

**Материаловедение  
и технологии материалов  
Materials science and materials technology**

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК: 672.1(076.5)  
doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-66-74

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ  
СИНТЕТИЧЕСКИХ СЕРЫХ ЧУГУНОВ**

**Игорь Алексеевич Казанцев<sup>1✉</sup>, Виктор Михайлович Батрашов<sup>2</sup>, Роман Михайлович Лупанов<sup>3</sup>, Егор Романович Грищенко<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> kazancev678@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2884-2048>

<sup>2</sup> shift150887@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

<sup>3</sup> zhukov.hung@yandex.ru

<sup>4</sup> egrsamsung@gmail.com

**Аннотация**

Рассматривается влияние термической обработки на электросопротивление и температуропроводность синтетических серых чугунов. Представлен механизм образования фаз и структурных составляющих чугунов в зависимости от режима термической обработки (ТО). Выявлены экспериментальные зависимости электросопротивления и температуропроводности от состава чугуна и параметров термической обработки. Предложены рекомендации, позволяющие подобрать тот или иной сплав

для реальных изделий с требуемым комплексом электрофизических характеристик. Подчеркивается значимость представленных исследований, результаты которых позволят заменить традиционные дорогостоящие высокоомные материалы на менее дорогие серые чугуны.

**Ключевые слова:** чугун, электросопротивление, температуропроводность, структурные составляющие, химический состав, свойства, фазы, обработка.

*Ссылка для цитирования:*

*Казанцев И.А. Влияние термической обработки на электросопротивление и температуропроводность синтетических серых чугунов / И.А. Казанцев, В.М. Батрашов, Р.М. Лупанов, Е.Р. Грищенко // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 2. – С. 66-74. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-66-74.*

Original article  
Open Access Article

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON ELECTRICAL RESISTANCE  
AND THERMAL CONDUCTIVITY OF SYNTHETIC GREY CAST IRON**

**Igor Alekseevich Kazantsev<sup>1✉</sup>, Viktor Mikhailovich Batrashov<sup>2</sup>, Roman Mikhailovich Lupanov<sup>3</sup>, Egor Romanovich Grishchenko<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> kazancev678@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2884-2048>

<sup>2</sup> shift150887@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

<sup>3</sup> zhukov.hung@yandex.ru

<sup>4</sup> egrsamsung@gmail.com

## Abstract

The effect of heat treatment on the electrical resistance and thermal conductivity of synthetic grey cast iron is considered. The mechanism of forming phases and structural components of cast iron depending on the mode of heat treatment (HT) is presented. Experimental dependences of electrical resistance and thermal conductivity on cast iron composition and heat treatment parameters are found out. Recommendations are proposed that make it possible to select one or another

alloy for real products with the required set of electro-physical characteristics. The importance of the presented studies is stressed, the results of which will allow replacing traditional expensive high-resistance materials with less expensive grey cast iron.

**Keywords:** cast iron, electrical resistance, thermal conductivity, structural components, chemical composition, properties, phases, treatment.

## Reference for citing:

Kazantsev IA, Batrashov VM, Lupanov RM, Ggrishchenko ER. The effect of heat treatment on electrical resistance and thermal conductivity of synthetic gray cast iron. *Transport Engineering*. 2026;2:66-74. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-66-74.

## Введение

Термическая обработка металлов и сплавов является одной из эффективных технологических операции при формировании, у изделий, требуемого комплекса физико-механических свойств. Решение задачи замены традиционных высокоомных материалов на недорогостоящие и широко распространённые железоуглеродистые сплавы для изготовления резистив-

ных элементов и устройств только изменением химического состава сплавов малоэффективно без использования в технологическом цикле производства термической обработки. В этой связи исследование влияния ТО железоуглеродистых сплавов, в частности чугуна, является актуальной научно-практической задачей.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

