

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1103)

11.2023

МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Тема номера:

**80 лет кафедре «Обработка материалов
давлением и аддитивные технологии»
Московского политехнического
университета (стр. 15-69)**

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 11 (1103), ноябрь 2023 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С. П. Королева»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
ФГБУК «Государственный Эрмитаж»

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников, А. Г. Воробьев
А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
С. В. Коновалов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. В. Мунтин,
А. Е. Пелевин, Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков,
Е. Ю. Сидорова, И. А. Султангузин, А. Я. Травянов, А. С. Харченко, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
И. В. Чуманов, А. Н. Шаповалов, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

• фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617
• почтовый: 119049, Москва, а/я № 71
Телефон/факс: (495) 955-01-75
Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 11 (1103), ноябрь 2023 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 07.12.2023. Формат 60x90/8.
Печ. л. 12,75. Офсетная печать. Бумага офсетная.
Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

Подписной индекс:
12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна

- Е. А. Грибанов, Д. Р. Ганин, А. Ю. Фукс.* Повышение эффективности работы доменного производства АО «Уральская сталь» за счет уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе. 4

Производство стали

- Г. П. Вяткин, А. Н. Аникеев, Н. А. Шабурова, В. В. Седухин.* Идентификации интерметаллидной сигма-фазы в супердуплексных сталях методами металлографического анализа 8

80 лет кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета

- Д. А. Гневашев, Н. Ф. Шпунькин.* 80 лет кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета 15
- Р. Л. Шаталов.* Развитие теории расчета силовых показателей прокатки по длине тонких полос и лент 23
- С. А. Типалин, М. В. Боднар, В. Б. Белоусов.* Изменения толщины фланца при вытяжке листовых заготовок 29
- М. А. Петров, Е. В. Крутина.* Численное исследование процесса гибки труб малого диаметра из коррозионностойкой стали 34
- С. А. Типалин, Ю. Г. Калпин, Н. А. Куприянова.* Особенности расчета силовых параметров правки биметаллических листовых заготовок 42
- Д. А. Гневашев, Ш. Ф. Оруджев.* Исследование процесса гибки длинномерных листовых изделий с подбором прижимов на основе компьютерного моделирования 47
- Р. Л. Шаталов, Е. Е. Загоскин, В. А. Медведев.* Разработка и исследование условий температурной обработки, обеспечивающих заданные размеры и свойства стальных сосудов на прокатно-прессовой линии. 53
- Н. Ф. Шпунькин.* Технологические возможности испытательной машины МТЛ-10Г-1. 59
- Ю. К. Филиппов, Д. А. Гневашев, Ле Чунг Зунг.* Особенности построения кривой упрочнения при испытании образцов на одноосное сжатие в зависимости от величины деформации 66

Производство труб

- Б. В. Баричко, Я. И. Космацкий, Н. В. Фокин.* Улучшение качества высадки труб нефтяного сортамента. 70

Нагрев и термообработка

- В. Б. Деев, С. Л. Арапов, А. А. Косович, Е. М. Лесив.* Определение рациональных режимов термической обработки новой высокомарганцевой аустенитной стали с использованием термодинамического моделирования 75

Металловедение и физика металлов

- А. А. Казаков, Е. С. Мурсенков, В. А. Мурысев, Д. В. Киселев.* Диаграммы фазовых равновесий для интерпретации природы неметаллических включений в низкоуглеродистых сталях, модифицированных кальцием и церием 81
- Д. А. Болдырев, А. А. Николаев, М. В. Харченко, С. П. Нефедьев.* Влияние микролегирующих добавок карбидообразующих элементов и серы на комплекс свойств чугунных заготовок тормозных дисков. 90

Нанесение покрытий и защита от коррозии

- Е. И. Пряхин, Д. А. Прибыткова.* Влияние качества подготовки поверхности труб для теплосетей на их коррозионную стойкость при эксплуатации в условиях подземного залегания 97

Хроника

- Александрю Евгеньевичу Семину — 75 лет III стр. обл.

Журнал "Черные металлы"

по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в
"Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук"

Влияние микролегирующих добавок карбидообразующих элементов и серы на комплекс свойств чугунных заготовок тормозных дисков

Д. А. Болдырев, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»¹, докт. техн. наук, эл. почта: denis.boldyrev@vaz.ru

А. А. Николаев, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники², канд. техн. наук, эл. почта: aa.nikolaev@magtu.ru

М. В. Харченко, доцент кафедры механики², доцент кафедры металлургических технологий и оборудования³, канд. техн. наук, эл. почта: kharchenko.mv@bk.ru

С. П. Нефедьев, старший научный сотрудник научного инновационного сектора², доцент кафедры металлургических технологий и оборудования³, канд. техн. наук, эл. почта: sergeynefedeff@gmail.com

¹Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия.

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

³Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС», Новотроицк, Россия.

Повышение фрикционных свойств серого чугуна как материала тормозных дисков является актуальной задачей в машиностроении. Одним из способов повышения свойств изделий в данном направлении является добавление различных элементов в их состав. С целью подтверждения предположения о положительном влиянии серы и карбидообразующих элементов (Mn, Cr, Mo, Ti) на фрикционные свойства проведены лабораторные испытания на износостойкость изготовленных опытных отливок тормозных дисков и образцов, полученных из изготовленных тормозных дисков, с различным содержанием серы на машине трения СМЦ-2. Определено, что при повышении содержания серы в чугуне Gh190 с 0,02 до 0,12 % износ образцов по массе уменьшается в 2 раза, а при содержании серы в чугуне более 0,12 % износ увеличивается. Проведены стендовые испытания, при которых сравнили фрикционные свойства серых чугунов Gh190 со стандартным (0,03 %) и повышенным (0,12 %) содержанием серы. Линейный износ дисков с повышенным содержанием серы за всю серию испытаний на 30 % меньше, чем износ дисков со стандартным содержанием серы. При этом линейный износ тормозных колодок в паре с дисками из чугуна с повышенным содержанием серы на 12 % меньше. Выполнены испытания на машине трения образцов из тормозных дисков с различным содержанием серы и карбидообразующих элементов (Mn, Cr, Mo, Ti). Определено, что чугун с содержанием 0,07 % S, 0,6 % Mo и 0,2 % Ti подвергся износу в 1,8 раза меньше, чем чугун с содержанием 0,03 % S. Варьирование содержания серы и таких карбидообразующих элементов, как Mn и Cr, позволило повысить износостойкость образцов в 2 раза. Разработаны рекомендации: для отливок дисков переднего тормоза автомобилей серии ВАЗ из чугуна Gh190 внедрено изменение содержания серы (0,11–0,13 % вместо 0,01–0,03 %), что привело к снижению интенсивности износа тормозных дисков на 30 %, тормозных колодок — на 12 %.

