

На правах рукописи

ДРОКИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ  
ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА ЧЮ22Ш И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИТЬЯ

Специальность 05.16.04. - "Литейное производство"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2010

Диссертационная работа выполнена на кафедре технологии литейных процессов  
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

**Научный руководитель**  
профессор каф. ТЛП НИТУ МИСиС,  
доктор технических наук

**Тен Эдис Борисович**

**Официальные оппоненты:**  
Заведующий лабораторией ГНЦ  
ЦНИИТМАШ, доктор технических наук

**Ковалевич Евгений Владимирович**

Заместитель начальника отдела УГМет  
АМО «ЗИЛ», кандидат технических наук

**Клецкин Яков Григорьевич**

**Ведущая организация:**

**Люблинский литейно-механический завод –  
филиал ОАО РЖД**

Защита состоится **23 декабря 2010 года** в 10 часов на заседании диссертационного совета Д.212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Автореферат разослан 22 ноября 2010 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.212.132.02  
доктор технических наук, профессор



**А.Е. Семин**

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Современные технологии базируются на применении интенсивных режимов работы технических средств. При этом все более повышаются рабочие параметры скоростей, давлений и температур. Соответственно требуются материалы с высокими функциональными характеристиками. В частности, для работы в условиях высокотемпературной газовой коррозии применяются жаростойкие материалы. Во многих агрегатах газовая среда имеет широкий спектр химических составов, начиная от обычной воздушной среды и кончая средами с высокой коррозионной активностью, например, среда водяного пара, среды с высокой концентрацией сернистых и ванадий содержащих газов.

В качестве жаростойких материалов широко применяют в основном высоколегированные сплавы, в которых легирующими элементами являются дорогостоящие хром и никель. Общее содержание их в жаростойких сплавах достигает 30 % и более. Тем не менее, срок жизни рабочих деталей из жаростойких сплавов ограничен. Причем, чем выше рабочие температуры, тем он короче. Это обуславливает повышенные затраты на поддержание агрегатов в рабочем состоянии. Примерами таких деталей являются колосники агломерационных машин, детали котельных установок, обжиговых, нагревательных и стекловаренных печей, формы для литья, выхлопные коллекторы форсированных автомобильных двигателей и др.

В связи с этим, снижение затрат на жаростойкие изделия при сохранении их рабочих характеристик, в том числе и срока службы, становится весьма актуальной задачей. Одним из перспективных вариантов её решения является изготовление таких деталей из высоколегированного алюминиевого жаростойкого чугуна ЧЮ22Ш. Отливки из этого сплава отличаются, прежде всего, жаростойкостью при высоких температурах как в воздушной среде (до 1100° С), так и в средах, содержащих серу, сернистый газ, окислы ванадия и пары воды. Кроме того, они функционально могут работать и как износостойкие изделия, имеющие высокую прочность при нормальной и повышенной температурах. При этом они легче по массе и дешевле, чем отливки из высокохромистых сталей и чугунов аналогичного назначения.

Выполненные ранее исследования (Александрова Н.Н., Ключева Н.И., Ковалевича Е.В., Бобро Ю.Г., Косникова Г.А. и др.) позволили оптимизировать состав высоколегированного алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш, изучить его структуру, литейные и эксплуатационные свойства, разработать технологические режимы плавки, литья и термической обработки отливок, провести их промышленные испытания и определить перспективные направления применения. Однако в настоящее время потенциал алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш используется недостаточно. Одним из сдерживающих факторов является недостаточная изученность закономерностей его кристаллизации, а также отсутствие сведений о теплофизических свойствах, что не позволяет корректно использовать современные методы моделирования литейных процессов для совершенствования технологии изготовления отливок. Нет также данных о параметрах питания от-

ливок, что затрудняет получение их без внутренних дефектов усадочного характера. Отсутствует методика прогнозирования степени сфероидизирующего модифицирования при обработке чугуна РЗМ, что не гарантирует получения требуемой структуры и свойств в отливках.

**Цель работы.** Исследование закономерностей формирования отливок из алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш и разработка на их основе технологических рекомендаций для получения высококачественного литья.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе ставились задачи:

- Исследование фазовых превращений при кристаллизации высоколегированного алюминиевого чугуна, а также теплофизических и литейно-технологических свойств чугуна ЧЮ22Ш;
- Исследование условий образования шаровидной формы графита в чугуне с использованием метода измерения активности кислорода;
- Исследование зависимости параметров питания отливок (дистанции действия прибыли  $L_{ДП}$ , дистанции торцевого эффекта  $L_{ТЭ}$  и суммарной эффективной дистанции питания  $L_{\Sigma}$ ) от их толщины  $t$ ;
- Исследование влияния фактора литейной формы (песчаной и металлической) на структуру отливок переменной толщины;
- Разработка технологических рекомендаций для получения высококачественных отливок и опытно-промышленное опробование результатов работы.

### **Научная новизна**

1. Установлены закономерности кристаллизации высоколегированного алюминиевого чугуна, согласно которым из расплава сначала кристаллизуется первичный графит, потом ферритно-графитная эвтектика и затем остаток жидкой фазы трансформируется в максимально легированный алюминием феррит, а при последующем охлаждении чугуна вследствие снижения растворимости алюминия в  $\alpha$  – феррите из него выделяется железо-алюминиевый карбид, который при спектральном анализе выявляется как  $Fe_yAlC_x$ , где  $y = 1,3 \div 1,6$ .

2. Впервые измерены теплофизические характеристики высоколегированного алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш в интервале температур  $500 \div 1000^\circ \text{C}$ , согласно которым удельная теплоемкость его с повышением температуры возрастает с 536 до 585 Дж/(кг·К), теплопроводность и температуропроводность при тех же условиях также монотонно возрастают соответственно с 12,6 до 15,5 Вт/(м·К) и от  $4,0 \cdot 10^{-6}$  до  $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

3. Установлена количественная зависимость параметров питания отливок (дистанции действия прибыли  $L_{ДП}$ , дистанции торцевого эффекта  $L_{ТЭ}$  и суммарной эффективной дистанции питания  $L_{\Sigma}$ ) от их толщины  $t$  и показано, что она описывается уравнением вида  $L = k \cdot t^x$ .

4. Впервые определена активность кислорода в алюминиевом чугуне ЧЮ22 и показано, что она на два порядка ниже, чем у нелегированного чугуна,

при этом увеличивается с повышением температуры по экспоненциальной зависимости.

5. Установлена зависимость активности кислорода в высоколегированном алюминиевом чугуна от количества РЗМ, введенного в расплав, и показано, что она, в отличие от нелегированных чугунов, имеет экстремальный характер и в области минимальных значений активности кислорода достигается наиболее полная сфероидизация графитных включений.

### **Практическая значимость**

1. На основе установленной зависимости доли шаровидного графита в чугуне ЧЮ22Ш от активности кислорода в расплаве разработана диаграмма, позволяющая по данным измерения активности кислорода в жидком чугуне спрогнозировать степень его сфероидизирующего модифицирования.

2. Разработаны лепестковые пробы для определения параметров питания отливок и методика выявления в них зоны осевой пористости путем измерения твердости, которые позволяют адекватно определить дистанцию действия прибыли  $L_{ДП}$ , дистанцию торцевого эффекта  $L_{ТЭ}$  и суммарную эффективную дистанцию питания  $L_{\Sigma}$ .

3. Определены значения параметров питания для отливок из чугуна ЧЮ22Ш различной толщины, применение которых позволяет обеспечить получение отливок без дефектов усадочного происхождения при минимальном расходе металла на прибыли.

4. Установлено распределение объемной доли графита по сечению отливок в зависимости от их толщины и условий формирования (в песчаной или металлической формах), что позволяет прогнозировать структуру получаемых отливок и с учетом этого выбирать технологические варианты их изготовления.

5. Разработаны технологические рекомендации для получения качественных отливок из чугуна ЧЮ22Ш, которые включают: а) определение оптимального расхода РЗМ; б) прогнозирование степени сфероидизации графита измерением активности кислорода в модифицированном расплаве; в) выбор параметров питания отливок в зависимости от их толщины и места установки прибыли; г) выбор технологического варианта получения отливок в песчаной или металлической формах на основе прогнозирования их структуры.

