



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-98-113>
УДК 669.13.017:620.18; 669.13.017:620.17

Поступила 19.06.2025
Received 19.06.2025

АУСФЕРРИТНЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ (ADI): АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СХЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,

г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: art@phti.by

И. В. РАФАЛЬСКИЙ, П. Е. ЛУЩИК, Л. П. ДОЛГИЙ, Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,

г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24.

Создана база данных химических составов аусферритных высокопрочных чугунов (ADI) по материалам публикаций в авторитетных научных журналах (*Materials and Design*, *Materials Science and Engineering A*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, *Journal of Materials Research and Technology* (Elsevier), *Metallurgical and Materials Transactions A*, *International Journal of Metalcasting* (Springer), *Materials*, *Metals* (MDPI), *Materials Transactions JIM*, *ISIJ International* и др.). Глубина поиска составила 35 лет (1990–2025 гг.), наибольшее внимание уделено публикациям 2020–2025 гг. Проведен статистический анализ химических составов ADI из базы данных, который позволил выявить ряд закономерностей. Установлены значения средних концентраций, стандартных отклонений от средних, границы доверительных интервалов для средних значений концентраций химических элементов с использованием распределения Стьюдента при уровне значимости 0,05. Установлены граничные диапазоны легирования ADI основными элементами: углерод от 2,78 до 3,87%, кремний от 0,28 до 4,69%, марганец от 0,07 до 1,01%, медь от 0,01 до 1,4%, никель от 0,001 до 2,0%, молибден от 0,001 до 0,5%. Построены графики зависимостей частоты распределения исследуемых сплавов ADI от содержания углерода, марганца, меди, никеля, молибдена и магния. Обнаружены характерные максимумы частоты распределения сплавов, приходящиеся на интервалы концентраций следующих элементов: углерод 3,40–3,55% (42% сплавов), кремний 2,03–2,91% (90% сплавов), марганец 0,22–0,41% (41% сплавов). Для меди, никеля и молибдена в ADI не выявлено статистически значимых максимумов концентраций. Проведен анализ частоты распределения сплавов ADI в зависимости от сочетаний концентраций следующих пар химических элементов: C–Si, Si–Mn, Cu–Ni, Mo–Ni, P–S, Mg–C. Выявлены характерные для большинства сплавов комбинации концентраций C–Si и Si–Mn, которые отображаются на диаграммах в виде локальных, четко выраженных зон. Несколько менее выраженные области устойчивых сочетаний концентраций обнаружены для пар Mg–C и P–S. Установлен ряд групп устойчивых сочетаний концентраций Cu–Ni, Mo–Cu, Mo–Ni, отображающихся на диаграммах в виде нескольких соответствующих зон. Выявлены группы ADI: безмолибденовый, низкомедистый, низконикелевый; наиболее широко представлена группа комплексно легированных ADI: 0,6–1,4% Cu, 0,5–2,0% Ni, 0,15–0,3% Mo. Статистический анализ позволил выявить наиболее часто используемые интервалы легирования ADI: углерод 3,50–3,59%, кремний 2,44–2,66%, марганец 0,29–0,38%, медь 0,39–0,62%, никель 0,46–0,81%, молибден 0,13–0,24%, магний 0,042–0,051%, фосфор 0,024–0,035%, сера 0,011–0,015%. В результате статистической обработки всего массива данных определен средневзвешенный химический состав, который рекомендуется в качестве оптимального: 3,54% C, 2,55% Si, 0,33% Mn, 0,51% Cu, 0,64% Ni, 0,18% Mo, 0,046% Mg, до 0,03% P, до 0,01% S. Проведены анализ и сравнение химических составов ряда патентов на составы ADI авторов с выявленным среднестатистическим составом. Предложены направления создания групп экономнолегированных ADI на основе концепции экономного легирования.

Ключевые слова. Аусферритный высокопрочный чугун, ADI, бейнитный чугун, химический состав, оптимальный состав, легирующие элементы, медь, никель, молибден, статистический анализ, термическая обработка, аустемперинг, изотермическая закалка.

Для цитирования. Покровский, А. И. Аусферритные высокопрочные чугуны (ADI): анализ современных схем легирования / А. И. Покровский, И. В. Рафальский, П. Е. Лущик, Л. П. Долгий // *Литье и металлургия*. 2025. № 3. С. 98–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-98-113>.

AUSFERRITIC DUCTILE IRONS (ADI): ANALYSIS OF MODERN ALLOYING SCHEMES

A. I. POKROVSKY, Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: art@phti.by

I. V. RAFALSKI, P. E. LUSHCHYK, L. P. DOLGIY, Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”,
Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolasa str.

A database of chemical compositions of ausferritic ductile irons (ADI) was created based on publications in reputable scientific journals (*Materials and Design*, *Materials Science and Engineering A*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, *Journal of Materials Research and Technology* (Elsevier), *Metallurgical and Materials Transactions A*, *International Journal of Metalcasting* (Springer), *Materials*, *Metals* (MDPI), *Materials Transactions JIM*, *ISIJ International* и др.). The search was carried out for 35 years (1990–2025), with the greatest attention paid to publications for the period 2020–2025. A statistical analysis of the chemical compositions of ADI from the database was carried out, which revealed a number of patterns. The values of average concentrations, standard deviations from averages, and confidence interval boundaries for average values of chemical element concentrations were determined using the Student's distribution at a significance level of 0.05. The limiting ranges of ADI alloying with the main elements were established: carbon from 2.78 to 3.87 %, silicon from 0.28 to 4.69 %, manganese from 0.07 to 1.01 %, copper from 0.01 to 1.4 %, nickel from 0.001 to 2.0 %, molybdenum from 0.001 to 0.5 %. Graphs of the dependencies of the distribution frequency of the studied ADI alloys on the content of carbon, manganese, copper, nickel, molybdenum and magnesium were constructed. Characteristic maxima of the distribution frequency of the alloys were found, falling on the ranges of concentrations of the following elements: carbon 3.40–3.55 % (42 % of alloys), silicon 2.03–2.91 % (90 % of alloys), manganese 0.22–0.41 % (41 % of alloys). For copper, nickel and molybdenum in ADI, statistically significant concentration maxima were not revealed. The distribution frequency of ADI alloys was analyzed depending on the concentration combinations of the following pairs of chemical elements: C–Si, Si–Mn, Cu–Ni, Mo–Ni, P–S, Mg–C. Combinations of C–Si and Si–Mn concentrations, characteristic of most alloys, were revealed and displayed on the diagrams as local, clearly defined zones. Somewhat less defined areas of stable concentration combinations were found for the pairs: Mg–C and P–S. A number of groups of stable combinations of Cu–Ni, Mo–Cu, Mo–Ni concentrations were established and displayed on the diagrams as several corresponding zones. ADI groups were revealed: molybdenum-free, low-copper, low-nickel; the most widely represented group is complex-alloyed ADI: 0.6–1.4 % Cu, 0.5–2.0 % Ni, 0.15–0.3 % Mo. Statistical analysis allowed us to identify the most frequently used ADI alloying ranges: carbon 3.50–3.59 %, silicon 2.44–2.66 %, manganese 0.29–0.38 %, copper 0.39–0.62 %, nickel 0.46–0.81 %, molybdenum 0.13–0.24 %, magnesium 0.042–0.051 %, phosphorus 0.024–0.035 %, sulfur 0.011–0.015 %. As a result of statistical processing of the entire data array, the weighted average chemical composition: 3.54 % C, 2.55 % Si, 0.33 % Mn, 0.51 % Cu, 0.64 % Ni, 0.18 % Mo, 0.046 % Mg, up to 0.03 % P, up to 0.01 % S. This composition is recommended as optimal. An analysis and comparison of chemical compositions of a number of patents on ADI compositions of the authors with the identified average statistical composition was carried out. Directions for creating groups of economically alloyed ADI based on the concept of economical alloying are proposed.

Keywords. Ausferritic ductile iron, ADI, bainitic cast iron, chemical composition, optimal composition, alloying elements, copper, nickel, molybdenum, statistical analysis, heat treatment, austempering, isothermal hardening.

For citation. Pokrovsky A. I., Rafalski I. V., Lushchik P. E., Dolgiy L. P. Ausferritic ductile irons (ADI): analysis of modern alloying schemes. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 3, pp. 98–113. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-98-113>.

Введение

Аусферритный (бейнитный) чугуны получают путем термической обработки (изотермической закалки) специальных марок высокопрочного чугуна (ВЧ). Что касается терминологии, то в большинстве зарубежных статей, материалах научных конференций, стандартах, маркировке отливок сложилось общепринятое устойчивое словосочетание – Austempering Ductile Iron (ADI) – высокопрочный чугун, подвергнутый аустемперингу (аустенизации и изотермической закалке). Немного реже для обозначения аусферритных чугунов используется термин Ausferritic spheroidal graphite cast irons (аусферритный чугун со сфероидальным графитом). В России этот тип чугунов часто продолжают называть бейнитным. В данной статье мы будем придерживаться международной терминологии и называть этот класс чугунов Austempering Ductile Iron (ADI).

Первые публикации по ADI-чугунам относятся к 1950-м гг. За период, прошедший с этого времени, ADI на Западе приобрел репутацию эффективного и более дешевого заменителя проката из дорогих легированных и низколегированных конструкционных сталей. Он используется для изготовления ответственных машиностроительных изделий с прочностью до 1500 МПа. Например, в США и Европе в коробках передач некоторых грузовых автомобилей все шестерни изготавливают только из ADI. При этом в Беларуси ADI до сих пор считается относительно новым и мало опробованным классом материалов, поэтому данная статья предполагает заполнить пробел знаний об ADI в Беларуси.

Специальная термическая обработка ADI-чугунов (аустемперинг) состоит в нагреве отливки до температуры, при которой начинает образовываться аустенит, аустенизации с определенной выдержкой для диффузии углерода и последующем охлаждении с достаточно высокой скоростью, обеспечивающей подавление процесса формирования перлита.

Дальнейшее превращение переохлажденного аустенита (γ -фазы) в структуре металлической матрицы ADI-чугунов происходит во время изотермической закалки (ИЗ). Ее температура выбирается несколько ниже выступающего «мыса» на С-образной кривой распада аустенита (зоны максимальной устойчивости γ -фазы), но выше точки начала мартенситного превращения. Превращение состоит в сочетании бездиффузионного $\gamma \rightarrow \alpha$ фазового перехода и диффузионного перераспределения атомов углерода.

