

УДК 669.017: 620.178.16

СРАВНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНЫХ И СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Пастухова Т.В. аспирант, **Ефременко В.Г.** д.т.н., проф.,
Чейлях А.П. д.т.н., проф., **Чабак Ю.Г.** к.т.н.
(Приазовский государственный технический университет),
Брыков М.А. д.т.н., проф.
(Запорожский национальный технический университет)

Проанализировано влияние химического состава и структурного состояния легированных белых чугунов со сфероидальными карбидами ванадия на износостойкость в различных условиях абразивного изнашивания.

Введение. Рациональное использование ресурсов является одним из основных условий развития предприятий в современной конкурентной среде. Особенно остро проблема ресурсосбережения проявляется там, где значительные расходы материалов вызваны изнашиванием деталей машин. Треть мировых энергетических затрат связана с трением и восстановлением изношенного оборудования, при этом половину всех потерь вызывает абразивное изнашивание.

Анализ публикаций. Основным материалом деталей машин, подвергаемых в процессе эксплуатации абразивному изнашиванию, являются сплавы на основе железа – стали и чугуны [1, 2]. Нахождение сплавов рационального состава, сочетающих высокую износостойкость с приемлемой стоимостью, является одним из актуальных направлений развития трибоматериаловедения [1]. Оптимальные материалы для конкретных условий изнашивания находят в результате лабораторных, стендовых и натуральных испытаний [1, 3, 4]. Условия их проведения (тип абразива, характер взаимодействия абразива с поверхностью и проч.) очень сильно влияют на износостойкость материалов. Для оценки перспективности сплава как триботехнического материала необходимо при проведении испытаний приближать их условия к эксплуатационным.

В число абразивностойких материалов традиционно входят белые легированные чугуны [1, 5]. В последние годы активно исследуется новый класс чугунов – чугуны со сфероидальными карбидами ванадия (spheroidal carbides cast iron – SCI) [6-8]. Сфероидальную форму карбиды получают благодаря модифицирующей обработке расплава щелочноземельными или редкоземельными элементами [9]. Триботехнические характеристики SCI-чугунов к настоящему времени изучены недостаточно полно. Особенно это касается влияния структурного состояния SCI-сплавов на износостойкость в различных условиях абразивного истирания.

Цель работы – провести сопоставительную оценку влияния структурного состояния на абразивную износостойкость SCI-чугунов в условиях испытаний по различным методикам.

Методика исследований. Материалом исследования являлись три чугуна со сфероидальными карбидами ванадия, химический состав которых приведен в табл. 1. Методика получения чугунов и приготовления образцов достаточно подробно описана в работе [8].

Таблица 1 – Химический состав исследованных сплавов

Сплав	Содержание химических элементов, масс. %					
	C	Mn	Si	Cr	V	Ni
SCI-1	3,23	4,02	0,99	0,01	9,87	1,56
SCI-2	3,00	3,92	1,07	4,37	9,14	1,60
SCI-5	3,11	4,12	1,05	4,32	7,34	1,59

Образцы чугунов SCI-2 и SCI-2 закаливали от 920 °С (с выдержкой 2 ч) в масло и отпускали 2 ч при 200 °С. Образцы чугуна SCI-1 после аналогичной закалки подвергли обработке холодом (охлаждению в жидком азоте в течение 30 мин), после чего отпускали при 200 °С (2 ч).

Испытания на абразивное изнашивание проводили двумя способами. Лабораторные испытания выполняли по закрепленному абразиву (*two body abrasion*), используя полотно с электрокорундом зернистостью основной фракции 60-80 мкм [2]. Была применена схема испытаний *pin-on-drum*, которая наиболее предпочтительна при испытаниях на изнашивание закрепленным абразивом [10]. Нагрузка на образец составляла 2,94 Н (300 г). Образец испытываемого материала и эталонный образец (сталь) истирались поочередно по свежей поверхности абразивного полотна на пути трения, соответствующем ста оборотам барабана (диаметр барабана – 100 мм).