### **Апробация работы**

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, МИСиС, 2007 и 2009 г.г.; международной конференции «Ninth Symposium on Science and Processing of Cast Iron - SPCI-9», November 2010, Luxor, Egypt; научных семинарах кафедры технологии литейных процессов Московского института стали и сплавов (2007-2009 г.г.).

Результаты диссертационной работы отражены в 7 публикациях в виде статей и тезисов докладов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на страницах машинописного текста, содержит рисунков, таблиц, состоит из введения, 6 глав, выводов и списка литературы из наименований.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **2.1. Высоколегированный алюминиевый чугун как жаростойкий литейный сплав**

Рассмотрены классификация жаростойких сплавов и предъявляемые к ним требования. Рассмотрен чугун ЧЮ22Ш как перспективный жаростойкий материал, описаны его структура и свойства, достоинства и недостатки. Проанализированы результаты работ, посвященных исследованию технологии плавки, литья и термической обработки алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш. Наибольший вклад в развитие этого направления литейной технологии внесли Н.Н. Александров, Н.И. Клочнев, Ю.Г. Бобро, Е.В. Ковалевич, Г.А. Косников и др.

По результатам изучения литературы были сделаны следующие выводы:

- в настоящее время недостаточно используется потенциал алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш в качестве жаростойкого сплава взамен высоколегированных сталей и чугунов, содержащих дорогостоящие легирующие элементы хром и никель;

- стабильное получение отливок с требуемыми структурными параметрами и механическими свойствами затруднительно в условиях отсутствия сведений о закономерностях кристаллизации чугуна и формировании шаровидной формы графита, поэтому необходимы исследования этих вопросов с целью прогнозирования фазового строения литого чугуна и степени сфероидизации графитных включений;

- высокая объемная усадка сплава ЧЮ22Ш обуславливает необходимость организации оптимального питания отливок, но это возможно только при наличии корректных данных о параметрах их питания, так как при недостаточном питании отливок вероятно возникновение брака по усадочным дефектам, а при избыточном питании, производство понесет убытки в результате перерасхода металла.

- существенное влияние на структурообразование в чугунах оказывает скорость охлаждения отливки, а параметры структуры в свою очередь определяют уровень механических свойств, поэтому необходим учет фактора формы для получения отливок с желаемой структурой и свойствами.

- основной причиной, сдерживающей широкое применение высоколегированных алюминиевых чугунов в промышленности, является недостаточность или отсутствие надёжных технологических рекомендаций, в частности, по сфероидизирующему модифицированию, питанию отливок и выбору оптимального варианта литья, обеспечивающих получение отливок без дефектов и с высокими механическими характеристиками.

Применение в качестве жаростойкого материала высоколегированного алюминиевого чугуна позволит при сохранении высокой жаростойкости значительно снизить стоимость литых изделий и уменьшить при этом их массу.

Исходя из вышеизложенного, актуальным представляется исследование закономерностей формирования отливок из чугуна ЧЮ22Ш и разработка технологических рекомендаций для получения из него высококачественного литья.

## **2.2. Методика проведения экспериментов**

Объектом исследования являлись чугуны ЧЮ22 и ЧЮ22Ш.

В лабораторных условиях чугун плавил в высокочастотной печи ИСТ-0,06 с основной футеровкой. В качестве материалов завалки печи использовались передельный чугун и стальной лом. После расплавления завалочной шихты жидкий металл перегревали до температуры 1450-1500° С и производили легирование чугуна алюминием путем ввода его небольшими порциями. По окончании легирования расплава его перегревали до 1480-1500° С, после чего производили сфероидизирующее модифицирование, путем ввода в печь 0,10-0,12% мишметалла ( $\Sigma P3M = 96,85\%$ ,  $Se = 54,90\%$ ). После непродолжительного перемешивания, чугун при температуре 1480- 1500° С выпускали в ковш с одновременным проведением графитизирующего модифицирования подачей 0,5% ферросилиция ФС75 на струю металла.

В производственных условиях чугун плавил аналогичным образом в индукционной высокочастотной печи с магнезитовой футеровкой вместимостью 0,5 и 1 т.

Твердость чугуна измеряли на приборе Wolpert Hardness Taster 930, при нагрузке 187,5 кг в соответствии с ГОСТ9013-59, а для измерения микротвердости использовали прибор Wilson Wolpert Micro-Vickers 402MVD при нагрузке 1 кг.

Термическую обработку образцов проводили в печи сопротивления при температуре 780° С с 8 часовой выдержкой и охлаждением с печью.

Микроструктуру чугуна ЧЮ22Ш в травленном и не травленном состоянии исследовали на микроскопе «NEOPHOT-21» фирмы ZEISS JENA при различных увеличениях.

Для определения общего содержания кислорода в чугуне из расплава кварцевыми трубками отбирали пробы, которые закаливали в воде. Анализ производили на установке ТС-600 фирмы Лесо, США.

Содержание углерода и серы в чугуне определяли на установке CS-224 Лесо, а остальных элементов – спектральным методом на электронно-зондовом микроанализаторе с энергодисперсионной системой JXA-8100+INCA Energy 400 Jeol Япония + Oxford Instruments Великобритания.

Механические свойства определяли на образцах, выточенных из отдельно отлитых брусков в соответствии с требованиями ГОСТ 7769-82. Перед механической обработкой бруски подвергали термической обработке по режиму отжи-

га, описанному выше. Затем из них по ГОСТ 1497-84 изготавливали цилиндрические образцы диаметром 8 мм и расчетной длиной 50 мм.

Испытания на растяжение проводили на приборе Zwick/Roell Z250 в соответствии с требованиями ГОСТ 27208-87.

Кроме того использовали специальные методики исследования, их описания приведены в соответствующих разделах работы.

### 2.3. Исследования фазовых превращений при кристаллизации высоколегированного алюминиевого чугуна

**Фазовые превращения** в чугуне при кристаллизации изучали в связи с тем, что до настоящего времени отсутствуют тройные и четверные диаграммы состояния Fe – C – Al и Fe – C – Si – Al. Имеются лишь политермические разрезы для тройной системы Fe – C – Al и то только до содержания алюминия 15%. А в чугуне ЧЮ22Ш содержание алюминия составляет 19-25%. Отсутствие необходимой информации не позволяет корректно судить о фазовых превращениях, протекающих при затвердевании и остывании отливок из этого чугуна.

В связи с этим в работе использовали компьютерную программу Thermo-Calc, которая позволяет определять температуры фазовых превращений, прогнозировать фазовые превращения и ожидаемую структуру сплава. С помощью программы Thermo-Calc построили политермические разрезы для тройных Fe – C – Al и четверных систем Fe – C – Si – Al. При этом варьировали содержанием углерода в пределах 1,5-2,5 %, кремния – 1-2 % и алюминия – 15-40 %. В качестве примера на рис. 1 приведены политермические разрезы для Fe – (2% C) – Al и Fe – (2% C) – (1% Si) – Al сплавов.

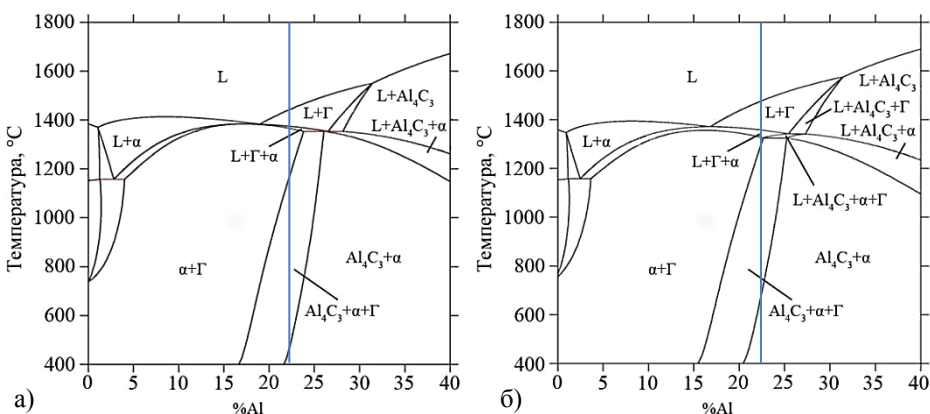


Рис. 1. Политермические разрезы фазовых диаграмм состояния систем Fe – (2% C) – Al (а) и Fe – (2% C) – (1% Si) – Al (б)

Из анализа данных политермических разрезов следует, что кристаллизация чугуна, по составу эквивалентного ЧЮ22 и содержащего 2% C, 1% Si и 22,5%



Al, начинается с выделения из жидкого чугуна первичных кристаллов графита. Затем происходит кристаллизация двойной эвтектики, состоящей из твердого раствора на основе легированного алюминием феррита ( $\alpha$  – фазы) и графита. После этого из остатка жидкой фазы выделяется максимально легированный алюминием феррит. При последующем охлаждении чугуна вследствие снижения растворимости алюминия в  $\alpha$  – фазе из него выделяется карбид  $Al_4C_3$ .