Ключевые слова: тормозной диск, машина трения, стенд, износостойкость, износ, карбидообразующие элементы, сера, серый чугун.

DOI: 10.17580/chm.2023.11.14

Введение

Чугун широко применяют в качестве фрикционного материала [1, 2]. Благодаря поддержанию значений коэффициента трения, работе без задиров и схватываний серый чугун является одним из основных материалов тормозных дисков [3].

Повышение ресурса тормозных дисков является важной научно-технической задачей в машиностроении. В отечественных и зарубежных исследованиях встречаются описания разных способов повышения эксплуатационных свойств блока дискового тормоза из чугуна: изменение конструкции (перфорация диска для отвода тепла [4, 5], применение плавающей тормозной колодки [6]), изменение технологии изготовления (режимов термической обработки и шлифования [7]), а также варьирование химического состава и модифицирование чугуна (использование циркония и редкоземельных элементов [3]).

В литературе представлены работы по исследованию влияния различных элементов в составе чугуна на его механические свойства [8–12]. Перспективным является изучение влияния различных элементов на износостойкость чугунов: магния, кремния и хрома [13]. Эксперименты [13] показали, что скорость изнашивания снижается с увеличением добавок марганца и хрома независимо от содержания кремния. В работе [3] предложено модифицировать чугун добавкой с содержанием оксида циркония (ZrO_2) при изготовлении колодок для вагонных составов. Показано, что такие колодки при натуральных испытаниях имеют ресурс на 4500–5500 км больше, чем у немодифицированных, за счет измельчения графита и зерна перлита, повышения доли перлита до 92–96 % при относительно низкой твердости (205 НВ). В работе [14] исследовано влияние макродобавок ниобия

при изготовлении отливок из белого чугуна с высоким содержанием хрома на микроструктуру, твердость и поведение при абразивном износе. Увеличение объемной доли карбида ниобия (от 0 до 10,7 % (мас.)) повысило твердость с 724 до 812 HV. Стойкость к абразивному износу от кварцита показала эффект до 7 %. При изучении изношенных поверхностей установлено, что частицы NbC выступают из матрицы и заметно препятствуют развитию процесса истирания. В работе [15] исследовано влияние марганца на абразивное изнашивание чугуновой композиции NFGREY8. Согласно полученным результатам, добавка 75 % ферромарганца упрочняют матрицу с образованием прочного интерметаллида $(\text{FeMn})_3\text{C}$.

Существенно повысить фрикционные свойства чугунов возможно увеличением содержания в них серы [16]. Так, в работе [16] отмечено, что добавление серы в формовочную смесь позволяет получить белый чугун в поверхностном слое отливок из серого чугуна. Износостойкость поверхностного слоя отливок увеличивается с повышением содержания серы в формовочной смеси (от 0 до 10 % массы песка). Однако работы по исследованию влияния серы на износостойкость серых чугунов практически не встречаются. Обычно исследуется изменение механических свойств чугуна. В работах [17–21] приводятся исследования механических свойств чугуна в зависимости от содержания серы и марганца. Исследования показали, что прочность чугунов увеличивается с повышением содержания серы, достигая максимального значения (совпадает с пределом растворимости включений MnS); после, при дальнейшем увеличении содержания серы, уменьшается.

Таким образом, в настоящее время исследование влияния серы на износостойкость серого чугуна и тормозных дисков из него является актуальным. Также необходимо провести исследования влияния элементов Mn, Cr, Mo, Ti на фрикционную износостойкость чугуна с содержанием серы.

Целью данного исследования является определение влияния микролегирующих добавок карбидообразующих элементов и серы на комплекс механических свойств чугунных заготовок тормозных дисков.

Задачи исследования.

1. Определить механические свойства опытных отливок тормозных дисков с различными вариантами содержания серы и карбидообразующих элементов.
2. Проанализировать микроструктуру серого чугуна с различным содержанием серы.
3. Выполнить лабораторные и стендовые испытания на износ образцов и тормозных дисков, соответственно, с различным содержанием серы.
4. Провести лабораторные испытания на износ образцов с различным содержанием серы и карбидообразующих элементов.

Материалы и методика исследования

В качестве материалов для проведения трибологических испытаний использованы чугунные тормозные диски с различным содержанием серы, %: 0,02 (Gh190 (0,03S)); 0,10 (Gh190 (0,10S)); 0,12 (Gh190 (0,12S)), 0,13 (Gh190 (0,13S)) и 0,14 (Gh190 (0,14S)). Диапазоны содержания элементов

в чугунах Gh190 следующие, % (мас.): 3,06–3,40 C; 1,64–2,53 Si; 0,41–0,55 Mn; 0,40–1,38 Cu; 0,10–0,18 Cr; 0,09–0,12 Ni; 0,028–0,045 P; 0,022–0,138 S; 0,015–0,034 Ti; 0,013–0,100 Sn; 0,002–0,006 Mo; 0,003–0,006 V; 0,001–0,093 Al.

С целью исследования влияния на фрикционные свойства серы, марганца, хрома, молибдена и титана изготовили опытные отливки тормозных дисков. Диапазон химических составов чугунов с повышенным содержанием серы, молибдена и титана, %: 2,79–3,42 C; 1,80–1,98 Si; 0,46–0,50 Mn; 0,23–0,45 Cu; 0,13–0,24 Cr; 0,08–0,2 Ni; 0,029–0,036 P; 0,028–0,076 S; 0,013–0,052 Sn; 0,009–0,025 Ti; 0,005–0,61 Mo; 0,005–0,007 V; 0,001–0,006 Al.