В соответствии с ГОСТ 10994-74, ГОСТ 5632-72, ГОСТ 12766.1-90 к материалам для резистивных элементов относятся материалы таких систем как: никель-медь; никель-хром-железо; железо-хром-алюминий; никель-кобальт-железо; никель-медь-марганец; никель-хром. В некоторых случаях возможна замена этих материалов на синтетический серый чугун, например, при изготовлении тормозных резисторов электроустановок железнодорожного транспорта, что позволит снизить затраты на их производство. Исследования в этой области направлены в основном на использование новых технологий [1] и выявление влияния химического состава на физико-механические свойства чугуна [2-4], тогда как влиянию режима ТО на электрофизические свойства серого чугуна уделяется меньше внимания. Поэтому проведение исследований, позволяющих оценить влияние ТО на наиболее важные для резистивных элементов электрофизические характеристики, такие как температуропроводность и электросопротивление, является актуальным.

Свойства чугуна, формируемые в процессе металлургического производства, зависят как от условий кристаллизации сплава [5], условий модифицирования [6] и комплексного легирования [7], так и от условий его последующей технологической обработки, к числу которых относится ТО.

Экспериментальные исследования влияния ТО на температуропроводность и электросопротивление проводили на серых чугунах различного химического состава, полученных при выплавке в индукционной печи, объемом 250 кг, с последующим легированием и модифицированием в ковше, объемом 120 кг. Качественный состав шихты представлен в табл. 1.

Влияние режима ТО на формирование электрофизических свойств серого чугуна оценивали по результатам металлографических исследований. Отбор образцов для исследований осуществляли из бездефектной части цилиндрических литых заготовок (проб), полученных литьем в песчано-глинистые формы.

Таблица 1

## Качественный состав шихты

Table 1

*Charge qualitative composition*

Шихта				
Сталь	Ферросилиций	Ферромарганец	Редкоземельные металлы (РЗМ)	Графитизиру- ванный кокс
Ст.3 пс, ГОСТ 380-2005	ФС 75, ГОСТ 1415-93	ФМн 78, ГОСТ 4755-91	ФС30РМ330, ТУ 14-5-136-81	КНПС-КМ, ГОСТ 22898-78

Исследования структуры выполняли на микрошлифах по методике, представленной в ГОСТ 3443-87. Микроанализ проводили на оптическом инвертированном микроскопе модели *Carl Zeiss Axiovert 5*. Химический состав металла определяли на атомно-эмиссионном спек-

трометре *OES-8000S*. Измерение температуропроводности осуществляли при комнатной температуре методом лазерной вспышки на приборе *LFA 427*. Для измерения удельного электросопротивления применяли четырехзондовый метод Кельвина, реализованный в установке ИУС-7.

**Результаты**

При проведении исследований химический состав синтетического серого чугуна изменяли в соотношениях, представленных в табл. 2. Химический состав образцов серого чугуна (в мас. %) представ-

лен в табл. 3, результаты измерения электросопротивления и температуропроводности синтетического серого чугуна – в табл. 4.

Таблица 2

## Химический состав синтетического чугуна

Table 2

*Chemical composition of synthetic cast iron*

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>РЗМ</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
мас. %					
3,47-3,95	1,33-2,33	0,38-1,57	0,08	не более 0,031	не более 0,032

Таблица 3

## Химический состав образцов синтетического серого чугуна

Table 3

*Chemical composition of synthetic grey cast iron samples*

№ серии	№ образца	<i>Fe</i> , мас. %	<i>C</i> , мас. %	<i>Si</i> , мас. %	<i>Mn</i> , мас. %	РЗМ, мас. %
О1	О1.2	92,14	3,95	2,33	1,50	0,08
О2	О2.2	94,47	3,47	1,60	0,38	0,08
О3	О3.2	92,96	3,86	1,33	1,30	0,08
О4	О4.2	91,67	3,76	1,75	1,57	0,08

Образцы серии О1 относятся к заэвтектическим чугунам, серии О2 – к доэвтектическим, серии О3, О4 – к эвтектическим. В отличие от сталей основой чугунов являются металлическая матрица и включения графита, которые существенно отличаются по своим физическим свойствам, и в частности по тепло-и электропроводности. Поэтому целесообразно рас-

сматривать влияние графитовых включений и металлической основы на физические свойства чугуна, как в отдельности, так и в совокупности. В представленной работе рассматривается влияние металлической основы на тепло- и электропроводность синтетических серых чугунов после ТО.

