

ISSN 0132-0890  
www.rudmet.ru

# Черные металлы

Издается с 1961 года  
(№ 1085)

5.2022



ВЕЧНАЯ СЛАВА  
ПАВШИМ ГЕРОЯМ

С праздником  
Победы!

# ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом  
«Руда и Металлы»

№ 5 (1085), май 2022 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»  
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»  
Государственного Эрмитажа

Официальный информационный орган  
Федерального УМО  
«Технологии материалов»

#### Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев

Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев

Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников

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,  
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь),  
А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,  
П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

#### Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников

Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Редактор: Э. Э. Бабали

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» № 5 (1085), май 2022 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: 09.06.2022. Формат 60x90/8.

Печ. л. 10,5. 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

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

Подписные индексы:

12985 («Пресса России»)

## СОДЕРЖАНИЕ

### 30 лет Новотроицкому филиалу НИТУ «МИСиС»

<i>Д. Р. Ганин, А. А. Панычев, А. Ю. Фукс.</i> Новый способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья . . . . .	4
<i>Г. А. Куницын, М. С. Кузнецов, А. Н. Шаповалов, И. В. Бакин.</i> Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям . . . . .	9
<i>А. А. Токарев, А. В. Каляскин, А. В. Бархатов, Е. В. Братковский.</i> Совершенствование технологии позднего графитизирующего модифицирования при производстве тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна . . . . .	16
<i>А. В. Нефедов, А. А. Китанов, Н. А. Чиченев.</i> Реинжиниринг роликовой закалочной машины листопрокатного цеха АО «Уральская Сталь» . . . . .	22
<i>Д. А. Болдырев, С. П. Нефедьев, М. В. Харченко, Р. Р. Дема.</i> Влияние технологических факторов на остаточные напряжения и вибрации в системе «диск – колодка» . . . . .	27
<i>А. В. Цуканов, К. В. Лицин, С. Н. Басков.</i> Разработка системы управления асинхронным электродвигателем на основе адаптивной модели в условиях листопрокатного производства . . . . .	34

### Подготовка сырьевых материалов

<i>А. Б. Лебедев, П. В. Мусинова.</i> Формирование прочности окомкованного многофазного спека двухкальциевого силиката . . . . .	40
--	----

### Прокатка

<i>В. А. Пименов.</i> Анализ влияния технологических режимов и состояния оборудования на возникновение вибраций при непрерывной холодной прокатке . . . . .	47
<i>Д. Ю. Алексеев, А. Е. Гулин, Д. Г. Емалеева, А. С. Кузнецова.</i> Разработка конечно-элементной модели расчета теплового поля рулонного проката в процессе термомеханической обработки . . . . .	55

### Нанесение покрытий и защита от коррозии

<i>Д. Д. Фазуллин, Г. В. Маврин, Л. И. Фазуллина, И. Г. Шайхиев, Н. М. Лядов.</i> Ингибиторы коррозии стали на основе растительного сырья для защиты нефтепромыслового оборудования . . . . .	61
---	----

### Сварка и наплавка

<i>М. А. Шекшеев, С. В. Михайлицын, А. Б. Сычков, А. Н. Емелюшин.</i> Исследование влияния шлаковой системы покрытых электродов на эффективность инокулирования металла сварочной ванны низкоуглеродистой стали. . . . .	68
--	----

### Машиностроительные технологии

<i>А. Н. Малышев, С. А. Бысов, В. Д. Кухарь, Ю. В. Бессмертная.</i> Экспериментальное исследование вытяжки стальных квадратных коробок по схеме круг-квадрат в радиальной и конической матрицах . . . . .	74
---	----

### Технологические измерения

<i>А. Д. Гусев, И. В. Тихонова, Я. А. Стаханова.</i> Применение нейронных сетей для прогнозирования измерения микротвердости в зоне термического влияния листов углеродистых и низколегированных сталей после лазерной резки. . . . .	79
---	----

### Юбилей

Леониду Николаевичу Шевелеву — 85 лет . . . . .	84
---	----

**Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии**

**Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service**

**Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)**

**(по версии SCIMAGO)**

# Влияние технологии изготовления тормозных дисков на остаточные напряжения и вибрации в системе «диск – колодка»

**Д. А. Болдырев**, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»<sup>1</sup>, докт. техн. наук

**С. П. Нефедьев**, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования<sup>2</sup>, канд. техн. наук

**М. В. Харченко**, доцент кафедры механики<sup>3</sup>, канд. техн. наук, эл. почта: kharchenko.mv@bk.ru

**Р. Р. Дема**, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения<sup>3</sup>, профессор кафедры металлургических технологий и оборудования<sup>2</sup>, докт. техн. наук

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия.

<sup>2</sup>Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

<sup>3</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Тормозная система является одним из основных органов управления, определяющим управляемость и безопасность наземного транспорта. Вибрации рулевого колеса и скрипы при торможении транспортного средства проявляются вследствие неравномерной толщины тормозного диска или его коробления. Причинами разнотолщинности тормозных дисков являются неточности при их изготовлении, а также неравномерный износ в процессе эксплуатации из-за неоднородности свойств. Коробление тормозных дисков обусловлено наличием остаточных напряжений в детали после изготовления или термическими напряжениями, возникающими в процессе эксплуатации.

Представлены результаты исследования влияния технологии изготовления вентилируемых тормозных дисков на их эксплуатационные характеристики и остаточные упругие деформации. Наибольшая точность изготовления обеспечивается при использовании технологии с финишной лезвийной обработкой, а наименьшая — при применении технологии без правки шлифовального инструмента. Установлено, что шлифование, являющееся финишной операцией механической обработки, ведет к повышению уровня остаточных напряжений в материале детали. Подобран режим термообработки, обеспечивающий снятие остаточных напряжений и оптимизацию механических свойств рабочих поверхностей. Подтверждено, что предлагаемый режим отжига обеспечивает сохранение геометрических параметров тормозных дисков и снижает биение на большинстве испытанных изделий, подверженных при изготовлении различным видам механической обработки.

