



УДК 669.1+669.162.275.142

DOI 10.17073/0368-0797-2024-1-73-75

Краткое сообщение  
Short Report

## ВЛИЯНИЕ МЕДИ И КРЕМНИЯ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД

Г. Адиллов, Н. Т. Карева, В. Е. Рошин

Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

roshchinve@susu.ru

**Аннотация.** При извлечении железа из медеплавильных шлаков образуется чугун с повышенным содержанием меди и кремния. Для оценки фазового и структурного состава мелющих тел, произведенных из такого чугуна, были рассчитаны фазовые равновесия в системе железо–углерод с добавлением разного количества меди и кремния. Расчеты были проведены с использованием программного комплекса ThermoCalc, который позволяет строить фазовые диаграммы по методу Calphad. В ходе расчетов были оценены температуры начала фазовых превращений с учетом всех возможных термодинамических фаз в системе при различных сочетаниях концентраций меди и кремния.

**Ключевые слова:** медеплавильный шлак, чугун, белый чугун, медь, железо, кремний, углерод, аустенит, феррит

**Для цитирования:** Адиллов Г., Карева Н.Т., Рошин В.Е. Влияние меди и кремния на фазовые превращения в системе железо–углерод. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(1):73–75. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-73-75>

## INFLUENCE OF COPPER AND SILICON ON PHASE TRANSFORMATIONS IN THE IRON – CARBON SYSTEM

G. Adilov, N. T. Kareva, V. E. Roshchin

South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

roshchinve@susu.ru

**Abstract.** To evaluate the phase and structural components of grinding media made of cast iron with a high content of copper and silicon obtained by extracting iron from copper-smelting slags, phase equilibria in the iron–carbon system were calculated with the addition of copper and silicon in various concentrations. The calculation was carried out using the ThermoCalc software package with construction of phase diagrams by the Calphad method. At the same time, temperatures of the beginning of phase transformations were estimated taking into account the presence of all thermodynamically possible phases in the system at various combinations of copper and silicon concentrations.

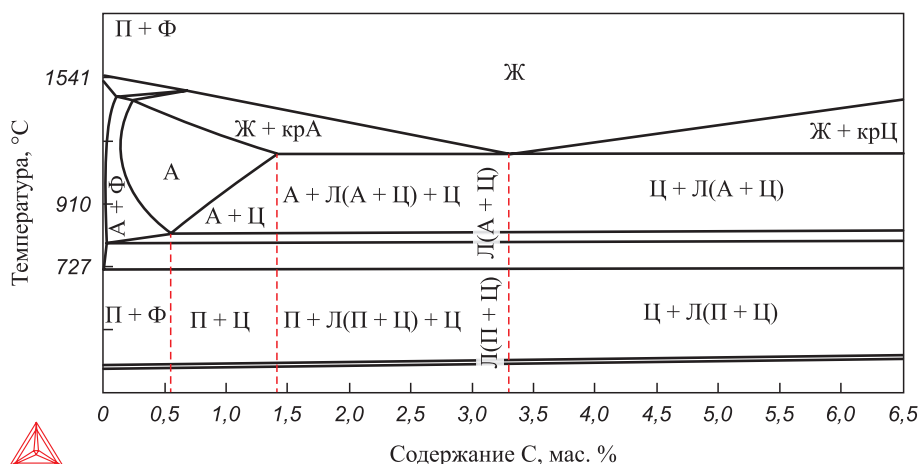
**Keywords:** copper smelting slag, cast iron, white cast iron, copper, iron, silicon, carbon, austenite, ferrite

**For citation:** Adilov G., Kareva N.T., Roshchin V.E. Influence of copper and silicon on phase transformations in the iron–carbon system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2024;67(1):73–75. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-73-75>

### ВВЕДЕНИЕ

В регионах с развитой цветной металлургией в отвалах накопилось большое количество медеплавильного шлака, содержащего преимущественно оксиды железа, кремния, кальция и алюминия. В шлаке также присутствуют в небольших количествах соединения меди, цинка, селена, мышьяка и других элементов. С учетом количества присутствующих элементов самую

высокую стоимость в шлаке имеет железо. При восстановлении железа углеродом в зависимости от условий процесса получаются сплавы железо–углерод или железо–углерод–кремний с высоким содержанием меди и серы. Высокое содержание меди, которая не удаляется традиционными методами, не позволяет использовать такой металл в «большой» металлургии. В связи с этим предлагается схема глубокой переработки медеплавильных шлаков для получения металлических



Вертикальный разрез системы железо – углерод – медь (1 %) при добавлении кремния (3,5 %)

Vertical section of the iron – carbon – copper system (1 %) with addition of silicon (3.5 %)

