влияния температуры отпуска на магнитные, механические свойства на структуру стали ШХ15СГ / Л.В. Михайлов, А.В. Михайлов, В.Н. Костин [и др.] // Международный научный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 5 (143).
15. Xincheng Xie, Zhongning Guo, Zhongwei Liang, Jinrui Xiao, Zhuan Zhao. Enhanced high-temperature wear resistance of GCr15 steel balls by generating a Ti +Nb diffusion layer via mechanical alloying and NH₃·H₂O treatment. Surface & Coatings Technology. - 2023. - pp. 1-9.

L.R. Razetdinova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Saint Petersburg, Russia, lyaisan.rakh@gmail.com

INCREASING THE SERVICE LIFE OF WORKING ROLLERS IN PENDULUM MILLS: SELECTION OF WEAR-RESISTANT STEELS AND CAST IRONS AND ANALYSIS OF HARDENING MECHANISMS

Abstract

The article presents methods for enhancing the mechanical and operational properties of wear-resistant materials used in the manufacturing of work rolls for pendulum mills in the mining industry. The relevance of this work stems from the need to extend the lifespan of work rolls, which is a critical factor when operating under abrasive wear conditions. The aim of the review is to identify optimal materials and technologies for increasing the service life of pendulum mill work

rolls. The study examines methods for microstructure analysis, heat treatment, and tribological testing used to evaluate wear-resistant high-chromium cast iron and bearing steel. The research findings indicate that the modification method and the application of a diffusion layer via complex mechanical alloying significantly contribute to improved wear resistance of materials, which helps reduce costly maintenance and increase equipment productivity.

Keywords: wear and service life of working rollers, complex mechanical alloying, diffusion layer, modification.