Стендовые испытания проводили по схеме истирания сжатым столбом абразивной массы на установке, имитирующей формирование огнеупоров в штампах (*three body abrasion*) [11]. В качестве абразива использовали шамот с размерами зерен 0,63-1,0 мм и твердостью 1000-1400 НВ. Давление столба сжатого абразива составляло 5 МПа.

За величину относительной износостойкости ϵ испытываемого материала принимали отношение массового износа эталонного образца к массовому износу образца испытываемого материала. В лабораторных испытаниях абразивом служила отоженная сталь 08кп, в стендовых – коммерческая сталь Hardox-450 в состоянии поставки.

Микроструктуру сплавов исследовали на микрошлифах, подготовленных по стандартной процедуре и протравленных 4%-м ниталем. Использовали микроскоп Nikon Eclipse L150. Твердость измеряли методом Роквелла по шкале «С». Фазовый состав определяли рентгеноструктурным методом с помощью дифрактометра ДРОН-2 в железном излучении.

Основные результаты. Чугун SCI-2 и SCI-5 в термообработанном состоянии имели твердость 42 и 43 HRC соответственно. Они содержали сфероидизированные карбиды ванадия зернистой формы, а также карбидную эвтектику «аустенит+ Me_7C_3 » (рис. 1, а, б). Объемная доля карбидов в чугунах SCI-2 и SCI-5 составляла: VC – 15,5 и 8,7 %, соответственно, Me_7C_3 – 8,5 и 16,0 %, соответственно. Матрица сплавов имела аустенито-мартенситную структуру, упрочненную дисперсными включениями вторичных карбидов, которые выделились из аустенита при нагреве под закалку. Результаты обработки дифрактограмм (рис. 2) показали, что количество аустенита в матричной фазе чугунов составляло 62 и 66 %, соответственно.