## Углеродный эквивалент, электросопротивление и температуропроводность образцов синтетического серого чугуна

*Carbon equivalent, electrical resistance and thermal conductivity of synthetic grey cast iron samples*

№ серии	№ образца	Углеродный эквивалент $C_{экв}$ , мас. %	Электро-сопротивление $\rho_t \times 10^{-6}$ , Омхм	Температуро- проводность $\alpha \times 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с
О1	О1.2	4,62	1,06	17,5
О2	О2.2	3,94	0,77	15,5
О3	О3.2	4,32	0,82	14,8
О4	О4.2	4,32	0,97	14,2

Известно [4, 8], что теплопроводность в железоуглеродистых сплавах в отличие от чистого железа зависит от наличия примесей, причем, чем больше примесей, тем ниже теплопроводность. Следует отметить, что для железоуглеродистых сплавов теплопроводность значительно отличается от теплопроводности отдельных структурных составляющих. При этом теплопроводность ( $\lambda$ , Вт/(м·К) отдельных фаз и структурных составляющих различна: наибольшая (350 Вт/(м·К) у графита; наименьшая (8 Вт/(м·К) у цементита; имеющая средние значения из представленных – 50 Вт/(м·К) у феррита и перлита.

Механизм электропроводности (или обратная ей величина электросопротивление) металлов и сплавов основан на переносе энергии преимущественно движением свободных обобщенных электронов. В том случае, когда сопротивление движению свободных электронов повышается, например, при повышении температуры, изменяется и электросопротивление увеличивается [9].

Электросопротивление является структурно чувствительной величиной [10]. Поэтому любые изменения в структуре материала, изменение его химического и фазового состава, наличие структурных неоднородностей и примесей, влечет за собой изменение электросопротивления. Появление любых неоднородностей в металле вызывает его изменение. Электросопротивление в отличие от теплопроводности в большей степени структурно чувствительная характеристика материала. Электросопротивление, так же как и теплопроводность зависят от размеров, фор-

мы, дисперсности и распределения в металлической матрице структурных составляющих и включений.

Основной сложностью при оценке тепло- и электропроводности чугуна является большое объемное количество фаз и структурных составляющих, и в особенности их совместное влияние. Кроме того, изменение в широких пределах концентрации основных химических элементов в структуре чугуна не позволяет оценить долю каждого из них в совокупном влиянии. При этом тип металлической матрицы (ферритная, феррито-перлитная или перлитная), графитовые включения, оксиды, нитриды, фосфиды, сульфиды значительно отличаются по своим физическим свойствам. Поэтому в исследованиях указываются физические свойства чугуна в широком интервале значений, что затрудняет их интерпретацию для конкретной марки. В связи с изложенным можно рекомендовать общий подход к выбору конкретной марки чугуна в зависимости от экспериментальных значений тепло-и электропроводности, полученных в результате исследований. Такой подход обусловлен еще и тем, что смоделировать механизм переноса тепла и электричества в микрообъемах графитовых включений, и особенно на границе раздела «графитовое включение – металлическая матрица» в настоящее время является сложной научно-практической задачей. Кроме того, смоделировать процесс графитизации в реальных средах не представляется возможным из-за сложности строения графитовых включений.

