

## Материаловедение и технологии материалов Materials science and materials technology

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 669.131.622

doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-78-87

### ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЧУГУНА С ПЛАСТИНЧАТЫМ ГРАФИТОМ

Вадим Олегович Сазонов<sup>1✉</sup>, Константин Васильевич Макаренко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> sazonow.vadick2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7594-8018>

<sup>2</sup> makkon1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

#### Аннотация

Цель исследования: оценить влияние концентрации кремния на процесс модифицирования чугуна с пластинчатым графитом с точки зрения гетерогенизации расплава. Задача, решению которой посвящена статья, состоит в анализе результатов микроструктурного и электронно-зондового микроанализа образцов из серого антифрикционного чугуна марок СЧМ и А-ХМ, экспериментально полученных при использовании модификаторов на основе кремния разной концентрации 68...72 % и 73...75 %. Методы исследования: теоретический анализ литературы, касающейся тематики исследования, экспериментальные исследования составов модификаторов с различной концентрацией кремния, практическое определение твердости образцов, микроструктурные исследования, микрорентгено-спектральный анализ. Новизна работы: экспериментально подтверждена гипотеза о гетерогенизации расплава после модифицирования и формиро-

вание в зонах с повышенным содержанием кремния мелкодисперсного графита. Результаты исследования: удалось на практике доказать, что концентрация кремния оказывает существенное влияние на кристаллизацию серого низкосернистого чугуна. Анализ спектра характеристического рентгеновского излучения графитовой фазы подтвердил наличие кремния на спектре в образцах с наилучшими показателями по структуре и свойствам, полученных при использовании модификаторов с высоким содержанием кремния 73...75 %, что подтверждают гипотезу о гетерогенизации расплава после модифицирования и формирования в зонах с повышенным содержанием кремния мелкодисперсного графита.

**Ключевые слова:** серый чугун, пластинчатый графит, расплав, модифицирование, структурообразование, ферросилиций.

Ссылка для цитирования:

Сазонов В.О. Влияние кремния при модифицировании на процесс кристаллизации чугуна с пластинчатым графитом / В.О. Сазонов, К.В. Макаренко // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 3. – С. 78-87. doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-78-87.

Original article

Open Access Article

### INFLUENCE OF SILICON WHEN MODIFYING THE CRYSTALLIZATION OF CAST IRON WITH FRAKE GRAPHITE

Vadim Olegovich Sazonov<sup>1✉</sup>, Konstantin Vasilyevich Makarenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> sazonow.vadick2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-7594-8018>

<sup>2</sup> makkon1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

## Abstract

The study objective is to evaluate the effect of silicon concentration on modifying cast iron with frake graphite from the point of view of melt heterogenization.

The task to which the paper is devoted is to analyze the results of microstructural and electron probe microanalysis of gray antifriction cast iron samples of СЧМ and А-ХМ grades, experimentally obtained using silicon-based modifiers of different concentrations of 68...72 % and 73...75 %.

Research methods: theoretical analysis of the literature on the subject of the study, experimental studies of modifier compositions with different concentrations of silicon, practical determination of sample hardness, microstructural studies, microrentgenospectral analysis.

### Reference for citing:

Sazonov VO, Makarenko KV. Influence of silicon when modifying the crystallization of cast iron with frake graphite. *Transport Engineering*. 2026;3:78-87. doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-78-87.

## Введение

Изучению влияния кремния на процесс кристаллизации серых чугунов уделяется существенное внимание в работах зарубежных [1] и отечественных [2, 3] ученых. Однако, анализируя данный вопрос следует обратить особое внимание на существующие в настоящее время гипотезы о строение жидкого чугуна. До недавнего времени существовало две основные точки зрения на строения жидкого чугуна, изложенные советскими исследователями в работе [4]. Во-первых, расплав чугуна рассматривается как двухфазная система, дисперсионной средой является раствор С в жидком железе, а дисперсной фазой – остальная часть углерода в виде микрочастиц графита, что позволяет классифицировать жидкий чугун как коллоидный растворам. Данную гипотезу активно поддерживает Г.М. Кимстач [5, 6]. В частности, в работе автора [6] приводятся анализы результатов термического анализа, предполагающие наличие в чугунном расплаве  $\delta$ -фазы,  $\delta\delta$ ,  $\delta\gamma$ ,  $\gamma$ -фазы, однако данные результаты противоречат диаграмме железо-углерод и не объяснимы с точки зрения термодинамики растворов.

Также коллоидной гипотезе строения жидкого чугуна придерживался П.С. Попель [7]. Согласно его данным, не имеется даже косвенных доказательств перехода от однородного к микрогетерогенному состо-

The novelty of the work: the hypothesis of melt heterogeneity after modification and the formation of finely dispersed graphite in areas with high silicon content is experimentally confirmed.