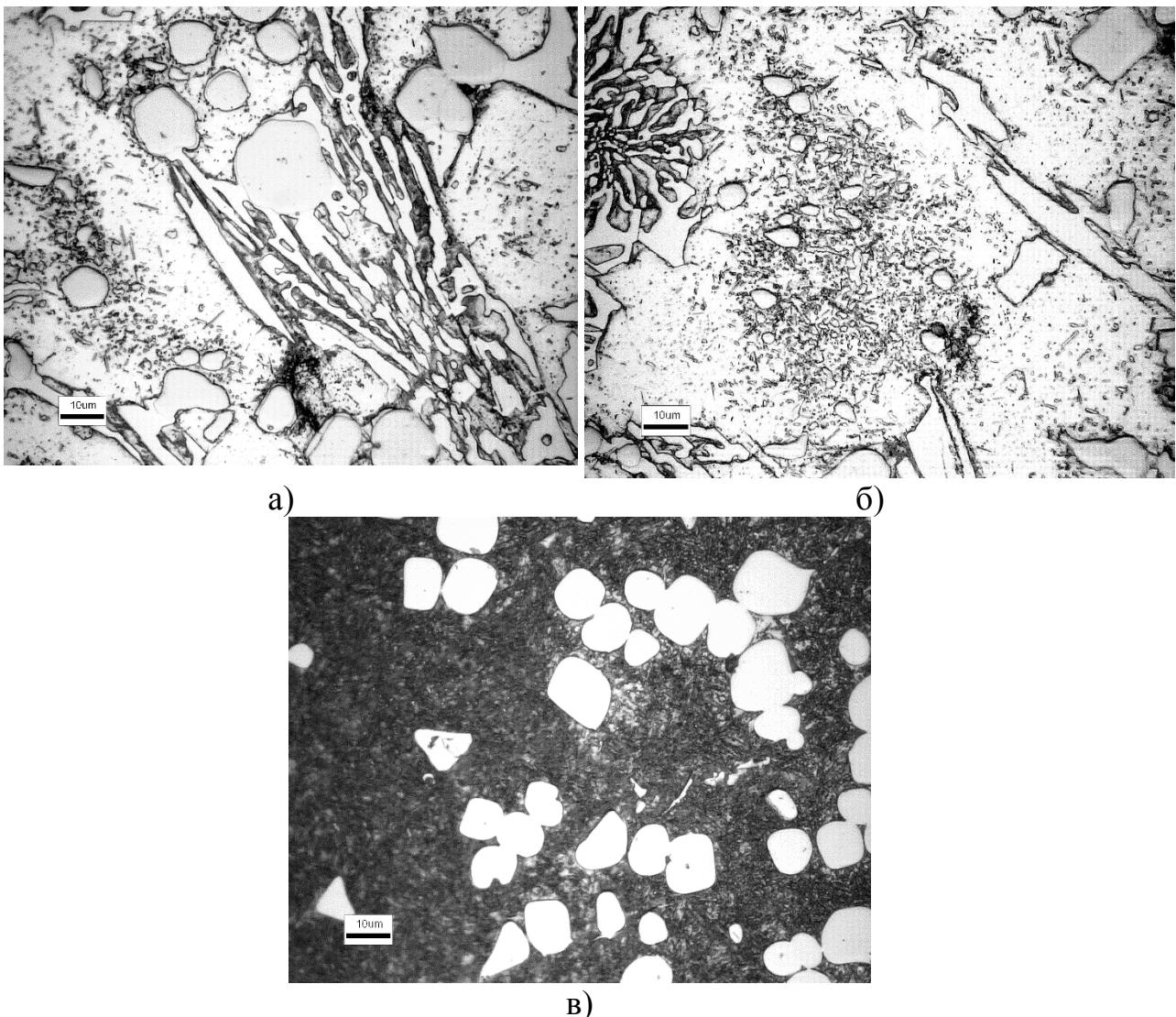


Рис. 1 – Микроструктура чугунов SCI-2 (а), SCI-5 (б), SCI-1 (в)

Чугун SCI-1 имел в структуре лишь сфероидальные карбиды ванадия (12,7 %) (рис.1, в). После закалки его твердость составляла 35 HRC вследствие высокого содержания остаточного аустенита в структуре (85 %). После обработки холодом большая часть аустенита превратилась в мартенсит, что

привело к росту твердости до 60 HRC. На рис. 1, в видно, что матрица чугуна SCI-1 состоит преимущественно из мелкоигльчатого мартенсита.

На рис. 3 представлены результаты лабораторных испытаний закрепленным абразивом. Они показывают, что при изнашивании электрокорундом минимальную износостойкость продемонстрировал чугун SCI-1 ($\epsilon=3,35$). Более износостойким оказался чугун SCI-5 ($\epsilon=4,42$), максимальную износостойкость проявил чугун SCI-2 ($\epsilon=5,18$). На этом же рисунке приведены значения ϵ для стали X12 (закалка на аустенитную матрицу) и твердого сплава BK8 (эти результаты были получены ранее в аналогичных условиях испытаний) [12]. Из сопоставления результатов следует, что чугун SCI-2 превзошел по износостойкости сталь X12 на 8,3 %; близкую к стали X12 износостойкость имел чугун SCI-2. Чугун с мартенситной основой SCI-1 существенно уступал сплавам с преимущественно аустенитной матрицей. Твердый сплав BK8 значительно (в 15,5-24,0 раз) превосходил вышеназванные сплавы по сопротивлению изнашиванию.

