

Коваль О. С.,  
Дёмин Д. А.,  
Костик В. О.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ ПРОЦЕССА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧУГУНА ДЛЯ ОТЛИВОК АВТОМОБИЛЬНОЙ И ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

*В статье описаны результаты технологического аудита процесса модифицирования чугуна двумя типами модификаторов — ферросилицием и Si-Вa лигатурой. По данным экспериментально-промышленных исследований, имеющих целью выявление возможных резервов ресурсосбережения за счет обоснованного выбора наиболее эффективного модификатора в зависимости от номенклатуры отливок в конкретном производстве, были установлены условия применения каждого из исследуемых модификаторов.*

**Ключевые слова:** микроструктура, модификатор, серый чугун, оценка структур, эффективность применения.

### 1. Введение

Производителями ферросплавов на современном рынке представлено огромное количество модификаторов для чугунов практически всей номенклатуры — от обычного серого до высокопрочного. Зачастую, при таких широких возможностях выбора, потребители испытывают определенные сложности в ответе на вопрос — на каком же из модификаторов остановить свой выбор. Ведь помимо основных преимуществ, декларируемых производителями, которые могут склонить чашу весов в пользу того или иного варианта, в обязательном порядке должен учитываться фактор цены модификатора. Ситуация усугубляется еще и тем, что в специальной научной литературе мало освещено реальных результатов применения того или иного типа модификатора. Часто такие результаты оказываются не объективными в силу того, что они приводятся «внедренческими» подразделениям предприятий-производителей модификаторов. Используя такой опыт в условиях конкретного промышленного производства, имеющего специфические особенности, отличающиеся от тех, для которых удачный опыт применения имел место, может оказаться, что данный модификатор в таких условиях либо не обеспечивает декларируемой эффективности, либо его использование оказывается слишком «дорогим удовольствием». Поэтому актуальными являются исследования, направленные на выявление «границ применимости» того или иного типа модификатора на основе неких компромиссных критериев эффективности, учитывающих в обязательном порядке экономическую целесообразность их использования для конкретных условий производства.

### 2. Анализ существующих данных и постановка проблемы

Выбор типа модификатора и разработка технологии модифицирования должны рассматриваться в контексте решения вопросов управления качеством на производстве [1–3]. Среди наиболее представляемых на рынке модификаторов могут быть отмечены, например, модификаторы Superseed® Extra Inoculant [4], Reseed®

Inoculant [5] и SMZ® Inoculant [6]. Авторами данных работ отмечено, в частности, следующее.

Модификатор Superseed® Extra Inoculant максимально снижает отбел в отливках из серого чугуна, способствует формированию равномерно распределенного графита, нейтрализует вредное воздействие азота, способствует образованию мелких включений графита, уменьшая выкрашивание графита в процессе механической обработки. Такой эффект модификатора объясняется авторами наличием в его составе циркония и стронция, улучшающих зародышеобразование при минимальной степени переохлаждения и снижающих риск формирования переохлажденного графита и феррита.

Модификатор Reseed® Inoculant предназначен для высокопрочных и серых чугунов с низким содержанием серы и способствует, в частности, формированию глобулярного графита с хорошей степенью шаровидности в толстых сечениях отливок из высокопрочного чугуна и предотвращению образования микроусадочной пористости в отливках. Такой эффект обеспечивается наличием в составе модификатора сбалансированного количества активных элементов — кальция и церия.

Модификатор SMZ® Inoculant может быть использован для графитизирующего модифицирования серого чугуна и чугуна с вермикулярным графитом и подходит для позднего модифицирования в струе металла (MSI процесс), стабилизацию отклонений по химическому составу и регулирования содержания азота в чугуне. Такой эффект, как отмечают авторы работы [6], обеспечивается благодаря тщательно сбалансированному количеству кальция и алюминия, обеспечивающего максимальный контроль за отбелом.