Research results: Practical results make it possible to prove that the silicon concentration has a significant effect on the crystallization of low-sulfur gray cast iron. Analysis of the characteristic X-ray spectrum of the graphite phase confirmed the presence of silicon on the spectrum in samples with the best structure and properties obtained using modifiers with a high silicon content of 73...75 %, which confirms the hypothesis of melt heterogeneity after modification and the formation of finely dispersed graphite in areas with a high silicon content.

**Keywords:** grey cast iron, frake graphite, melt, modification, structuring, ferrosilicon.

анию системы при температурах, стремящихся к эвтектическим, это означает, что основными "генами" металлургической наследственности, ответственными за передачу структурных особенностей шихты через жидкое состояние к слитку или отливке могут выступать коллоидные частицы графита.

В современной литературе коллоидная гипотеза отражена в работе В.С. Цепелева, Н.И. Сеницына, О.А. Чиковой, М. Г. Потапова, В.В. Вьюхина [8]. Согласно их мнению, жидкие расплавы представляют микрогетерогенными (коллоидными), в них дисперсные частицы обогащены одним из компонентов взвешены в окружающей среде иного состава и имеют четкую межфазовую поверхность. Авторы подтверждают данную гипотезу расчетами объемной доли дисперсных частиц  $\phi$  для двух марок чугунов ИЧХ28Н2 ( $\phi = 0,28$ , соответствующему размеру частиц  $\sim 100$  нм) и ИЧ310Х24М2Ф4ТР ( $\phi = 0,1$  соответствующему размеру  $\sim 10$  нм). Тем самым утверждая, что жидкий чугун – коллоидная система, которая состоит из дисперсионной среды и включений.

Во-вторых, часть отечественных исследователей представляли чугун как истинный раствор, при этом возникает большая вероятность образования кластеров углерода, однако кластеры не имеют явно

выраженной границы раздела и не являются отдельной фазой в расплаве. Данную гипотезу активно поддерживал А.А. Жуков с коллегами [4, 9], развивая данную тему, авторы в работе [10] указывают на существование в жидком чугуна направленного массопереноса, который приводит систему к состоянию предрасслоения. При этом присутствие графита в расплаве возможно лишь в очень малых количествах в мерцающих зонах (флуктуации Краско-Любова и тонкие оболочки Ричарда-Данилова), которые, в свою очередь, частично покрывают часть неметаллических включений и отвечают согласно принципу Данкова определенным размерным условиям. Данной гипотезы также придерживается Г.П. Анастасиади [11], согласно мнению автора, расплав чугуна представляет собой макроскопически однородное состояние.

Придерживается гипотезы о наличии кластеров в расплаве чугуна И.В. Гаврилов [12, 13]. В своих работах автор, считает, что образование конгломератов кластеров рассматривается как предкристаллизационный процесс, подготавливающий явление избирательной кристаллизации и образование различных фаз [13]. При этом размеры этих кластерных микрогруппировок можно рассчитать, используя уравнение броуновского движения в жидкостях:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3kT \ln C/C_0}{4\pi(\Delta - \delta)gh}} [13], \quad (1)$$

где  $r$  – радиус микрогруппировок,  $k$  – константа Больцмана,  $T$  – температура,  $C$  – равновесная концентрация,  $C_0$  – исходная концентрация данного компонента в расплаве,  $\Delta$  – средняя плотность расплава,  $\delta$  – плотность микрогруппировок,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $h$  – высота образца.

Из современных работ по материаловедению чугунов следует уделить особое внимание публикации А.Г. Панова [12], в ней детально рассмотрены различные гипотезы, касающиеся строения расплава чугуна в момент, предшествующий его кристаллизации. В частности, в представленной работе проанализированы следующие гипотезы, изложенные С.В. Давыдовым:

- коллоидная – макрочастицы кристаллического графита;
- карбидная – карбидные кластеры;
- полимеризационная – субмикротерогенная структура на базе углеродных комплексов (углеродные фуллереновые кластеры), которую автор и считает верной.

При анализе гипотез о строении жидкого чугуна следует обратить внимание на роль кремния. В работе белорусского исследователя Л.З. Писаренко [14], касающийся теории истинных растворов, говорится, что при модифицировании в железоуглеродистом сплаве возникают некоторые макрообъемы, которые обогащены кремнием, образовавшиеся при растворении модификатора. В таких макрообъемах повышается термодинамическая активность углерода, что способствует образованию зародышей графита. В свою очередь, в статье Г.М. Кимстача [15] о модифицировании низкокремистых железоуглеродистых, утверждается обратное. Согласно мнению автора, эффект модифицирования создает только кремний, который вводят в расплав модифицирующей присадкой, общее же содержание кремния в расплаве оказывает воздействие только на протяженность эффекта модифицирования, что обуславливает ограниченную длительность этого эффекта.