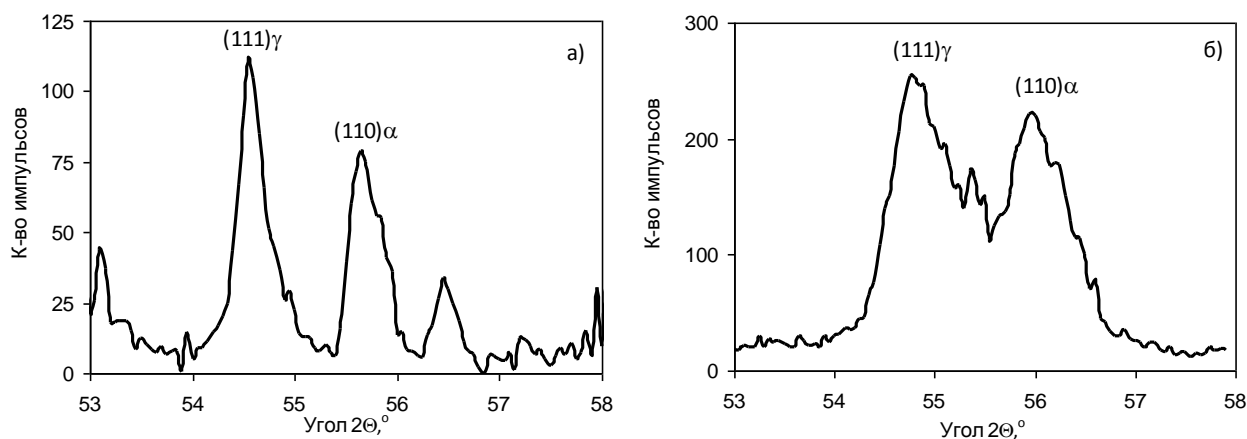


Рис. 2 – Дифрактограммы чугунов SCI-2 (а) и SCI-5 (б)

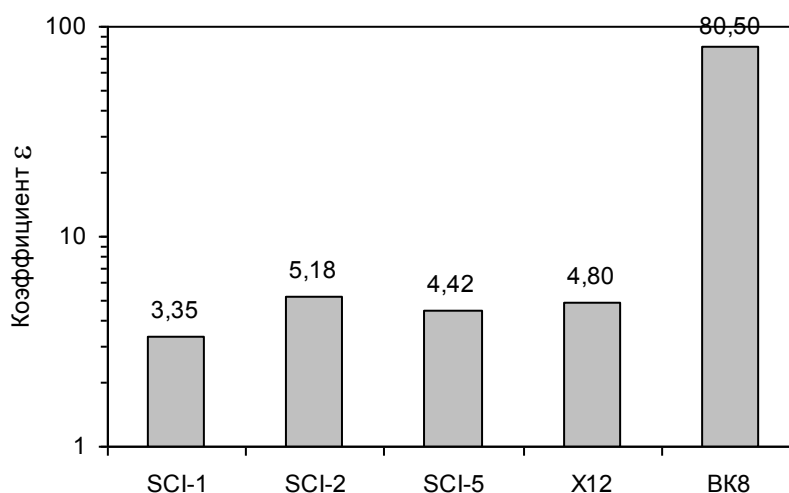


Рис. 3 – Износостойкость исследованных сплавов в условиях лабораторных испытаний закрепленным абразивом (электрокорундом)

Как показали стендовые испытания (рис. 4), характер ранжирования SCI-сплавов по износостойкости в целом сохранился, однако существенно возросла разница в значениях коэффициента относительной износостойкости между отдельными сплавами (приведенное для сравнения на рис. 4 значение коэффициента ϵ для твердого сплава BK8 было получено ранее). Значительно возросла относительная износостойкость чугуна SCI-2: он почти в 10 раз превзошел чугун SCI-1 и в 4,6 раза – чугун SCI-5. В то же время по сравнению с лабораторными испытаниями разница в износостойкости твердого сплава BK8 и чугуна SCI-2 уменьшилась с 15,5 до 3 раз.