Таким образом, даже на основании небольшой выборки литературных источников, посвященных вопросам применения наиболее современных модификаторов, может быть сформулирована основная проблема, которая должна решаться исследованиями в области обоснованного выбора модификаторов. И эта проблема связана со сложностью выбора модификатора на основе компромиссных критериев, учитывающих, с одной стороны, необходимость повышения качества модифицирования, а с другой — минимизации затрат предприя-

тия, связанных с приобретением или нерациональным использованием дорогостоящих модификаторов. Ведь управление качеством чугуна предполагает и применение модификаторов, и комплексное легирование ферросплавами, содержащими титан, медь, ванадий и т. д. Стабильность химического состава таких ферросплавов и дороговизна их получения, представляющая собой сложные энергоёмкие технологические процессы [7–9], должны обязательно учитываться при рассмотрении вопросов, связанных с управлением качеством чугуна для отливок машиностроительного назначения.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью исследования являлось проведение сравнительной оценки эффективности применения двух типов модификаторов, на основе металлографического анализа микроструктур чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 отливок с разной толщиной стенки, и разработка рекомендаций по обоснованному выбору того или иного типа исследуемого модификатора для реальных условий конкретного промышленного производства. Для достижения этой цели ставились следующие задачи:

- проведение экспериментально-промышленных исследований в условиях реального промышленного производства,
- изготовление шлифов клиновых образцов чугуна, залитого с использованием исследуемых типов модификаторов,
- проведение металлографического анализа микроструктуры чугуна, модифицированного исследуемыми типами модификаторов, на поверхности и в осевой части образцов, в точках плана полного факторного эксперимента — суть координат точек на плоскости клиновых образцов.

### 4. Технологический аудит процесса плавки и модифицирования

Аудит проводился в чугунолитейном цехе ОАО «Кременчугский завод дорожных машин» (ОАО «Кредмаш»), специализирующемся на изготовлении отливок для автомобильной и дорожной техники, из чугуна марок СЧ20 — СЧ30 ГОСТ 1412-85, специальных легированных и износостойких чугунов. Плавка осуществлялась в индукционной тигельной печи с кислой футеровкой модели ИСТ1/0.8-М5 в соответствии с технологическими инструкциями на плавку, действующими в цехе. Подбор шихты осуществлялся в соответствии с установленным на предприятии нормами расходов. Управление режимом плавки осуществлялось с пульта управления. Контроль правильности ведения процесса плавки, состояния тигля и изоляции индуктора осуществлялось по показаниям приборов щита управления. Подгрузка предварительно подогретых шихтовых материалов выполнялась только после осаждения шихты в тигле (расплавления шихты начинается в нижней части через 7–10 мин с момента начала плавки). При интенсивном перемешивании расплава, сопровождаемым выбросом брызг металла, напряжение на индукторе уменьшалась. Для наведения шлака выполнялась присадка сухого песка, для получения шлака — присадка извести или известняка фракцией до 30 мм. Проверка соответствия химического состава и температуры заданным осуществлялась

после полного расплавления путем и перегрева расплава в течение 5 минут, последующего отключения печи и выдержки с целью более полного протекания окислительно-восстановительных процессов в расплаве.

Температура чугуна перед модифицированием находилась в диапазоне 1400–1450 °С. Обработка расплава модификаторами осуществлялась в ковше фракцией 1–10 мм в количестве 0,3 % от массы жидкого металла (3 кг на 1 т) после заполнения ковша на 100–150 мм. Модификаторы применялись в форме пластин с толщиной 0,5–3 мм и максимальными размерами до 50 мм, по технологии «чипс-модифицирования». Обоснованием к выбору типа модификатора предприятием являлись следующие теоретические соображения. Известно, что графитизирующее модифицирование чугуна позволяет дополнительно создавать в нем зародыши графитовых включений, а также стимулировать их рост и равномерно распределять по объему чугуна. Это обеспечивается за счет создания в жидком чугуне концентрационных неоднородностей по кремнию. В центры областей с повышенным содержанием кремния в модификаторе содержатся поверхностно-активные или зародышеобразующие элементы, которые обеспечивают правильное и равномерное формирование графита. Однако в используемом традиционном ферросилиции, как простом ферросплаве, практически отсутствуют такие высокоактивные элементы как барий, стронций, цирконий и другие РЗМ, а, например, содержание кальция достигает только около 0,5 %. Следствием этого является то, что эффект модифицирования проявляется недостаточно эффективно. Поэтому для полноценного модифицирования расплава чугуна необходимо либо существенно увеличивать навеску модификатора, либо применять новые графитизирующие модификаторы, уже содержащие в своем составе необходимое количество активных щелочно- или редкоземельных металлов. Это позволяет получать необходимые характеристики микроструктуры и свойств чугуна в отливках, используя меньшее количество модификатора. Одним из таких модификаторов является Si-Ba лигатура — модификатор ферросиликобарий (ФС65Ba4), который может быть отнесен к относительно новому поколению графитизирующих модификаторов. Химический состав модификатора приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав модификатора ФС65Ba4