Диапазоны химического состава чугунов с повышенным содержанием серы, марганца и хрома, %: 3,09–3,39 C; 1,80–2,52 Si; 0,48–1,11 Mn; 0,16–0,58 Cr; 0,028–0,06 P; 0,01–0,36 Ni; 0,01–0,57 Cu; 0,013–0,02 Sn; <0,010–0,035 Mo; <0,010–0,017 V; <0,010 Al; 0,006–0,127 S; 0,005–0,020 Ti.

Условные обозначения данных чугунов следующие: Gh190 (0,03S), Gh190 (0,07S), Gh190 (0,07S; 0,3Mo); Gh190 (0,07S; 0,6Mo); Gh190 (0,07S; 0,6Mo; 0,02Ti); Gh190 (0,77Mn; 0,19Cr), Gh190 (0,55Mn; 0,16Cr; 0,13S); Gh190 (1,11Mn; 0,17Cr; 0,11S); Gh190 (0,94Mn; 0,28Cr; 0,09S); Gh190 (0,82Mn; 0,28Cr; 0,10S); Gh190 (0,57Mn; 0,41Cr; 0,10S); Gh190 (1,09Mn; 0,16Cr); Gh190 (0,48Mn; 0,58Cr; 0,08S); Gh190 (1,00Mn; 0,36Cr; 0,05S); Gh190 (0,84Mn; 0,32Cr).

Испытания на одноосное растяжение проводили на испытательной машине TIRAtest 2300 согласно ГОСТ 1497–84 [22]. Образцы для проведения испытаний на одноосное растяжение вырезали из ступичной части опытных тормозных дисков, для оценки микроструктуры и износостойкости опытных составов серого чугуна — из рабочей части тормозных дисков. Химический состав полученных отливок определяли на оптико-эмиссионном с тлеющим разрядом спектрометре Spectruma GDA-750. Микроструктуру и графитовые включения исследовали на световом микроскопе Zeiss.

Твердость по Бринеллю измеряли на поверхностях трения тормозного диска при помощи стационарного твердомера ТБ 5006 (ГОСТ 9012–59 [23]). При стендовых испытаниях тормозных дисков применяли тормозную колодку отечественного производства (условное обозначение: «С»).

Лабораторные испытания по определению износостойкости опытных отливок из износостойкого чугуна различного состава проводили на универсальной машине трения СМЦ-2 по схеме ролик (из материалов тормозных дисков) – пластина (из материалов тормозных колодок); число испытаний каждого опытного варианта — 6. Исследовали образцы диаметром 27 мм при поддержании послойной нормальной нагрузки 72 Н и линейной скорости 3,12 м/с в течение 10 мин для каждого опытного варианта. По полученным результатам определяли износ опытных чугунных образцов весовым способом с достоверной вероятностью не менее 80 %.

Стендовым испытаниям подвергали опытные чугунные тормозные диски с содержанием 0,03–0,12 % S с определением линейного износа тормозных дисков и колодок с погрешностью до 0,005 мм. При проведении стендовых испытаний на инерционном динамометрическом стенде (6 шт.

на каждый опытный состав серого чугуна), поддерживали следующие параметры:

- момент инерции — 4,18 кг·м²; замедление — 3 м/с²; момент трения — 38 кг·м;
- начальная температура нагрева тормозного диска перед торможением — от 100 до 350 °С с шагом 50 °С;
- число торможений при каждой начальной температуре нагрева тормозного диска — $N = 200$;
- начальная и конечная скорости торможения — 100 и 60 км/ч соответственно.

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние микролегирующих добавок серы на свойства серого чугуна

Изучение микроструктуры серых чугунов с различным содержанием серы (рис. 1) показало, что с повышением ее содержания в структуре появляются сульфиды марганца (показаны стрелками), размеры которых увеличиваются пропорционально росту содержания серы.

Характеристики структуры и свойств исследуемых чугунов с различным содержанием серы приведены в табл. 1. Из представленных в табл. 1 данных следует, что с повышением содержания серы в исследуемом диапазоне снижение прочностных свойств и твердости наблюдается с ростом содержания серы до 0,10 %, а дальнейшее увеличение

содержания серы не приводит к существенным изменениям механических свойств серого чугуна марки Gh190.

Результаты оценки износостойкости опытных отливок из серого чугуна с различным содержанием серы, проводимой по величине весового износа чугунов, представлены на рис. 2. Согласно графику, влияние серы на весовой износ серого чугуна имеет сложный экстремальный характер с достижением минимального уровня износа при содержании 0,12 % S. Снижение весового износа опытных образцов серого чугуна с повышением содержания в них серы от 0,03 до 0,12 % обусловлено появлением в структуре включений сульфида марганца MnS (см. рис. 1, а, б), работающих как твердый смазочный материал в сочетании с включениями графита. Однако с повышением содержания серы до 0,13 % и более, сопровождающимся укрупнением сульфидов марганца (см. рис. 1, в, г), наблюдается увеличение весового износа образцов и, соответственно, снижение износостойкости. Ухудшение фрикционных свойств чугуна при повышенном содержании серы объясняется, вероятно, избыточным укрупнением сульфидов марганца, размеры которых значительно превышают размеры графитных включений. Таким образом, для достижения минимального износа целесообразно повышение содержания серы в сером чугуне до уровня 0,12 %.

Графическое представление результатов стендовых испытаний тормозных дисков из опытных составов серого