**Ключевые слова:** вентилируемый тормозной диск, разнотолщинность, коробление, термообработка, отжиг, остаточные упругие деформации, естественное старение.

**DOI:** 10.17580/chm.2022.05.05

## Введение

Безопасная эксплуатация различных видов транспортных средств требует решения или минимизации множества проблем, возникающих в тормозных системах: образование трещин в тормозных дисках, появление вибраций рулевого колеса и возникающих при торможении шумов и др. [1–7].

При торможении транспортных средств возникает переменный момент трения в контакте «тормозной диск – колодка». При этом возникающие в автомобиле колебания передаются на рулевое колесо, а их амплитуда усиливается кинематической системой рулевой тяги автомобиля. По мнению авторов работ [8–10], основным источником возникновения вибраций является разнотолщинность или поводки тормозных дисков, появляющиеся при изготовлении или эксплуатации транспортной техники. Причинами разнотолщинности тормозных дисков являются неточности при их изготовлении, а также неравномерный износ в процессе эксплуатации из-за неоднородности свойств.

Результаты исследования [11] тормозных дисков автомобилей марки ВАЗ при торможении в интервале скоростей 100–120 км/ч показывают, что наличие разнотолщинности дисков величиной 0,02 мм не приводит к значительной

вибрации рулевого колеса. Повышение разнотолщинности до 0,04 мм вызывает существенные вибрации во всем диапазоне скоростей. При этом величина разнотолщинности тормозных дисков импортного производства не превышает 0,005 мм.

Появляющаяся в процессе нормальной эксплуатации дисков разнотолщинность обычно составляет менее 0,02 мм и не является критической. Более существенной является проблема возникновения разнотолщинности вследствие неточности изготовления, которая может значительно превышать 0,02 мм, а также в дальнейшем развиваться или появляться при эксплуатации из-за неравномерного износа. Разнотолщинность новых тормозных дисков может быть связана с короблением из-за действия остаточных напряжений в детали [12]. Возникающие в дисках остаточные напряжения могут быть легко устранены или понижены до безопасного уровня проведением специальной термической обработкой (отжиг) [13]. Однако в научно-технической литературе встречается недостаточное количество работ, посвященных исследованию влияния различных параметров технологий изготовления тормозных дисков на их геометрические параметры (биение, неплоскостность, непараллельность) после эксплуатации. В основном работы

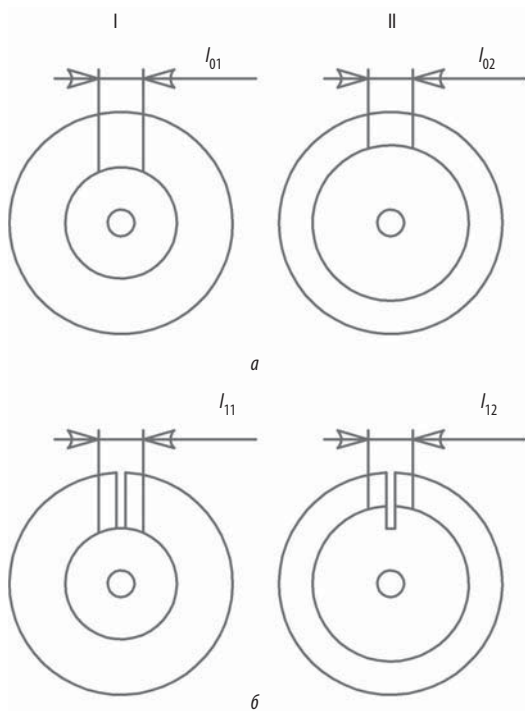


Рис. 1. Схема определения относительных остаточных упругих деформаций

направлены на исследование процессов, протекающих при изнашивании тормозных дисков. В работе [14] была выявлена взаимосвязь между локальным износом тормозных дисков и свойствами специально отлитого литейного чугуна с зонами, отличными по механическим свойствам, при испытании на машине трения. При испытаниях было обнаружено, что локальные места с отличными свойствами чугуна, в первую очередь твердостью, коррелируют с локальным износом диска. В исследованиях [15] определено влияние ванадия на сталь состава Ni – Cr – Mo. При этом выяснено, что твердость вблизи поверхности трения такая же высокая, как у стали с высокой прокаливаемостью, а стойкость к тепловым нагрузкам улучшается при добавлении 0,1 % V.

Большое внимание уделяется изучению тепловых процессов в паре «тормозной диск – колодка» при помощи различных методов исследований: вычислительной гидродинамики (CFD-анализ) [16], конечно-элементного моделирования [17–20] и др. В исследовании [16] проведен CFD-анализ тормозной системы для определения распределения воздушных потоков вокруг цельного и вентилируемого тормозных дисков и значений коэффициентов теплопередачи различных поверхностей для дисков из серого чугуна (FG25 AL, FG20 и FG15).

В работе [20] методом конечных элементов были проанализированы тепловое состояние и термические напряжения тормозных дисков из различных материалов: чугуна, мартенситностареющей стали, алюмо-боро-силикатного стекла и композитов с алюминиевой металлической матрицей. Согласно полученным результатам, алюминиевые композиты в меньшей степени нагреваются и, соответственно, менее подвержены появлению термических напряжений в процессе эксплуатации. Кроме того, отмечено, что уровень термических напряжений в чугунных дисках ниже, чем