Эти данные согласуются с результатами термографических исследований. На рис. 2 приведена экспериментально полученная кривая охлаждения чугуна ЧЮ22Ш.

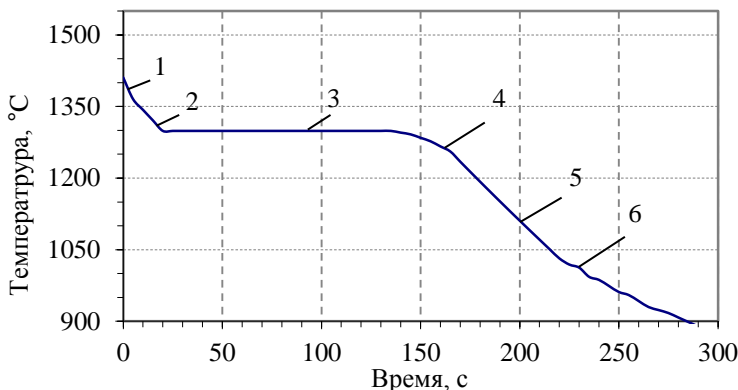


Рис. 2. Кривые охлаждения чугуна ЧЮ22Ш

Кривая охлаждения, прежде всего, свидетельствует о том, что сплав в основном кристаллизуется при постоянной температуре, но претерпевает незначительную предэвтектическую и послеэвтектическую кристаллизацию. На температурно-временной кривой можно выделить участки остывания жидкого чугуна 1, предэвтектической кристаллизации первичного графита 2, эвтектической кристаллизации 3, послеэвтектической кристаллизации феррита ( $\alpha$  – фазы) 4, остывания твердого чугуна 5 и выделения из пересыщенного твердого раствора ( $\alpha$  – фазы) алюминий содержащей карбидной фазы 6.

В табл. 1 приведены данные о критических температурах кристаллизации чугуна по данным политермических разрезов и термографических исследований.

Таблица 1. Критические температуры кристаллизации чугуна с 22,5 % Al

№	Способ определения	Критическая температура, °C		
		Ликвидуса	Эвтектики	Солидуса
1	По политермическому разрезу Fe – 2 % C – 22,5 % Al	1448	1375	1365
2	По политермическому разрезу Fe – 2 % C – 1% Si – 22,5% Al	1475	1360	1332
3	Экспериментально	1360	1295	1260

Как видно, фактические температуры кристаллизации чугуна намного ниже теоретических значений. Наиболее существенное различие наблюдается по температуре ликвидус – 88-115° С, по температуре эвтектики оно составляет 65-80°С и по температуре солидус – 72-105° С. Видимо, это обусловлено трудностью выделения графитной фазы в виде первичных кристаллов и связанного с этим сильного переохлаждения расплава.

Наличие эвтектической кристаллизации было известно и раньше, причем, по данным Н.Н. Александрова и Н.И. Клочнева, у чугуна ЧЮ22 она протекает при температурах 1230 - 1280° С. Полученные результаты показывают, что эвтектическая кристаллизация может протекать и при более (на 15-60° С) высоких температурах. Кроме того, установлено наличие предэвтектической и послеевтектической кристаллизации, а также фазового превращения в твердом состоянии с выделением из твердого раствора алюминия в железе ( $\alpha$  - фазы) железоалюминиевого карбида типа  $\text{Fe}_3\text{AlC}_x$  ( $\varepsilon$  – фазы).

**Формирование структуры чугуна** изучали с учетом изложенных выше результатов о том, какие фазы, в какой последовательности, в каких сочетаниях и при каких температурах выделяются при переходе высоколегированного алюминиевого чугуна из жидкого состояния в твердое.

Большая протяженность горизонтального участка на кривой охлаждения свидетельствует о развитости эвтектической кристаллизации и формировании в отливках соответствующей структуры. Согласно кривым охлаждения и поли-термическим разрезам, в чугуне ЧЮ22 должны присутствовать три структурные составляющие: включения первичного графита (I), графито-ферритная эвтектика (II) и вторичный карбид  $\text{Al}_4\text{C}_3$  (III), выделившийся после эвтектической кристаллизации. Однако реальная структура отличается от изложенной.

На рис. 3 представлена типичная микроструктура чугуна. В нетравленном виде (Рис. 3,а) выделяются темные включения шаровидного графита, равномерно распределенные в металлической матрице. В самой матрице различаются основная светлая фаза и строчечные включения темного цвета. В травленном виде при небольшом увеличении (Рис. 3,б) различаются светлая и темная фазы. При большом увеличении в центре темной фазы выявляется графитное включение, которое расположено на белом фоне вокруг огороженных в виде «забора» темных строчечных включений причудливой формы (Рис. 3,в).

Светлую и темную фазы предварительно идентифицировали путем измерения их микротвердости и сопоставления полученных значений с литературными данными. Микротвердость светлой фазы равна 413 HV, что соответствует микротвердости легированного алюминием феррита ( $\alpha$  – фазы). Более темная кристаллическая фаза имеет микротвердость 650 HV, поэтому её идентифицировали как железо – алюминиевый карбид  $\text{Fe}_3\text{AlC}_x$  ( $\varepsilon$  – фазу), микротвердость которого находится в пределах 680 – 760 HV (по данным Александрова Н.Н. и Клочнева Н.И.).

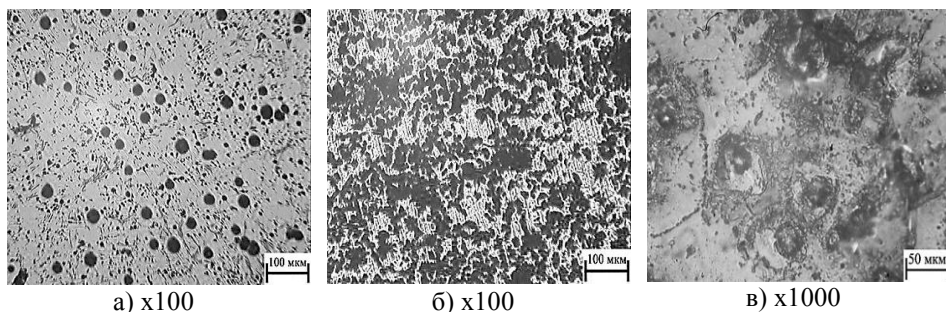
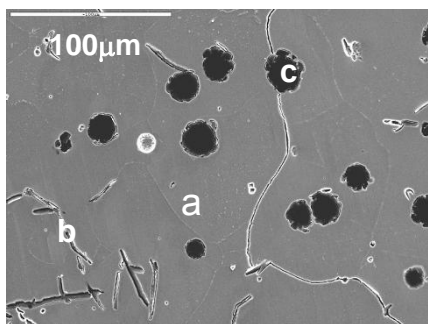


Рис. 3. Структура чугуна ЧЮ22Ш до (а) и после травления (б и в)

Составы фаз дополнительно изучали на электронном микроскопе с микроанализатором. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Количественный анализ подтверждает, что матрица а – феррит, легированный алюминием до 23% ( $\alpha$  – фаза), а темные включения округлой формы с – графит. Данные по строчечным включениям б свидетельствуют о том, что они содержат железо, алюминий и углерод и потому могут рассматриваться как железоалюминиевые карбиды. Однако, атомные доли железа в них, согласно многократным определениям, лишь в 1,3-1,6 раз превышают атомную долю алюминия. Поэтому они, скорее всего, являются железоалюминиевыми карбидами переменного состава типа  $Fe_yAlC_x$ , где  $y = 1,3 \div 1,6$ .