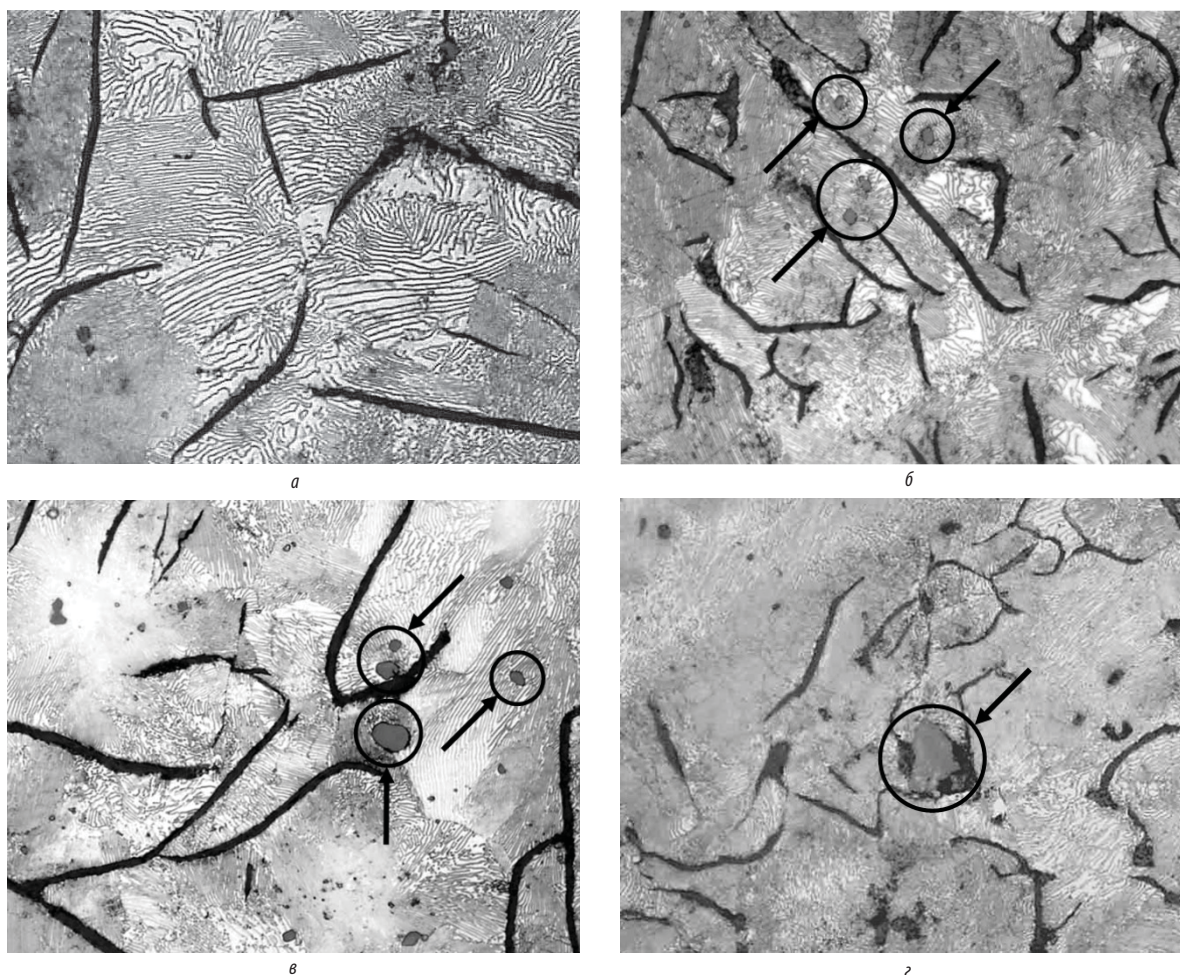


Рис. 1. Микроструктура чугуна Gh190 при содержании серы 0,02 (а), 0,12 (б), 0,13 (в) и 0,14 (г) %, ×500

Таблица 1

Характеристики исследуемых чугунов

Параметр	Чугун				
	Gh190	Gh190 (S0,10)	Gh190 (S0,12)	Gh190 (S0,13)	Gh190 (S0,14)
Тип графита	A, B и D № 4, 5	A, B и E № 4–6	A, B и E № 4–6	A, B и E № 4–6	A, B и D № 4
MnS, % (мас.)*	0,06	0,26	0,32	0,34	0,38
Mn _{своб.} , % (мас.)**	0,51	0,25	0,31	0,23	0,91
Феррит, % _{об}	–	–	–	–	–
σ_b (среднее), МПа	315	265	257	275	207
НВ (среднее)	225	214	209	214	206

* Рассчитано по стехиометрическому соотношению.
 ** $Mn_{своб} = Mn - 1,72 \cdot S, \% (мас.) [2]$.

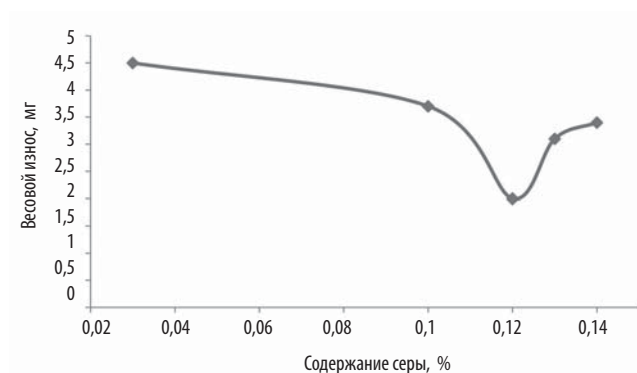


Рис. 2. Весовой износ отливок из серого чугуна Gh190 в зависимости от содержания серы при испытаниях по схеме ролик – пластина

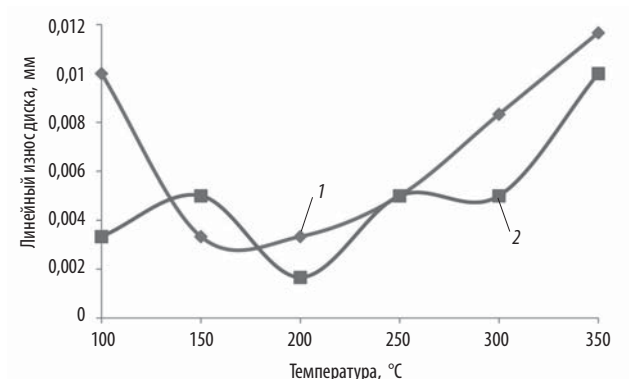


Рис. 3. Влияние температуры нагрева тормозного диска на его линейный износ в процессе проведения стендовых испытаний при содержании серы в чугуне 0,03 (1) и 0,12 (2) %