При этом формируется структура, состоящая из феррито-карбидной смеси (преимущественно игольчатого феррита), которая обеспечивает прочность ADI, а также остаточного аустенита, который придает ему пластичность.

Такое сочетание фаз дает возможность управления соотношением прочностных и пластических характеристик в более широких пределах по сравнению со сталями. Многообразие структур открывает возможность оптимально подстраивать механические свойства материала под конкретное применение. Так, при низких температурах ИЗ (около 250 °С) образуется игольчатая ферритная фаза с небольшим количеством остаточного аустенита, что обеспечивает высокую твердость и прочность на растяжение, но лишь ограниченную пластичность. При повышении температуры ИЗ до 370 °С феррит становится грубее и возрастает количество остаточного аустенита (до $\approx 40\%$), что приводит к увеличению пластичности, снижению прочности и твердости.

В настоящее время разработано множество международных, европейских, а также национальных стандартов на аусферритные чугуны и технических условий заводов-производителей. Наиболее проработанным считается международный стандарт ISO 17804:2020 "Founding – Ausferritic spheroidal graphite cast irons – Classification". В Беларуси до недавнего времени не существовало национального стандарта на ADI, пока не была проведена гармонизация ISO 17804 со степенью соответствия IDT (коллектив разработчиков: Покровский А. И., Хина Б. Б., Толкачева О. А.). Первый белорусский стандарт СТБ ISO 17804–2024 «Отливки. Аусферритный чугун с шаровидным графитом. Классификация» был введен в действие постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 23.12.2024 № 143.

В СТБ ISO 17804–2024 предусмотрено пять марок ADI, у которых показатели предела прочности при растяжении составляют (по мере увеличения марки) от 800 до 1400 МПа, а показатели относительного удлинения – от 10 до 1 % соответственно. Например, обозначение самой низкой в линейке марки ADI в белорусском стандарте – ISO 17804/JS/800–10 (где 800 – предел прочности при растяжении, МПа, 10 – относительное удлинение, %), а обозначение наиболее прочной марки – ISO 17804/JS/1400–1 (где 1400 – предел прочности при растяжении, МПа, 1 – относительное удлинение, %).

Актуальность темы исследований

Большим недостатком и специфической особенностью классификации ADI в существующих стандартах (как и в большинстве других стандартов на чугуны) является то, что она основана не на химическом составе, а на механических свойствах. Так сложилось исторически. Между тем, именно схема легирования в первую очередь определяет структуру и уникальные механические характеристики ADI. В этой связи актуальны статистический анализ массива данных химических составов ADI и исследование современного подхода к их легированию.

К настоящему времени опубликовано большое количество статей и патентов, касающихся составов ADI и схем их легирования. Однако в большинстве своем эти исследования носят разрозненный характер и не систематизированы. Это не позволяет определить общие тенденции в легировании и системно подойти к выбору оптимального состава аусферритных чугунов. Настоящая работа по статистическому анализу достаточно представительного массива химических составов ADI выполнена впервые и поэтому обладает новизной.

Вкратце роль легирующих элементов в ADI можно охарактеризовать следующим образом. Кремний является стабилизатором феррита, повышает и расширяет температурный интервал превращения феррита в аустенит при нагреве. Медь способствует образованию перлита в литой микроструктуре и замедляет растворение графитных глобул во время аустенизации. Никель стабилизирует аустенит, увеличивает прокаливаемость за счет замедления превращения аустенита в перлит при охлаждении, а также понижает температуру превращения феррита в аустенит при нагреве. Молибден повышает прокаливаемость за счет замедления превращения аустенита в перлит при охлаждении.

Принципиальное влияние большинства легирующих элементов на С-образную диаграмму изотермического распада аустенита заключается в том, что они замедляют диффузию углерода. Соответственно, С-кривые начала и окончания превращения аустенита сдвигаются вправо, что позволяет получить аусферритную структуру ADI при меньшей скорости охлаждения.

К актуальности данной работы можно также отнести существующую потребность в разработке подхода к экономному легированию ADI. Оно должно быть основано на соотношении цена – качество, т.е. оптимальном балансе между конечными свойствами материала и стоимостью легирующих элементов.

В частности, для увеличения прокаливаемости и стабилизации аустенита в ADI-чугунах обычно используется классическая триада легирующих элементов: никель, медь, молибден. Влияние этих элементов на свойства ADI положительно, и доказана эффективность введения в состав их повышенного количества. Но проблема заключается в том, что эти металлы (или соответствующие ферросплавы) достаточно дорогие. Из описанной триады наиболее дорогим является молибден, далее следует никель, затем медь. Поэтому, несмотря на положительное влияние молибдена, его введение ограничивают минимальным содержанием из-за высокой стоимости.

Исходя из вышесказанного, вытекает **цель настоящего исследования** – выполнить статистический анализ и систематизацию представительного массива химических составов аусферритных чугунов, выбранных по материалам публикаций в авторитетных и наиболее цитируемых научных журналах, исследовать частоту использования в ADI каждого элемента и их сочетаний, выявить наиболее часто встречающиеся комбинации легирующих элементов и интервалы легирования. Результатом статистического анализа должно быть определение интервалов легирования, наиболее часто используемых исследователями, и конкретной комбинации легирующих элементов (так называемого золотого состава ADI), которые и являются, по-видимому, оптимальными.

Решаемые задачи

Выполнить поиск научных публикаций по химическим составам ADI-чугунов на глубину до 35 лет и сформировать представительную базу данных (не менее 70 составов) для последующего анализа.

Провести статистический анализ данных по частоте распределения химических элементов и их сочетаний в составе ADI-чугунов.

Установить минимальные и максимальные концентрации углерода, легирующих, модифицирующих элементов и примесей в ADI.

Провести анализ частоты распределения сплавов ADI в зависимости от сочетаний концентраций основных пар химических элементов: C–Si, Si–Mn, Cu–Ni, Mo–Ni, P–S, Mg–C.

Определить наиболее часто встречающиеся интервалы концентраций элементов и химические составы ADI.

Предложить направления экономного легирования ADI.

Методология исследований

Литературный и патентный анализ химических составов ADI-чугунов проведен на глубину 35 лет (1990–2025 гг.). Поиск велся исключительно среди зарубежных научных журналов, учитывая значительно больший опыт и наработки по созданию ADI за рубежом, чем в странах бывшего Советского Союза. Особое внимание уделялось публикациям в наиболее авторитетных научных журналах с высоким импакт-фактором, например, Materials and Design, Materials Science and Engineering A, Journal of Materials Engineering and Performance, Journal of Materials Research and Technology (издательство Elsevier), Metallurgical and Materials Transactions A, International Journal of Metalcasting (издательство Springer), Materials, Metals (MDPI), Materials Transactions JIM, ISIJ International и др. Досконально проработаны свежие публикации 2020–2025 гг. Для создания базы данных выбирались только те публикации, где указывался конкретный химический состав ADI. При этом те литературные источники, где приводились интервалы легирования (а зачастую эти интервалы достаточно широки), не принимались во внимание и отбрасывались. Проанализирован 51 литературный источник и создана достаточно представительная база, включающая 71 химический состав ADI (в некоторых работах указано несколько составов). Особенностью данного исследования является то, что анализировались только химические составы из научных статей. Обзор промышленно используемых марок ADI, а также патентов, вероятно, мог бы показать несколько отличные результаты.

Обработку экспериментальных данных производили с помощью методов математической статистики. В качестве оценки математического ожидания использовали среднее арифметическое. Для установления частоты распределения элементов применяли распределение Стьюдента при уровне значимости 0,05.

Результаты исследований и их обсуждение

Созданная база данных химических составов аусферритных чугунов (ADI) приведена в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав аусферритных высокопрочных чугунов (ADI) (по данным [1–51])