Экспериментальные исследования теории истинных растворов связаны с работами Ри Хосена [16]. Изучая рентнограммы чугуна, выдержанного в жидком состоянии и резко закаленного с температур 1200...1400°C, Ри Хосен обнаружил в структуре сплава области с повышенным и пониженным содержанием кремния, т.е. расплав был химически неоднородным. Согласно Г.И. Сильману [17], если в расплаве происходит расслоение, то при локальном анализе содержание углерода и кремния будет существенно различаться концентрация этих элементов в макрообъемах жидкого чугуна. Позднее опыты, проведенные Ри Хосеном, опроверг Г.М. Кисмтач, повторив данные эксперименты, в результатах которых не было обнаружено областей с разной концентрацией кремния

и углерода, т.е. расплав чугуна после модифицирования оставался однородным.

При рассмотрении вопроса о строении расплава чугуна возникает ряд противоречий из чего и складывается цель рабо-

### Материалы и методы

Экспериментальные исследования были проведены с использованием промышленного оборудования «АО КЗПК» и лаборатории кафедры «МиМ» БГТУ

ты – оценить влияние концентрации кремния на процесс модифицирования чугуна с пластинчатым графитом с точки зрения гетерогенизации расплава.

Брянск. Работы проводились с двумя марками чугунов с пластинчатым графитом, химический состав которых представлен в табл. 1.

Химический состав серых антифрикционных чугунов марок СЧМ и А-ХМ

Таблица 1

Table 1

*Chemical composition of grey antifriction cast iron of СЧМ and А-ХМ grades*

Марка чугуна	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
СЧМ	2,9-3,2	1,5-1,8	1,2-1,5	0,3-0,6	≤ 0,12	0,2-0,4	-	0,3-0,6
А-ХМ	3,0-3,3	1,9-2,4	0,6-1,0	0,25-0,4	≤ 0,10	0,5-0,7	0,5-0,8	-
Допускаемые отклонения по элементам в %								
СЧМ и А-ХМ	±0,10	+0,15 -0,10	+0,20	-	-	+0,10	-	+0,30

Проверка химического состава чугуна требованиям, приведенным в табл. 1 проводилась на приборе для определения химического состава – Искролайт 100.

Проверка твердости производилась на стационарном твердомере по Бринеллю ТБ 5004. Измерения вели по средней линии на трех участках маслотной заготовки, как указано на рис. 1. Число твердости определяют как среднее арифметическое трех полученных результатов [18, 19].

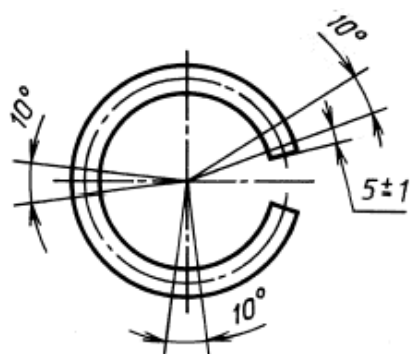


Рис. 1. Схема измерения твердости поршневого кольца по средней линии на 3 участках заготовки  
Fig. 1. Diagram of measuring the hardness of the piston ring along the midline on 3 sections of the workpiece

Определение микроструктуры полученных маслотнох заготовок проводят согласно ГОСТу 3443–87. Изучали размерно-топологические параметры графитовой фазы на нетравленных шлифах и особенности структуры металлической матрицы на травленных согласно требуемой нормативно-технической документации (НТД) для изучаемых чугунов представлены в табл. 2. Травление образцов проводилось 4 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты. Структура оценивалась по результатам исследований образцов не менее чем в 3-х полях зрения. Исследование и фотофиксацию изображений микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе ММР-2. Изучение шлифов проводилось в светлом поле при увеличениях ×100 и ×500.

Отдельные образцы подвергались электронно-зондовому микроанализу. Определение локального элементного состава образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе Bruker с системой энергодисперсионного микроанализа QUANTAX EDS при ускоряющем напряжении 20 кВ. Диапазон регистрируемых элементов от Ве (атомный номер

$Z = 4$ ) до  $U$  ( $Z = 92$ ). Обработка данных производилась в операционном программном обеспечении *ESPRIT Compact*. Изображения микроструктуры образцов получали в режиме обратно отраженных электронов.

При этом предварительно производилось дополнительное механическое шлифование и полирование торцевой поверхности образцов для подготовки шлифов. Данные процессы выполнялись на шлифовально-полировальном станке МР-2В [19].