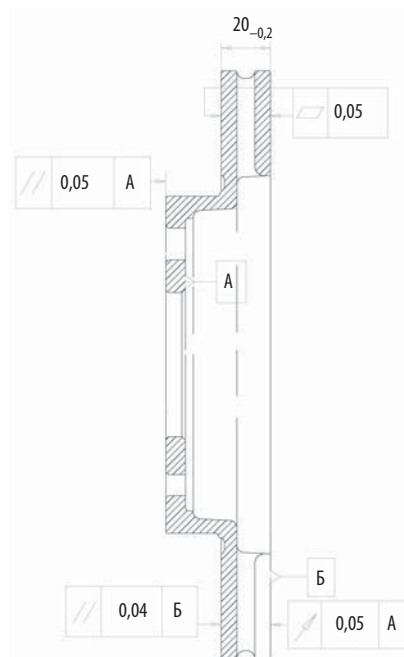


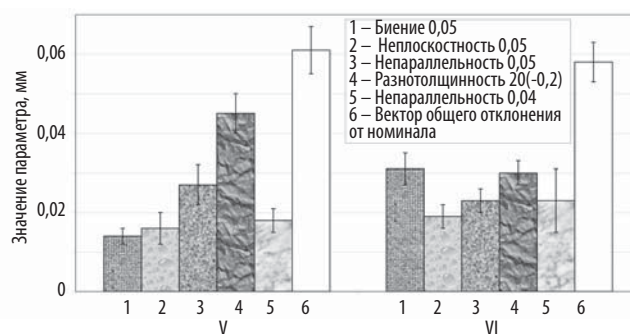
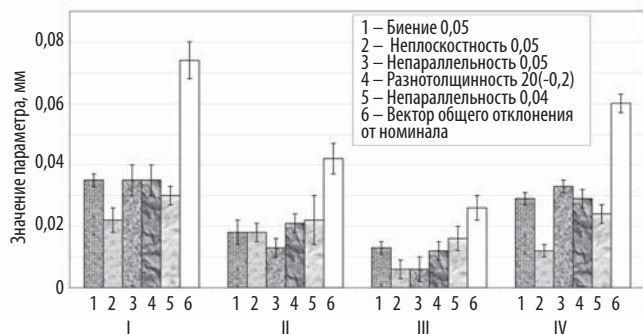
Рис. 2. Геометрические параметры (допуски) тормозных дисков: I ( $\wedge$ 0,05) — биение; II ( $\sphericalangle$ ...0,05) — неплоскостность; III ( $\parallel$  0,05) — непараллельность; IV ( $20_{-0,2}$ ) — разнотолщинность; V ( $\parallel$  0,04) — непараллельность

в дисках из мартенситностареющей стали и алюмо-боро-силикатных стекол.

Также недостаточно внимания уделяют исследованиям, направленным на выявление влияния режимов термической обработки на геометрические параметры тормозных дисков. В исследовании [21] анализируется процесс изготовления тормозных дисков из низколегированной стали для высокоскоростных поездов. Предложено улучшение механических свойств литой стали при помощи нормализации и последующих закалки и отпуска. В работе [22] проведены испытания на машине трения «палец–диск» для определения роли обычной термообработки, проводимой на чугунных дисках, в износе вышеуказанной пары. Скорость изнашивания как диска, так и фрикционных материалов снижается почти на порядок при предварительной термообработке диска и последующей шлифовке с удалением поверхностного обезуглероженного слоя, образующегося в ходе термической обработки. Также отмечено, что проведение термической обработки (отжига) с целью снятия внутренних напряжений и последующего шлифования приводит к значительному снижению коэффициента трения. В работе [23] исследована прочность чугунных изделий (в том числе и тормозных дисков), подвергнутых термодиффузионному поверхностному легированию. Установлено, что химико-термическая обработка позволила повысить прочность деталей более чем на 60 %.

Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на определение режимов термической обработки тормозных дисков для снятия внутренних напряжений.

Цель исследования заключается в разработке оптимальных режимов термической обработки вентилируемых тормозных дисков, изготавливаемых по различным технологическим схемам.



**Рис. 3.** Точность изготовления вентилируемых тормозных дисков в зависимости от факторов технологии их производства: I — ВА3-2112 (технология обработки без правки шлифовального инструмента); II — ВА3-2112 (серийная технология); III — ВА3-2112 (опытная технология с финишной лезвийной обработкой); IV — ВА3-2112 (технология обработки без шлифования); V — ВА3-2110 (технология механической обработки без операции правки шлифовального инструмента); VI — ВА3-2110 (технология механической обработки без операции шлифования)

### Материалы и методика исследования

Исследование проводили на вентилируемых тормозных дисках из серого перлитного чугуна Gh190 (аналог СЧ25 по ГОСТ 1412–85 [24]), изготовленных АО «АВТОВАЗ» из отливок ОАО «АЛНАС» (Альметьевск).

Термообработанные заготовки подвергали отжигу по следующему режиму: нагрев печи до 450 °С, нагрев печи с отливками до 580 °С, выдержка при данной температуре в течение 2 ч, охлаждение отливок вместе с печью до 350 °С, выгрузка отливок и их охлаждение на воздухе.

Условные обозначения, принятые для описания технологии изготовления тормозных дисков, приведены ниже.

Условное обозначение	Технология изготовления
И	Тормозной диск из отожженной отливки, изготовленный без операции правки шлифовального инструмента
Б	Тормозной диск из неотожженной отливки, изготовленный без операции правки шлифовального инструмента
АО	Тормозной диск из неотожженной отливки, изготовленный по серийной технологии
АО + С	Тормозной диск из отожженной отливки, изготовленный по серийной технологии
ЛО	Тормозной диск из неотожженной отливки, изготовленный по опытной технологии с финишной лезвийной обработкой
ЛО + С	Тормозной диск из отожженной отливки, изготовленный по опытной технологии с финишной лезвийной обработкой
Е	Тормозной диск из отливки после естественного 2-месячного старения, изготовленный без операции шлифования

Уровень остаточных напряжений определяли на основе измерения относительных остаточных упругих деформаций (ОУД), которые находили по следующему алгоритму.

1. Нанесение на стороны I и II тормозного диска (рис. 1, а) друг напротив друга риски:  $l_{01}$  и  $l_{02}$  на расстоянии  $20 \pm 1$  мм.