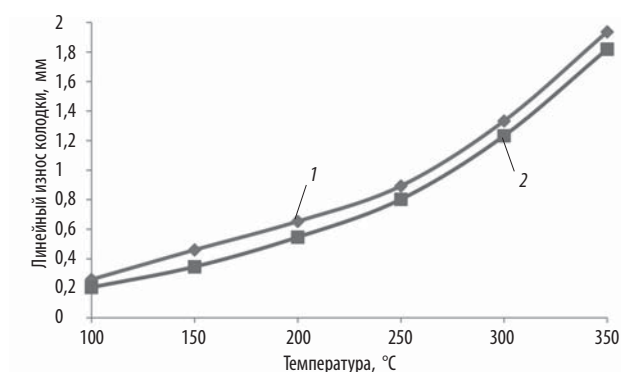


Рис. 4. Влияние температуры нагрева тормозного диска на линейный износ тормозных колодок в процессе проведения стендовых испытаний при содержании серы в чугуне тормозного диска 0,03 (1) и 0,12 (2) %

чугуна с содержанием 0,03 и 0,12 % S при различных температурах начала торможения представлено на **рис. 3** и **4**. Из полученных экспериментальных данных следует, что суммарный средний износ дисков с содержанием 0,03 и 0,12 % S за испытание составил 0,042 и 0,03 мм соответственно. Суммарный средний износ колодок составил 5,54 и 4,95 мм в паре с тормозными дисками из чугунов Gh190 (0,03S) и Gh190 (0,12S) соответственно. Таким образом, средний линейный износ дисков с повышенным содержанием серы (0,12 %) примерно на 30 % меньше, чем износ дисков

Таблица 2

Усредненные коэффициенты трения (min...max) за 200 торможений при каждой температуре в паре тормозной диск – тормозная колодка «С»

Температура тормозного диска в начале торможения, °C					
100	150	200	250	300	350
Диск из чугуна Gh190					
0,44...0,47	0,40...0,45	0,40...0,41	0,40...0,42	0,40...0,42	0,36...0,38
Диск из чугуна Gh190 (0,12S)					
0,47...0,51	0,44...0,50	0,41...0,43	0,40...0,41	0,38...0,41	0,34...0,38

с содержанием серы 0,03 % при аналогичных температурных режимах испытаний. Следует отметить, что, кроме снижения износа тормозных дисков из серого чугуна с повышенным содержанием серы, получено снижение линейного износа тормозных колодок, работающих в паре с опытными тормозными из чугуна Gh190 (0,12S), на 12 % (отн.).

Данные расчета коэффициентов трения, полученные по результатам стендовых испытаний, представленные в **табл. 2**, показывают, что в температурном диапазоне 100–150 °C коэффициенты трения при испытаниях тормозных дисков из чугуна с содержанием 0,12 % S превышают аналогичные показатели работы дисков из чугуна с содержанием 0,02 % S. С повышением темпе-

ратур тормозных дисков в диапазоне от 200 до 350 °С результаты расчетных значений коэффициентов трения при испытаниях тормозных дисков из чугуна с различным содержанием серы находятся на сопоставимых уровнях.

Влияние микролегирующих добавок карбидообразующих элементов Мо, Ti, Mn и Cr на свойства серого чугуна

Результаты исследования влияния серы, молибдена и титана на структуру, механические свойства и величину весового износа образцов серого чугуна после испытаний на машине трения СМЦ-2 представлены на **рис. 5** и в **табл. 3**. Как видно из рис. 5, износостойкость серых чугунов повышается по мере увеличения содержания в них серы, молибдена и титана. Наибольшей износостойкостью по результатам испытаний образцов серого чугуна обладает чугун, содержащий 0,07 % S, 0,6 % Mo и 0,2 % Ti.

Весовой износ чугуна с содержанием 0,07 % S и 0,3 % Mo составил в среднем на 1,6 мг меньше, чем при испытании чугуна с содержанием 0,03 % S. Увеличение содержания молибдена в чугуне на 0,3 % дополнительно снижает весовой износ в среднем на 0,3 мг.

Результаты изучения весового износа чугунов с повышенным содержанием серы, марганца и хрома, подвергнутых испытаниям на машине трения СМЦ-2, приведены на **рис. 6**, их характеристики представлены в **табл. 4**.

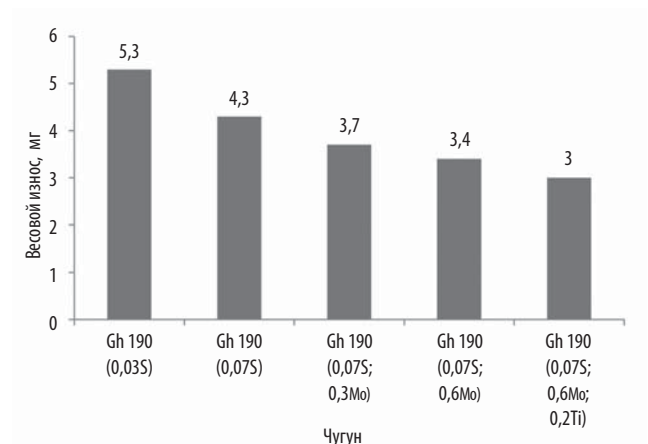


Рис. 5. Влияние состава серого чугуна, легированного серой, молибденом и титаном, на весовой износ при лабораторных испытаниях

Варьирование содержания карбидообразующих элементов и серы позволяет повысить износостойкость чугуна в 2 раза (по сравнению с чугуном со стандартным содержанием 0,03 % S). Минимальный весовой износ 2,4 и 2,2 мг характерен для чугунов Gh190 (1,09Mn; 0,16Cr) и Gh190 (0,48Mn; 0,58Cr; 0,08S) соответственно.

Наименьшее уменьшение весового износа показали результаты испытаний образцов Gh190 (0,77Mn; 0,19Cr) и Gh190 (1,0Mn; 0,36Cr; 0,05S), для которых весовой износ составил 3,9 и 3,7 мг, что в 1,15 и 1,22 раза ниже, чем износ серого чугуна со стандартным содержанием 0,03 % S.

При достижении определенных значений содержания марганца и хрома износостойкость снижается, что, возможно, связано с процессами охрупчивания.

На основе полученных результатов предложены рекомендации при совместном легировании чугуна серой, марганцем и хромом:

$$Mn^{изб} + 2 \cdot Cr = 1,5, \% (мас.), \tag{1}$$

где $Mn^{изб}$ — количество марганца, не связанного в сульфиды, % (мас.).