№ п/п	Содержание химических элементов в сплаве, % (мас.)												Год публи- кации	Источник
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	Cr	Al	Mg	P	S	Другие элементы		
1	3,7	2,5	0,2	≤ 0,8	≤ 2,0	≤ 0,25							1990	[1, p. 4–29]
2	3,6	2,7	0,11	0,63	0,82								1992	[2, p. 545]
3	3,8	2,8	0,32										1992	[2, p. 546]
4	3,40	2,35	0,58	0,04						0,01	0,02		1999	[3, p. 2746]
5	3,52	2,10	0,11	0,03						0,01	0,03		1999	[3, p. 2746]
6	3,40	2,8	0,8	0,04						0,01	0,02		2001	[4, p. 51]
7	3,54	2,42	0,25						0,041		0,007		2003	[3, p. 995]
8	3,46	2,44	0,30						0,035		0,009		2003	[3, p. 995]
9	3,47	2,45	0,48						0,038		0,009		2003	[3, p. 995]
10	3,46	2,90	0,50						0,035		0,009		2003	[3, p. 995]
11	3,50	3,10	0,48						0,050		0,003		2003	[3, p. 995]
12	3,86	2,1	0,4						0,042	0,07	0,059		2003	[6, p.1056]
13	3,44	2,61	0,16		0,03		0,04		0,052	0,024	0,01		2003	[7, p. 644]
14	3,20	2,67	0,07	0,02	0,80	0,25	0,12			0,022	0,003		2004	[8, p. 309]
15	3,45	2,48	0,4	0,3	1,5	0,5			0,05	0,013	0,012		2006	[9, p. 113]
16	3,6	2,5	0,28	0,45			0,04		0,066	0,014	0,014		2006	[10, p. 617]
17	2,78	4,69	0,49	0,92	1,10					0,050	0,017		2009	[11, p. 44]
18	3,79	3,09	0,45						0,028	0,046	0,014		2009	[12, p. 49]
19	3,41	2,58	0,47		1,02	0,24			0,084	0,026	0,040		2009	[12, p. 49]
20	3,55	1,21	0,11		0,04			2,11	0,06	0,005	0,005		2011	[13, p. 3]
21	3,73	2,77	0,44	0,23	0,15		0,10		0,047	0,057	0,009		2012	[14, p. 72]
22	3,64	2,70	0,39	0,01	0,03				0,04	0,03	0,01		2013	[15, p. 176]
23	3,65	2,65	0,30	0,99	0,04				0,045	0,03	0,01		2013	[15, p. 176]
24	3,61	2,70	0,40	0,95	1,10				0,05	0,03	0,01		2013	[15, p. 176]
25	3,75	2,6	0,3							0,04	0,01		2013	[16, p.1947]
26	3,55	2,67	0,31	0,04	0,08		0,025		0,06	0,027	0,009		2014	[17, p. 75]
27	3,48	2,89	0,52	0,50	0,01		0,03		0,05	0,06	0,01		2014	[18, p. 2]
28	3,63	2,6	0,35						0,03	0,03	0,02		2014	[19, p. 32]
29	3,41	2,68	0,44	0,82	0,04	0,01	0,02					V 0,002	2015	[20, p. 16]
30	3,53	2,73	0,59	0,45	0,54		0,05		0,05	0,03	0,01		2015	[21, p. 52]
31	3,44	2,46	0,08	0,52	1,03	<0,01	0,05	0,018	0,043	0,016	0,008	V 0,017; Ce 0,013; Ti 0,01; Sn, Sb <0,005	2015 2017 2018	[22, p. 72] [28, p. 26] [30, p. 3]
32	3,29	2,53	0,31	0,51	0,81	0,002	0,053		0,031	0,015	0,013	V 0,003; Ti 0,004; Sn 0,006; W 0,004	2016	[23, p. 326]
33	3,54	2,2	0,18	0,73	1,58	0,01	0,04	0,023	0,046	0,029	0,015	V 0,017; Nb 0,001; Ti 0,007; Co 0,021; Sn 0,009; W 0,008	2016	[24, p. 2]
34	3,87	2,17	0,49	0,73	0,02	0,02	0,04	0,007	0,005	0,023	0,007	V 0,005; Nb 0,015; Ti 0,01; Co 0,003; Sn 0,028; W 0,001	2016	[24, p. 2]
35	3,57	2,49	0,113	0,4					0,057	0,029	0,007		2016	[25, p. 5]
36	3,4	3,1	0,2	0,666	0,616	0,293	0,06		0,042	0,1	0,009		2016	[26, p. 5597]
37	3,55	2,55	0,31		1,56				0,063	0,025	0,009		2017	[27, p. 2274]
38	3,62	2,55	0,40	0,017	0,012		0,048	0,015	0,08	0,017	0,018	Ti 0,072	2017	[29, p. 13436]

Окончание табл. 1

№ п/п	Содержание химических элементов в сплаве, % (мас.)												Год публи- кации	Источник
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	Cr	Al	Mg	P	S	Другие элементы		
39	3,68	2,54	0,19	0,61	0,82	0,25	0,03		0,045	0,038	0,001		2018	[31, p. 3]
40	3,36	2,95	0,40	0,59	0,76								2018	[32, p. 2]
41	3,70	2,60	0,28				0,017		0,036	0,015	0,013		2019	[33, p. 4358]
42	3,71	2,60	0,64				0,017		0,038	0,015	0,013		2019	[33, p. 4358]
43	3,71	2,59	1,01				0,016		0,037	0,015	0,013		2019	[33, p. 4358]
44	3,45	2,55		1,35	0,98	0,15	0,04		0,05	0,02	0,005		2019	[34, p. 2]
45	3,79	2,77	0,11		0,96		0,03		0,03	0,02	0,003		2019	[35, p. 184]
46	3,2	0,28	0,37		0,81		0,11	4,8	0,02	0,023	0,022	Sn 0,17	2020	[36, p. 47]
47	3,73	2,37	0,18	0,02	0,02	0,00			0,05	0,04	0,01	Ti 0,01	2020	[37, p. 3]
48	3,68	2,35	0,18	0,03	0,02	0,25			0,04	0,04	0,02	Ti 0,01	2020	[37, p. 3]
49	3,63	2,38	0,18	0,03	0,02	0,49			0,04	0,04	0,01	Ti 0,01	2020	[37, p. 3]
50	3,46	2,37	0,29	0,84	1,1					0,02	0,01		2021	[38, p. 3]
51	3,37	2,7	0,306	0,467	0,164	0,0857	0,124	0,017	0,0371	0,0136	0,0181		2021	[39, p. 23]
52	3,53	2,32	0,17	0,19		0,22			0,035	0,08	0,017		2021	[40, p. 2417]
53	3,41	2,46	0,18	0,19		0,22			0,034	0,074	0,016	Nb 0,35	2021	[40, p. 2417]
54	3,6	2,44	0,36		0,89		0,11		0,036	0,004	0,015		2021	[41, p. 291]
55	3,82	2,28	0,39		0,54				0,048	0,041	0,011		2021	[42, p. 345]
56	3,6	2,5	0,4	1,4						<0,05	<0,03		2021	[43, p. 2]
57	3,37	2,60	0,268				0,017			0,015	0,013		2021	[44, p. 3]
58	3,71	2,58	0,64				0,023			0,015	0,013		2021	[44, p. 3]
59	3,86	2,55	1,01				0,024			0,021	0,013		2021	[44, p. 3]
60	3,51	2,80	0,32							0,023	0,0085		2022	[45, p. 4]
61	3,69	2,42	0,54	0,02	0,01	0,00	0,05	0,02			0,01		2022	[46, p. 4]
62	3,56	2,24	0,108	0,841	0,004	<0,001			0,036	0,032	0,012		2023	[47, p. 192]
63	3,49	2,40	0,083	0,824	0,001	0,197			0,050	0,035	0,014		2023	[47, p. 192]
64	3,56	2,33	0,086	0,826	0,599	0,191			0,039	0,033	0,011		2023	[47, p. 192]
65	3,83	2,72	0,16				0,03		0,06	0,04	0,03		2023	[48, p. 126]
66	3,45	2,70	0,18	0,60	0,88		0,04		0,042	0,01	0,007		2024	[49, p. 2]
67	3,53	2,66	0,18	0,01	0,12		0,04		0,041	0,01	0,006		2024	[49, p. 2]
68	3,407	2,725	0,310	1,013	1,128	0,185	0,099		0,112				2025	[50, p. 6]
69	3,371	2,781	0,347	1,041	1,428	0,185	0,105		0,090				2025	[50, p. 6]
70	3,174	2,619	0,274	1,011	1,962	0,197	0,098		0,077				2025	[50, p. 6]
71	3,5	2,2	0,22	0,05	0,5	0,2	0,03		0,02	0,01	0,001		2025	[51, p. 4]

Проведен статистический анализ базы данных по химическим составам ADI, включая углерод, легирующие, модифицирующие элементы и примеси.

1. Анализ верхних и нижних границ содержания углерода, легирующих, модифицирующих элементов и примесей в ADI

Установлены верхние и нижние границы содержания легирующих элементов, используемых при легировании ADI, средних концентраций, стандартных отклонений от средних, границы доверительных интервалов для средних значений концентраций химических элементов с использованием распределения Стьюдента при уровне значимости 0,05. Все эти данные сгруппированы в табл. 2.

Как видно из табл. 2 (колонки 2, 3), диапазоны легирования ADI основными элементами достаточно широки. В частности, содержание углерода колеблется от 2,78 до 3,87% (диапазон составляет 1%), кремния от 0,28 до 4,69% (более 3%), марганца от 0,07 до 1,01% (1%), меди от 0,01 до 1,4%, никеля от 0,001 до 2,0%, молибдена от 0,001 до 0,5%, магния от 0,005 до 0,112%, фосфора от 0,004 до 0,1%, серы от 0,01 до 0,59. Учитывая, что обрабатывался достаточно значительный массив информации, ожидаемо получился большой разброс показателей.

Несмотря на это, результаты позволяют сделать ряд важных выводов. Например, установлены верхние границы легирования (колонка 3, табл. 2) и показано, что содержание углерода в ADI никогда не превышает 3,8%, кремния – 4,49%, марганца – 1%; примеси фосфора не должны превышать 0,1%, серы – 0,06%, остаточное содержание магния – 0,1%.

Таблица 2. Результаты статистического анализа данных по химическому составу (табл. 1) аусферритных высокопрочных чугунов (ADI)

Химический элемент	Минимальная концентрация, % (мас.)	Максимальная концентрация, % (мас.)	Средняя концентрация, % (мас.)	Стандартное отклонение, % (мас.)	Нижняя граница доверительного интервала, % (мас.)	Верхняя граница доверительного интервала, % (мас.)
1	2	3	4	5	6	7
C	2,78	3,87	3,54	0,18	3,50	3,59
Si	0,28	4,69	2,55	0,46	2,44	2,66
Mn	0,07	1,01	0,33	0,2	0,29	0,38
Mo	0,001	0,5	0,18	0,14	0,13	0,24
Cr	0,016	0,124	0,05	0,03	0,04	0,06
Ni	0,001	2,0	0,64	0,58	0,46	0,81
Cu	0,01	1,4	0,51	0,4	0,39	0,62
Mg	0,005	0,112	0,046	0,020	0,042	0,051
P	0,004	0,100	0,031	0,022	0,024	0,035
S	0,001	0,059	0,013	0,011	0,011	0,015

Очень важным результатом анализа базы данных ADI является определение максимальных (предельных) содержаний основной тройки легирующих элементов (колонка 3, табл. 2): меди – 1,4 %, никеля – 2,0 %, молибдена (наиболее дорогого элемента) – 0,5 %. Соответственно, установлено и предельное суммарное содержание основной триады легирующих (Cu + Ni + Mo), которое не превышает 4 %. Этот показатель нам пригодится в дальнейших рассуждениях об экономном легировании ADI.

В колонках 4–7 табл. 2 приведены средние концентрации легирующих элементов, стандартное отклонение, нижние и верхние границы доверительных интервалов.

2. Анализ распределения количества составов ADI по содержанию углерода, кремния, марганца, меди, никеля и молибдена

Содержание химических элементов в исследуемых сплавах ADI, как уже было показано в табл. 1, колеблется в очень широких пределах. Для упрощения и удобства анализа весь диапазон значений их концентраций разбит на пять равных интервалов. Из-за того, что диапазоны легирования у каждого элемента различны, величины интервалов оказались также различными, например, для углерода интервал составлял 0,15 %, для кремния – 0,88 % и т.д. Таким образом, концентрации каждого элемента отображались в виде пяти столбцов гистограммы (рис. 1–3).