Термическая обработка железоуглеродистых сплавов является важной техно-

логической операцией при производстве сталей и чугунов, поскольку позволяет изменять первоначальные свойства сплава, полученного металлургическим путем. Поэтому целесообразно рассматривать изменение электросопротивления и температуропроводности в зависимости от вида термической обработки, так как при этом происходят существенные изменения в структуре, составе фаз и структурных составляющих, их степени дисперсности, размерах и форме включений. К числу наиболее распространенных способов термической обработки железоуглеродистых

сплавов, и чугуна в частности, относятся отпуск, отжиг и закалка. Отпуск проводится при температурах ниже критических превращений (ниже критической точки  $A_1$ ), при этом изменение структуры не происходит, поэтому его влияние на электросопротивление и температуропроводность не столь значительно по сравнению с отжигом и закалкой, которые проводятся при температурах выше критических превращений (выше критической точки  $A_1$ ). Режимы отжига и закалки серого чугуна представлены в табл. 5.

Таблица 5

Режимы ТО серого чугуна

Table 5

*Heat treatment modes of grey cast iron*

Операции ТО	Вид ТО					
	Отжиг		Закалка			
	первоначальный	повторный	на сорбит	на троостит	на бейнит	на мартенсит
Нагрев	до 850-900 °С	до 900-1000 °С	850-900 °С			
Выдержка	3 часа		1 час			
Охлаждение	вместе с печью до 250-300 °С, с последующим охлаждением на воздухе	вместе с печью до 250-300 °С с последующим охлаждением на воздухе	на воздухе	в масле	в расплавленной соли, имеющей температуру 350 °С	в воде

Отжиг проводили по двум режимам: первоначальный отжиг и повторный отжиг (табл. 5). Структура чугуна после отжига феррито-перлитная или перлитная с включениями графита пластинчатой формы.

Закалку чугуна проводили по четырем режимам (табл. 5):

1. Закалка на сорбит. Структура чугуна представляет собой сорбитообразную феррито-цементитную механическую смесь с включениями графита пластинчатой формы.

2. Закалка на троостит. Структура чугуна представляет собой трооститообразную феррито-цементитную механическую смесь с включениями графита пластинчатой формы.

3. Закалка на бейнит. Чугун приобретает структуру бейнита с включениями графита пластинчатой формы.

4. Закалка на мартенсит. Чугун приобретает структуру мартенсита с включениями остаточного аустенита и графита.

Изменение электросопротивления и температуропроводности в зависимости от вида термической обработки и их режимов представлено на рис. 1, 2. Приведенные результаты свидетельствуют, что при температуре отжига 850...900 °С происходит изменение электросопротивления – уменьшается на 4...5%, (рис. 1, кривые 1 – 4, точка «б» (на оси абсцисс) по сравнению с точкой «а») и температуропроводности – увеличивается на 3...5%, (рис. 2, кривые 1 – 4, точка «б» (на оси абсцисс) по сравнению с точкой «а») и. Повторный отжиг при температуре 950...1000 °С не внес заметных изменений электросопротивления (электросопротивление понизилось на 1...1,4 %, рис. 1, кривые 1...4, точка «г» (на оси абсцисс) по сравнению с точкой «в») и температуропроводности (температуропровод-

ность повысилась на 0,5...0,7 %, рис. 2, кривые 1–4, точка «г» (на оси абсцисс) по сравнению с точкой «в»), что объясняется необратимыми изменениями в структуре чугуна еще на первом этапе отжига (отжиг при температуре 850...900 °С), в частности, происходит распад механической смеси перлита на феррит и графит, который преобразуется из цементита.

Увеличение количества графита приводит к увеличению температуропроводности и уменьшению электросопротивления. В тех случаях, когда такое изменение свойств удовлетворяет потребителя, отжиг следует проводить. То же самое можно утверждать, если необходимо увеличить температуропроводность, при этом уменьшение электросопротивления неважно для потребителя. В том случае, если следует повысить электросопротивление, проводить отжиг нецелесообразно. Появление в металлической основе пересыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$  – железе (мартенсита) и образование неравновесных структур, таких, как, сорбит, троостит и бейнит позволят снизить температуропроводность и повысить электросопротивление, что подтверждается результатами исследований влияние закалки на указанные свойства (рис. 1, 2, точки «г», «д», «е», «ж»).