мельющих тел на основе медьсодержащих сплавов железо – углерод – кремний и керамических пропантов (керамических изделий) для нефтедобывающей промышленности [1]. В настоящее время для изготовления мельющих тел из медьсодержащего материала применяются белые износостойкие эвтектические чугуны [2; 3]. Для оценки фазового и структурного состава получаемых сплавов из перерабатываемого материала шлаков требуются дополнительные знания о фазовых превращениях в системе железо – углерод в присутствии меди и кремния.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения диаграммы состояния железо – углерод с присутствием примесей меди и кремния был использован метод Calphad в программном комплексе ThermoCalc с базой данных TCBIN: TC Binary Solutions v1.1<sup>1</sup>. Метод Calphad в программном комплексе ThermoCalc основывается на использовании всех доступных экспериментальных данных для вывода термодинамических функций системы, при этом термодинамические функции представлены в виде полиномов химического состава и температуры. В результате значения полиномиальных коэффициентов получаются с использованием методов численной оптимизации<sup>2</sup>. Для определения фазовых превращений на диаграмме состояния железо – углерод при проведении расчетов в систему добавляли медь в количестве 0 – 1,5 % (здесь и далее мас. %) и кремний в пределах 0 – 3,5 %. При этом давление принимали равным 10<sup>5</sup> Па, а температурные диапазоны определялись автоматически.

<sup>1</sup> The CALPHAD methodology, Introduction to Thermo-Calc. URL: <http://www.thermocalc.com> (Дата обращения 03.04.2023).

<sup>2</sup> Computational Thermodynamics. Calculation of Phase Diagrams using the CALPHAD Method. URL: [http://www.calphad.com/calphad\\_method.html](http://www.calphad.com/calphad_method.html) (Дата обращения 03.04.2023).

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В системе железо – углерод, как известно, формируется пять фаз, включая одну жидкую и четыре твердых фазы: феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц) и графит. Результаты расчетов показали, что присутствие примесей меди и кремния в указанных выше пределах приводит к изменению растворимости углерода в фазах системы железо – углерод. Количество меди в пределах 0 – 1,5 % незначительно снижает растворимость углерода в аустените с 2,14 до 2,0 %.

При добавлении кремния в количестве 0 – 3,5 % на вертикальном разрезе системы железо – углерод – медь (1 %) происходит понижение растворимости углерода в ГЦК решетке аустенита с 2,14 до 1,5 %. Кроме того, наблюдается расширение области существования феррита и смещение эвтектической точки до концентрации углерода 3,2 % (см. рисунок).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно проведенным расчетам, для того, чтобы получить белый износостойкий чугун с эвтектическим составом, который можно использовать для изготовления мельющих шаров с высокими эксплуатационными характеристиками, необходимо в материале переработки шлаков иметь содержание меди около 1 %, кремния около 3,5 % при содержании углерода 3,5 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Roshchin V.E., Adilov G.A., Povolotckii A.D., Kapelyushin Y. Complex processing of copper smelting slags with obtaining of cast iron grinding media and proppants. In: *KnE Social Sciences. IV Congress “Fundamental Research and Applied Developing of Recycling and Utilization Processes of Technogenic Formations”*. 2020:462–471. <https://doi.org/10.18502/kms.v6i1.8126>

2. Стеблов А.Б., Березов С.Н., Козлов А.А. Литые чугуны шары для помола материалов. *Литье и металлургия*. 2012;(3S(66)):45–49.  
Steblov A.B., Berezov S.N., Kozlov A.A. Cast iron balls for materials grinding. *Lit'e i metallurgiya*. 2012;(3S(66)): 45–49. (In Russ.).
3. Чиж Е.В., Абеннова М.Б. Выбор и анализ технологии изготовления мелющих тел. *Теория и технология металлургического производства*. 2016;(2(19)):42–44.  
Chizh E.V., Abenova M.B. Selection and analysis of grinding media manufacturing technology. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2016;(2(19)):42–44. (In Russ.).

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Галымжан Адилев**, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет

**ORCID:** 0000-0002-1012-8097

**E-mail:** adilovg@susu.ru

**Надежда Титовна Карева**, к.т.н., доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет

**E-mail:** karevant@susu.ru

**Василий Ефимович Роцин**, д.т.н., профессор кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет

**ORCID:** 0000-0003-3648-8821

**E-mail:** roshchinve@susu.ru

**Galymzhan Adilov**, Research Associate of the Research Laboratory "Hydrogen Technologies in Metallurgy", South Ural State University

**ORCID:** 0000-0002-1012-8097

**E-mail:** adilovg@susu.ru

**Nadezhda T. Kareva**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University

**E-mail:** karevant@susu.ru

**Vasilii E. Roshchin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Pyrometallurgical and Foundry Technologies, South Ural State University

**ORCID:** 0000-0003-3648-8821

**E-mail:** roshchinve@susu.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**Г. Адилев** – аналитический обзор по теме статьи, проведение моделирования, подготовка текста и иллюстраций статьи.

**Н. Т. Карева** – постановка и решение задачи, анализ результатов моделирования, редактирование текста и иллюстраций.

**В. Е. Роцин** – научное руководство, формирование цели исследования и выводов по результатам моделирования.

**G. Adilov** – analytical review on the article topic, modeling, preparation of the text and illustrations.

**N. T. Kareva** – statement and solution of the problem, analysis of modeling results, editing the text and illustrations.

**V. E. Roshchin** – scientific guidance, formation of the research goal and conclusions based on the modeling results.

Поступила в редакцию 03.04.2023

После доработки 11.04.2023

Принята к публикации 11.09.2023

Received 03.04.2023

Revised 11.04.2023

Accepted 11.09.2023