Таблица 2

Требования к микроструктуре чугунов марок СЧМ и А-ХМ согласно НТД и ГОСТ3443-87

Table 2

*Requirements for the microstructure of cast iron grades of СЧМ and А-ХМ according to RTD and GOST3443-87*

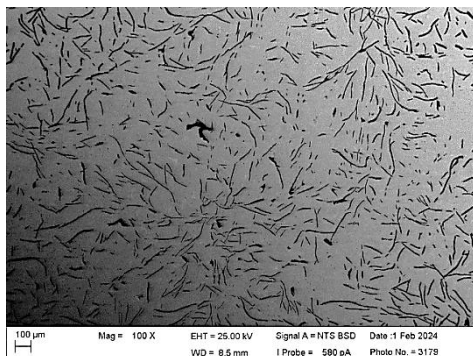
Марка чугуна	Металлическая матрица - перлит		Графитовая фаза				Фосфидная эвтектика			Структурно-свободный цементит
	Площадь	Дисперсность	Площадь	Длина	Распределение	Форма	Площадь	Строение	Распределение	
СЧМ	П	Пд0,3 Пд0,5 Пд1,0	ПГ6 ПГ10	ПГд45 -90	ПГр1 ПГр7	ПГф1 ПГф2	ФЭп2000 ФЭп6000	ФЭ1- ФЭ3	ФЭр1 ФЭр2	Недопустим
А-ХМ	П	Пд0,3 Пд0,5 Пд1,0	ПГ6 ПГ10	ПГд45 -180	ПГр1 ПГр7	ПГф1 ПГф2	ФЭп2000 ФЭп6000	ФЭ1- ФЭ5	ФЭр1 ФЭр2	

## Результаты

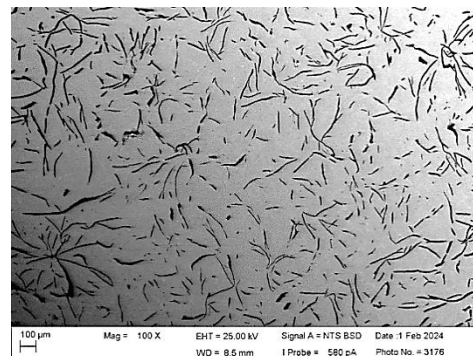
При проведении экспериментальных работ использовали модификаторы на основе ферросилиция с различным содержанием кремния 68...72 % и 73...75 %. Модификатор укладывали на дно ковша, количество модификатора для чугуна марки СЧМ составляло 800 гр. на ковш в 150 кг, для А-ХМ 4 кг. на ковш в 1т. Из каждой плавки отбирались образцы для анализа

химического состава и дальнейшего микроструктурного анализа (рис. 2).

Проводили электронно-зондовый микроанализ на сканирующем электронном микроскопе в результате, которого оценивался спектр характеристического рентгеновского излучения графитовой фазы (рис. 3).



а)



б)

Рис. 2. Типичная микроструктура чугуна, полученная при использовании модификатора на основе кремния (образцы не травлены,  $\times 100$ ): а – 73...75 %, б – 68 %

*Fig. 2. Typical microstructure of cast iron obtained using a silicon-based modifier (samples are not etched,  $\times 100$ ): a – 73...75 %, b – 68 %*