Различия в электросопротивлении и температуропроводности твердых растворов (мартенсита закалки) и гетерогенных структур (феррито-цементитных механических смесей) в сером чугуне наглядно иллюстрируется результатами, представленными на рис. 1, 2. Показано, что электросопротивление после закалки синтетического серого чугуна выше, а температуропроводность ниже, чем после отжига. Так, например, после закалки на мартенсит электросопротивление заэвтектического чугуна (табл. 3, 4, рис. 1, кривая 1, точка «ж») на 21 % выше, чем после повторного отжига, рис. 1, точка «в»), а температуропроводность – на 13 % ниже (табл. 3, 4 рис. 2, кривая 1). При этом характер изменения исследуемых свойств остается одинаковым для всех структурных состояний чугуна – исходного, после отжига (первоначального и повторного) и закалки (за-

калке на сорбит, троостит, бейнит и мартенсит). Отжиг чугуна с исходной структурой позволяет снизить его электросопротивление и повысить температуропроводность, а закалка наоборот – повысить электросопротивление и снизить температуропроводность.

Максимальные значения электросопротивления ( $1,28 \cdot 10^{-6}$  Ом·м) наблюдаются после закалки на мартенсит у заэвтектического чугуна (табл. 3, 4, образец О1.2, рис. 1, кривая 1), минимальные ( $0,85 \cdot 10^{-6}$  Ом·м) – у доэвтектического чугуна (табл. 3, 4, образец О2.2, рис. 1, кривая 2). Электросопротивление после закалки на мартенсит эвтектических чугунов занимает промежуточные значения (табл. 3, 4, образец О3.2, рис. 1, кривая 3 ( $0,9 \cdot 10^{-6}$  Ом·м); табл. 3, 4, образец О4.2, рис. 1, кривая 4 ( $1,15 \cdot 10^{-6}$  Ом·м)) между заэвтектическим и доэвтектическим. Разница по электросопротивлению между результатами для чугуна с исходной структурой и после закалки на мартенсит составляет 17 % для заэвтектического чугуна (рис. 1, кривая 1), 9 % для доэвтектического и эвтектического чугуна (рис. 1, кривые 2, 3) и 16 % для эвтектического чугуна (рис. 1, кривая 4).

Максимальные значения температуропроводности ( $18,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с) наблюдаются после повторного отжига у заэвтектического чугуна (табл. 3, 4, образец О1.2, рис. 2, кривая 1), минимальные ( $15,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с) – у эвтектического чугуна (табл. 3, 4, образец О4.2, рис. 2, кривая 4). Температуропроводность после повторного отжига доэвтектического чугуна занимает промежуточные значения (табл. 3, 4, образец О2.2, рис. 2, кривая 2 ( $16,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с)) между заэвтектическим (табл. 3, 4, образец О1.2, рис. 2, кривая 1) и доэвтектическим (табл. 3, 4, образец О3.2, рис. 2, кривая 3) чугунами. Температуропроводность эвтектического чугуна (табл. 3, 4, образец О3.2, рис. 2, кривая 3) после повторного отжига составляет ( $15,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с) и занимает промежуточные значения между доэвтектическим (таблицы 3, 4, образец О2.2 3, рис. 2, кривая 2) и эвтектическим (табл. 3, 4, образец О4.2, рис. 2, кривая 4) чугунами. Разница по температуропроводности между результатами для чугуна с исходной

структурой и после повторного отжига составляет 6 % для заэвтектического чугуна (рис. 2, кривая 1), 7 % для доэвтектического (рис. 2, кривая 2) и эвтектических (рис. 2, кривые 3, 4) чугунов.

Анализ результатов свидетельствует о преобладающем влиянии на изменение

электросопротивления и температуропроводности внутреннего строения синтетического серого чугуна, в частности получение неравновесной структуры после термической обработки, по сравнению с исходной структурой.