Элементы	Химический состав				
	Si	Ba	Mn	Al	Fe
Содержание, %	62...70	2,0...4,0	макс. 0,4	макс. 3,0	остаток

Барий в модификаторе на основе ферросилиция усиливает и пролонгирует во времени процесс образования и роста графитовых включений, что позволяет снизить склонность чугуна к отбеливанию. Повышение действия модификатора достигается путем увеличения его суммарной площади поверхности за счет уменьшения размера его фракции.

### 5. Технология металлографического анализа и его результаты

Для изучения микроструктуры образцов и их влияния на структуру чугуна СЧ20 ГОСТ 1412-85, проводился

металлографический анализ, которому предшествовало изготовление шлифов, травление и фотографирование макроструктуры от поверхности контакта к сердцевине образца. Для выявления микроструктуры изготавливались шлифы на клиновых образцах из чугуна, модифицированного ферросилицием (ФС75) и ФС65Ba4. Поверхность образца, подлежащая металлографическому анализу, обрабатывалась на абразивном круге, затем шлифовались в несколько этапов на абразивном бумаге с разным размером зерна. При переходах под углом 90° выполнялось изменение направления обработки. После этого переходили к шлифовке на полировальном станке с помощью мелкозернистой пасты (паста ГОИ). Далее выполнялась полировка на полировальном станке для придания поверхности зеркального блеска. Целью травления было выявления участков шлифа, подлежащих детальному изучению с помощью металлографического анализа. Травление проводилось равномерно, с последующей промывкой под проточной водой и высушиванием потоком горячего воздуха. Исследование структуры образцов проводили методом оптической микроскопии и дальнейшим сопоставлением фотографий образцов с фотографиями-эталонами, описанными в ГОСТ 3443-87.

**5.1. Результаты исследования образцов чугуна до травления.** Исследование проводилось для образцов из чугуна СЧ20 ГОСТ 1412-85, модифицированного ФС75 (исследование образца № 1). Пример результата приведен на рис. 1.



Рис. 1. Микроструктура СЧ20 ГОСТ 1412-85, модифицированного ФС75, × 150

После исследования микроструктуры структуры № 1 выявлено, что металлической основой является перлит пластинчатый (до 96 % перлита — П96) и феррит (до 4 % феррита — Ф4), согласно ГОСТ 3443-87. Графит пластинчатый, прямолинейный, форма ПГф1 — структура чугуна с равномерно распределенным пластинчатым графитом прямолинейной формы длиной 60—120 мкм. Фосфидная эвтектика тройная, распределение включений равномерное ПГр1, у поверхности наблюдается междендритная пластинчатая ориентация графита ПГр9. Длина включений ПГд 90—45, количество включений ПГб. Тройная мелкозернистая фосфоридная эвтектика ФЕЗ распределена равномерно ФЕ1 (псевдодвойная — фосфорид и феррит). Площадь включения фосфидной эвтектики ~ФЭП 2000 (рис. 2).

После исследования микроструктуры на образце № 2 из чугуна, модифицированного ФС65Ba4, выявлено, что металлической основой является перлит пластинчатый (до 92 % перлита) и феррит (до 8 % феррита), согласно ГОСТ 3443-87 (пример представлен на рис. 3).