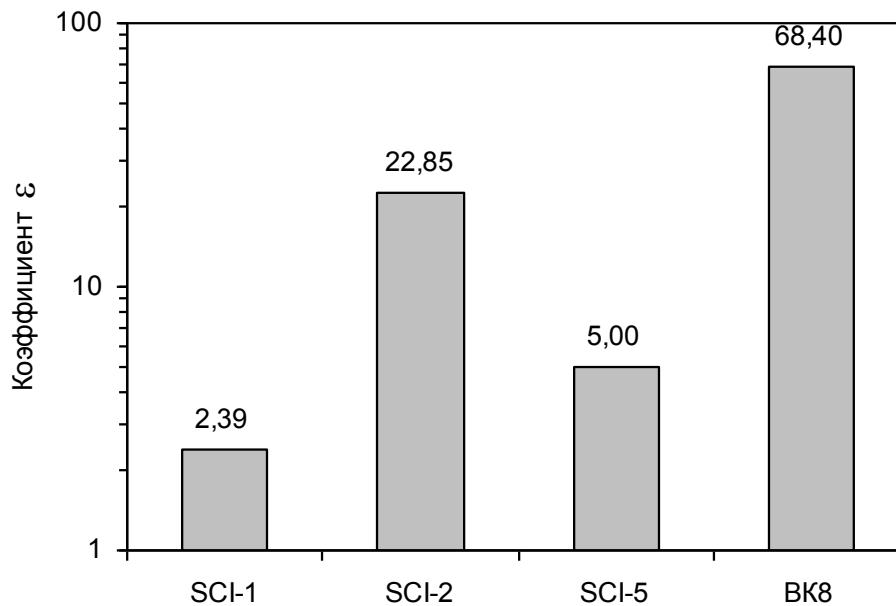


Рис. 5 – Износостойкость исследованных сплавов в условиях стендовых испытаний шамотом

Анализ полученных данных показывает следующее. Чугуны с преимущественно аустенитной основой при любой схеме испытаний изнашивались с меньшей скоростью, чем чугун с мартенситной основой SCI-1. Более того, сталь X12, в структуре которой отсутствовали твердые карбиды ванадия, однако количество аустенита составляло 80 % [2] (что выше, чем в SCI-чугунах), также имела высокую износостойкость при испытаниях электрокорундом (сопоставимую с чугуном SCI-2). Как было показано в работах [2, 12], в принятых условиях лабораторных и стендовых испытаний аустенит в стали X12 активно претерпевает деформационное мартенситное превращение, инициируемое изнашиванием (ДМПИ), что повышает твердость поверхности трения до 1250 HV и весьма положительно влияет на износостойкость; факторы этого влияния достаточно полно описаны в ряде работ [2, 11-15]. Можно предположить в исследованных чугунах SCI-2 и SCI-5 при испытаниях также протекает ДМПИ, в основном обуславливая их преимущество перед чугуном SCI-1 с мартенситной основой (частично это преимущество связано с присутствием в структуре SCI-2 и SCI-5 эвтектических карбидов хрома в

количестве 8-16 %). Дополнительным важным фактором износостойкости SCI-сплавов является количество сфероидальных карбидов ванадия: чугун SCI-2 содержит почти в два раза больше таких карбидов, чем SCI-5, что делает его более износостойким.

Необходимо отметить, что переход от испытаний электрокорундом к испытаниям шамотом вызвал увеличение разницы в значениях коэффициента ε для SCI-чугунов. Очевидно, при стендовых испытаниях влияние отдельных факторов (количество метастабильного аустенита, карбидов ванадия, карбидов хрома) проявляется более существенно, «расширяя» ряды износостойкости по значениям коэффициента ε . Можно предположить, что это связано с меньшей твердостью шамота по сравнению с электрокорундом, в результате чего даже незначительные изменения структуры вызывают такое повышение твердости поверхности трения, которое изменяет характер разрушения поверхности в контакте с абразивом от малоциклового к многоциклового (в последнем случае изнашивание трансформируется фактически в усталостное разрушение и его интенсивность резко снижается).

Таким образом, из всех чугунов со сфероидальными карбидами ванадия чугун SCI-2 продемонстрировал наилучшую износостойкость в условиях как лабораторных, так и стендовых испытаний. В последнем случае он может быть использован как альтернатива твердому сплаву. Несмотря на 3-х кратное превосходство ВК8 в износостойкости, его стоимость в 12-15 раз превышает стоимость чугуна SCI-2. Кроме того, чугун более технологичен и дает возможность получения изделий доступным методом литья, в то время как получение изделий из твердого сплава требует проведения операций спекания или горячего изостатического прессования. Таким образом, использование чугуна SCI-2 взамен сплава ВК8 является технологически и экономически более выгодным.