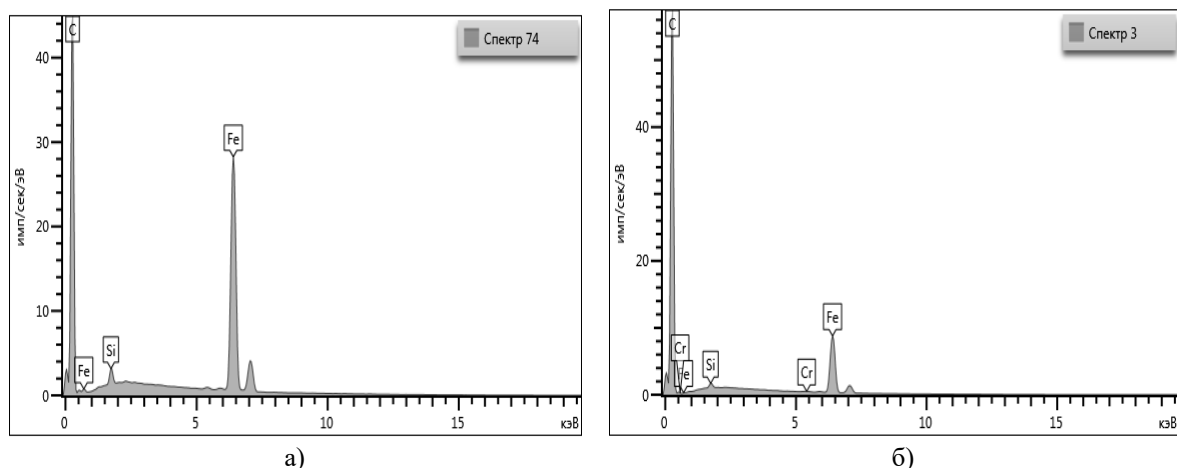


Рис. 3. Типичный спектр характеристического рентгеновского излучения графитовой фазы, полученный при использовании модификатора на основе кремния: а – 73...75 %, б – 68 %  
 Fig. 3. Typical spectrum of characteristic X-ray radiation of the graphite phase when using a silicon-based modifier: a – 73-75%, b – 68%

Наилучшие по размерно-геометрическим параметрам результаты (табл. 3 и рис. 2а) как для чугунов марки СЧМ, так и для А-ХМ, удовлетворяющие требованиям НТД (табл. 2), удалось получить при использовании модификаторов с высоким содержанием кремния порядка 73-75%. В данных образцах кремний присутствует на спектре характеристического рентгеновского излучения графитовой фазы (рис. 3а), а в «неудовлетворительных» образцах (рис. 3б) на спектре характери-

стического рентгеновского излучения превалировал хром, который используется в качестве легирующего элемента в антифрикционном чугуне, и железо. Данные результаты исследования подтверждают гипотезу о гетерогенизации расплава после модифицирования и формирование в зонах с повышенным содержанием кремния мелкодисперсного графита, на базе которого происходит формирование графитовой фазы чугунов.

### Результаты экспериментальных исследований

Таблица 3

Table 3

#### Experimental research results

Содержание кремния в модификаторе	Графитовая фаза				Металлическая матрица	Твердость НВ
	форма	длина	распределение	кол-во		
Требования НТД						
СЧМ	ПГф1,2	ПГд45-90	ПГр1,7	ПГ6,10	П-ФЭ1-3-ФЭр1-2	241-302
А-ХМ	ПГф1,2	ПГд45-180	ПГр1,7	ПГ6,10	П-ФЭ1-5-ФЭр1-2	229-269
Результаты экспериментальный исследований						
68-72% (СЧМ)	ПГф1	ПГд90	ПГр6	ПГ4	П-ФЭ3-ФЭр1	250
73-75% (СЧМ)	ПГф1	ПГд45	ПГр6	ПГ6	П-ФЭ3-ФЭр2	265
68-72% (А-ХМ)	ПГф1	ПГд180	ПГр1	ПГ6	П-ФЭ5-ФЭр1	201
73-75% (А-ХМ)	ПГф1	ПГд90	ПГр1	ПГ10	П-ФЭ3-ФЭр1	265

Объяснять полученные результаты, представленные на рис. 2, 3 можно при помощи основ геометрической термодинамики, приведенных в работе А.А. Жукова и Р.Л. Снежного [20], которая теоретически объясняет важность использования в качестве базы модификатора ферросили-

ция с высоким содержанием кремния. Согласно авторам, в жидком чугуне процесс модифицирования кремнийсодержащим модификатором сохраняется в течении десятка минут, что говорит о факторах, тормозящих процессы массопереноса и гомогенизации расплава чугуна. А.А. Жуков

рассматривал в системе Fe-Si зависимости энтальпии  $\Delta H_{см}$  (рис. 4а) и энтропии  $\Delta S_{см}$

(рис. 4б) смешения в области эквимолярного состава  $N_{Fe} \approx 0,5$  и  $N_{Si} \approx 0,5$ .

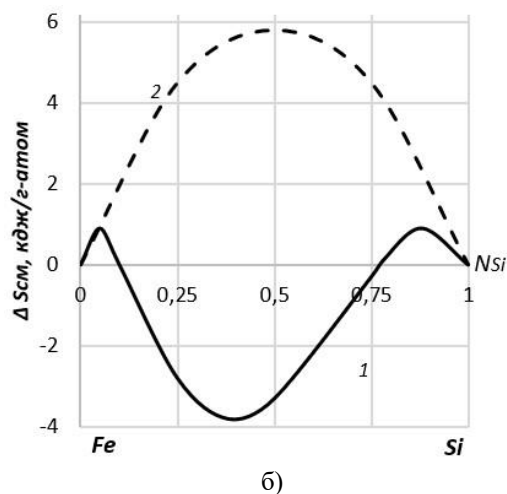
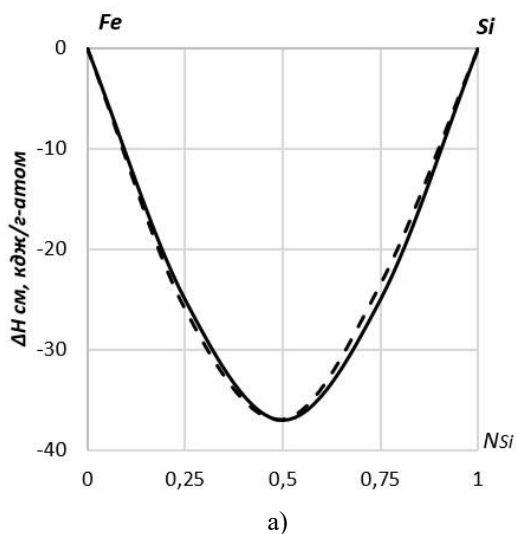