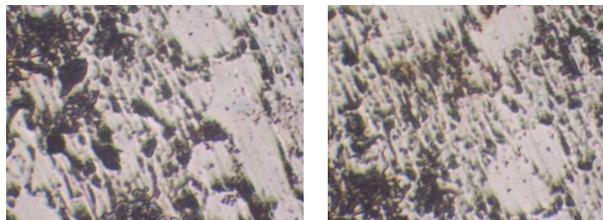


Рис. 2. Структура графита в тонком сечении образца, × 150: а — периферия; б — осевая зона

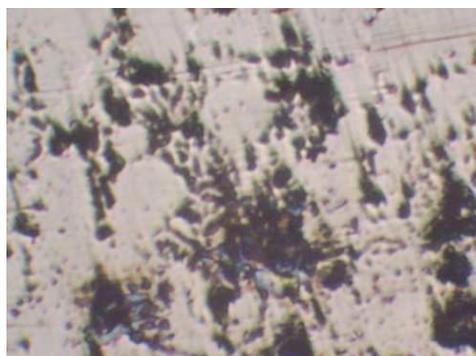


Рис. 3. Микроструктура СЧ20 ГОСТ 1412-85, модифицированного ФС65Ba4, × 150

Графит пластинчатой завихренной формы ПГф2, распределение розеточное, длина включений ПГД90. Наблюдаются участки междендритного пластинчатого и точечного распределения включений графита ПГр9, ПГр8. количество включений ПГ10. Тройная мелкозернистая фосфидная эвтектика распределена равномерно, площадь включений < ФЭП 2000 (рис. 4, 5).

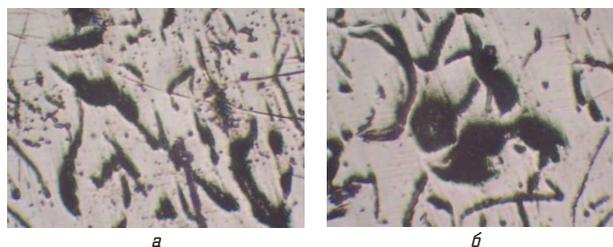


Рис. 4. Структура графита в толстом сечении образца, × 150: а — периферия; б — осевая зона

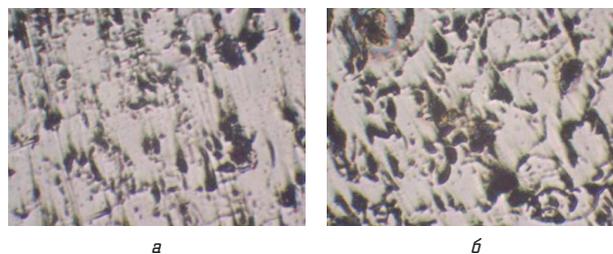


Рис. 5. Структура графита в тонкой части, × 150: а — периферия; б — осевая зона

**5.2. Результаты исследования образцов чугуна после травления.** После исследования микроструктуры на образце № 1 (чугун модифицирован ФС75), выявлено, что металлической основой является перлит пластинчатый и сорбит. Графит пластинчатый завихренной формы ПГф2, распределение включений чугуна ПГр7, длина включений ПГд90. Ближе к поверхности наблюдается

междендритное распределение пластинчатых включений графита ПГр9, длина включений ПГд25, количество включений графита ПГ6. Тройная мелкозернистая фосфидная эвтектика распределена в виде разорванной сетки ФЭр650. Площадь включений фосфоритной эвтектики ФЭП 2000 ГОСТ 3443-87 (рис. 6).

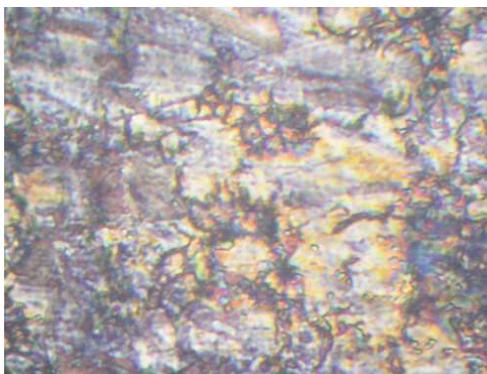


Рис. 6. Пример микроструктуры СЧ20 ГОСТ1412-85, модифицированного ФС75, × 150

После исследования микроструктуры образца № 2 (чугун модифицирован ФС65Ба4) было установлено, что металлическая основа — перлит (до 96 % перлита) и феррит (до 4 % феррита). Графит пластинчатый завихрения формы ПГф2, имеются розеточные распределения ПГр7, длина включений ПГд90. Наблюдаются участки междендритного пластинчатого и точечного распределения включений графита ПГр9, ПГр8. Количество включений ПГ10. Фосфидная эвтектика — тройная мелкозернистая, распределение равномерное ФЭП1, площадь включений ФЭП 2000 (рис. 7).