2. Разрез тормозного диска фрезой шириной 2 мм между рисками (см. рис. 1, б).

3. Измерение расстояния между рисками на сторонах I и II после разреза:  $l_{11}$  и  $l_{12}$  (см. рис. 1, б).

4. Определение относительной ОУД для сторон I и II соответственно:

$$\varepsilon_1 = \Delta l_1 / L,$$

$$\varepsilon_2 = \Delta l_2 / L,$$

где  $L = \pi D$  — длина окружности, соответствующая диаметру тормозного диска, мм;  $\Delta l_1 = l_{11} - l_{01}$  и  $\Delta l_2 = l_{12} - l_{02}$  — изменение расстояния между рисками на сторонах I и II до и после разреза соответственно, мм.

Величину коробления исследуемых дисков оценивали, замеряя такие параметры, как биение, неплоскостность, непараллельность и разнотолщинность (рис. 2), через 1 и 2 мес. после изготовления изделий. Замеры проводили на трехкоординатной измерительной машине DEA (Германия), погрешность измерения которой составляет  $\pm 0,0025$  мм.

Инструментальная погрешность при измерении основных контролируемых геометрических параметров (ОКПП)  $\pm 0,001$  мм (см. рис. 2).

### Полученные результаты и их обсуждение

Оценку точности изготовления провели путем механической обработки отливок тормозных дисков, изготовленных по различным технологиям, с последующим измерением их ОКПП (см. рис. 2). Результаты оценки геометрии тормозных дисков ВА3-2110 и ВА3-2112 представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, схожее качество изготовления дисков ВА3-2110 обеспечивает технологии механической обработки без правки шлифовального инструмента и механической обработки без операции шлифования, однако значение параметра биения  $\nearrow 0,05$  имеет более высокое значение на дисках ВА3-2110, обработанных по технологии без операции шлифования.

Наиболее высокую точность при изготовлении тормозных дисков обеспечивает финишная лезвийная обработка, а наименьшая точность получается при технологии,

Таблица 1

## Изменение формы тормозных дисков за (1 месяц)/(2 месяца) естественного старения

Тормозной диск	№	ОКГП				
		∠ 0,05 Б	20 <sub>0,2</sub>	□ 0,05	// 0,04	// 0,05 Б
2110 И	46	-0,002/+0,001	0/-0,001	+0,002/-0,002	+0,001/0	+0,003/+0,002
	41	-0,002/+0,002	+0,002/0	+0,002/-0,001	+0,001/0	-0,001/-0,003
	40	-0,003/+0,016	-0,001/+0,002	0/-0,001	-0,001/+0,001	+0,003/+0,004
2110 Б	36	0/+0,002	-0,015/-0,021	+0,001/-0,001	-0,001/-0,002	+0,003/+0,001
	34	0/+0,006	+0,008/-0,001	+0,001/-0,001	-0,005/-0,004	-0,002/+0,001
	31	-0,009/-0,011	-0,018/-0,016	+0,002/+0,002	-0,002/-0,004	-0,003/-0,003
2110 Е	1	-0,005/-0,005	-0,001/+0,002	+0,001/-0,001	+0,002/+0,002	-0,001/-0,002
	8	-0,022/-0,019	-0,018/-0,014	+0,003/+0,004	-0,002/-0,002	+0,003/-0,002
	10	-0,005/-0,007	0/+0,003	0/+0,001	-0,003/-0,004	-0,005/-0,011
2112 Е	7	-0,009/-0,004	0/+0,003	-0,003/0	+0,002/-0,003	-0,003/0
	8	+0,003/+0,008	-0,002/-0,002	0/+0,001	+0,003/+0,001	+0,002/+0,001
	10	-0,001/-0,007	0/+0,004	+0,001/-0,002	+0,001/0	0/-0,002
2112 АО	55	-0,005/-0,001	+0,001/0	0/+0,002	+0,001/-0,001	+0,003/-0,003
	56	+0,002/-0,006	+0,003/+0,001	-0,001/0	0/-0,002	0/+0,004
	57	+0,007/-0,001	-0,001/0	0/+0,002	-0,003/-0,001	+0,002/+0,001
2112 АО + С	65	-0,005/-0,010	0/+0,002	0/0	0/-0,003	+0,002/-0,003
	66	-0,002/-0,002	0/-0,004	+0,003/+0,001	0/-0,004	+0,002/+0,001
	67	+0,006/-0,008	-0,001/-0,003	0/0	+0,001/+0,002	-0,005/-0,003
2112 И	26	+0,001/-0,001	+0,001/+0,002	0/0	+0,001/+0,001	+0,001/-0,004
	22	+0,006/-0,009	-0,001/+0,001	0/0	+0,001/0	-0,008/-0,003
	18	+0,012/+0,011	-0,001/0	-0,001/-0,001	+0,002/-0,001	-0,002/+0,005
2112 Б	16	+0,013/+0,004	-0,001/-0,001	+0,002/+0,001	-0,002/+0,001	-0,003/+0,001
	24	0/-0,003	0/0	0/0	-0,002/0	+0,001/0
	14	0/+0,006	-0,002/-0,002	-0,002/-0,001	+0,001/+0,001	-0,001/-0,001
2112 ЛО	50	-0,005/-0,005	0/+0,001	0/+0,002	0/0	-0,004/-0,003
	51	-0,002/-0,004	0/0	+0,001/+0,002	0/0	+0,004/-0,001
	52	-0,006/-0,005	-0,002/-0,002	+0,002/0	+0,003/+0,001	-0,001/+0,004
2112 ЛО + С	60	-0,006/-0,003	-0,001/0	0/+0,002	-0,002/-0,001	+0,001/+0,003
	61	+0,001/+0,006	0/+0,001	+0,001/-0,001	+0,002/+0,002	+0,002/+0,005
	62	-0,003/+0,003	+0,002/+0,003	0/+0,002	+0,002/+0,003	+0,001/-0,003

не предусматривающей правку шлифовального инструмента перед шлифовкой.