Рис. 4. Зависимости: а – энтальпии смешения  $\Delta H_{см}$ ; б – энтропии смешения  $\Delta S_{см}$  [20]  
 Fig. 4. Dependences: а – enthalpy of mixing  $\Delta H_m$ ; б – entropy of mixing  $\Delta S_m$  [20]

При этом полученные экспериментально значения  $\Delta S_{см}$  (пунктирная линия) существенно отличаются от значений в совершенных и регулярных растворах. Такое отклонение сказывается на свободной энергии смешения  $\Delta G_{см}$  (рис. 5). Особенность представленной кривой в том, что ее кривизна на участках I и II повышенная по сравнению с кривизной  $\Delta G_{см}$  для совершенных и регулярных растворов, а в области III кривизна очень мала и близится к нулю, стремление системы к нулю означает приближение системы расплава чугуна к расслоению, именно поэтому зона III является зоной с очень малыми скоростями массопереноса и носит название области индифферентности.

Согласно гипотезы А.А. Жукова преодолеть область индифферентности при использовании модификаторов с низким содержанием кремния легко, чаще всего данный процесс происходит при заполнении ковша, в следствие чего теряется модифицирующее действие. В свою очередь, при высоком содержании кремния отдельные макрообъемы расплава долго не могут преодолеть область индифферентности, поэтому химическая неоднородность металла и эффект модифицирования сохраняется дольше.

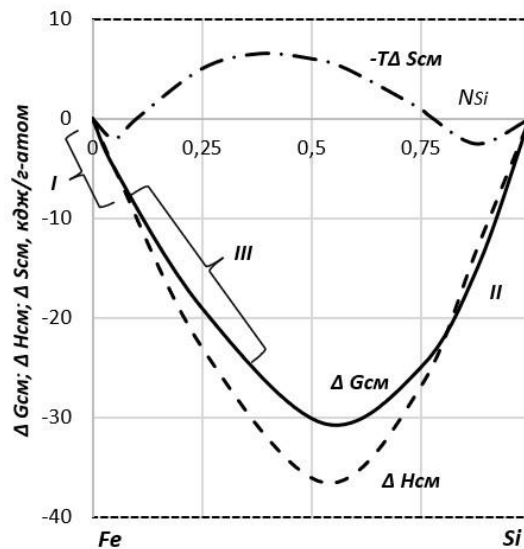


Рис. 5. Зависимость свободной энергии смешения  $\Delta G_{см}$  [20]  
 Fig. 5. Dependence of the free energy of mixing  $\Delta G_m$  [20]

В момент, когда расплав находится в состоянии предрасслоения, углерод стремится обособиться в низкокремнистых макрообъемах, а кремний, напротив – в низкоуглеродистых, что стабилизирует систему и способствует процессу графитизации, путем вытеснения углерода из высококремнистого раствора в виде неравновесного графита. В конечном итоге гетерогенизация, возникающая вследствие растворения высококремнистого модификатора, способствует зарождению большого

число кластеров графита, из которых, на неметаллических включениях, как потенциальных подложках, образовавшихся в результате химического взаимодействия

### Заключение

Были изложены особенности теорий о строении жидкого чугуна. Рассмотрен процесс кристаллизации серых низкосернистых чугунов марок СЧМ и А-ХМ при использовании модификаторов на основе кремния разной концентрации 68...72 % и 73...75 % при одинаковых условиях модифицирования для серых низкосернистых чугунов марок СЧМ и А-ХМ.

На основании проведенных экспериментальных работ, электронно-зондового микроанализа и анализа термодинамических зависимостей удалось доказать, что концентрация кремния оказывает суще-

активных компонентов модификатора, начинает формироваться графитовая фаза, являющаяся основой для растущих эвтектических ячеек.