Рис. 7. Пример микроструктуры СЧ20 ГОСТ 1412-85, модифицированного ФС65Ба4, × 150

Как видно из полученных результатов, однозначную оценку эффективности сравниваемых модификаторов провести сложно. Причиной этого является субъективизм оценки параметров микроструктуры и зависимость результатов от координаты на поверхности образца, в которой проводится металлографический анализ. Для иллюстрации этого обстоятельства на рис. 8, 9 показаны точки на поверхности образца, в которых проводился металлографический анализ, и несколько вариантов микроструктур, снятых в соответствующих точках образца из чугуна, модифицированного ФС75.

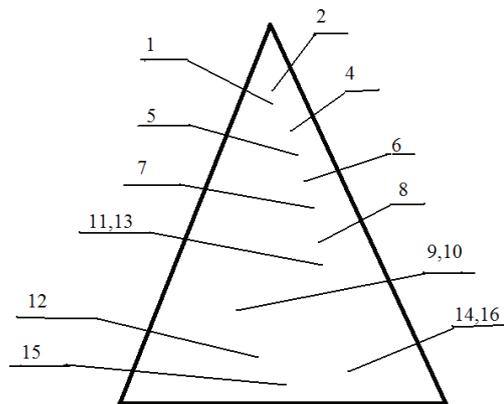


Рис. 8. Поверхность образца и точки проведения металлографического анализа образца из чугуна, модифицированного ФС75

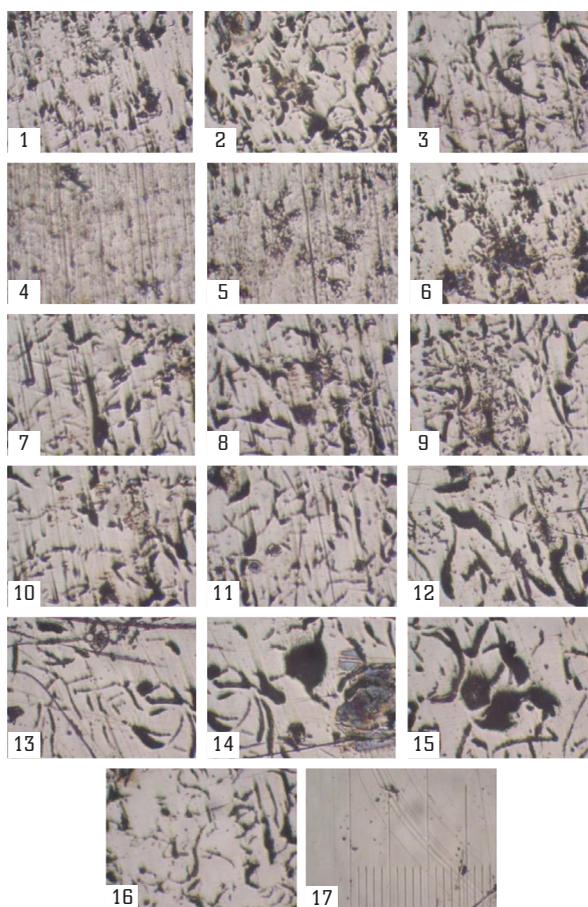


Рис. 9. Микроструктуры, полученные в точках проведения анализа на образце из чугуна, модифицированного ФС75

На рис. 10, 11 показаны точки на поверхности образца, в которых проводился металлографический анализ, и несколько вариантов микроструктур, снятых в соответствующих точках образца из чугуна, модифицированного ФС65Ба4.