На рис. 1 представлена гистограмма распределения количества ADI при различном содержании углерода. Заметно, что наиболее часто встречающийся интервал концентраций углерода составляет 3,40–3,55 % (у 42 % сплавов) и в меньшей степени 3,56–3,71 % (у 30 % сплавов).

На рис. 2 представлена гистограмма частоты распределения исследуемых сплавов ADI при различном содержании кремния. Гистограмма имеет очень характерный вид, и заметно, что подавляющее большинство сплавов (90 %) содержит 2,03–2,91 % кремния.

На рис. 3 представлена гистограмма частоты распределения исследуемых сплавов ADI от содержания марганца. Заметно, что наибольшее количество сплавов (41 %) содержит 0,22–0,41 % марганца, несколько меньшее количество сплавов (32 %) содержит от 0 до 0,21 % этого элемента.

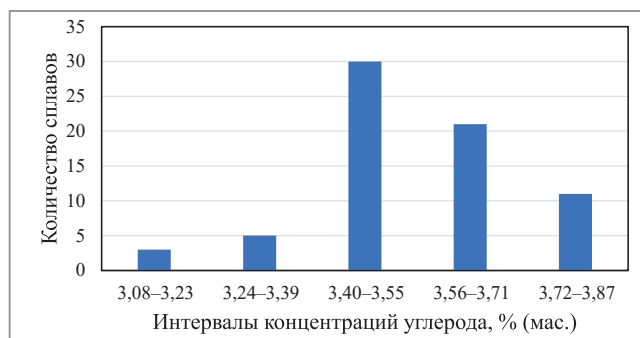


Рис. 1. Гистограмма частоты распределения составов ADI в зависимости от содержания углерода, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

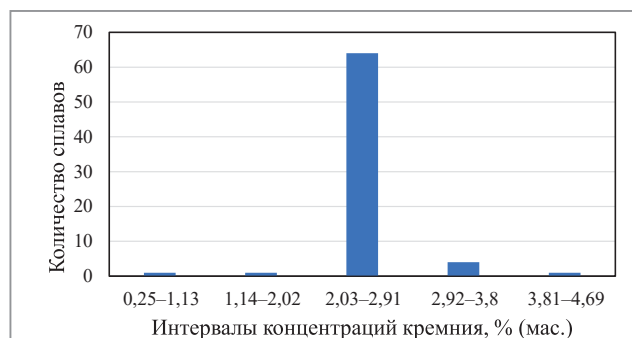


Рис. 2. Гистограмма частоты распределения составов ADI в зависимости от содержания кремния, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

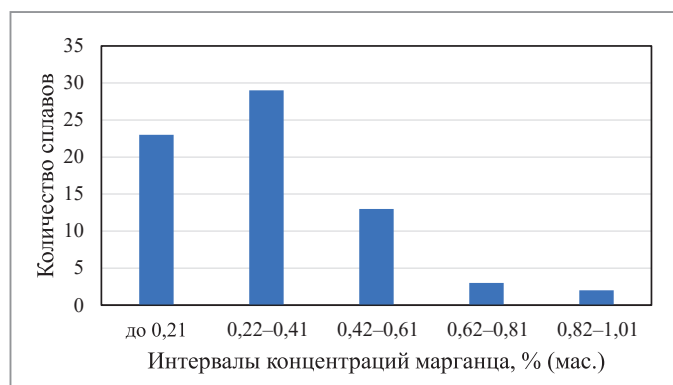


Рис. 3. Гистограмма частоты распределения составов ADI в зависимости от содержания марганца, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

Анализ статистики распределения в ADI меди, никеля, молибдена не выявил наличия устойчивых характерных максимумов, их концентрации распределены достаточно равномерно по всему исследуемому массиву составов, поэтому эти гистограммы не приводятся. Отсутствие максимумов Cu, Ni, Mo позволяет сделать вывод, что в настоящее время у исследователей нет единого подхода к легированию этими элементами. Соответственно перспективно проведение исследований по определению оптимального соотношения меди, никеля и молибдена в ADI.

3. Анализ наиболее часто встречающихся парных сочетаний легирующих элементов в ADI

Проведен анализ частоты распределения сплавов ADI в зависимости от сочетаний концентраций следующих пар химических элементов: C–Si, Si–Mn, Cu–Ni, Mo–Ni, P–S, Mg–C. Результаты анализа в виде точечных диаграмм в двумерных пространствах значений концентраций каждого элемента представлены на рис. 4–10.

Анализ парных сочетаний элементов оказался очень информативным. Для ряда пар элементов, как видно из рис. 4–7, на диаграммах имеются весьма четко выраженные области легирования, где локально сконцентрировано большинство исследуемых составов. Это касается в первую очередь следующих сочетаний элементов: C–Si, Si–Mn, Mg–C, P–S. Выявлены характерные для большинства сплавов соотношения концентраций C–Si и Si–Mn, которые отображаются на диаграммах в виде четко выраженных локальных зон. Несколько менее выраженные области устойчивых сочетаний концентраций обнаружены для пар Mg–C и P–S.

Рассмотрим подробнее частоту распределения в ADI концентраций пар химических элементов. На рис. 4 представлена точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций углерода и кремния. Хорошо заметна характерная локальная область (обведена красным овалом), ограниченная интервалами содержания углерода 3,3–3,9% и кремния 2,0–3,2%.

На рис. 5 представлена точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций кремния и марганца в ADI-чугунах.

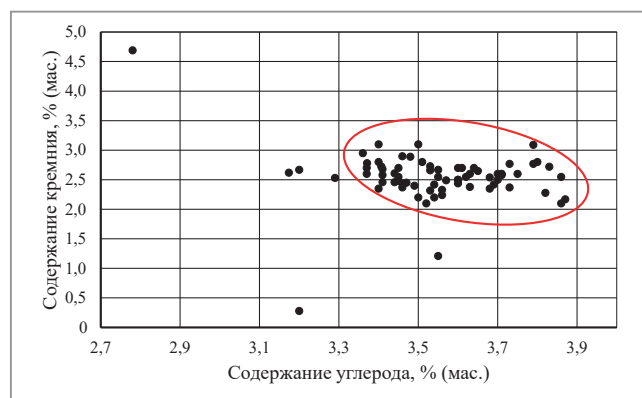


Рис. 4. Точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций углерода и кремния в ADI, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

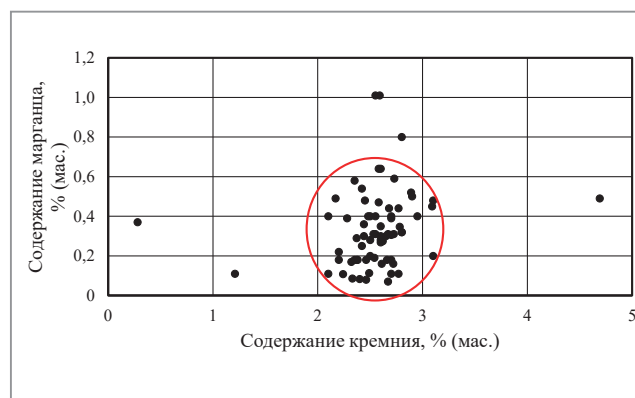


Рис. 5. Точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций кремния и марганца в ADI, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

На рис. 5 хорошо заметна характерная локальная область, ограниченная содержанием кремния 2,0–3,2% и марганца 0,05–0,65%, где очень кучно сгруппировались химические составы ADI (обведена красным овалом).

На рис. 6 представлена точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций магния и углерода в ADI-чугунах. Хорошо заметна характерная локальная область, ограниченная содержанием магния 0,02–0,07% и углерода 3,4–3,9%, где сгруппированы химические составы ADI (обведена красным овалом).

На рис. 7 представлена точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций фосфора и серы в ADI-чугунах. В левом нижнем углу концентраций хорошо заметна характерная локальная область, ограниченная содержанием фосфора до 0,05% и серы до 0,025%, где сгруппированы химические составы ADI (обведена красным овалом).

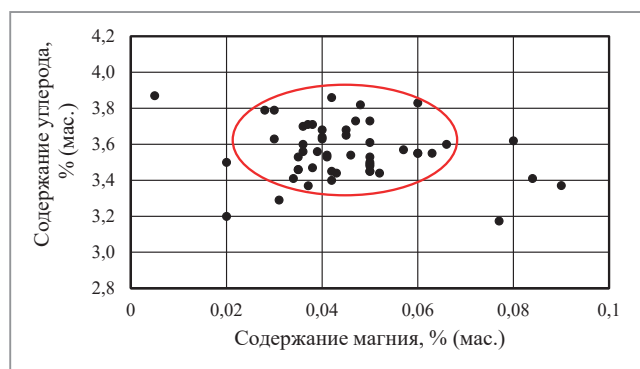


Рис. 6. Точечная диаграмма распределения составов ADI в зависимости от концентраций магния и углерода, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

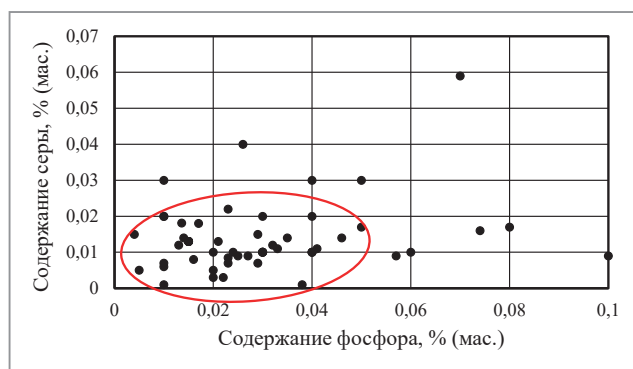


Рис. 7. Точечная диаграмма распределения составов ADI в зависимости от концентраций фосфора и серы, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

Для парных сочетаний элементов Cu–Ni, Mo–Cu, Mo–Ni не выявлено наличия группировки составов в виде единой зоны на диаграмме (рис. 8–10). Такой результат при достаточно большой выборке сплавов опять же подтверждает тезис о том, что соотношение Cu–Ni–Mo до сих пор не оптимизировано. Но при этом обнаружено несколько отдельных небольших групп устойчивых сочетаний концентраций Cu–Ni, Mo–Cu, Mo–Ni, отображающихся на диаграммах в виде нескольких зон. Выявлены четыре такие группы ADI-чугунов: безмолибденовые, низкомедистые, низконикелевые и комплексно легированные (наиболее широко представлены): 0,6–1,4% Cu, 0,5–2,0% Ni, 0,15–0,3% Mo.