ственное влияние на кристаллизации серого низкосернистого чугуна. Анализ спектра характеристического рентгеновского излучения графитовой фазы подтвердил наличие кремния на спектре в образцах с наилучшими показателями по структуре и свойствам, полученных при использовании модификаторов с высоким содержанием кремния 73...75 %. Данные исследования подтверждают гипотезу о гетерогинезации расплава после модифицирования и формирования в зонах с повышенным содержанием кремния мелкодисперсного графита.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скаланд, Т. Техническая информация по вопросам применения модификаторов компании «ЭЛКЕМ АСА» для производства отливок из чугуна с различной формой графита / Т. Скаланд. 2004. 36 с.
2. Шерман, А.Д. Чугун: справочник / А. Д. Шерман, А.А. Жуков. Москва: Металлургия. 1991. 576 с.
3. Худокормов, Д. Н. Роль примесей в процессе графитизации чугунов / Д. Н. Худокормов. Минск: Наука и техника. 1968. 153 с.
4. О субмикрорегерогенном строении чугуна / А.А. Жуков, Р.Л. Снежной, Н.Г. Гиршович, С.В. Давыдов // Литейное производство. 1980. № 6. С. 3-4.
5. О модифицировании низкокремистых графитизируемых Fe-C-сплавов / Г.М. Кимстач // Литейное производство. 1992. № 8. С. 5.
6. Синтетический чугун / Кимстач, Г.М. // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. №12. С.7-14.
7. Метастабильное микрорасслоение жидких сплавов и его влияние на структуру отливки / П.С. Попель // Литейное производство. 1992. № 7. С. 3-6.
8. Микрорегерогенное строение жидких чугунов ИЧХ28Н2, ИЧ310Х24М2Ф4ТР / В. С. Цепелев, Н. И. Синицин, О. А. Чикова, М. Г. Потапов, В. В. Вьюхин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. –2024. № 5. С. 279-292.
9. Теоретическое обоснование критериев склонности чугуна к графитизации / А.А. Жуков, И.И. Добровольский // Литейное производство. 1982. № 6. С. 3-5.
10. Взаимодействие и массоперенос в жидком чугуне / А.А. Жуков, В.А. Ильинский, Ю.Ю. Жигуц, Л.В. Костылева // Литейное производство. – 1986. № 2. С. 7-8.
11. Химическая микронеоднородность в литейных сплавах / Г.П. Анастасиади // Литейное производство. 1992. № 6. С. 6-7.
12. Распределение углерода в жидком чугуне / И.В. Гаврилин // Литейное производство. 1982. № 4. С. 2-4.
13. Равновесная химическая неоднородность в жидких литейных сплавах / И.В. Гаврилин, Ю.Д. Корогодов, Н.П. Тихонов, В.Н. Шаршин // Литейное производство. 1986. № 1. С. 3-5.
14. О строении чугунных расплавов / А.Г. Панов, Г.Ф. Мухаметзянова // М: Металлургия Машиностроения. 2014, №5, С. 6-12:
15. К вопросу о роли кремния как модификатора чугуна / Г.М. Кимстач, Б.М. Драпкин, Д.А. Уртаев, И.Г. Кимстач // Литейное производство. 2008. № 7. С. 12-13.
16. Влияние кремния на строение и свойства модифицированных железоуглеродистых расплавов / Ри Хосен, А. Н. Литвиненко, Н.И. Мостовой // Литейное производство. 1977. № 9. С. 1-12.
17. Сильман, Г.И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях / Г.И. Сильман. Москва: Машиностроение. 2007. 302с.
18. Методы исследования и экспериментальные установки для оценки триботехнических характеристик поршневых колец / В. О. Сазонов, Е.А. Памфилов // Новые материалы и технологии в машиностроении. Брянск. 2023. С. 93-96.

19. Оценка взаимосвязи твердости со структурой легированных чугунов с пластинчатым графитом, применяемых для изготовления поршневых колец / В.О. Сазонов, К.В. Макаренко, А.В. Вдовин // Транспортное машиностроение. 2025. №2. С. 64-76.

20. О малой скорости массопереноса и структурных изменений в жидком модифицированном чугуне / А.А. Жуков, Р.Л. Снежной // Литейное производство. 1976. № 11. С. 4-5.