Для оценки эффективности модифицирования сравниваемыми модификаторами в качестве критерия выбран размер графита в микроструктуре. Обработка результатов исследования микроструктуры позволила построить гистограммы распределения размера графита (рис. 12–15).

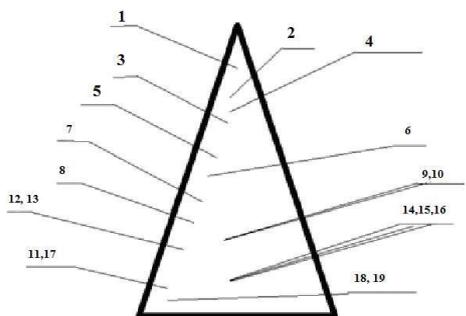


Рис. 10. Поверхность образца и точки проведения (1—19) металлографического анализа образца из чугуна, модифицированного ФС65Ba4

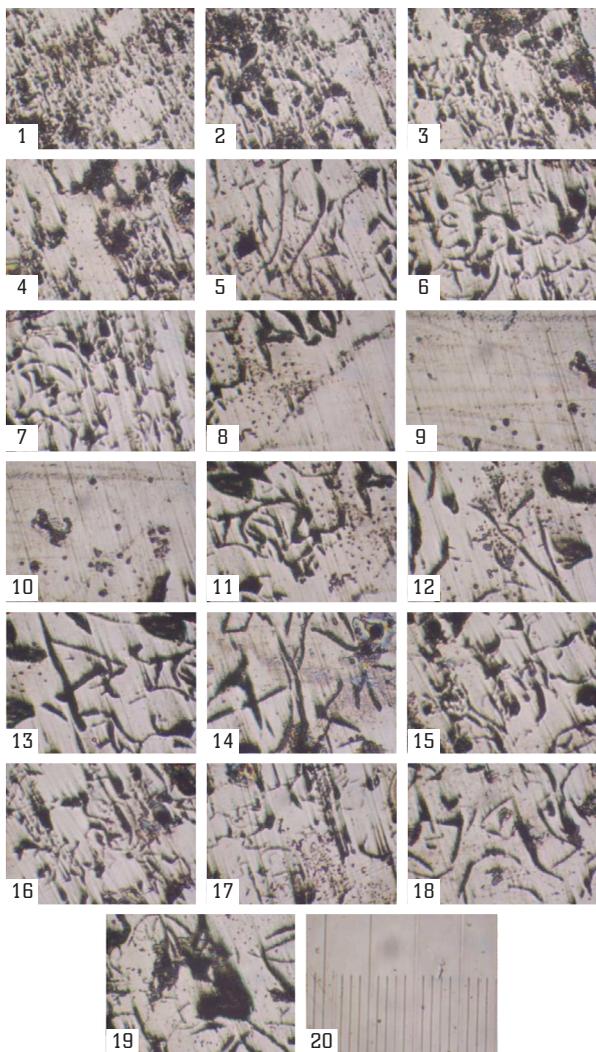


Рис. 11. Микроструктуры, полученные в точках проведения анализа на образце из чугуна, модифицированного ФС75

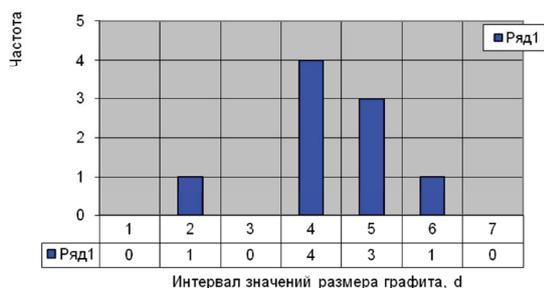


Рис. 12. Зависимость частоты определенного размера графита от интервала его значений в чугуна, модифицированном ФС75 (осевая зона образца)

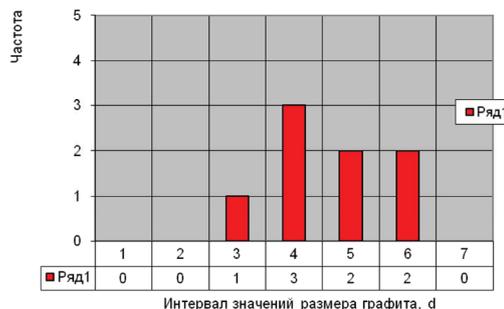


Рис. 13. Зависимость частоты определенного размера графита от интервала его значений в чугуна, модифицированном ФС75 (периферия образца)