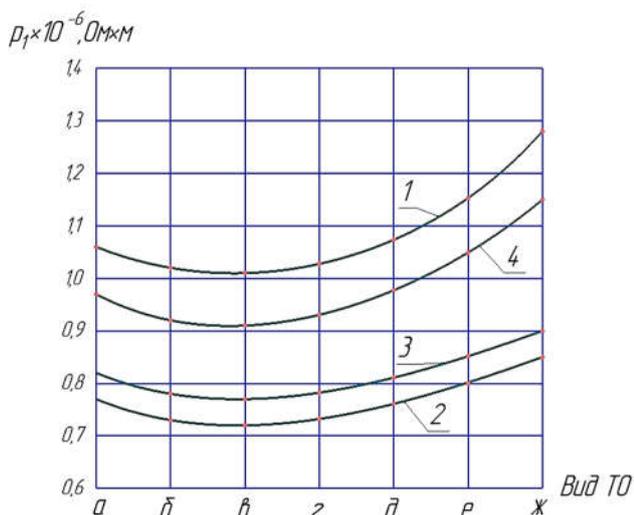


Рис. 1. Электросопротивление чугунов: а – исходное состояние (без термической обработки); б – первоначальный отжиг при 850 – 900 °С; в – повторный отжиг при 950 – 1000 °С; г – закалка на сорбит; д – закалка на троостит; е – закалка на бейнит; ж – закалка на мартенсит; 1 – заэвтектический чугун (образцы серии О1 – О1.2); 2 – доэвтектический чугун (образцы серии О2 – О2.2); 3 – эвтектический чугун (образцы серии О3 – О3.2); 4 – эвтектический чугун (образцы серии О4 – О4.2)

Fig. 1. Electrical resistance of cast iron: a – initial state (without heat treatment); b – initial annealing at 850 – 900°C; c – re-annealing at 950 – 1000°C; d – quenching for sorbitol; e – quenching for troostite; e – quenching for bainite; g – quenching for martensite; 1 – transeutectic cast iron (samples of O1 – O1.2 series); 2 – pre-eutectic cast iron (samples O2 – O2.2 series); 3 – eutectic cast iron (samples of O3 – O3.2 series); 4 – eutectic cast iron (samples of O4 – O4.2 series)

### Закключение

На основании вышеизложенного, влияние термической обработки на электросопротивление и температуропроводность можно сформулировать следующим образом.

1. Получение неравновесной структуры чугуна после термической обработки оказывает преобладающее влияние на изменение электросопротивления и температуропроводности по сравнению с исходной структурой.

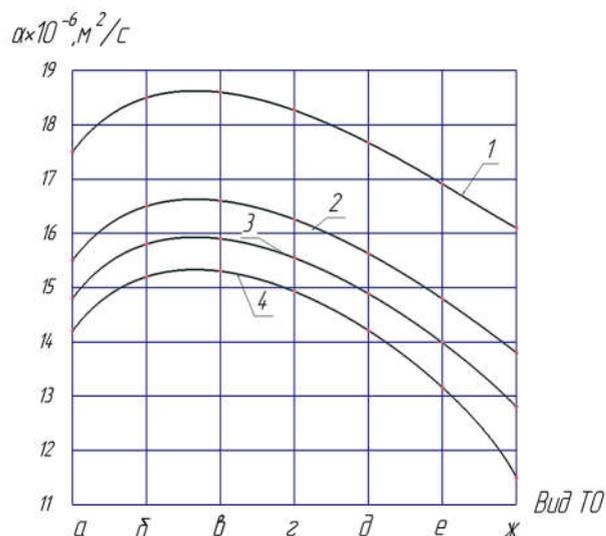


Рис. 2. Температуропроводность чугунов: а – исходное состояние (без термической обработки); б – первоначальный отжиг при 850 – 900 °С; в – повторный отжиг при 950 – 1000 °С; г – закалка на сорбит; д – закалка на троостит; е – закалка на бейнит; ж – закалка на мартенсит; 1 – заэвтектический чугун (образцы серии О1 – О1.2); 2 – доэвтектический чугун (образцы серии О2 – О2.2); 3 – эвтектический чугун (образцы серии О3 – О3.2); 4 – эвтектический чугун (образцы серии О4 – О4.2)