Рассмотрим подробнее сочетания этих пар основных легирующих элементов. На рис. 8 представлена точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций меди и никеля в ADI-чугунах. Можно выделить три зоны концентраций. В левом нижнем углу хорошо заметна характерная локальная область (обведена синим овалом) практически безмедистых чугунов с широким диапазоном содержания никеля от 0 до 0,9%. В нижней части (зеленый овал) группируются низконикелевые (до 0,2% Ni) чугуны с содержанием меди от 0 до 0,9%. И, наконец, в центральной части просматривается менее компактная зона комплексного легирования медью (0,4–1,1%) и никелем (0,5–2,0%) (обведена красным овалом).

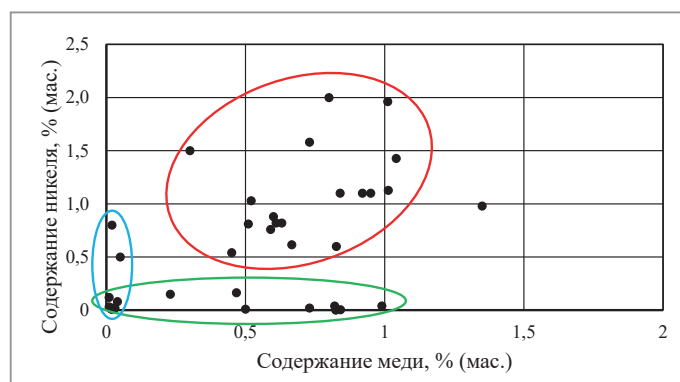


Рис. 8. Точечная диаграмма распределения составов ADI в зависимости от концентраций меди и никеля, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

На рис. 9 представлена точечная диаграмма с областью наиболее часто встречающихся сочетаний концентраций молибдена и меди. В ней также можно выделить три зоны концентраций. В левом углу хорошо заметна характерная локальная область (обведена зеленым овалом) практически безмолибденовых чугунов с содержанием меди от 0,5 до 0,8 %. В нижней части (синий овал) группируются низкомедистые чугуны (до 0,2 % Cu) с содержанием молибдена 0,2–0,25 %. В центральной части заметна зона комплексного легирования молибденом (0,15–0,3 %) и медью (0,6–1,4 %) (обведена красным овалом).

На рис. 10 представлена точечная диаграмма с областью сочетаний концентраций молибдена и никеля. В ней можно выделить три зоны. В левой части хорошо заметна характерная локальная область (обведена зеленым овалом) практически безмолибденовых чугунов с содержанием никеля 0,5–1,5 %. В нижней части диаграммы (синий овал) группируются безникелевые чугуны с содержанием молибдена 0–0,25 %. В центральной части видна зона комплексного легирования молибденом (0,15–0,3 %) и никелем (0,5–2,0 %) (обведена красным овалом).

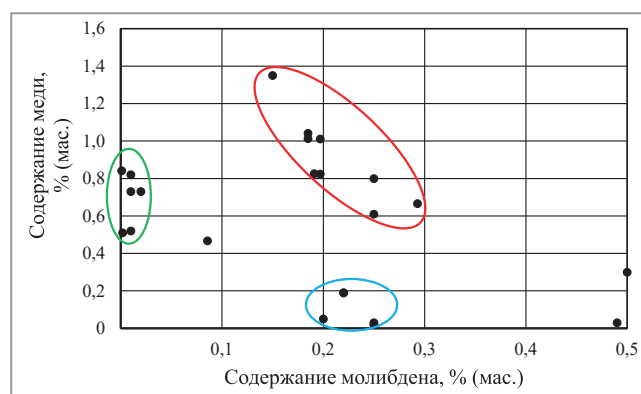


Рис. 9. Точечная диаграмма распределения составов ADI в зависимости от концентраций молибдена и меди, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

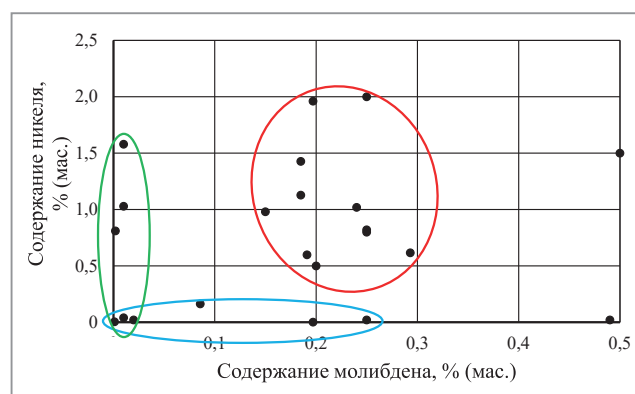


Рис. 10. Диаграмма распределения составов ADI в зависимости от концентраций молибдена и никеля, построенная по результатам анализа базы данных (табл. 1)

Таким образом, обнаружены определенные устойчивые комбинации легирующих элементов, которые используют большинство исследователей ADI.

4. Рекомендации по оптимальным схемам легирования и определение оптимального химического состава ADI

Сводные данные по химическому составу ADI-чугунов представлены в табл. 3; они сгруппированы в виде нескольких колонок, маркированных для наглядности различными цветами.

Таблица 3. Рекомендации по химическому составу ADI-чугунов

Химический элемент	Допустимая нижняя граница содержания, % (мас.)	Допустимая верхняя граница содержания, % (мас.)	Рекомендуемая нижняя граница содержания, % (мас.)	Рекомендуемая верхняя граница содержания, % (мас.)	Среднестатистическое содержание, % (мас.)
1	2	3	4	5	6
C	3,4	3,8	3,50	3,59	3,54
Si	2,0	3,0	2,44	2,66	2,55
Mn	0,1	0,5	0,29	0,38	0,33
Cu	0,00	1,0	0,39	0,62	0,51
Ni	0,00	2,0	0,46	0,81	0,64
Mo	0,00	0,30	0,13	0,24	0,18
Mg	0,03	0,06	0,042	0,051	0,046
P	0,00	≤0,04	≤0,024	≤0,035	≤0,031
S	0,00	≤0,02	≤0,011	≤0,015	≤0,013
Cr	0,00	0,10	0,04	0,06	0,05

В табл. 3 достаточно интересными для исследователей являются колонки 2 и 3 (желтый маркер) – допустимые нижние и верхние границы содержания химических элементов. Очевидно, это те многократно выверенные исследователями диапазоны легирования, за которые не стоит выходить.

Еще более важными являются колонки 4 и 5 табл. 3 (синий маркер) – это рекомендуемые нижние и верхние границы содержания элементов. Их диапазоны гораздо уже, так как они ограничены статистическими допусками, используемыми в данной статье. По-видимому, эти схемы легирования можно считать оптимальными и использовать в практической работе.

И, наконец, окончательным результатом данной работы является определенный теоретически конкретный химический состав (колонка 6, табл. 3, зеленый маркер). Это полученный методами статистической обработки всей созданной базы данных гипотетический средневзвешенный химический состав, так называемый золотой состав ADI: 3,54 % C, 2,55 % Si, 0,33 % Mn, 0,51 % Cu, 0,64 % Ni, 0,18 % Mo, 0,046 % Mg, до 0,03 % P, до 0,01 % S. Данный конкретный состав пока не существует в природе, его ближайшими аналогами являются сплавы из базы данных с порядковыми номерами 30, 32, 36, 39, 64, 66. Хотя этот состав выявлен теоретическим путем, учитывая достаточно представительное количество изученных сплавов и большую глубину поиска, полагаем, что его можно рекомендовать в качестве оптимального. На данный состав подана заявка на выдачу патента на изобретение.

В этой связи небезинтересным будет сравнить предыдущие наработки авторов статьи по патентованию химических составов ADI-чугунов с полученными статистическими данными.

Химические составы ADI, разработанные ранее авторами статьи (материалы белорусских патентов), приведены в табл. 4. Для наглядности цветом выделены строки содержания основных легирующих элементов (Cu, Ni, Mo), а также микродобавок.

Таблица 4. Химические составы ADI-чугунов по данным белорусских патентов

Химический элемент	Номер, название, патента на изобретение Республики Беларусь			
	23331. Бейнитный чугун [52]	22823. Бейнитный чугун [53]	23393. Аусферритный чугун [54]	23389. Аусферритный чугун [55]
1	2	3	4	5
C	3,4–3,8	3,4–3,8	3,4–3,8	2,7–3,8
Si	2,0–2,4	2,0–2,4	2,0–2,4	2,1–2,9
Mn	0,15–0,45	0,15–0,30	0,15–0,30	1,1–1,4
Cu	0,3–0,8	0,3–0,9	0,3–0,9	0,9–1,7
Ni	0,4–0,8	0,4–0,9	0,4–0,9	0,05–0,2
Mo	–	–	–	0,05–0,15
Mg	0,03–0,06	0,03–0,06	0,03–0,06	0,03–0,06
Sr / Ba	0,005–0,05	–	0,005–0,05	–
Мишметалл	–	–	0,05–0,5	0,05–0,5
V	–	–	–	0,02–0,1
Nb	–	0,005–0,05	–	–
B	–	0,01–0,05	0,01–0,05	0,01–0,05

Из табл. 4 видно, что авторы белорусских патентов по содержанию углерода, кремния, марганца, меди, никеля действуют в русле мировых тенденций (колонки 2–4 табл. 4). По этим элементам химические составы чугунов, согласно патентам Республики Беларусь № 23331, 22823, 23393, близки к составу, который определен в настоящей статье путем анализа статистики базы данных. Что касается легирования молибденом, то авторы его вообще не применяют из-за дороговизны, придерживаясь собственной разработанной концепции экономного легирования [56, 57] и заменяя его микродобавками других элементов.