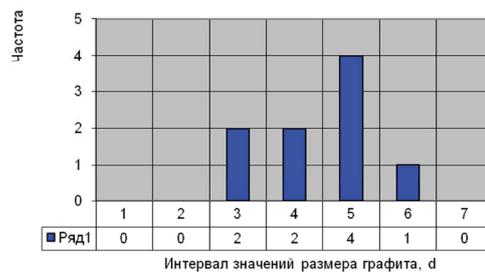


Рис. 14. Зависимость частоты определенного размера графита от интервала его значений в чугуна, модифицированном ФС65Ba4 (осевая зона образца)



Рис. 15. Зависимость частоты определенного размера графита от интервала его значений в чугуна, модифицированном ФС65Ba4 (периферия образца)

Проверка гипотезы о соответствии закона распределения размера графита в осевой зоне и на периферии образцов из чугуна, модифицированного обоими типами модификаторов, нормальному закону распределения, позволила сделать вывод о приближении реального закона распределения к нормальному. Полученные гистограммы, следовательно, могут быть использованы для проведения сравнительной оценки эффективности модифицирования чугуна путем наложения гистограмм друг на друга и последующего определения величины смещения математического ожидания размера графита для чугуна, модифицированного ФС75 и ФС65Ba4, друг относительно друга. Величина полученной разности и позволяет определить, какой из модификаторов обеспечивает получение графита меньшего размера (разумеется, при одинаковом химическом составе модифицируемого чугуна) и связанное с этим улучшение его механических свойств. Альтернативным вариантом является построение математической модели, описывающей распределение размеров графита на плоскости клинового образца. Фактически такая модель позволяет выявить размер графита в стенках отливки разной толщины (рис. 8, 10). Поэтому искомая математическая модель позволила бы определить,

какому из модификаторов следует отдать предпочтение для условий конкретного производства. Например, если окажется, что в цехе изготавливают отливки с минимальной толщиной стенки  $R_{min}$ , и ФС75 обеспечивает при модифицировании чугуна для этих отливок получение таких же результатов, как и ФС65Ba4, именно ему и следует отдавать предпочтение, а не переплачивать за более дорогостоящий ФС65Ba4. Применение последнего же будет обосновано лишь в том случае, если толщина стенок отливок меньше той  $R_{min}$ , для которой применение модификатора ФС75 обеспечивает качественные показатели микроструктуры (в том числе и по размеру графита). Поэтому перспективой дальнейших исследований в контексте сформулированной цели исследования является именно построение адекватной математической модели, описывающей распределение размеров графита на плоскости клинового образца.

## 6. Выводы

Приведенные результаты исследований позволяют сделать ряд важных выводов, касающихся обоснований при выборе модификаторов.

1. Выбору модификатора в конкретных промышленных условиях должно предшествовать экспериментально-промышленное исследование, целью которого является анализ микроструктуры чугуна, полученного после модифицирования контрольной партией модификаторов. При этом должна определяться микроструктура, как в осевой зоне, так и на периферии шлифа клинового образца.

2. Результаты анализа микроструктуры в осевой зоне и на периферии образца и «увязка» их с минимальной толщиной стенки отливки, изготавливаемой в конкретных промышленных условиях, позволяют оценить, какой из сравниваемых модификаторов обеспечивает достаточные условия по качеству структурообразования.

3. Сравнительная оценка модификаторов ФС75 и ФС65Ba4 показывает, что для чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 при условии, что минимальная толщина стенки отливки находится в пределах 10–12 мм, достаточно применение ферросилиция ФС75 — это обеспечивает приемлемые показатели микроструктуры и отсутствие отбела в пределах такой толщины стенки отливки. Если данное условие не выполняется, необходимо использовать ФС65Ba4.