При данной концентрации марганца и хрома значение износостойкости максимальное. При содержании элементов выше данной концентрации износостойкость и прочностные свойства серого чугуна снижаются.

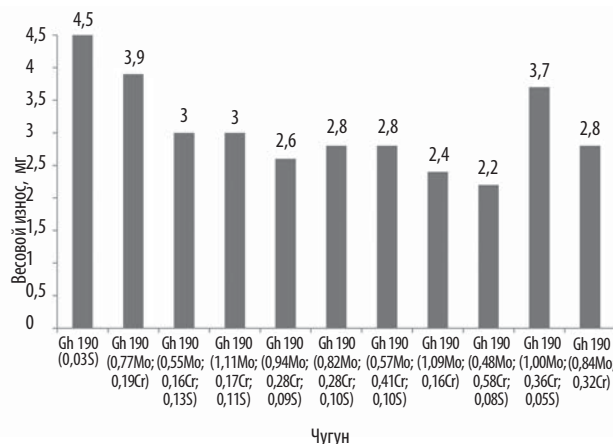


Рис. 6. Весовой износ чугуна Gh190, легированного серой, марганцем и хромом, при лабораторных испытаниях в паре с материалом тормозной колодки «С»

Таблица 3

Характеристики чугунов с повышенным содержанием серы, молибдена и титана

Параметр	Чугун				
	Gh190	Gh190 (0,07S)	Gh190 (0,07S; 0,3Mo)	Gh190 (0,07S; 0,6Mo)	Gh190 (0,07S; 0,6Mo; 0,02Ti)
Тип графита	A № 4, 5; B и D	A № 4, 5; B	A № 5, 6	A № 4, 5; B	A № 4, 5; B
MnS, % (мас.)*	0,08	0,21	0,21	0,19	0,19
Mn _{своб} , % (мас.)	0,41	0,37	0,35	0,35	0,36
Феррит, % _{об}	—	—	—	3–4	1–2
HВ (среднее)	234	241	261	279	240

* Рассчитано по стехиометрическому соотношению.
 ** Mn_{своб} = Mn – 1,72·S, % (мас.) [2].

Таблица 4

Характеристики чугунов с повышенным содержанием серы, марганца и хрома

Параметр	Чугун										
	Gh 190	Gh190 (0,77Mn; 0,19Cr)	Gh190 (0,55Mn; 0,16Cr; 0,13S)	Gh190 (1,11Mn; 0,17Cr; 0,11S)	Gh190 (0,94Mn; 0,28Cr; 0,09S)	Gh190 (0,82Mn; 0,28Cr; 0,10S)	Gh190 (0,57Mn; 0,41Cr; 0,10S)	Gh190 (1,09Mn; 0,16Cr)	Gh190 (0,48Mn; 0,58Cr; 0,08S)	Gh190 (1,00Mn; 0,36Cr; 0,05S)	Gh190 (0,84Mn; 0,32Cr)
Тип графита	A, B и D № 4, 5	A, E № 4, 5	A, E № 4, 5	A, E № 4–6	A, E № 4, 5	A, E № 4, 5	A, E № 4, 5	A № 3, 4	A № 3, 4	A № 3, 4	A, E № 3–5
MnS, % (мас.)*	0,06	0,03	0,35	0,30	0,25	0,28	0,28	0,03	0,23	0,13	–
Mn _{своб} , % (мас.)**	0,51	0,75	0,33	0,92	0,78	0,64	0,40	1,07	0,34	0,92	0,84
Феррит, % _{об}	–	20	30	25	1	1,5	3	4	2	2	1
σ_B , МПа	315	313	263	226	290	260	296	259	316	230	257
НВ	225	191	181	179	213	198	193	191	217	194	201

* Рассчитано по стехиометрическому соотношению.
**Mn_{своб} = Mn – 1,72·S, % (мас.) [2].

Заключение

По результатам исследования влияния серы и карбидообразующих элементов Mn, Cr, Mo и Ti на механические и эксплуатационные свойства тормозных дисков из серого чугуна марки Gh190 сделаны следующие выводы.

1. В исследуемом диапазоне содержания серы (0,02–0,14 %) ее влияние на износостойкость серого чугуна марки Gh190 носит экстремальный характер с достижением минимального износа образцов при содержании 0,12 % S.

2. Снижение весового износа опытных образцов серого чугуна с повышением содержания в них серы от 0,03 до 0,12 % обусловлено появлением в структуре включений сульфидов марганца, работающих как твердый смазочный материал в сочетании с включениями графита. Однако с увеличением содержания серы до 0,13 % и более, сопровождающимся укрупнением сульфидов марганца, наблюдается увеличение весового износа образцов и соответственно снижение износостойкости. Ухудшение фрикционных свойств чугуна при повышенном содержании серы объясняется, вероятно, избыточным укрупнением сульфидов марганца, размеры которых значительно превышают размеры графитных включений.

3. С повышением содержания серы в исследуемом диапазоне снижение прочностных свойств и твердости чугуна наблюдается с ростом содержания серы до 0,10 %, а дальнейшее увеличение содержания серы не приводит к существенным изменениям механических свойств.

4. Средний линейный износ дисков с повышенным содержанием серы (0,12 %) примерно на 30 % (отн.) меньше, чем износ дисков с содержанием серы 0,03 % при аналогичных температурных режимах испытаний.

5. Повышенное содержание серы в тормозных дисках из серого чугуна до 0,12 % обеспечивается снижение линейного износа тормозных колодок на 12 % (отн.).

6. Износостойкость серых чугунов повышается по мере их микролегирования карбидообразующими элементами Mn, Cr, Mo и Ti.

7. Варьирование содержания карбидообразующих элементов и серы позволяет повысить износостойкость чугуна в 2 раза (по сравнению с чугуном со стандартным содержанием 0,03 % S).

По результатам исследования разработаны рекомендации по оптимизации состава серого чугуна марки Gh190, используемого для изготовления тормозных дисков, заключающиеся в повышении содержания серы до 0,12 %. Использование разработанных рекомендаций позволило снизить скорость износа тормозных дисков на 30 % при сокращении износа тормозных колодок на 12 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2023-0008).