Еще один путь, предлагаемый авторами белорусских патентов – повышение содержания меди до достаточно высоких значений (0,9–1,7 %) при совместном достаточно экономном легировании никелем (до 0,2 %) и молибденом (до 0,15 %). Конкретный состав этого ADI указан в колонке 4 табл. 4 (патент № 23389). При изготовлении на базе ФТИ НАН Беларуси экспериментальной партии литых корпусных деталей автомобиля «КамАЗ» взамен стали, образцы из этого чугуна показали высокую прочность, а изделия в настоящее время проходят стендовые испытания.

Магистральным направлением легирования ADI основными элементами, по нашему мнению, является повышенное содержание меди, среднее – никеля и низкое – молибдена. В частности, мы являемся сторонниками следующей численной комбинации легирующих элементов: около 0,8 % меди, 0,6 % никеля и 0,2 % молибдена. Такое соотношение обеспечивает эффективную прокаливаемость ADI за счет

смещения С-образной кривой распада аустенита вправо и, соответственно, высокие механические свойства после термической обработки. При этом количество использованных легирующих элементов пропорционально их стоимости и достаточно экономично. Суммарное количество легирующих элементов составляет у экономнолегированных ADI 1,5% против 4,0% у большинства комплексно легированных сплавов.

Выводы

1. Статья посвящена современным подходам к легированию аусферритных высокопрочных чугунов (ADI). Именно химический состав и схема легирования в первую очередь определяют структуру и уникальные механические характеристики ADI. Исторически сложившаяся классификация чугунов исключительно по механическим свойствам привела к тому, что вопросам легирования уделяется недостаточно внимания. Чтобы восполнить этот пробел, на основе публикаций наиболее авторитетных зарубежных научных журналов (1990–2025 гг.) создана база данных химических составов ADI. Границы доверительных интервалов для средних значений концентраций химических элементов определяли с использованием распределения Стьюдента при уровне значимости 0,05. Настоящая работа по статистическому анализу достаточно представительного массива химических составов ADI выполнена впервые и поэтому обладает новизной.

2. Проведен статистический анализ химических составов ADI из базы данных, который позволил выявить ряд закономерностей. Установлены граничные диапазоны легирования ADI основными элементами: углерод от 2,78 до 3,87%, кремний от 0,28 до 4,69%, марганец от 0,07 до 1,01%, медь от 0,01 до 1,4%, никель от 0,001 до 2,0%, молибден от 0,001 до 0,5%.

3. Построены графики зависимостей частоты распределения исследуемых сплавов ADI от содержания углерода, марганца, меди, никеля, молибдена и магния. Обнаружены характерные максимумы частоты распределения сплавов, приходящиеся на интервалы концентраций следующих элементов: углерод 3,40–3,55% (42% сплавов), кремний 2,03–2,91% (у 90% сплавов), марганец 0,22–0,41% (41% сплавов). Для меди, никеля и молибдена в исследованных сплавах ADI не выявлено статистически значимых максимумов концентраций. Это подтверждает актуальность дальнейшего проведения работ по определению оптимального соотношения Cu–Ni–Mo.

4. Проведен анализ частоты распределения сплавов ADI в зависимости от сочетаний концентраций следующих пар химических элементов: C–Si, Si–Mn, Cu–Ni, Mo–Ni, P–S, Mg–C. Выявлены характерные для большинства сплавов комбинации концентраций C–Si и Si–Mn, которые отображаются на диаграммах в виде локальных, четко выраженных зон. Несколько менее выраженные области устойчивых сочетаний концентраций обнаружены для пар Mg–C и P–S. Установлено ряд групп устойчивых сочетаний концентраций Cu–Ni, Mo–Cu, Mo–Ni, отображающихся на диаграммах в виде нескольких соответствующих зон. Выявлены четыре характерные группы ADI: безмолибденовые, низкомедистые, низконикелевые и комплексно легированные (0,6–1,4% Cu, 0,5–2,0% Ni, 0,15–0,3% Mo).

5. Статистический анализ позволил выявить наиболее часто используемые интервалы легирования ADI: углерод 3,50–3,59%, кремний 2,44–2,66%, марганец 0,29–0,38%, медь 0,39–0,62%, никель 0,46–0,81%, молибден 0,13–0,24%, магний 0,042–0,051%, фосфор 0,024–0,035%, сера 0,011–0,015%. Анализ полученных данных позволил выделить неопробованные технологические окна во всем исследованном массиве ADI, предложить оптимальные химические составы аусферритных высокопрочных чугунов, что способствует облегчению патентования. В результате статистической обработки всего массива данных определен средневзвешенный химический состав, так называемый золотой состав ADI: 3,54% C, 2,55% Si, 0,33% Mn, 0,51% Cu, 0,64% Ni, 0,18% Mo, 0,046% Mg, до 0,03% P, до 0,01% S. Данный состав рекомендуется в качестве оптимального.

6. Проведены анализ и сравнение химических составов ADI ряда ранее полученных патентов авторов с выявленным в статье среднестатистическим составом. Предложены направления создания групп экономнолегируемых ADI с пониженным содержанием молибдена или полностью безмолибденовых на основе концепции экономного легирования.

7. Так как в большинстве случаев химический состав ADI-чугунов выбирается под конкретное применение изделий, нужно признать, что данное статистическое исследование носит характер в большей мере теоретический, чем практический. Тем не менее, учитывая достаточно представительное количество изученных материалов и большую глубину поиска, полагаем, что предложенные результаты можно использовать на практике.

8. Особенностью данного исследования являлось то, что анализировались только материалы научных статей, где были указаны абсолютно конкретные химические составы ADI, а не интервалы легирования (такова специфика статистической обработки). Обзор патентов на ADI, в которых составы представлены интервалами легирования, а также промышленно используемых марок ADI, вероятно, мог бы показать несколько отличные результаты. Создание мировой базы патентов на ADI нам представляется следующей актуальной задачей.

9. Нужно понимать, что химический состав ADI – это только один из главных, но не единственный фактор, управляющий структурой и свойствами этого материала. Не уступающим ему по значимости является фактор термической обработки (параметры аустенизации и изотермической закалки), а также составов закалочных сред. Термической обработке ADI мы планируем посвятить следующую статью.

Работа выполнена в ФТИ НАН Беларуси и НТП БНТУ «Политехник» (г. Минск) в рамках ГПНИ «Металлургия» (2021–2025), задание № 2.01.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ductile Iron Data for Design Engineers / Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Canada. – 1990. – 219 p.
2. **Tanaka, Y.** Development and Application of Austempered Spheroidal Graphite Cast Iron / Y. Tanaka, H. Kage // Materials Transactions JIM. – 1992. – Vol. 33, no. 3. – P. 543–547.
3. Influence of the Mn Content on the Kinetics of Austempering Transformation in Compacted Graphite Cast Iron / J. Desimoni [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1999. – Vol. 30A. – P. 2745–2752.
4. Thermal Dependence of Austempering Transformation Kinetics of Compacted Graphite Cast Iron / K. F. Laneri [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2001. – Vol. 32A. – P. 51–58.
5. **Wu, Ch.-Zh.** Effects of Inclusion Particles on the Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Austempered Ductile Iron / Ch.-Zh. Wu, T.-Sh. Shih // Materials Transactions. – 2003. – Vol. 44, no. 5. – P. 995–1003.
6. **El-Kashif, E.** Stepped Austempering of GGG 40 Ductile Cast Iron / E. El-Kashif, E. El-Banna, S. Riad // ISIJ International. – 2003. – Vol. 43, no. 7. – P. 1056–1062.
7. **Zimba, J.** Austempered ductile iron: an alternative material for earth moving components / J. Zimba, D. J. Simbi, E. Navara // Cement & Concrete Composites. – 2003. – Vol. 25. – P. 643–649.
8. **Bosnjak, B.** Effect of austenitising temperature on austempering kinetics of Ni-Mo alloyed ductile iron / B. Bosnjak, B. Radulovic // Materiali in Tehnologije. – 2004. – Vol. 38. – P. 307–312.
9. Development of austenite free ADI (austempered ductile cast iron) / S. K. Putatunda [et al.] // Materials Science and Engineering A. – 2006. – Vol. 435, iss. 436. – P. 112–122.
10. The austempering study of alloyed ductile iron / O. Eric' [et al.] // Materials and Design. – 2006. – Vol. 27. – P. 617–622.
11. Analysis of Factors Influencing Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron / A. Vasko [et al.] // Commun. Sci. Lett. Univ. Zilina. – 2009. – Vol. 11. – P. 43–47.
12. Austempered ductile iron with dual matrix structures / C. Vald'es [et al.] // Revista Mexicana De Física. – 2009. – Vol. 55. – P. 48–51.
13. **Erfanian-Naziftoosi, H. R.** The Effect of Isothermal Heat Treatment Time on the Microstructure and Properties of 2.11 % Al Austempered Ductile Iron / H. R. Erfanian-Naziftoosi, N. Haghdadi, A. R. Kiani-Rashid // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2011. – 9 p.
14. **Milosan, I.** The kinetics transformation of a low alloy cast iron / I. Milosan // Recent Journal. – 2012. – Vol. 13, no. 1. – P. 72–75.
15. **Tyrała, E.** Measurement of Phase Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron / E. Tyrała, M. Górny, M. Kawalec // Archives of Foundry Engineering. – 2013. – Vol. 13, special iss. 3. – P. 175–178.
16. **Hammood, A. S.** A Study the Effect of Retained Austenite on Fatigue Life of Austempering Ductile Iron by Using Artificial Neural Networks / A. S. Hammood, H. M. Lieth // International Journal of Current Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 3, no. 5. – P. 1946–1951.
17. **Kaleicheva, J.** Wear Behavior of Austempered Ductile Iron with Nanosized Additives / J. Kaleicheva // Tribology in Industry. – 2014. – Vol. 36, no. 1. – P. 74–78.
18. Quenching and Partitioning process in Ductile Cast Irons / A. J. S. T. da Silva [et al.] // 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron – SPCI10. – Mar del Plata, 2014. – 8 p.
19. **Akor, T.** Effect of Austempering Time on the Mechanical Properties of Ductile Iron, Austempered in Rubber Seed Oil / T. Akor, L. T. Tuleun // International Journal of Engineering Research and Development. – 2014. – Vol. 10, iss. 8. – P. 31–34.
20. Austempering kinetics of a ductile iron / M. Pellizzari [et al.] // La Metallurgia Italiana. – 2015. – No. 10. – P. 15–20.
21. Comparison of Austempered Ductile Iron and Manganese Steel Wearability / A. Kochański [et al.] // Archives of Foundry Engineering. – 2015. – Vol. 15, special iss. 1. – P. 51–54.
22. **Putatunda, S. K.** Development of Nanostructured Austempered Ductile Cast Iron (ADI) / S. K. Putatunda, S. Panneerselvam, M. Alshwigi // Proceedings of the 28th ASM Heat Treating Society Conference. – 2015. – P. 71–75.
23. Influence of austempering heat treatment on mechanical and corrosion properties of ductile iron samples / M. Janjić [et al.] // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55. – P. 325–328.
24. Study of Ausferrite Transformation Kinetics for Austempered Ductile Irons with and without Ni / B. Wang [et al.] // SAE International. – 2016. – 8 p.
25. **Solic, S.** Improvement in Abrasion Wear Resistance and Microstructural Changes with Deep Cryogenic Treatment of Austempered Ductile Cast Iron (ABЧ) / S. Solic, Z. Schauperl, Č. Donik // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2016. – Vol. 47. – 18 p.