Fig.2. Thermal conductivity of cast iron: a – initial state (without heat treatment); b – initial annealing at 850 – 900°C; c – re-annealing at 950 – 1000°C; d – quenching for sorbitol; e – quenching for troostite; f – quenching for bainite; g – quenching for martensite; 1 – transeutectic cast iron (samples of O1 – O1.2 series); 2 - pre-eutectic cast iron (samples of O2 – O2.2 series); 3 – eutectic cast iron (samples of O3 – O3.2 series); 4 – eutectic cast iron (samples of O4 – O4.2 series)

2. Наибольшей температуропроводностью, после отжига, обладают заэвтектические чугуны, наименьшей эвтектические.

3. Закалка на мартенсит позволяет получить наименьшие значения температуропроводности для всех типов чугунов – доэвтектических, эвтектических и заэвтектических.

4. Наибольшим электросопротивлением, после закалки на мартенсит, обла-

дают заэвтектические чугуны, наименьшей эвтектические.

5. Отжиг позволяет получить наименьшие значения электросопротивления для всех типов чугунов – доэвтектических, эвтектических и заэвтектических.

6. Закалка позволяет получить наибольшие значения электросопротивления для всех типов чугунов – доэвтектических, эвтектических и заэвтектических.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– отжиг снижает электросопротивление, а закалка увеличивает;

– отжиг повышает температуропроводность, а закалка на сорбит, троостит, бейнит и мартенсит снижает;

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Туракулов М. Р. Использование новых технологий при получении синтетического чугуна / М. Р. Туракулов, С. З. Юнусов, С. Н. Кенжаев // Теория и практика современной науки. 2023. № 4 (94). С. 267-275.
2. Золотухин А. А. Влияние марганца и редкоземельной лигатуры на температуропроводность и электросопротивление синтетических серых чугунов / А. А. Золотухин. М.: Препринт ОИВТ РАН, 2001. 44 с.
3. Казанцев И.А. Исследование свойств резистивных материалов, применяемых в электроустановках железнодорожного транспорта / И.А. Казанцев, Р.М. Лупанов // Промышленность и сельское хозяйство. - Макеевка / ФГБОУ Донбасская аграрная академия. Международный научный журнал. 2024. № 12. С. 22-26.
4. Казанцев И.А. Влияние примесей на электросопротивление и температуропроводность серых чугунов / И.А. Казанцев, Р.М. Лупанов // Молодеж. Образование. Наука. 2025. С. 232-241.
5. Сучков А. Н. Структура и свойства легированного, микролегированного и модифициро-

## REFERENCES

1. Turakulov MR, Yunusov SZ, Kenzhaev SN. The use of new technologies in the production of synthetic cast iron. *Theoriya i Praktika Sovremennoi Nauki*. 2023; 4(94): 267-275.
2. Zolotukhin AA. Influence of manganese and rare-earth ligature on thermal conductivity and electrical resistance of synthetic gray cast iron. Moscow: Preprint OIVT RAN; 2001.
3. Kazantsev IA, Lupanov RM. Study of properties of resistive materials used in electric installations of railway transport. *Industry and Agriculture*.

– для получения максимального электросопротивления и температуропроводности предпочтение следует отдавать заэвтектическому чугуну, для получения минимального электросопротивления – доэвтектическому, а минимальной температуропроводности – эвтектическому;

– общий подход к выбору конкретной марки чугуна с требуемым комплексом свойств по электросопротивлению и температуропроводности – выбор в зависимости от экспериментальных значений тепло-и электропроводности, полученных в результате исследований.