Элемент	В масс. %		В ат. %	
	a	b	a	b
Al	22,99	21,53	37,79	35,84
Si	1,33	1,29	2,11	2,07
Mn	0,88	1,51	0,71	1,23
Fe	74,79	75,67	59,39	60,86
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00

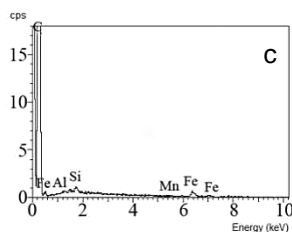
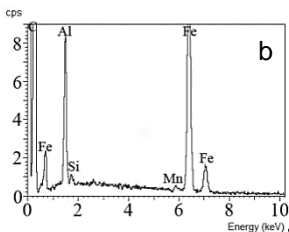
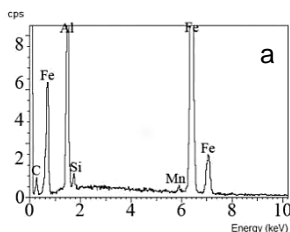


Рис. 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа фаз в чугуна ЧЮ22Ш

Фактическая структура чугуна отличается от предполагаемой по нескольким признакам. Прежде всего, не удастся однозначно выявить выделения первичного графита. Кроме того, в чугуне, вместо ожидаемого карбида  $Al_4C_3$ , образуется железо – алюминиевый карбид близкий по составу к  $Fe_{1,5}AlC_x$ . Возможно, в условиях высокого переохлаждения термодинамически выгоднее образовывать вместо двойного карбида  $Al_4C_3$  тройной карбид, причем даже не  $Fe_3AlC_x$  ( $\epsilon$  – фазу), а  $Fe_{1,5}AlC_x$ .

Таким образом, выполненные исследования существенно дополняют наши знания о закономерностях кристаллизации высоколегированного алюминиевого чугуна и формирования его структуры.

## 2.4. Исследования закономерностей формирования в высоколегированном алюминиевом чугуне графита шаровидной формы

Исследования условий образования в высоколегированном алюминиевом чугуне графита шаровидной формы выполнены из предпосылки, что по аналогии с нелегированным чугуном, он также контролируется активностью кислорода в расплаве. Последнюю оценивали расчетным (термодинамическим) и экспериментальными методами.

Расчетные значения активности кислорода в чугуне находили исходя из того, что в легированном алюминиевом чугуне активность кислорода определяется алюминием, поскольку он обладает наибольшим сродством к кислороду. В этом случае определяющей является реакция:



Из выражения константы равновесия для данной реакции:

$$\lg K_{Al_2O_3} = \lg \left[ a_{Al_2O_3} / (a_{Al}^2 \cdot a_O^3) \right] = \lg a_{Al_2O_3} - \lg(a_{Al})^2 - \lg(a_O)^3. \quad (2)$$

С учетом того, что в высоколегированном алюминиевом чугуне (ЧЮ22) продуктом реакции является практически чистый оксид  $Al_2O_3$  и  $a_{Al_2O_3} = 1$ , а активность алюминия  $a_{Al} = f_{Al} \cdot [\%Al]$ , где  $f_{Al}$  и  $[\%Al]$  – коэффициент активности и концентрация алюминия в жидком чугуне соответственно, получили уравнение для расчета активности кислорода в алюминиевом чугуне:

$$\lg a_{O,Al} = 1/3 (-\lg K_{Al_2O_3} - 2\lg f_{Al} - 2\lg [\%Al]) \quad (3)$$

где  $\lg f_{Al} = \sum (e_{Al}^i \cdot [\%J]) + \sum (r_{Al}^{ij} \cdot [\%J]^2)$ , а  $e_{Al}^i$  и  $r_{Al}^{ij}$  – параметры взаимодействия алюминия первого и второго порядков соответственно.

В нелегированном чугуна (СЧ) активность кислорода определяется или кремнием (при  $T < 1350^\circ \text{C}$ ) или углеродом (при  $T > 1350^\circ \text{C}$ ). Соответственно расчетные значения активности кислорода находили по реакциям:



Аналогично (3) получили следующие выражения для расчета активности кислорода в расплаве нелегированного чугуна (СЧ) для реакций (4) и (5):

$$\lg a_{\text{O, Si}} = 1/2(-\lg K_{\text{SiO}_2} - \lg f_{\text{Si}} - \lg[\% \text{Si}]) \quad (6)$$

$$\lg a_{\text{O, C}} = -\lg K_{\text{CO}} - \lg f_{\text{C}} - \lg[\% \text{C}] + \lg P_{\text{CO}}. \quad (7)$$

где  $\lg f_{\text{Si}}$  и  $\lg f_{\text{C}}$  также рассчитывали по параметрам взаимодействия первого ( $e_{\text{Si}}^j$ ,  $e_{\text{C}}^j$ ) и второго ( $r_{\text{Si}}^{jj}$ ,  $r_{\text{C}}^{jj}$ ) порядков.

Экспериментально активность кислорода в чугуна изучали при помощи кислородных датчиков. В качестве кислородного датчика использовали кислородно-концентрационный элемент с твердым электролитом из плавленной двуокиси циркония, стабилизированной окисью иттрия, и электродом сравнения в виде порошкообразной смеси 90% Мо и 10% МоО<sub>2</sub>.

При измерении активности кислорода в чугуна эксперименты проводили в печи Таммана в среде аргона. Чугун плавил в корундовом тигле вместимостью 0,3 кг из готовой шихтовой заготовки (ЧЮ22), предварительно выплавленной в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой. После расплавления шихты расплав нагревали до требуемой температуры и производили измерение кислородным датчиком, затем кварцевой трубкой отбирали пробу исходного металла. Далее вводили расчетную порцию РЗМ и после минутной выдержки и контроля температуры производили повторное измерение активности и отбор пробы. При помощи вторичного прибора фиксировали значение ЭДС датчика Е и по нему рассчитывали значение активности кислорода по формуле:

$$\lg a_{\text{O}} = -2,685 - (10,087E + 5660)/T, \quad (8)$$

где Е и Т – соответственно ЭДС активометра (мВ) и температура расплава (К).

Полученные результаты представлены на рис. 5.

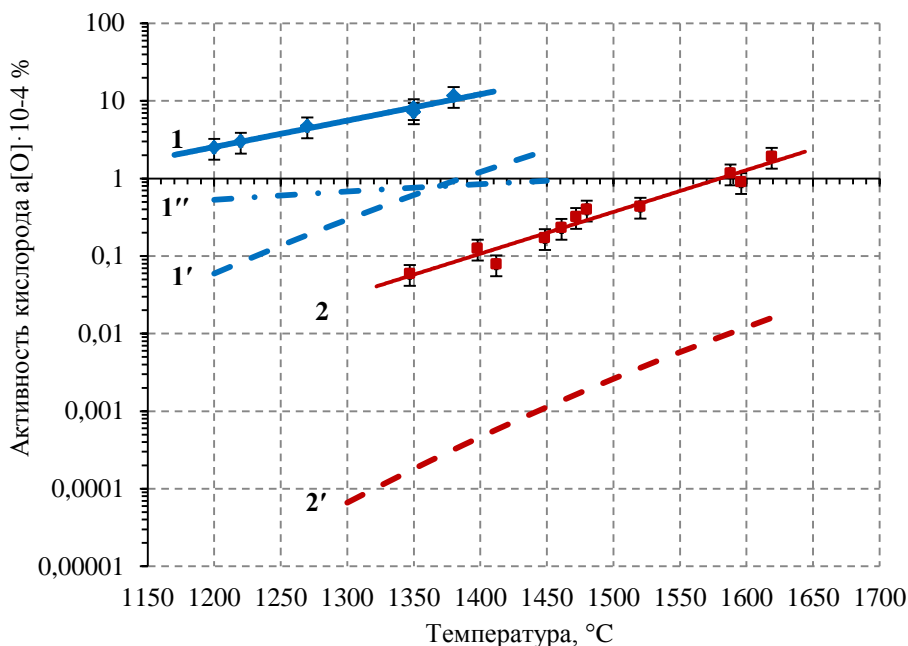


Рис. 5. Зависимости активности кислорода в расплавах чугунов от температуры  
1 и 2 – экспериментальные данные для нелегированного (1) и легированного (2)  
чугунов; 1', 1'' и 2' – расчетные зависимости по реакциям  
(4), (5) и (1) соответственно.