## REFERENCES

1. Skaland T. Technical information on the use of ELKEM ASA modifiers for the production of iron castings with various graphite forms. 2004.
2. Sherman AD, Zhukov AA. Cast iron: handbook. Moscow: Metallurgiya; 1991.
3. Khudokormov DN. The role of impurities in graphitization of cast iron. Minsk: Nauka I Tekhnika; 1968.
4. Zhukov AA, Snezhnoy RL, Girshovich NG, Davydov SV. On the sub micro heterogenic structure of cast iron. Foundry. Technology and Equipment. 1980;6:3-4.
5. Kimstach GM. On the modification of low-silicon graphitic Fe-C alloys. Foundry. Technology and Equipment. 1992;8:5.
6. Kimstach GM. Synthetic iron. Blanking Production in Mechanical Engineering. 2007;12:7-14.
7. Popel PS. Metastable micro-stratification of liquid alloys and its effect on the casting structure. Foundry. Technology and Equipment. 1992;7:3-6.
8. Tsepelev VS, Sinitsin NI, Chikova OA, Potapov MG, Vyukhin VV. Microheterogenic structure of liquid cast iron IChKh28N2 and ICh310Kh24M2F4TR. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2024;5:279-292.
9. Zhukov AA, Dobrovolsky II. Theoretical substantiation of the criteria for the propensity of cast iron to graphitization. Foundry. Technology and Equipment. 1982;6:3-5.
10. Zhukov AA, Ilyinsky VI, Zhiguts YuYu, Kostyleva LV. Interaction and mass transfer in liquid cast iron. Foundry. Technology and Equipment. 1986;2:7-8.
11. Anastasiadi GP. Chemical microuniformity in foundry alloys. Foundry. Technology and Equipment. 1992;6:6-7.
12. Gavrilin IV. Carbon distribution in liquid cast iron. Foundry. Technology and Equipment. 1982;4:2-4.
13. Gavrilin IV, Korogodov YuD, Tikhonov NP, Sharshin VN. Equilibrium chemical heterogeneity in liquid casting alloys. Foundry. Technology and Equipment. 1986;1:3-5.
14. Panov AG, Mukhametzyanova GF. On the structure of cast iron melts. Metallurgiya Mashinostroeniya. 2014;5:6-12.
15. Kimstach GM, Drapkin BM, Urtaev DA, Kimstach IG. On the problem of the silicon role as a modifier of cast iron. Foundry. Technology and Equipment. 2008;7:12-13.
16. Hosen R, Litvinenko AN, Mostovoy NI. The influence of silicon on the structure and properties of modified iron-carbon melts. Foundry. Technology and Equipment. 1977;9:1-12.
17. Silman GI. Thermodynamics and thermokinetics of structure formation in cast irons and steels. Moscow: Mashinostroenie; 2007.
18. Sazonov VO, Pamfilov EA. Research methods and experimental installations for evaluating tribotechnical characteristics of piston rings. New Materials and Technologies in Mechanical Engineering. Bryansk; 2023. p. 93-96.
19. Sazonov VO, Makarenko KV, Vdovin AV. Evaluation of the correlation between hardness and structure of alloyed cast iron with flake graphite used for manufacturing piston rings. Transport Engineering. 2025;2:64-76.
20. Zhukov AA, Snezhnoy RL. On the low rate of mass transfer and structural changes in liquid modified cast iron. Foundry. Technology and Equipment. 1976;11:4-5.

## Информация об авторах:

**Сазонов Вадим Олегович** – аспирант кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-23.

**Sazonov Vadim Olegovich** – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science at Bryansk State Technical University, phone: (4832) 58-82-23.

**Макаренко Константин Васильевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-18.

**Makarenko Konstantin Vasilyevich** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science at Bryansk State Technical University. phone: (4832) 58-82-18.

**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 11.12.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 27.02.2026. 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 11.12.2025; approved after review on 19.02.2026; accepted for publication on 27.02.2026. 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*.



***В Брянском государственном техническом университете в 2026 году продолжается приём на новую специальность***

***23.05.03 – Подвижной состав железных дорог, специализация «Технология производства и ремонта подвижного состава»***

*Подготовка предусматривает освоения фундаментальных основ конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог с применением предиктивной аналитики, систем искусственного интеллекта и работы с большими объемами данных. Обучение организовано в интересах крупнейших предприятий в области обслуживания и ремонта подвижного состава таких, как ООО «Локотех», ОАО «РЖД», ООО «Новая вагоно-ремонтная компания» и другие.*

*Начиная со второго курса обучения студентам предоставляется возможность оплачиваемой стажировки на структурных подразделениях компаний с целью приобретения практических навыков необходимых для освоения профессий технолога и инженера. В рамках освоения программы значительное внимание уделяется современным методам прогнозирования технического состояния подвижного состава, системам массового обслуживания и ремонта сложных технических систем, прогнозирования фактического состояния ответственных узлов подвижного состава и оценке рисков возникновения аварийных ситуаций.*

*Приобретённые по программе специалитета компетенции позволят обучающимся стать высококвалифицированными специалистами, которые смогут применить полученные знания и навыки на практике, участвуя в реализации стратегических проектов по развитию железнодорожной инфраструктуры страны.*