Вывод. При лабораторных испытаниях на абразивное изнашивание закрепленным абразивом (электрокорундом) и при стендовых испытаниях свободным абразивом (шамотом) наибольшую износостойкость проявил чугун, содержащий в структуре 15,5 % сфероидальных карбидов ванадия, 8,5 % эвтектических карбидов Me_7C_3 , распределенных в матрице, состоящей из 36 % мартенсита и 64 % остаточного аустенита. С учетом соотношения «цена-износостойкость» применение этого чугуна является более выгодным по сравнению с твердым сплавом ВК8.

Список литературы:

1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. - М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
2. Брыков М.Н. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании / М.Н. Брыков, В.Г. Ефременко, А.В. Ефременко. – Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 364 с.

3. Trezona R.I. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test / R.I. Trezona, D.N. Allsopp, I.M. Hutchings // *Wear*. – 1999. - Vol. 225–229.- Part 1. – P. 205–214.
4. Gates J.D. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion / J.D.Gates // *Wear*. – 1998. - Vol. 214. - Is. 1. – P. 139-146.
5. Комаров О.С. Высокохромистый чугун как материал для быстроизнашиваемых деталей машин / О.С. Комаров, Н.И. Урбанович, Д.О. Комаров, В.И. Волосатиков, Г.Ф. Лившиц // *Литейное производство*. - 2008. - №2. - С. 2-4.
6. Yoneta N. Wear Characteristics of Spheroidal Carbides Cast Irons in Uniaxial Rotary Glass Shredder/ N.Yoneta, K. Shimizu, H. Hara, M. Tanaka, Y. Nawa// *Key Engineering Materials*. – 2011. - Vol. 457. - P. 249-254.
7. Kawalec M. Abrasive wear resistance of cast iron with precipitates of spheroidal VC carbides/ M. Kawalec, E. Olejnic//*Archives of Foundry Engineering*. - 2012. - № 2. - P. 221-226.
8. Efremenko V. G. Effect of vanadium and chromium on the microstructural features of V-Cr-Mn-Ni spheroidal carbide cast irons / V. G. Efremenko, K. Shimizu, A. P. Cheiliakh et al. // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. – 2014. – Vol. 21, Is. 11. – P. 1096-1108.
9. Chaochang W. Formation of Spheroidal Carbide in Vanadium White Cast Iron by RE Modification / W.Chaochang, H. T. Hsu, M. Qian// *Material Science Technology*. – 1990. – Vol. 6. - P. 905-910.
10. Blickensderfer R. A pin-on-drum abrasive wear test and comparison with other pin tests / R. Blickensderfer, G. Laird II // *Journal of Testing and Evaluation*. - 1988. - Vol. 16, № 6. - P. 516-526.
11. Куликовский Р. А. Разработка износостойких бескарбидных наплавочных материалов для эксплуатации в условиях абразивного изнашивания: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Куликовский Руслан Анатольевич - Запорожье, 2007. - 166 с.
12. Koval' A. D. Principles of Development of Grinding Media with Increased Wear Resistance. Part 2. Optimization of Steel Composition to Suit Conditions of Operation of Grinding Media / A. D. Koval', V. G. Efremenko, M. N. Brykov et al. // *Journal of Friction and Wear*. – 2012. - Vol. 33. - No. 2. - P. 153–159.
13. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С.Попов, Н.Н.Брыков, Н.С.Дмитриченко и др. - М.: Металлургия, 1978. - 232 с.
14. Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. - М.: Металлургия, 1988. - 256 с.
15. Чейлях А.П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии/ А.П. Чейлях. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 483 с.

Анотація

Порівняння зносостійкості легованих чавунів в умовах лабораторних та стендових випробувань

Пастухова Т.В., Єфременко В. Г., Бриков М.М., Чейлях О.П., Чабак Ю.Г.

Проаналізовано вплив хімічного складу і структурного стану легованих білих чавунів зі сфероїдальними карбідами ванадію на зносостійкість в різних умовах абразивного зношування.

Abstract

Comparison of wear resistance of alloyed cast irons in laboratory and bench scale testing

Pastukhova T.V., Efremenko V. G., Brykov M.N., Cheiliakh A.P., Chabak Yu.G.

The influence of the chemical composition and structural state of alloyed cast iron with spheroidal vanadium carbide upon wear resistance in various conditions of abrasive wear is analyzed.