Расчетные значения активности кислорода в алюминиевом чугуне (кривая 2') на три порядка ниже, чем в расплаве нелегированного чугуна (кривые 1' и 1'').

Экспериментальные значения активности кислорода в чугуне ЧЮ22 (%: 1,75 C; 1,74 Si; 0,3 Mn; 23,1 Al) отличаются от расчетных более чем на два порядка, а в нелегированном чугуне СЧ (%: 3,3 C; 2,0 Si; 1,0 Mn) – на полтора-два порядка. Причем, активность кислорода в чугуне ЧЮ22 ниже, чем в расплаве СЧ на два порядка.

Зависимости активности кислорода в чугуне от температуры имеют экспоненциальную зависимость и описываются следующими выражениями:

№	Тип чугуна	Способ выявления зависимости	Вид зависимости
1	Чугуна ЧЮ	Расчетная по (3)	$a_o = 1 \cdot 10^{-14} \cdot e^{0,0172 \cdot T}$ (9)
2		Экспериментальная	$a_o = 3 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0124 \cdot T}$ (10)
3	Чугуна СЧ	Расчетная по (6)	$a_o = 2 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,0146 \cdot T}$ (11)
4		Расчетная по (7)	$a_o = 0,0362 \cdot e^{0,0023 \cdot T}$ (12)
5		Экспериментальная	$a_o = 0,0002 \cdot e^{0,0078 \cdot T}$ (13)

Низкая активность кислорода в высоколегированном алюминиевом чугуна создает предпосылки для получения графита шаровидной формы при существенно меньшем, по сравнению с СЧ, расходе сфероидизатора. На рис. 6 представлены данные, подтверждающие это предположение.

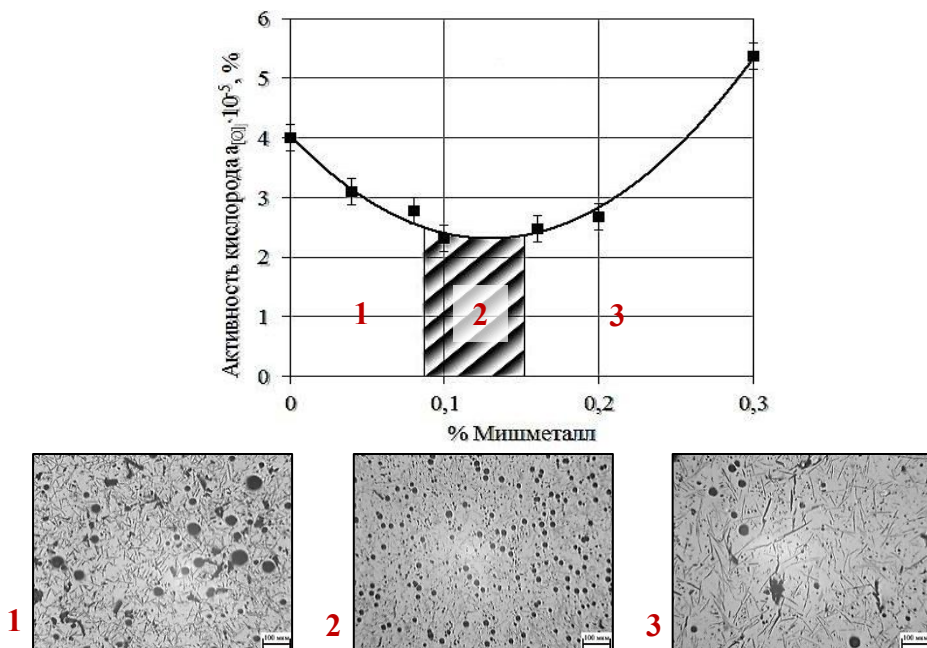


Рис. 6. Влияние РЗМ на активность кислорода и форму графита в чугуне ЧЮ22

Активность кислорода в алюминиевом чугуне с увеличением расхода РЗМ изменяется по экстремальной зависимости, которая описывается степенным уравнением  $a_O = 103,39 M^2 - 26,74 M + 4,042$ ,  $R^2 = 0,9884$ , где  $M$  – расход мишметалла, %. При этом максимальное количество шаровидного графита формируется в области минимума активности кислорода при расходе РЗМ в интервале от 0,08 до 0,16%.

Таким образом, выполненные исследования позволили выявить низкую, по сравнению с нелегированным чугуном, окисленность расплава ЧЮ22, установить закономерности изменения в нем активности кислорода при вводе РЗМ и определить оптимальный его расход, при котором достигается наиболее высокая степень сфероидизации графитных включений.

Исследование влияния технологических факторов на параметры структуры изучали на ступенчатой технологической пробе (рис. 7). Из одного стояка отливали по две ступенчатые пробы, одна из которых охлаждалась с нижней стороны холодильником. Проба позволяет имитировать формирование структуры в отливках разной толщины (5,10,20 и 40 мм), изготавливаемых как в песчаной фор-

ме (правая ступенька), так и в металлической форме (левая ступенька с холодильником).

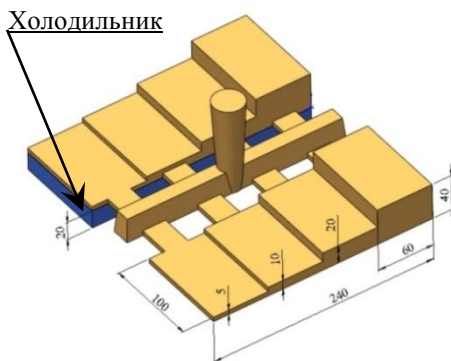


Рис. 7. Технологическая ступенчатая проба

Полученные пробы распиливали пополам вдоль продольной оси и в сечениях каждой ступеньки изучали микроструктуру чугуна. Первичный анализ показал, что ступеньки снизу и сверху затвердевают неодинаково из-за образования со стороны верхней поверхности газового зазора. Поэтому структуру чугуна изучали с подовой стороны до линии встречи нижнего фронта затвердевания с верхним. В сечениях каждой отливки количество структурных составляющих меняется сходным образом, хотя численно различается (Рис. 8). При этом с увеличением толщины образца объемная доля графита увеличивается.

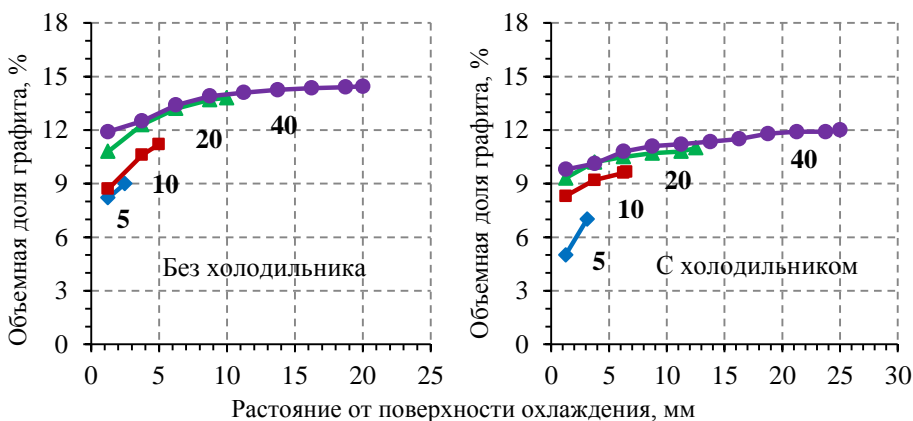


Рис. 8. Изменение количества графита по мере удаления от поверхности охлаждения отливок (Цифры на кривых – толщина отливок, мм)

При использовании холодильника зависимость толщины отливки от объемной доли графита несколько изменяется: при прочих равных условиях объемная



доля графита меньше. При этом в чугуна ЧЮ22Ш графит выделяется в свободной форме даже в сечениях отливки толщиной 5 мм, затвердевшей на холодильнике, чего не наблюдается в случае литья нелегированного чугуна СЧ.

Очевидно, что изменения параметров структуры чугуна, представленные на рис. 8, связаны со скоростью затвердевания в различных сечениях отливки. Она уменьшается при продвижении фронта кристаллизации от периферии к центру отливки. При этом проявляется фактор массивности стенки отливок. Он заключается в том, что пристеночные слои толстостенных отливок, при прочих равных условиях, затвердевают с меньшей скоростью. В глубинных слоях этот фактор ослабляется и исчезает. Но в отливках, формирующихся в формах с холодильником, фактор массивности проявляется до большего расстояния от стенки отливок.