- ванного доэвтектического серого чугуна / А. Н. Сучков, Карабиц О. И., Е. В. Кузнецов // *Литье и металлургия*. 2003. № 3. С. 50-52.
6. Давыдов С. В. Основные типы современных модификаторов для чугуна и стали // *Научно-ёмкие технологии в машиностроении*. 2016. № 3. С. 3-11.
7. Габец Д. А. Оценка влияния легирующих добавок на структуру и механические свойства серых чугунов / Д. А. Габец, А. М. Марков, А. В. Габец, Е. О. Чертовских // *Ползуновский вестник*. 2018. № 4. С. 189-195.
8. Захарченко Э. В. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко, Ю.Н. Левченко, В.Г. Горенко, П.А. Вареник // *АН УССР, Ин-т пробл. литья*. Киев: Наук. думка, 1986. 247 с.
9. Синицин Н. И. Удельное электросопротивление расплавов Fe-Mn-C / Н. И. Синицин, О. А. Чикова, В. В. Вьюхин // *Неорганические материалы*. 2021. Т. 57. № 1. С. 89-97.
10. Шулепов С. В. Физические свойства углеродных материалов / С. В. Шулепов. Челябинск.: Изд. ЧГПИ, 1988. 65 с.

- 2024; 12: 22-26.
4. Kazantsev IA, Lupanov RM. Influence of impurities on the electrical resistance and thermal conductivity of gray cast iron. *Youth. Education. Science*. 2025:232-241.
5. Suchkov AN, Karabits OI, E. Kuznetsov EV, Pustovoi VN, Malov VM Structures and characteristics of the alloyed, microalloyed and modified hypoeutectic gray cast iron. *Foundry Production and Metallurgy*. 2003; 3: 50-52.
6. Davydov SV. Basic types of modern modifiers

for cast iron and steel // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2016;3:3-11.

7. Gabets DA, Markov AM, Gabets AV, Chertovskikh EO. Evaluation of the effect of alloying additives on the structure and mechanical properties of gray cast iron. *Polzunovskiy Vestnik*. 2018;4:189-195.
8. Zakharchenko EV, Levchenko YuN, Gorenko

VG, Varenik PA. Iron castings with spherical and vermicular graphite. Kiev: Naukova Dumka; 1986.

9. Sinitsin NI, Chikova OA, Vyukhin VV. Electrical resistivity of Fe-Mn-C alloys. *Inorganic Materials*. 2021; 57(1): 89-97.
10. Shulepov SV. Physical properties of carbon materials. Chelyabinsk.: Publishing house of CHG-PI; 1988.

#### **Информация об авторах:**

**Казанцев Игорь Алексеевич** – кандидат технических наук, профессор Пензенского государственного университета, тел. 8-962-474-58-00.

**Батрашов Виктор Михайлович** – кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой КиИМ Пензенского государственного университета, тел. 8-927-366-30-56.

**Kazantsev Igor Alekseevich** – Candidate of Technical Sciences, Professor of Penza State University, phone: 8-962-474-58-00.

**Batrashov Viktor Mikhailovich** – Candidate of Technical Sciences, , Acting Head of the Department of Control and Testing of Materials at Penza State University, phone: 8-927-366-30-56

**Лупанов Роман Михайлович** – магистрант Пензенского государственного университета, тел. 8-987-073-67-78.

**Грищенко Егор Романович** – магистрант Пензенского государственного университета, тел. 8-927-365-82-38.

**Lupanov Roman Mikhailovich** – Master's degree student at Penza State University, phone: 8-987-073-67-78

**Grishchenko Egor Romanovich** – Master's degree student at Penza State University, phone: 8-927-365-82-38.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 08.12.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 27.01.2026. Рецензент – Химухин С.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 08.12.2025; approved after review on 16.12.2025; accepted for publication on 27.01.2026. The reviewer is Khimukhin S.N., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.