#### Влияние старения

В табл. 1 приведены данные по изменению формы тормозных дисков через 1 и 2 мес. естественного старения после их изготовления. Все статистически значимые величины выделены.

Из табл. 1 видно, что в процессе вылеживания после изготовления тормозных дисков происходит нарастающее со временем изменение их формы. Изменение геометрии после их изготовления зависит от технологии механической обработки и диаметра диска, при этом основным изменяющимся геометрическим параметром является биение  $\nabla 0,05$ . Вылеживание дисков в течение 2 мес. приводит к следующим изменениям их геометрии:

- ухудшение геометрии тормозных дисков ВА3-2110 и ВА3-2112, изготовленных по технологии шлифовки искусственно состаренной отливки без правки шлифовального инструмента;

- сохранение неизменной геометрии тормозных дисков ВА3-2112, изготовленных по серийной технологии шлифовки отливки и по опытной технологии финишной лезвийной обработки искусственно состаренной отливки;

- улучшение геометрии тормозных дисков ВА3-2110, изготовленных по технологии шлифовки без правки шлифовального инструмента, а также ВА3-2110 и ВА3-2112, изготовленных по технологии, исключаящей операцию шлифования естественно состаренной в течение 2 мес. отливки, и ВА3-2112, изготовленных по серийной технологии обработки из искусственно состаренной отливки.

#### Определение относительных ОУД

Результаты определения относительных ОУД приведены в табл. 2.

Результаты количественной оценки относительных ОУД для отливок и дисков между собой не сравнивают из-за влияния литейной корки отливок. Количественное сравнение проводится отдельно для отливок и дисков.

Шлифование при изготовлении данных деталей вызывает повышение уровня остаточных напряжений в них. При этом разница в величине остаточных напряжений 1-го рода между отоженными и неотоженными дисками после механической обработки практически отсутствует. Необходимо отметить, что отжиг приводит, наряду со снятием остаточных напряжений 1-го рода, и к снятию напряжений 2-го и 3-го рода [25, 26].

Таблица 2

**Относительные остаточные упругие деформации**

Диск (отливка)		Абсолютное изменение расстояния между рисками		Относительная ОУД до разреза, ×100 % <sup>I</sup>				
маркировка	диаметр, мм	внутри <sup>II</sup> , мм	снаружи <sup>II</sup> , мм	внутри <sup>II</sup>	$\alpha$ <sup>III</sup>	снаружи <sup>II</sup>	$\alpha$ <sup>III</sup>	$ \beta $ <sup>IV</sup>
Отливка вентилируемого тормозного диска ВА3-2110	243,85	-0,299	-0,211	-0,039		-0,028		0,034
Отожженная отливка вентилируемого тормозного диска ВА3-2110	244,40	-0,111	-0,154	-0,014		-0,020		0,017
Вентилируемый тормозной диск ВА3-2110	239,20	-0,040	-0,144	-0,005	-0,005	-0,019	-0,015	0,010
Отожженный вентилируемый тормозной диск ВА3-2110	239,30	-0,136	+0,014	-0,018	-0,014	+0,002	-0,006	0,010
Отливка вентилируемого тормозного диска ВА3-2112	265,10	-0,272	-0,282	-0,033		-0,034		0,034
Отожженная отливка вентилируемого тормозного диска ВА3-2112	264,70	-0,001	-0,007	0		-0,001		0,001
Вентилируемый тормозной диск ВА3-2112	260,10	+0,118	+0,196	+0,014	+0,016	+0,024	+0,018	0,017
Отожженный вентилируемый тормозной диск ВА3-2112	260,20	-0,059	+0,080	-0,007	-0,006	+0,010	+0,007	0,007

<sup>I</sup> «+» — деформация растяжения; «-» — деформация сжатия.  
<sup>II</sup> Рис. 1.  
<sup>III</sup>  $\alpha$  — среднее значение относительной остаточной упругой деформации с внутренней (наружной) стороны.  
<sup>IV</sup>  $|\beta|$  — среднее значение относительной остаточной упругой деформации из значений для внутренней и наружной сторон, взятых по модулю.

*Влияние режима термической обработки на геометрические параметры тормозных дисков и их свойства*

В литературе [25–28] указано, что остаточные напряжения в детали, приводящие к ее короблению, возможно устранить или существенно снизить путем проведения специальной термической обработки — отжига для снятия внутренних напряжений.

С целью определения наилучшего режима термической обработки проведен эксперимент, заключающийся в отжиге 11 плоских образцов (рис. 4). Образцы вырезали с наружной (6 длинных образцов) и внутренней (5 коротких образцов) сторон отливок. Отжиг проводили по следующему режиму: нагрев образцов вместе с печью; выдержка образцов в течение 2 ч при заданной температуре отжига; охлаждение с печью до 100 °С с последующим охлаждением на воздухе. В эксперименте варьировали температуру отжига: 450, 500 °С и далее до 680 °С с шагом 20 °С.

Предварительно на образцах измерили твердость. После проведения отжига исследуемые образцы подвергали разделке на две части в радиальном направлении, после чего определяли величину обезуглероженного слоя и осуществляли шлифовку на глубину, превышающую глубину обезуглероженного слоя. На шлифованных образцах проводили измерение твердости (см. рис. 4).

По результатам проведенных исследований построен график зависимости твердости от температуры отжига (рис. 5), на котором видно резкое падение твердости после достижения температуры отжига 640 °С.

При изготовлении тормозных дисков применяют термические печи, имеющие значительные колебания температур

по их зонам, поэтому в результате полученных экспериментальных данных был рекомендован следующий рациональный режим отжига отливок тормозных дисков:

- загрузка дисков в предварительно нагретую до 450 °С печь;
- нагрев дисков в печи до 580 °С с последующей выдержкой в течение 2 ч;
- охлаждение дисков с печью до температуры 350 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры на воздухе.