## 2.5. Исследования свойств чугуна ЧЮ22Ш

**Теплофизические свойства** чугуна необходимы для компьютерного моделирования процессов заполнения расплавом полости литейных форм, затвердевания и остывания в них отливок с целью выбора наилучшего варианта технологии получения их без литейных дефектов. Однако такие сведения по чугуну ЧЮ22Ш отсутствуют.

В работе определяли теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность чугуна ЧЮ22Ш в интервале температур 500-1000° С. Эксперименты проводили в лаборатории Корейского института материаловедения (KIMS) на приборах NETZSCH DSC 404 C Pegasus и NETZSCH LFA 457 Micro-Flash®. Испытания проводили на образцах, выточенных из литых проб и имевших плотность 5909 кг/м<sup>3</sup>. Размеры образцов составили: диаметр – 12,700 мм, толщина – 3,1580 мм.

Полученные результаты приведены в табл. 2 как средние значения пяти измерений.

Табл. 2. Теплофизические свойства чугуна ЧЮ22Ш

Наименование свойств	Температура, °С					
	500	600	700	800	900	1000
Теплоемкость удельная $C_p$ , Дж/(кг·К)	536 ± 0,001	549 ± 0,001	559 ± 0,001	565 ± 0,001	573 ± 0,001	585 ± 0,001
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	12,64 ± 0,028	13,11 ± 0,068	13,64 ± 0,048	14,19 ± 0,136	14,93 ± 0,157	15,53 ± 0,141
Температуропроводность $a$ , 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	3,99 ± 0,009	4,04 ± 0,021	4,13 ± 0,014	4,25 ± 0,041	4,41 ± 0,047	4,49 ± 0,041

Согласно данным табл. 2, удельная теплоемкость чугуна ЧЮ22Ш с повышением температуры возрастает и составляет 536 при 500° С и 585 Дж/(кг·К) при 1000° С, что сопоставимо с аналогичным показателем для нелегированного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ).

Теплопроводность чугуна ЧЮ22Ш с повышением температуры возрастает более существенно, чем теплоемкость – с 12,64 при 500° С до 15,53 Вт/(м · К) при 1000° С. Полученные значения заметно меньше приводимых в литературе: 16,28 Вт/(м · К) при 200° С и 26,75 Вт/(м · К) при 500° С. При одинаковой температуре (500° С) значения отличаются более, чем в 2 раза. Предполагается, что приводимые в работе показатели теплопроводности более надежны, поскольку получены на современной аппаратуре, причем, каждое значение измерено пятикратно и выполнено в широком интервале температур. Исходя из этого, можно считать, что алюминиевый чугун ЧЮ22Ш имеет теплопроводность примерно в 3 раза ниже, чем нелегированный чугун ЧШГ с ферритной металлической матрицей, который при 400° С имеет коэффициент теплопроводности 38 Вт/(м · К). Поскольку, теплопроводность у нелегированного чугуна уменьшается с повышением температуры, а у чугуна ЧЮ22Ш, наоборот, возрастает, то в области рабочих температур 1000 – 1100° С это различие должно сильно сократиться.

Коэффициент температуропроводности у чугуна ЧЮ22Ш монотонно возрастает с  $4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с до  $4,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при увеличении температуры с 500 до 1000° С. Отсутствие литературных данных не позволяет сравнить полученные значения. У нелегированного чугуна ЧШГ этот показатель равен  $(5,5-6,5) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при 600° С и  $(5,0-5,6) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при 800° С. Сопоставление данных показывает, что чугун ЧЮ22Ш при температурах 600 и 800° С имеет температуропроводность на 33 и 20 % ниже соответственно, но при более высоких температурах температуропроводность чугунов ЧЮ22Ш и ЧШГ будут мало различаться.

**Литейные свойства** изучали по спиральной пробе (жидкотекучесть), I и II образных пробах (свободную и затрудненную усадку), приборе Большакова (предусадочное расширение) и брусковых многолепестковых пробах (параметры питания). Результаты определения жидкотекучести и параметров усадки чугуна ЧЮ22Ш приведены в табл. 3.

Табл. 3. Жидкотекучесть и литейная усадка чугуна ЧЮ22Ш<sup>1</sup>

Жидкотекучесть, мм	Литейная усадка, %		Предусадочное расширение, %
	Свободная	Затрудненная	
(525 – 775)/830	(1,42 – 1,52)/(2,2 – 2,5)	(1,26 – 1,47)/ -	0,01/ -

<sup>1</sup> В знаменателе приведены данные Александрова Н.Н. и Ключева Н.И

Как видно, измеренные по спиральной пробе значения жидкотекучести сопоставимы с литературными данными, однако свободная литейная усадка ниже в 1,5 раза. А предусадочное расширение высоколегированного алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш существенно меньше в сравнении с аналогичным показателем для нелегированного серого чугуна (0,07 %).

**Параметры питания отливок** включают дистанцию питания от прибыли  $L_{дп}$ , дистанцию действия торцевого эффекта  $L_{тэ}$  и суммарную дистанцию эффективного питания  $L_{\Sigma} = L_{дп} + L_{тэ}$ . В литературе имеются данные о параметрах питания отливок из ВЧШГ, стали и некоторых сплавов цветных металлов. Относительно влияния толщины отливки на эти параметры имеются лишь отдельные

замечания. По высоколегированному алюминиевому чугуна данные о параметрах питания отливок полностью отсутствуют. Вместе с тем, этот чугун имеет высокую объемную усадку (3,2-7,0 % по данным Ковалевича Е.В.) и потому при затвердевании отливки из него должны испытывать дефицит питания. Но без знания параметров питания отливок невозможно корректно организовать направленное затвердевание отливок.

Поэтому в работе детально изучали параметры питания отливок из чугуна ЧЮ22Ш. Для этого разработали 2-х, 3-х и 4-х лепестковые брусковые пробы. На рис. 9а в качестве примера приведена 2-х лепестковая проба.

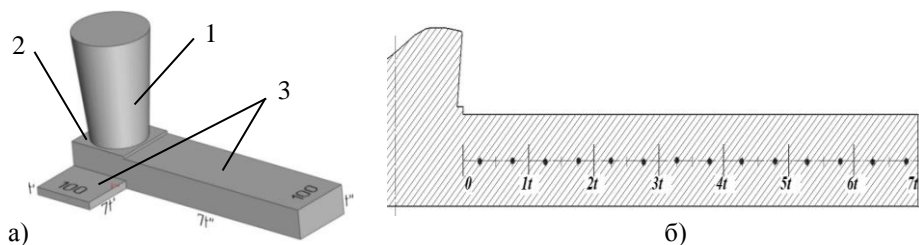


Рис. 9. 2<sup>х</sup> лепестковая проба (а) и схема измерения твердости для определения параметров питания отливки (б): 1 – стояк-прибыль; 2 – основание; 3 – исследуемая часть пробы; • - точки замера твердости

Толщины брусков  $t$  составили 6, 12, 24, 30, 36, 42 и 48 мм при ширине 100мм. Длину брусков  $\ell$  выбирали из принципа достаточности. При этом полагали, что у высоколегированного алюминиевого чугуна с шаровидным графитом ЧЮ22Ш дистанция питания примерно такая же, как и у ВЧШГ ( $L_{\Sigma} \approx 6 \cdot t$ ). Исходя из этого, приняли (с небольшим запасом)  $\ell = 7 \cdot t$ .

Из литых проб получали отдельные темплеты. Для этого бруски разрезали пополам вдоль продольной плоскости. После фрезеровки плоскости разреза на темплетях выявляли зоны пористости. Для этого опробовали разные методы, в том числе визуальный, ультразвуковой и метод измерения твердости. Наиболее адекватные результаты были получены при использовании метода измерения твердости по Роквеллу (HRC). Твердость замеряли по осевой линии темплетов на расстояниях, кратных толщине лепестка  $t$  (Рис. 9, б).

По протяженности плотного металла со стороны торца и прибыли определяли соответственно дистанцию действия торцевого эффекта  $L_{ТЭ}$  и дистанцию питания от прибыли  $L_{ДП}$ , а по их сумме - суммарную дистанцию эффективного питания  $L_{\Sigma} = L_{ДП} + L_{ТЭ}$ .