4. По результатам металлографического анализа для каждого из параметров микроструктуры, подлежащего количественной оценке, и каждого из сравниваемых модификаторов, должны строиться гистограммы, описывающие распределение количественной характеристики данного параметра для сравниваемых модификаторов. Наложением полученных при этом гистограмм друг на друга может быть выявлено, какой из модификаторов в конкретных условиях предпочтительнее — количественной оценкой эффективности модифицирования по выбранному параметру микроструктуры является разность математических ожиданий этого параметра микроструктуры для сравниваемых модификаторов.

## Литература

- Химичева, А. И. Методология оценки конкурентоспособности наукоемкой продукции [Текст] / А. И. Химичева, Аль Зарей Аммар, А. С. Зенкин // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2006. — № 4/3(22). — С. 69–72.

- Зенкин, А. С. Оценка степени наукоемкости продукции на основе кластерного анализа [Текст] / А. С. Зенкин, А. И. Химичева, В. А. Годик, И. Т. Пухлик, П. В. Иванов // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2010. — № 4/3(46). — С. 72–74.
- Зенкин, А. С. Математическая модель процесса поиска решения в системе менеджмента качества предприятия [Текст] / А. С. Зенкин, В. А. Годик, П. В. Иванов, А. И. Химичева // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2010. — № 6/4(48). — С. 46–49.
- Elkem ASA Research. Модификатор Superseed®Extra Inoculant [Текст] // ИТБ «Литве Украины». — 2003. — № 12(40).
- Elkem ASA Research. Модификатор Reseed®Inoculant [Текст] // ИТБ «Литве Украины». — 2004. — № 7(47).
- Elkem ASA Research. Модификатор SMZ®Inoculant [Текст] // ИТБ «Литве Украины». — 2004. — № 5(45).
- Гулько, И. М. Анализ техногенных источников и технологических схем производства пентаоксида ванадия [Текст] / И. М. Гулько, И. Ф. Червоный, С. Г. Егоров // Металургія. — Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2011. — Вип. 25. — С. 59–67.
- Криворучко, Н. П. Температурный режим поточной линии электролиза магния титанового производства [Текст] / Н. П. Криворучко, Д. В. Бачурский, И. Ф. Червоный, Д. М. Хабров, Е. А. Матвеев, Е. П. Щербань // Металургія. — 2012. — Вип. № 1(26). — С. 58–61.
- Червоный, И. Ф. Порционно-периодическая подача магния в процессе магнетермического восстановления тетраоксида титана [Текст] / И. Ф. Червоный, Д. А. Листопад, В. И. Иващенко и др. // Металургія. — Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2009. — Вип. 20. — С. 63–70.

## ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ПРОЦЕСУ МОДИФІКУВАННЯ ЧАВУНУ ДЛЯ ВИЛИВКІВ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТА ДОРОЖНЬОЇ ТЕХНІКИ

У статті описані результати технологічного аудиту процесу модифікування чавуну двома типами модифікаторів — феросиліцієм та Si-Ba лігатурою. По даних експериментально-промислових досліджень, що мали за мету визначити можливі резерви ресурсозбереження за рахунок об'єднаного вибору найбільш ефективного модифікатора відповідно до номенклатури виливків в конкретному виробництві, було встановлено умови використання кожного з досліджуваних модифікаторів.

**Ключові слова:** микроструктура, модифікатор, сірий чавун, оцінка структур, ефективність застосування.

*Коваль Оксана Сергіївна, аспірант, кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: koval.oxana@yandex.ru.*

*Демин Дмитрій Александрович, доктор технічних наук, професор, кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: nauka@jet.com.ua.*

*Костик Вікторія Олегівна, кандидат технічних наук, професор, кафедра матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail vikakostik@yandex.ru.*

*Коваль Оксана Сергіївна, аспірант, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Демин Дмитро Олександрович, доктор технічних наук, професор, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Костик Вікторія Олегівна, кандидат технічних наук, професор, кафедра матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Koval Oksana, graduate student of foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: koval.oxana@yandex.ru.*

*Demin Dmytro, doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: nauka@jet.com.ua.*

*Kostik Viktoriia, candidate of technical sciences, docent, Department of materials science, National Technical University «The Kharkov State Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail vikakostik@yandex.ru*