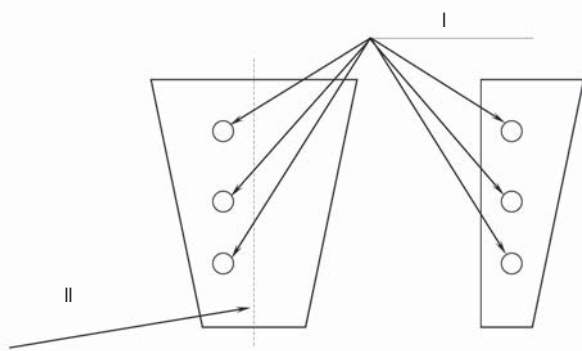
В продолжение настоящей работы планируется проведение натурных стендовых и эксплуатационных испытаний, что позволит оценить работоспособность вентилируемых тормозных дисков, полученных по разработанным режимам термообработки, в реальных условиях эксплуатации.

**Заключение**

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшая точность изготовления обеспечивается при использовании технологии с финишной лезвийной обработкой, а наименьшая — при применении технологии без правки шлифовального инструмента.
2. Биение тормозных дисков после проведения естественного старения в течение 1–2 мес. после их изготовления изменяется следующим образом:
  - не изменяется для дисков ВА3-2112, изготовленных по серийной технологии и по опытной технологии с финишной лезвийной обработкой искусственно состаренной отливки;
  - снижается для дисков ВА3-2110 и ВА3-2112, изготовленных по другим исследованным вариантам технологии.





**Рис. 4.** Схема замера твердости для подбора режима термообработки на плоском образце из диска переднего тормоза до и после отжига:  
I — линия реза; II — места замеров твердости

3. Шлифование, являющееся финишной операцией механической обработки, ведет к повышению уровня остаточных напряжений в материале отливки. При этом разница в величине остаточных напряжений 1-го рода между предварительно отожженными и неотожженными дисками после проведения процесса шлифования практически отсутствует.

4. Подобран режим термообработки, обеспечивающий снятие остаточных напряжений, сохранение геометрических параметров тормозных дисков и снижение биения на большинстве испытанных изделий, подверженных при изготовлении различным видам механической обработки.

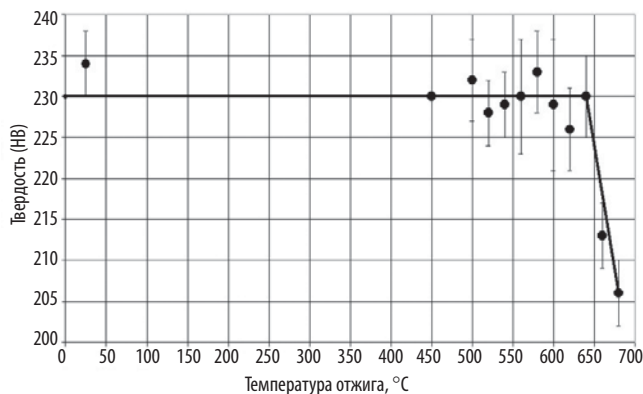
Следует также отметить, что применяемая технология шлифования снижает формоустойчивость тормозных дисков. Это связано с большой погрешностью, возникающей при смене баз при переходе с токарной операции на шлифовальную. Также на характер остаточной деформации тормозных дисков оказывают влияние неблагоприятные растягивающие остаточные напряжения на поверхности, возникающие в отливках в результате силового шлифования. Однако исключать операцию шлифования из существующего технологического процесса станет возможно тогда, когда удастся выполнить чистовое точение с соблюдением минимальных ограничений по биению и шероховатости.

Применение разработанного режима отжига отливок привело к снижению количества дисков с отклонением по ОКГП в среднем на 30–35 % после их естественного старения дисков в течение 2 мес. ЧМ

**Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).**

#### Библиографический список

- Li W., Yang X., Wang Sh., Xiao J., Hou Q. Review: Comprehensive analysis on the performance and material of automobile brake discs // *Metals*. 2020. Vol. 10. P. 377. DOI: 10.3390/met10030377.
- Lazzari A., Tonazzi D., Massi F. Squeal propensity characterization of brake lining materials through friction noise measurements // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 128. P. 216–288. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.029i.
- Li J., Xu J., Luo F. Research on brake noise of air disc brake // *3<sup>rd</sup> International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2011. P. 1111–1113. DOI: 10.1109/ICMTMA.2011.560.