26. Correlation between microstructure and mechanical properties of an austempered ductile iron / V. C. C. Alves [et al.] // 22^o CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. – Natal, 2016. – P. 5595–5603.
27. Characteristics of ADI ductile cast iron with single addition of 1.56 % Ni / B. Mrzyglód [et al.] // Arch. Metall. Mater. – 2017. – Vol. 62. – P. 2273–2280.
28. **Panneerselvam, S.** Development of Nanostructured Austempered Ductile Cast Iron: Diss. ... Doctor of Philosophy / S. Panneerselvam. – Michigan, 2017. – 199 p.
29. Microstructural Characterization and Some Mechanical Behaviour of Low Manganese Austempered Ferritic Ductile Iron / A. A. Abioye [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, no. 23. – P. 13435–13441.
30. **Panneerselvam, S.** Processing of Nanostructured Austempered Ductile Cast Iron (ABЧ) by a Novel Method / S. Panneerselvam, S. K. Putatunda // International Journal of Metallurgy and Metal Physics. – 2018. – Vol. 3, iss. 20. – 11 p.
31. Austempered Ductile Iron (ADI): Influence of Austempering Temperature on Microstructure, Mechanical and Wear Properties and Energy Consumption / P. Sellamuthu [et al.] // Metals. – 2018. – Vol. 8. – 12 p.
32. Characterization of Austempered Ferritic Ductile Iron / V. S. Dakre [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 346. – 10 p.
33. **Hegde, A.** Mechanical characterization and optimization of heat treatment parameters of manganese alloyed austempered ductile iron / A. Hegde, S. Sharma, R. V. Sadanand // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2019. – Vol. 13, iss. 1. – P. 4356–4367.
34. Evaluation of Volume Fraction of Austenite in Austempering Process of Austempered Ductile Iron / E. Tyrała [et al.] // Metals. – 2019. – Vol. 9. – 10 p.
35. An Investigation into Mechanical Properties of Ductile Cast Iron with Different Heat Treatment Processes / R. R. Moussa [et al.] // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 63. – P. 183–187.
36. The Austempering Kinetics, Microstructural Development, and Processing Window in the Austempered, Fe-3.2C-4.8Al Compacted Graphite Cast Iron / A. Kazazi [et al.] // Iranian Journal of Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 17, no. 4. – P. 46–54.
37. Phase Transition Kinetics in Austempered Ductile Iron (ADI) with Regard to Mo Content / M. Landesberger [et al.] // Materials. – 2020. – Vol. 13. – 23 p.
38. Structure Homogeneity and Thermal Stability of Austempered Ductile Iron / M. Górny [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2021. – Vol. 52A. – 11 p.
39. Effect of Cast Thickness and Austenitizing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of ADI and IADI Castings / A. Negm [et al.] // Open Journal of Metal. – 2021. – Vol. 11. – P. 21–35.
40. **Skudlarek, W.** Effect of austempering temperature on microstructure and mechanical properties of ductile cast iron modified by niobium / W. Skudlarek, M. N. Krmasha, K. S. Al-Rubaie // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 12. – P. 2414–2425.
41. Influence of Heat Treatment Processing Three Phase Region on the Microstructure and Hardness ADI Alloys / L. V. Hoang [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2021. – Vol. 44, no. 7. – P. 289–296.
42. Influence of Austempering Temperature on Physiochemical and Microstructural Properties of Ductile Cast Iron (ADI) with Selected Local Oil Quenchants / S. C. Ibeh [et al.] // International Journal of Research Publication and Reviews. – 2021. – Vol. 2, iss. 3. – P. 343–349.
43. Insights into effect of first-step austempering temperature on the microstructure and properties of austempered ductile iron / Y. Zhang [et al.] // Mater. Res. Express. – 2021. – Vol. 8. – 9 p.
44. Effect of austempering temperature and manganese content on the impact energy of austempered ductile iron / A. Hegde [et al.] // Cogent Engineering. – 2021. – Vol. 8. – 9 p.
45. Microstructures and Mechanical Properties of Ductile Cast Iron with Different Crystallizer Inner Diameters / J. Bai [et al.] // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – 15 p.
46. Artificial Neural Networks for Producing a Low-Cost Austempered Ductile Iron / D. Hofmama [et al.] // Materials Research. – 2022. – Vol. 25. – 6 p.
47. **Keles, A.** Effect of alloying elements and technological parameters of austempering on the structure and mechanical properties of ductile cast iron (ADI) / A. Keles, R. Cengiz, M. Yildirim // Metal Science and Heat Treatment. – 2023. – Vol. 65, no. 3–4. – P. 191–199.
48. Highly Accurate Structural Analysis of Austempered Ductile Iron Using EBSD Technique / P. Kejzlar [et al.] // Materials Science Forum. – 2023. – Vol. 1081. – P. 125–130.
49. **Machado, H. D.** Effect of intercritical austenitization and starting matrix on martensite start temperature and austenite carbon concentration in ductile iron / H. D. Machado, R. Aristiza-bal-Sierra, C. Garcia-Mateo // International Journal of Metalcasting. – 2024. – 11 p.
50. **Pereira, L.** Development of ductile iron alloy for ADI production using heated air in austempering / L. Pereira, W. M. Pasini, V. Karlinski de Barcellos // REM–International Engineering Journal. – 2025. – Vol. 78. – 10 p.
51. **Ghasemi, R.** Synergistic Effects of Austempering Variables on the Microstructure and Mechanical Properties of Low-Temperature Austenitized Compacted Graphite Irons / R. Ghasemi, K. Salomonsson, A. Dioszegi // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2025. – 14 p.
52. Бейнитный чугу́н: патент (изобретение) 23331 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский. – № а 20190368; заявл. 24.07.2018, опубл. 28.02.2021 // Афіц. бюл. / НЦІУ. – 2021. – № 1. – С. 57.
53. Бейнитный чугу́н: патент (изобретение) 22823 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский, С. Ф. Сенько. – № а 20180359; заявл. 24.07.2018; опубл. 30.12.2019. // Афіц. бюл. / НЦІУ. – 2019. – № 6. – С. 98.
54. Аусферритный чугу́н: патент (изобретение) 23393 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский. – № а 20200023; заявл. 27.01.2020, опубл. 30.04.2021 // Афіц. бюл. / НЦІУ. – 2021. – № 2. – С. 50.
55. Аусферритный чугу́н: патент (изобретение) 23389 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) С 22С 37/10 / А. И. Покровский. – № а 20200022; заявл. 27.01.2020, опубл. 30.04.2021 // Афіц. бюл. / НЦІУ. – 2021. – № 2. – С. 50.
56. **Покровский, А. И.** Концепция создания экономнолегированных аусферритных (бейнитных) высокопрочных чугунов / А. И. Покровский // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 29–37.

57. **Марукович, Е.И.** Разработка экономнолегированных высокопрочных аусферритных (бейнитных) чугунов – магистральное направление в чугунолитейной промышленности / Е.И. Марукович, А.И. Покровский // *Литейщик России*. – 2022. – № 12. – С. 16–20.