Библиографический список

1. Григорьев В. М., Жатченко Я. В. Чугун остается перспективным сплавом для тормозных колодок // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2016. № 1 (6). С. 12–15.
2. Чугун / под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. — М.: Металлургия, 1991. — 576 с.
3. Неижко И. Г. Графитизация и свойства чугуна. — Киев: Наукова Думка, 1989. — 208 с.
4. Поляков П. А., Тагиев Р. С., Федотов Е. С., Полякова Е. А. и др. Разработка тепловой модели тормозного диска фрикционного узла // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1 (150). С. 64–76.
5. Sawczuk W., Jungst M. Numerical analyzes and a comparative study of an automotive standard brake disc with a disc drilled along the Archimedes spiral // The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2018. Vol. 79, Iss. 1. P. 79–94. DOI: 1014669/AM.VOL79.ART6.
6. Войтенко В. А. Перспективные конструкции для дисковых тормозов высокоскоростных поездов // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 5. С. 8–11.
7. Болдырев Д. А., Нефедьев С. П., Харченко М. В., Дема Р. Р. Влияние технологических факторов на остаточные напряжения и вибрации в системе «диск – колодка» // Черные металлы. 2022. № 5. С. 27–33.
8. Boldyrev D., Kharchenko M., Nefedev S., Suvorova E. The improvement of the operational characteristics of the ventilated front brake discs // Materials Research Proceedings: Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. 2022. Vol. 21. P. 88–94.

9. Boldyrev D., Nefedyev S., Dema R., Kharchenko M. et al. Influence of Fe–Si–Mg–REM-Inoculants on the microstructure of iron castings with vermicular graphite // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2022. Vol. 57, Iss. 2. P. 390–401.
10. Чайкин В. А., Болдырев Д. А., Чайкина Н. В. Особенности графитизирующего модифицирования высокопрочного чугуна смешанными модификаторами в условиях ОАО «АВТОВАЗ» // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2007. № 4 (20). С. 53–58.
11. Dawson S., Hollinger I., Robbins M., Daeth J. et al. The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron // *SAE Transactions*. Vol. 110. Sec. 5: *Journal of Materials and Manufacturing*. 2001. P. 334–352.
12. Ghanbari H., Ketabchi M., Damavandi E. Effect of chemical composition and microstructure on the crack growth and machinability of GG20 gray cast iron for brake drum application // *Machining Science and Technology*. 2023. Vol. 26, Iss. 5. P. 977–1002. DOI: 10.1080/10910344.2023.2180752.
13. El Sawy E. E. T., El Hebeary M. R., El Mahallawi I. S. E. Effect of manganese, silicon and chromium additions on microstructure and wear characteristics of grey cast iron for sugar industries applications // *Wear*. 2017. Vol. 390–391. P. 113–124.
14. Hamid P., Gates J. D. Effects of niobium macro-additions to high chromium white cast iron on microstructure, hardness and abrasive wear behavior // *Materials & Design*. 2021. Vol. 212. 110261.
15. Agunsoye J., Ochulor E. F., Talabi S. I., Olatunji S. Effect of manganese additions and wear parameter on the tribological behaviour of NFGREY (8) cast iron // *Tribology in Industry*. 2012. Vol. 34. No. 4. P. 239–246.
16. Abouraya G. E. Y., Abdallah M. M., Al-jarrah J. A. Wear and crystallization behavior of a gray cast iron surface treatment by sulphur additions in the moulding sand // *Port Said Engineering Research Journal*. 2012. Vol. 16. No. 1. DOI: 10.21608/pserj.2012.114378.
17. Srivastava R., Singh B., Saxena K. K. Influence of S and Mn on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview // *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.577.
18. Alderson A. The influence of manganese and sulphur on the structure and mechanical properties of grey cast iron // *The British Foundryman*. 1985. Vol. 78. P. 335–341.
19. Gundlach R. Influence of Mn and S on mechanical properties of gray cast iron: Part I – Historical Perspective // *Annual Metalcasting Congress*. 2014. Vol. 118. P. 287–304.
20. Meyer M. H., Gundlach R. B., Williams D. C., Winardi L. Influence of Mn and S on the properties of cast iron. Part II – Experimental Design: Aspects of Melting and Pouring // *Transactions of the American Foundry Society*. 2014. Vol. 122. P. 273–278.
21. Gundlach R., Meyer M., Winardi L. Influence of Mn and S on the properties of cast iron. Part III – Testing and Analysis // *International Journal of Metalcasting*. 2015. Vol. 9. P. 69–82.
22. ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. — Введ. 01.01.1986.
23. ГОСТ 9012–59. *Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю*. — Введ. 01.01.1960.

“*Chernye metally*”, 2023, No. 11, pp. 90–96
DOI: 10.17580/chm.2023.11.14

Influence of microalloying additives of carbide-forming elements and sulfur on the complex of properties of cast iron brake disc blanks

Information about authors

D. A. Boldyrev, Dr. Eng., Prof., Dept. of Nanotechnology, Materials Science and Mechanics¹, e-mail: denis.boldyrev@vaz.ru;

A. A. Nikolaev, Cand. Eng., Head of the Dept. of Automated Electric Drive and Mechatronics², e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru;

M. V. Kharchenko, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Mechanics², Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment³, e-mail: kharchenko.mv@bk.ru;

S. P. Nefediev, Cand. Eng., Senior Researcher of the Scientific Innovation Sector², Associate Prof., Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment³, e-mail: sergeynefedieff@gmail.com

¹ Tolyatti State University, Tolyatti, Russia.

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

³ Novotroitsk branch of NUST MISIS, Novotroitsk, Russia.