**Рис. 5.** Зависимость твердости от температуры отжига (прибор ТБ-5004)

- Бруннер Х., Аугсбург К., Грохович Я. Исследование вибраций дисковых тормозов с плавающей скобой легковых автомобилей // *ATZ*. 1999. № 1. С. 22–30.
- Wang Zh., Han J., Domblesky J. P., Li Zh., Fan X., Liu X. Crack propagation and microstructural transformation on the friction surface of a high-speed railway brake disc // *Wear*. 2019. Vol. 428–429. P. 45–54.
- Kang J., Choi S. Brake dynamometer model predicting brake torque variation due to disc thickness variation // *Proc. IMechE. Part D: J. Automobile Engineering*. 2007. Vol. 221. P. 49–55. DOI: 10.1243/09544070JAUTO91.
- Jacobsson H. Disc brake judder considering instantaneous disc thickness and spatial friction variation // *Proc. IMechE. Part D: J. Automobile Engineering*. 2003. Vol. 217. P. 325–342. DOI: 10.1243/095440703321645043.
- Rodriguez A. J. Experimental Analysis of Disc Thickness Variation Development in Motor Vehicle Brakes. PhD thesis. RMIT University. 2006. URL: <https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/outputs/doctoral/Experimental-analysis-of-disc-thickness-variation/9921861223501341>.
- Haight M. J., Smales H., Abe M. Vehicle judder under dynamic braking caused by disc thickness variation // *IMechE*. 1993. C444/022. P. 247–258.
- Болдырев Д. А. Повышение работоспособности и ресурса пары трения «тормозной диск – колодка»: дис. ... канд. техн. наук. — Тольятти, 2004. — 137 с.
- ВА3-21103 после 125000 км // *За рулем*. 2002. № 8. С. 102.
- Thevenet J., Siroux M., Desmet B. Measurements of brake disc surface temperature and emissivity by two-color pyrometry // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. P. 753–759. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.12.005.
- Nong X. D., Jiang Y. L., Fang M., Yu L., Liu C. Y. Numerical analysis of novel SiC<sub>3</sub>/Al alloy co-continuous composites ventilated brake disc // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. P. 1374–1382.
- Okamura T., Imasaki M. A Study on relationship between disc thickness variation and casting material properties // *SAE International: 21<sup>st</sup> Annual Brake Colloquium and Exhibition Hollywood*. 2003. Vol. 01. P. 3347.
- Harada N., Takuma M., Tsujikawa M., Higashi K. Effects of V addition on improvement of heat shock resistance and wear resistance of Ni–Cr–Mo cast steel brake disc // *Wear*. 2013. Vol. 302. Iss. 1–2. P. 1444–1452.
- Ali B., Wan Z., Wan O. CFD analysis of the brake disc and the wheel house through air flow: Predictions of Surface heat transfer coefficients (STHC) during braking operation // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. Vol. 32, Iss. 1. P. 481–490. DOI: 10.1007/s12206-017-1249-z.
- Belhocine A., Bouchetara M. Thermal analysis of a solid brake disc // *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 32. P. 59–67.
- Zhang Sh., Wang W., Jin L., Jiang W. Numerical analysis and experimental study on temperature field of brake disc during the air-cooling process // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 189–193. P. 2009–2012.
- Yan H. B., Zhang Q. C., Lu T. J. Heat transfer enhancement by X-type lattice in ventilated brake disc // *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 107. P. 39–55.

20. Abebe L., Nallamothu R. B., Subrahmanyam K. H. S., Nallamothu S. K., Nallamothu A. K. Thermal analysis of disc brake made of different materials // SSRG-IJME. 2016. Vol. 3, Iss. 6. P. 5–9.
21. Li J., Li H., Jiao B., Lv B., Chen D., Gu L. Development of cast steel for brake disc of high-speed train // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 419. P. 370–375.
22. Straffellini G., Verma P. Ch., Metinoz I., Ciudin R., Perricone G., Gialanella S. Wear behavior of a low metallic friction material dry sliding against a cast iron disc: Role of the heat-treatment of the disc // Wear. 2016. Vol. 348–349. P. 10–16.
23. Овсянников В. Е., Шпитко Г. Н., Некрасов Р. Ю., Васильков Д. Е. Повышение прочности чугуновых гильз цилиндров двигателей строительного дорожных машин // Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 3(45). С. 36–40.
24. ГОСТ 1412–85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. — Введ. 01.01.1987.
25. Boldyrev D. A., Dema R. R., Kalugina O. B. The microstructure and hardness of casting a solid brake disc after late graphitizing modification // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. P. 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012021.
26. Boldyrev D. A., Shapovalov A. N., Nefedev S. P., Dema R. R., Kononov V. N., Kharchenko M. V., Suvorova E. V., Markova I. Yu. The electron-microscopic and x-ray spectral analysis of phase composition of CGI inoculant structure // J. Chem. Technol. Metall. 2019. Vol. 54. P. 348–361.
27. Чайкин В. А., Болдырев Д. А., Чайкина Н. В. Особенности графитизирующего модифицирования высокопрочного чугуна смешанными модификаторами в условиях ОАО «АВТОВАЗ» // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2007. No. 4. P. 53–58.
28. Boldyrev D. A., Platov S. I., Urtsev N. V., Terentyev D. V., Latypov O. R. Research and features of preliminary graphitizing processing of melt of iron with silicon carbide on the structure and properties of cast iron castings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1008. P. 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/1008/1/012047.

“Chernye metally”, 2022, No. 5, pp. 27–33  
DOI: 10.17580/chm.2022.05.05

### Influence of brake disc manufacturing technology on residual stresses and vibrations in the “disk-pad” system

#### Information about authors

**D. A. Boldyrev**, Dr. Eng., Professor, Dept. of Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics<sup>1</sup>;  
**S. P. Nefediev**, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment<sup>2</sup>;

**M. V. Kharchenko**, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Mechanics<sup>3</sup>,  
e-mail: kharchenko.mv@bk.ru;

**R. R. Dema**, Dr. Eng., Associate Professor, Dept. of Machinery and Technologies of Forming and Engineering<sup>3</sup>, Professor, Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Togliatti State University, Togliatti, Russia.

<sup>2</sup> Novotroitsk Branch of NUST MISIS, Novotroitsk, Russia.

<sup>3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract:** The braking system is one of the main controls responsible for the management and safety of ground transport. Vibrations of the steering wheel and squeaks when braking vehicles are manifested by uneven sensitivity of the brake disc or its buckling. The reasons for the difference in thickness of the brake discs are inaccuracies in their manufacture, as well as uneven wear during operation due to the heterogeneity of properties. Buckling of the presence of brake systems of internal organs, residual stress in parts after formation or thermal stresses that arise during operation.

The paper presents the results of a study on the influence of the manufacturing technology of ventilated brake discs on their performance characteristics and residual elastic deformations. So, the highest manufacturing accuracy is ensured when using technology with finishing blade processing, and the lowest - when using technology without dressing the grinding tool. It has been established that grinding, which is the finishing operation of machining, leads to an increase in the level of residual stresses in the material of the part. The heat treatment mode has been selected, which ensures the removal of residual stresses and the optimization of the mechanical properties of the working surfaces. It has been confirmed that the proposed annealing mode ensures the preservation of the geometric parameters of the brake discs and reduces the runout on most of the tested products subjected to various types of machining during manufacture.