REFERENCES

1. Ductile Iron Data for Design Engineers / Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Canada, 1990, 219 p.
2. **Tanaka Y., Kage H.** Development and Application of Austempered Spheroidal Graphite Cast Iron. *Materials Transactions JIM*, 1992, vol. 33, no. 3, pp. 543–547.
3. **Desimoni J.** [et al.] Influence of the Mn Content on the Kinetics of Austempering Transformation in Compacted Graphite Cast Iron. *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 1999., vol. 30A, pp. 2745–2752.
4. **Laneri K. F.** [et al.] Thermal Dependence of Austempering Transformation Kinetics of Compacted Graphite Cast Iron. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, vol. 32A, pp. 51–58.
5. **Wu Ch.-Zh., Shih T.-Sh.** Effects of Inclusion Particles on the Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Austempered Ductile Iron. *Materials Transactions*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 995–1003.
6. **El-Kashif E., El-Banna E., Riad S.** Stepped Austempering of GGG 40 Ductile Cast Iron. *ISIJ International*, 2003, vol. 43, no. 7, pp. 1056–1062.
7. **Zimba J., Simbi D. J., Navara E.** Austempered ductile iron: an alternative material for earth moving components. *Cement & Concrete Composites*, 2003, vol. 25, pp. 643–649.
8. **Bosnjak B., Radulovic B.** Effect of austenitising temperature on austempering kinetics of Ni-Mo alloyed ductile iron. *Materiali in Tehnologije*, 2004, vol. 38, pp. 307–312.
9. **Putatunda S. K.** [et al.] Development of austenite free ADI (austempered ductile cast iron). *Materials Science and Engineering A*, 2006, vol. 435, pp. 112–122.
10. **Eric' O.** [et al.] The austempering study of alloyed ductile iron. *Materials and Design*, 2006, vol. 27, 617–622.
11. **Vasko A.** [et al.] Analysis of Factors Influencing Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron. *Commun. Sci. Lett. Univ. Zilina*, 2009, vol. 11, pp. 43–47.
12. **Vald'es C.** [et al.] Austempered ductile iron with dual matrix structures. *Revista Mexicana De Física*, 2009, vol. 55, pp. 48–51.
13. **Erfanian-Naziftoosi H. R., Haghdadi N., Kiani-Rashid A. R.** The Effect of Isothermal Heat Treatment Time on the Microstructure and Properties of 2.11 % Al Austempered Ductile Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 9 p.
14. **Milosan I.** The kinetics transformation of a low alloy cast iron. *Recent Journal*, 2012, vol. 13, no. 1, pp. 72–75.
15. **Tyrala E., Górny M., Kawalec M.** Measurement of Phase Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron. *Archives of Foundry Engineering*, 2013, vol. 13, special iss. 3, pp. 175–178.
16. **Hammood A. S., Lieth H. M.** A Study the Effect of Retained Austenite on Fatigue Life of Austempering Ductile Iron by Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2013, vol. 3, no. 5, pp. 1946–1951.
17. **Kaleicheva J.** Wear Behavior of Austempered Ductile Iron with Nanosized Additives. *Tribology in Industry*, 2014., vol. 36, no. 1, pp. 74–78.
18. **Silva da A. J. S. T.** [et al.] Quenching and Partitioning process in Ductile Cast Irons. *10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron – SPCI10*. Mar del Plata, 2014, 8 p.
19. **Akor T., Tuleun L. T.** Effect of Austempering Time on the Mechanical Properties Of Ductile Iron, Austempered in Rubber Seed Oil. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2014, vol. 10, pp. 31–34.
20. **Pellizzari M.** [et al.] Austempering kinetics of a ductile iron. *La Metallurgia Italiana*, 2015, no. 10, pp. 15–20.
21. **Kochański A.** [et al.] Comparison of Austempered Ductile Iron and Manganese Steel Wearability. *Archives of Foundry Engineering*, 2015, vol. 15, pp. 51–54.
22. **Putatunda S. K., Panneerselvam S., Alshwigi M.** Development of Nanostructured Austempered Ductile Cast Iron (ADI). *Proceedings of the 28th ASM Heat Treating Society Conference*, 2015, pp. 71–75.
23. **Janjić M.** [et al.] Influence of austempering heat treatment on mechanical and corrosion properties of ductile iron samples. *Metallurgija*, 2016, vol. 55, pp. 325–328.
24. **Wang B.** [et al.] Study of Ausferrite Transformation Kinetics for Austempered Ductile Irons with and without Ni. *SAE International*, 2016, 8 p.
25. **Solic S., Schauerperl Z., Donik Č.** Improvement in Abrasion Wear Resistance and Microstructural Changes with Deep Cryogenic Treatment of Austempered Ductile Cast Iron (ABCI). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, vol. 47, 18 p.
26. **Alves V. C. C.** [et al.] Correlation between microstructure and mechanical properties of an austempered ductile iron. *22° CBEC-iMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Natal, 2016, pp. 5595–5603.
27. **Mrzyglód B.** [et al.] Characteristics of ADI ductile cast iron with single addition of 1.56% Ni. *Arch. Metall. Mater*, 2017, vol. 62, pp. 2273–2280.
28. **Panneerselvam S.** *Development of Nanostructured Austempered Ductile Cast Iron: Diss. ... Doctor of Philosophy*. Michigan, 2017, 199 p.
29. **Abioye A. A.** [et al.] Microstructural Characterization and Some Mechanical Behaviour of Low Manganese Austempered Ferritic Ductile Iron. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 23, pp. 13435–13441.
30. **Panneerselvam S., Putatunda S. K.** Processing of Nanostructured Austempered Ductile Cast Iron (ABCI) by a Novel Method. *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*, 2018, vol. 3, iss. 20, 11 p.
31. **Sellamuthu P.** [et al.] Austempered Ductile Iron (ADI): Influence of Austempering Temperature on Microstructure, Mechanical and Wear Properties and Energy Consumption. *Metals*, 2018, vol. 8, 12 p.
32. **Dakre V. S.** [et al.] Characterization of Austempered Ferritic Ductile Iron. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 346, 10 p.
33. **Hegde A., Sharma S., Sadanand R. V.** Mechanical characterization and optimization of heat treatment parameters of manganese alloyed austempered ductile iron. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2019, vol. 13, pp. 4356–4367.

34. Tyrala E. [et al.] Evaluation of Volume Fraction of Austenite in Austempering Process of Austempered Ductile Iron. *Metals*, 2019, vol. 9, 10 p.
35. Moussa R. R. [et al.] An Investigation into Mechanical Properties of Ductile Cast Iron with Different Heat Treatment Processes. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2019, vol. 63, pp. 183–187.
36. Kazazi A. [et al.] The Austempering Kinetics, Microstructural Development, and Processing Window in the Austempered, Fe-3.2C-4.8Al Compacted Graphite Cast Iron. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 46–54.
37. Landesberger M. [et al.] Phase Transition Kinetics in Austempered Ductile Iron (ADI) with Regard to Mo Content. *Materials*, 2020, vol. 13, 23 p.
38. Górný M. [et al.] Structure Homogeneity and Thermal Stability of Austempered Ductile Iron. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, vol. 52A, 11 p.
39. Negm A. [et al.] Effect of Cast Thickness and Austenitizing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of ADI and IADI Castings. *Open Journal of Metal*, 2021, vol. 11, pp. 21–35.
40. Skudlarek W., Krmasha M. N., Al-Rubaie K. S. Effect of austempering temperature on microstructure and mechanical properties of ductile cast iron modified by niobium. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 12, pp. 2414–2425.
41. Hoang L. V. [et al.] Influence of Heat Treatment Processing Three Phase Region on the Microstructure and Hardness ADI Alloys. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2021, vol. 44, no. 7, pp. 289–296.
42. Ibeh S. C. [et al.] Influence of Austempering Temperature on Physiochemical and Microstructural Properties of Ductile Cast Iron (ADI) with Selected Local Oil Quenchants. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2021, vol. 2, pp. 343–349.
43. Zhang Y. [et al.] Insights into effect of first-step austempering temperature on the microstructure and properties of austempered ductile iron. *Mater. Res. Express*, 2021, vol. 8, 9 p.
44. Hegde A. [et al.] Effect of austempering temperature and manganese content on the impact energy of austempered ductile iron. *Cogent Engineering*, 2021, vol. 8, 9 p.
45. Bai J. [et al.] Microstructures and Mechanical Properties of Ductile Cast Iron with Different Crystallizer Inner Diameters. *Crystals*, 2022, vol. 12, 15 p.
46. Hofmam D. [et al.] Artificial Neural Networks for Producing a Low-Cost Austempered Ductile Iron. *Materials Research*, 2022, vol. 25, 6 p.
47. Keles A., Cengiz R., Yildirim M. Effect of alloying elements and technological parameters of austempering on the structure and mechanical properties of ductile cast iron (ADI). *Metal Science and Heat Treatment*, 2023, vol. 65, no. 3–4, pp. 191–199.
48. Kejzlar P. [et al.] Highly Accurate Structural Analysis of Austempered Ductile Iron Using EBSD Technique. *Materials Science Forum*, 2023, vol. 1081, pp. 125–130.
49. Machado H. D., Aristiza-bal-Sierra R., Garcia-Mateo C. Effect of intercritical austenitization and starting matrix on martensite start temperature and austenite carbon concentration in ductile iron. *International Journal of Metalcasting*, 2024, 11 p.
50. Pereira L., Pasini W. M., Karlinski de Barcellos V. Development of ductile iron alloy for ADI production using heated air in austempering. *REM-International Engineering Journal*, 2025, vol. 78, 10 p.
51. Ghasemi R., Salomonsson K., Dioszegi A. Synergistic Effects of Austempering Variables on the Microstructure and Mechanical Properties of Low-Temperature Austenitized Compacted Graphite Irons. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 14 p.
52. Pokrovskij A. I. Bejnitnyj chugun: patent (izobretenie) [Bainitic cast iron: patent] 23331 Resp. Belarus' (invention), MPK (2006.01) S 22S 37/10/ – № a 20190368; zajavl. 24.07.2018, opubl. 28.02.2021. *Afic. bjull. / NCIU = Official bulletin / National Center for Intellectual Property*, 2021, no. 1, p. 57.
53. Pokrovskij A. I., Sen'ko S. F. Bejnitnyj chugun: patent (izobretenie) [Bainitic cast iron: patent] 22823 Resp. Belarus', MPK (2006.01) S 22S 37/10/. – № a 20180359; zajavl. 24.07.2018; opubl. 30.12.2019. *Afic. bjull. / NCIU = Official bulletin / National Center for Intellectual Property*, 2019. – no. 6, p. 98.
54. Pokrovskij A. I. Ausferritnyj chugun: patent (izobretenie) [Ausferritic cast iron: patent] 23393 Resp. Belarus', MPK (2006.01) S 22S 37/10/ – № a 20200023; zajavl. 27.01.2020, opubl. 30.04.2021. *Afic. bjull. / NCIU = Official bulletin / National Center for Intellectual Property*, 2021, no. 2, p. 50.
55. Pokrovskij A. I. Ausferritnyj chugun: patent (izobretenie) [Ausferritic cast iron: patent] 23389 Resp. Belarus', MPK (2006.01) S 22S 37/10/ – № a 20200022; zajavl. 27.01.2020, opubl. 30.04.2021. *Afic. bjull. / NCIU = Official bulletin / National Center for Intellectual Property*, 2021, no. 2, p. 50.
56. Pokrovskij A. I. Konceptija sozdaniya jekonomnolegirovannyh ausferritnyh (bejnitnyh) vysokoprochnyh chugunov [Concept for development of economically alloyed ausferritic (bainitic) ductile cast irons]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metal-lurgy*, 2022, no. 4, pp. 29–37.
57. Marukovich E. I., Pokrovskij A. I. Razrabotka jekonomnolegirovannyh vysokoprochnyh ausferritnyh (bejnitnyh) chugunov – magistral'noe napravlenie v chugunolitejnoj promyshlennosti [Development of economically alloyed high-strength ausferritic (bainitic) cast irons is the main direction in the cast iron foundry industry]. *Litejshhik Rossii = Foundryman of Russia*, 2022, no. 12, pp. 16–20.