Abstract: Improving the frictional properties of gray cast iron as a material for brake discs is an urgent task in mechanical engineering. One way to improve the properties of products in this direction is to add various elements to their composition. In this paper, tests were carried out for wear resistance of the manufactured experimental melts of brake discs and samples from them in order to confirm the assumption about the positive effect of sulfur and carbide-forming elements (Mn, Cr, Mo, Ti) on friction properties. Laboratory tests were carried out on the friction machine SMC-2 of samples obtained from manufactured brake discs with different sulfur content. It was determined that with an increase in the sulfur content in cast iron Gh190 from 0.02 % to 0.12 %, the weight wear of the samples decreases by 2 times, and with a sulfur content in cast iron of more than 0.12 %, the wear increases. Bench tests were carried out, in which the friction properties of gray cast irons Gh190 were compared with a standard sulfur value of 0.03 % and with an increased value of 0.12 %. The linear wear of disks with a high sulfur content over the entire series of tests was 30 % than the wear of a disk with a standard sulfur content. At the same time, the linear wear of brake pads paired with discs made of cast iron with a high sulfur content was 12 % less. Also, tests were carried out on the friction machine of samples of brake discs with different contents of sulfur and carbide-forming elements (Mn, Cr, Mo, Ti). It was determined that cast iron with a sulfur content of 0.07 %, molybdenum 0.6 % and titanium 0.2 % suffered 1.8 times less wear than cast iron with a sulfur content of 0.03 %. Varying the content of sulfur and such carbide-forming elements as Mn, Cr made it possible to increase the wear resistance of the samples by a factor of 2. As a result of the research, recommendations were developed for optimizing the material and manufacturing technology of brake discs: for castings of front brake discs VAZ from cast iron Gh190, a change in sulfur content was introduced (0.11–0.13 % instead of 0.01–0.03 %), which led to a decrease in the intensity of wear of brake discs by 30%, brake pads – by 12 %.

Keywords: brake disc, friction machine, stand, wear resistance, wear, carbide-forming elements, sulfur, gray cast iron.

The work was carried out under financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZR-2023-0008).

References

1. Grigoriev V. M., Zhatchenko Ya. V. Cast iron remains a promising alloy for brake pads. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona*. 2016. No. 1 (6). pp. 12–15.
2. Cast iron. Edited by A. D. Sherman, A. A. Zhukov. Moscow : Metallurgiya, 1991. 576 p.

3. Neizhko I. G. Graphitization and properties of cast iron. Kiev : Naukova Dumka, 1989. 208 p.
4. Polyakov P. A., Tagiev R. S., Fedotov E. S., Polyakova E. A. et al. Development of a thermal model of the friction unit brake disc. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. Vol. 24. No. 1 (150). pp. 64–76.
5. Sawczuk W., Jungst M. Numerical analyzes and a comparative study of an automotive standard brake disc with a disc drilled along the Archimedes spiral. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2018. Vol. 79, Iss. 1. pp. 79–94. DOI: 1014669/AM.VOL79.ART6.
6. Vitenko V. A. Promising designs for disc brakes on high-speed trains. *Transport Rossiyskoy Federatsii*. 2018. No. 5. pp. 8–11.
7. Boldyrev D. A., Nefediev S. P., Kharchenko M. V., Dema R. R. Influence of brake disk manufacturing technology on residual stresses and vibrations in the “disc-pad” system. *Chernye Metally*. 2022. No. 5. pp. 27–33.
8. Boldyrev D., Kharchenko M., Nefediev S., Suvorova E. The improvement of the operational characteristics of the ventilated front brake discs. *Materials Research Proceedings: Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2022. Vol. 21. pp. 88–94.
9. Boldyrev D., Nefediev S., Dema R., Kharchenko M. et al. Influence of Fe–Si–Mg–REM-Inoculants on the microstructure of iron castings with vermicular graphite. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2022. Vol. 57, Iss. 2. pp. 390–401.
10. Chaykin V. A., Boldyrev D. A., Chaykina N. V. Features of graphitizing modification of high-strength cast iron with mixture modifiers under the conditions of JSC AVTOVAZ. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2007. No. 4 (20). pp. 53–58.
11. Dawson S., Hollinger I., Robbins M., Daeth J. et al. The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. *SAE Transactions*. Vol. 110. Sec. 5: *Journal of Materials and Manufacturing*. 2001. P. 334–352.
12. Ghanbari H., Ketabchi M., Damavandi E. Effect of chemical composition and microstructure on the crack growth and machinability of GG20 gray cast iron for brake drum application. *Machining Science and Technology*. 2023. Vol. 26, Iss. 5. pp. 977–1002. DOI: 10.1080/10910344.2023.2180752.
13. El Sawy E. E. T., El Hebeary M. R., El Mahallawi I. S. E. Effect of manganese, silicon and chromium additions on microstructure and wear characteristics of grey cast iron for sugar industries applications. *Wear*. 2017. Vol. 390–391. pp. 113–124.
14. Hamid P., Gates J. D. Effects of niobium macro-additions to high chromium white cast iron on microstructure, hardness and abrasive wear behavior. *Materials & Design*. 2021. Vol. 212. 110261.
15. Agunsoye J., Ochulor E. F., Talabi S. I., Olatunji S. Effect of manganese additions and wear parameter on the tribological behaviour of NFGREY (8) cast iron. *Tribology in Industry*. 2012. Vol. 34. No. 4. pp. 239–246.
16. Abouraya G. E. Y., Abdallah M. M., Al-jarrah J. A. Wear and crystallization behavior of a gray cast iron surface treatment by sulphur additions in the moulding sand. *Port Said Engineering Research Journal*. 2012. Vol. 16. No. 1. DOI: 10.21608/pserj.2012.114378.
17. Srivastava R., Singh B., Saxena K. K. Influence of S and Mn on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.577.
18. Alderson A. The influence of manganese and sulphur on the structure and mechanical properties of grey cast iron. *The British Foundryman*. 1985. Vol. 78. pp. 335–341.
19. Gundlach R. Influence of Mn and S on mechanical properties of gray cast iron: Part I – Historical Perspective. *Annual Metalcasting Congress*. 2014. Vol. 118. pp. 287–304.
20. Meyer M. H., Gundlach R. B., Williams D. C., Winardi L. Influence of Mn and S on the properties of cast iron. Part II – Experimental Design: Aspects of Melting and Pouring. *Transactions of the American foundry society*. 2014. Vol. 122. pp. 273–278.
21. Gundlach R., Meyer M., Winardi L. Influence of Mn and S on the properties of cast iron. Part III – Testing and Analysis. *International Journal of Metalcasting*. 2015. Vol. 9. pp. 69–82.
22. ГОСТ 1497–84. *Metals. Methods of tension test*. Introduced: 01.01.1986.
23. GOST 9012–59. *Metals. Method of Brinell hardness measurement*. Introduced: 01.01.1960.