Для всех плит толщиной от 6 до 48 мм (7 типоразмеров) получены распределения твердости вдоль осевой линии темплетов. В качестве иллюстрации на рис. 10 приведены данные о распределении твердости для плит толщиной 6 и 48 мм.

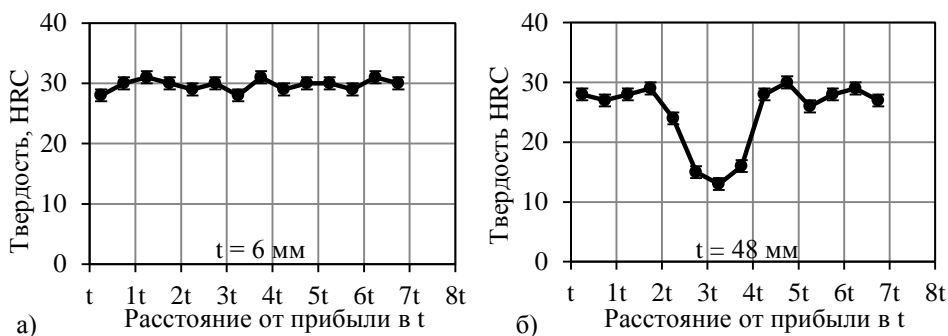


Рис. 10. Распределение твердости вдоль осевой линии темплетов различной толщины

Из полученных данных следует, что в плитах толщиной 6 и 12 мм зона пористости отсутствует и твердость имеет распределение как на рис. 10,а, а при толщине образца 24 мм показатели твердости по длине плиты имеют незначительные отклонения от среднего значения и потому зона пористости практически не выявляется. Это означает, что при толщине отливки до 24 мм суммарная дистанция эффективного питания  $L_{\Sigma} = L_{\text{дп}} + L_{\text{тэ}} \geq 7 \cdot t$ . При толщине отливки  $t = 48 \text{ мм}$  на графике зона пористости выявляется как широкая зона провала твердости (Рис. 10,б). При толщинах отливки-бруса 30 и 36 мм зоны пористости четко фиксируются, но имеют меньший и более узкий провал твердости. В табл. 4 приведены сводные результаты определения параметров питания отливок толщиной 6, 12, 24, 30, 36, 42 и 48 мм.

Табл. 4. Параметры питания отливок различной толщины

Толщина отливки $t$ , мм	$L_{\text{дп}}$	$L_{\text{тэ}}$	$L_{\Sigma} = L_{\text{дп}} + L_{\text{тэ}}$
6; 12 и 24	Не выявляется		$> 7 \cdot t$
30	$2,25 \cdot t$	$2,75 \cdot t$	$5,00 \cdot t$
36	$1,88 \cdot t$	$2,49 \cdot t$	$4,37 \cdot t$
42	$1,79 \cdot t$	$2,36 \cdot t$	$4,15 \cdot t$
48	$1,76 \cdot t$	$2,29 \cdot t$	$4,05 \cdot t$

С увеличением толщины отливок, значения параметров их питания уменьшаются. Обработкой данных табл. 4 для  $L_{\text{дп}}$ ,  $L_{\text{тэ}}$  и  $L_{\Sigma}$  получены соответственно следующие количественные зависимости:

$$L_{\text{дп}} = 33,2 \cdot t^{0,78}; L_{\text{тэ}} = 41,5 \cdot t^{0,77}; L_{\Sigma} = 74,1 \cdot t^{0,77}.$$

Разработанные лепестковая проба и методика выявления зоны пористости измерением твердости позволяют определить значения параметров питания  $L_{\text{дп}}$ ,  $L_{\text{тэ}}$  и  $L_{\Sigma}$ . С увеличением толщины отливки  $t$  они уменьшаются по зависимости вида  $L = k \cdot t^x$ . При малых и небольших толщинах отливок параметры питания

относительно велики и потому большая величина дистанции эффективного питания ( $L_{\Sigma} \gg t$ ) позволяет получать отливки без усадочных дефектов с минимальным количеством прибылей или вовсе без них. При больших толщинах отливок значения  $L_{дп}$ ,  $L_{тэ}$  и  $L_{\Sigma}$  сопоставимы с величиной  $t$  и потому их качественное питание не обеспечить без учета указанных параметров питания.

Таким образом, результаты выполненных исследований существенно дополняют имеющиеся данные о закономерностях формирования отливок и свойствах чугуна ЧЮ22Ш и позволяют более адекватно решать технологические вопросы получения качественного литья.

## 2.6. Опытно-промышленное опробование и разработка технологических рекомендаций

Одним из важнейших факторов производства качественных отливок является стабильное получение графита шаровидной формы. Значительные отклонения количества и формы графитных включений связаны с колебаниями химического состава чугуна, неодинаковым усвоением сфероидизирующих добавок, ослаблением модифицирующего эффекта во времени и другими факторами. В связи с этим, по результатам исследования закономерностей формирования в ЧЮ22 графита шаровидной формы предложен метод оперативного контроля степени сфероидизирующего модифицирования чугуна путем измерения активности кислорода в расплаве после обработки РЗМ. Для этого разработана диаграмма (Рис. 11, а), которая позволяет по величине активности кислорода прогнозировать степень сфероидизации графита.

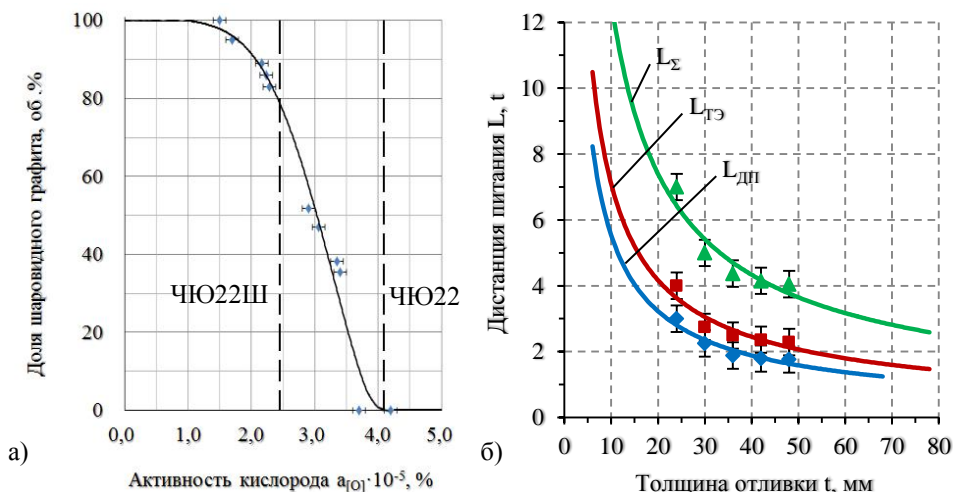


Рис. 11. Диаграммы прогнозирования доли графита шаровидной формы по активности кислорода (а) и определения параметров питания отливок по толщине их стенки (б).

Согласно диаграмме, 100% графита шаровидной формы образуется при активности кислорода в жидком чугуна менее  $1,5 \cdot 10^{-5} \%$ . Для получения чугуна с содержанием графита шаровидной формы не менее 80% активность кислорода должна быть не более  $2,4 \cdot 10^{-5} \%$ .

Другим не менее важным фактором производства качественных отливок является обеспечение полноты питания отливок, для чего необходимо знание таких параметров, как дистанция питания от прибыли, дистанция действия торцевого эффекта и суммарная дистанция эффективного питания. По результатам исследования свойств чугуна ЧЮ22Ш предложен график (Рис. 11, б) для определения по заданной толщине стенки отливаемой отливки, значения всех параметров питания.

Возможность получения качественных отливок из высокопрочного алюминиевого чугуна подтверждена опытно-промышленным опробованием. В производственных условиях методом центробежного литья в металлическую изложницу изготавливали трубу длиной 3 м, диаметром 150 мм, толщиной 15 мм. Из отлитой трубы вырезали темплеты для последующего исследования микроструктуры. С наружной стороны труба контактировала с изложницей и потому затвердевала быстрее, чем с внутренней стороны. Соответственно, количество графита в направлении к оси трубы изменяется по экстремальной зависимости с максимумом находящимся на расстоянии  $\sim 6,25$  мм и равным 14,12%. Твердость чугуна по сечению литой трубы различалась на 50 НВ, но после отжига она выравнивалась до 280 НВ с наружной и 270 НВ с внутренней стороны.