**Key words:** ventilated brake disc, thickness variation, buckling, heat treatment, annealing, residual elastic deformation, natural aging.

**The work was carried out within the framework of the government order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZR-2020-0011).**

#### References

1. Li W., Yang X., Wang Sh., Xiao J., Hou Q. Review: Comprehensive analysis on the performance and material of automobile brake discs. *Metals*. 2020. Vol. 10. p. 377.
2. Lazzari A., Tonazzi D., Massi F. Squeal propensity characterization of brake lining materials through friction noise measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 128. pp. 216–288.
3. Li J., Xu J., Luo F. Research on brake noise of air disc brake. *3<sup>rd</sup> International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2011. pp. 1111–1113.
4. Brunner Kh., Augsburg K., Grokhovich Ya. Study of vibrations of floating caliper disc brakes in passenger cars. *ATZ*. 1999. No. 1. pp. 22–30.
5. Wang Zh., Han J., Domblesky J. P., Li Zh., Fan X., Liu X. Crack propagation and microstructural transformation on the friction surface of a high-speed railway brake disc. *Wear*. 2019. Vol. 428–429. pp. 45–54.
6. Kang J., Choi S. Brake dynamometer model predicting brake torque variation due to disc thickness variation. *Proc. IMechE. Part D: J. Automobile Engineering*. 2007. Vol. 221. pp. 49–55.
7. Jacobsson H. Disc brake judder considering instantaneous disc thickness and spatial friction variation. *Proc. IMechE. Part D: J. Automobile Engineering*. 2003. Vol. 217. pp. 325–342.
8. Rodriguez A. J. Experimental Analysis of Disc Thickness Variation Development in Motor Vehicle Brakes. PhD thesis. RMIT University. 2006. Available at: <https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/outputs/doctoral/Experimental-analysis-of-disc-thickness-variation/9921861223501341>.
9. Haigh M. J., Smales H., Abe M. Vehicle judder under dynamic braking caused by disc thickness variation. *IMechE*. 1993. C444/022. pp. 247–258.
10. Boldyrev D. A. Increasing the efficiency and resource of the "brake disc - pad" friction pair. Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Togliatti, 2004. 137 p.
11. VAZ-21103 after 125,000 km. *Za rulem*. 2002. No. 8. p. 102.
12. Thevenet J., Siroux M., Desmet B. Measurements of brake disc surface temperature and emissivity by two-color pyrometry. *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. pp. 753–759.
13. Nong X. D., Jiang Y. L., Fang M., Yu L., Liu C. Y. Numerical analysis of novel SiC3D/Al alloy co-continuous composites ventilated brake disc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. pp. 1374–1382.
14. Okamura T., Imasaki M. A Study on relationship between disc thickness variation and casting material properties. *SAE International: 21<sup>st</sup> Annual Brake Colloquium and Exhibition Hollywood*. 2003. Vol. 01. p. 3347.
15. Harada N., Takuma M., Tsujikawa M., Higashi K. Effects of V addition on improvement of heat shock resistance and wear resistance of Ni–Cr–Mo cast steel brake disc. *Wear*. 2013. Iss. 1–2. pp. 1444–1452.
16. Ali B., Wan Z., Wan O. CFD analysis of the brake disc and the wheel house through air flow: Predictions of Surface heat transfer coefficients (STHC) during braking operation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. Vol. 32, Iss. 1. pp. 481–490.
17. Belhocine A., Bouchetara M. Thermal analysis of a solid brake disc. *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 32. pp. 59–67.
18. Zhang Sh., Wang W., Jin L., Jiang W. Numerical analysis and experimental study on temperature field of brake disc during the air-cooling process. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 189–193. pp. 2009–2012.
19. Yan H. B., Zhang Q. C., Lu T. J. Heat transfer enhancement by X-type lattice in ventilated brake disc. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 107. pp. 39–55.
20. Abebe L., Nallamothu R. B., Subrahmanyam K. H. S., Nallamothu S. K., Nallamothu A. K. Thermal Analysis of disc brake made of different materials. *SSRG-IJME*. 2016. Vol. 3, Iss. 6. pp. 5–9.
21. Li J., Li H., Jiao B., Lv B., Chen D., Gu L. Development of cast steel for brake disc of high-speed train. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 419. pp. 370–375.
22. Straffellini G., Verma P. Ch., Metinoz I., Ciudin R., Perricone G., Gialanella S. Wear behavior of a low metallic friction material dry sliding against a cast iron disc: Role of the heat-treatment of the disc. *Wear*. 2016. Vol. 348–349. pp. 10–16.
23. Ovsyannikov V. E., Shpitko G. N., Nekrasov R. Yu., Vaskov D. E. Increasing the strength of cast-iron cylinder liners for engines of road-building machines. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2020. No. 3 (45). pp. 36–40.
24. GOST 1412–85. Flake graphite iron for castings. Grades. Introduced: 01.01.1987.
25. Boldyrev D. A., Dema R. R., Kalugina O. B. The microstructure and hardness of casting a solid brake disc after late graphitizing modification. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 966. p. 012021.
26. Boldyrev D. A., Shapovalov A. N., Nefedev S. P., Dema R. R., Kononov V. N., Kharchenko M. V., Suvorova E. V., Markova I. Yu. The electron-microscopic and x-ray spectral analysis of phase composition of CGI inoculant structure. *J. Chem. Technol. Metall.* 2019. Vol. 54. pp. 348–361.
27. Chaikin V. A., Boldyrev D. A., Chaikina N. V. Features of graphitizing modification of high-strength cast iron with mixed modifiers in the conditions of JSC “AVTOVAZ”. *Vestnik MGTU*. 2007. Vol. 4. pp. 53–58.
28. Boldyrev D. A., Platov S. I., Urtsev N. V., Terentyev D. V., Latypov O. R. Research and features of preliminary graphitizing processing of melt of iron with silicon carbide on the structure and properties of cast iron castings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1008. p. 012047.