В условиях лабораторной базы кафедры ТЛП из чугуна ЧЮ22Ш изготовили тонкостенную отливку «Коллектор выпускной» (Рис. 12). Необходимость её изготовления из жаростойкого чугуна обусловлена тем, что в настоящее время ведущие автомобильные компании разрабатывают новое поколение форсированных двигателей с рабочей температурой выхлопного газа до  $1050^\circ \text{C}$ . Коллектор изготавливали методом прецизионного литья. Для этого сначала создали 3-х мерную компьютерную модель коллектора (Рис. 12,а) и по ней методом прототипирования изготовили выплавляемую модель. На модели затем сформировали керамическую оболочковую форму и в ней, после прокаливания отливали коллектор (Рис. 12,б).

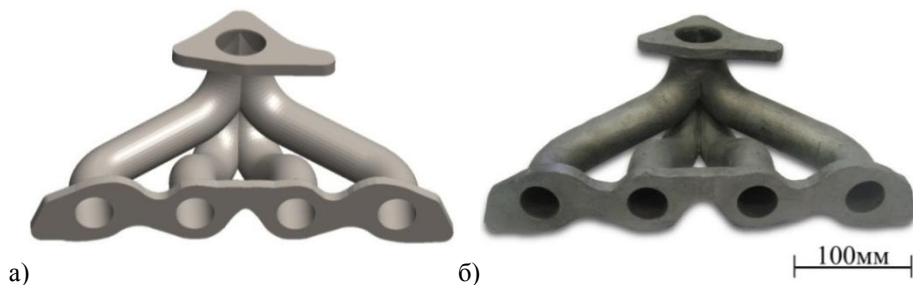


Рис. 12. Коллектор выпускной: трехмерная модель отливки (а) и отливка (б)

Для оценки механических свойств литого чугуна вместе с коллектором отливали бруски в соответствии с требованиями ГОСТ 7769-82. Результаты испытаний показали, что полученный чугун ЧЮ22Ш имеет предел прочности  $\sim 390$  МПа, что на 30% выше нижнего допустимого предела по ГОСТ 7769-82. А твердость чугуна ( $\sim 270$  НВ) находится в пределах регламентируемых значений, но ближе к нижнему пределу. При этом предел текучести чугуна достигает  $\sim 340$  МПа, относительное удлинение равно 0,6 %, а модуль нормальной упругости составляет  $\sim 160$  ГПа.

Отливки имеют типичную структуру чугуна с шаровидным графитом. Графитные включения в основном имеют форму ШГф5 и лишь частично ШГф4. Размер графитных включений находится в пределах 30-60 мкм (ШГд45), а количество и их распределение характеризуются показателями ШГ6 и ШГр3 соответственно.

Таким образом, результаты опытно-промышленного опробования подтверждают данные лабораторных исследований о влиянии условий затвердевания отливок на параметры структуры чугуна ЧЮ22Ш. Применение разработанных технологических рекомендаций позволяет получать качественные отливки как тонкостенные (толщиной 4 мм), так и толстостенные без дефектов усадочного происхождения, гарантированно имеющие требуемую степень сфероидизации графитных включений, высокие и стабильные показатели механических свойств, а также меньшую массу.

### 3. ВЫВОДЫ

1. С использованием компьютерной программы Thermo-Calc построены политермические разрезы тройных Fe-C-Al и четверных систем Fe-C- Si-Al для области составов, соответствующих чугуну ЧЮ22, по которым с учетом экспериментальных данных установлены последовательность, характер и температуры фазовых превращений, протекающих при кристаллизации чугуна;

2. Определены теплофизические свойства высоколегированного алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш в интервале температур  $500 \div 1000^\circ \text{C}$ , согласно которым его удельная теплоемкость с повышением температуры возрастает с 536 до 585 Дж/(кг·К), теплопроводность и температуропроводность при тех же условиях также монотонно возрастают соответственно с 12,6 до 15,5 Вт/(м·К) и от  $4,0 \cdot 10^{-6}$  до  $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

3. Показано, что активность кислорода в высоколегированных алюминиевых чугунах типа ЧЮ22 с повышением температуры увеличивается по экспоненциальной зависимости и при  $1350\text{-}1620^\circ \text{C}$  составляет  $(0,08\text{-}1,91) \cdot 10^{-4} \%$ , что на два порядка ниже, чем в нелегированных чугунах.

4. Установлено, что зависимость активности кислорода от расхода РЗМ в алюминиевых чугунах, в отличие от аналогичной зависимости в нелегированных чугунах, носит экстремальный характер с минимумом при 0,13% РЗМ, при этом

максимальная степень сфероидизации графитных включений достигается в области минимальных значений активности кислорода  $(2,3-2,5) \cdot 10^{-5} \%$ ;

5. Разработана методика определения параметров питания отливки на лепестковых пробах с выявлением зоны осевой пористости методом измерения твердости и показано, что зона пористости в отливках из ЧЮ22Ш выявляется только при толщинах стенки свыше 24 мм, которая возрастает с увеличением толщины отливки;

6. Выявлены количественные зависимости параметров питания отливок (дистанция действия прибыли  $L_{ДП}$ , и дистанция торцевого эффекта  $L_{ТЭ}$  и суммарной эффективной дистанции питания  $L_{\Sigma}$ ) от их толщины  $t$  в виде эмпирических уравнений вида  $L=k \cdot t^x$ , применение которых позволяет обеспечить получение отливок без дефектов усадочного происхождения при минимальном расходе металла на прибыли;

7. Установлено распределение объемной доли графита по сечению отливок в зависимости от их толщины и условий формирования (в песчаной или металлической формах), что позволяет прогнозировать структуру получаемых отливок и с учетом этого выбирать технологические варианты их изготовления;

8. Разработаны технологические рекомендации для получения из чугуна ЧЮ22Ш качественных отливок, которые включают: а) определение оптимального расхода РЗМ; б) прогнозирование степени сфероидизации графита измерением активности кислорода в модифицированном расплаве; в) выбор параметров питания отливок в зависимости от их толщины и места установки прибыли; г) выбор технологического варианта получения отливок в песчаной или металлической формах на основе прогнозирования параметров их структуры;

9. Проведено опытно-промышленное опробование изготовления прецизионным литьем тонкостенной (4 мм) отливки «Коллектор выпускной» и более толстостенной (15 мм) центробежно-литой трубы и показано, что применение результатов исследования позволяет получать отливки с требуемой структурой и высокими показателями механических свойств.



## **Основные результаты работы представлены в публикациях:**

1. Тен Э.Б., Дрокин А.С. Литейные свойства и параметры структуры высоколегированных алюминиевых чугунов // Прогрессивные литейные технологии. Труды 4-й международной научно-практической конференции М.: МИСиС. – 2007. – С.143-144.
2. Тен Э.Б., Дрокин А.С., Трефилова Н. // 64-и дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции М.: МИСиС. – 2008. – С.203-204.
3. Дрокин А.С., Белов М.В., Тен Э.Б. Изготовление литой детали «Коллектор выпускной» с повышенными эксплуатационными и потребительскими свойствами // Прогрессивные литейные технологии. Труды 5-й международной научно-практической конференции М.: МИСиС. – 2009. – С.152-154.
4. Тен Э.Б., Дрокин А.С., Аносов Д.А. Исследование параметров питания отливок из высоколегированных алюминиевых чугунов // Прогрессивные литейные технологии. Труды 5-й международной научно-практической конференции М.: МИСиС. – 2009. – С.154-157.
5. Тен Э.Б., Дрокин А.С., Аносов Д.А. Разработка проб для определения параметров питания отливок // Прогрессивные литейные технологии. Труды 5-й международной научно-практической конференции М.: МИСиС. – 2009. – С.217-221.
6. Дрокин А.С., Тен Э.Б., Белов М.В. Получение из чугуна ЧЮ22Ш прецизионного тонкостенного литья // Литейщик России. – 2010, № 4. – С.27-30.
7. Тен Э.Б., Дрокин А.С., Аносов Д.А. Разработка технологической пробы и методики определения параметров питания отливок // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2010, № 9. – С. 57-60.

