

УДК 621.746.019

М.В. Александров¹, Д.Г. Чистяков²**ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ В ДЕТАЛЯХ СТЕКЛОФОРМ ИЗ ЧУГУНОВ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ГРАФИТА**Госуниверситет-УНПК, Орел¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Выполнен анализ особенностей эксплуатации деталей стеклоформ и определены факторы, влияющие на их стойкость. Описано комплексное влияние скорости затвердевания и способа модифицирования расплава чугуна на процесс графитообразования. Показана возможность управления структурой чугуна и его свойствами, в частности, величиной предела прочности и теплопроводностью посредством изменения интенсивности теплообмена между отливкой и формой. Получена градиентная структура чугуна, обеспечивающая высокую термостойкость деталей стеклоформ.

Ключевые слова: чугун, отливка, стеклоформа, модифицирование, скорость затвердевания, графит компактной формы.

Введение

Одним из важнейших искусственных материалов, прочно вошедшим в технические устройства и агрегаты машиностроения, является стекло. Основным технологическим свойством, отличающим его от других материалов, является способность поддаваться самым разнообразным способам формования без нарушения целостности изготавливаемого изделия. При этом самым распространенным способом изготовления полых стеклянных тар, за счет своей производительности и широкого спектра возможных вариантов изготавливаемых изделий, является выдувание. Этот способ формования является специфичным для стекла, так как базируется на использовании зависимости вязкости и поверхностного натяжения стекломассы от ее температуры. При формировании стеклоизделий необходимо постоянство устанавливаемого температурного режима не только самой заготовки, но и формооснастки.

Формооснастка – это совокупность деталей, характеризующих формовой комплект для литья стеклоизделий, обеспечивающая создание стеклоупаковки от капли расплавленного стекла (с температурой до 1200°C) до конкретной бутылки, банки, флакона и т.п.

В условиях перехода стеклозаводов на новые высокопроизводительные секционные стеклоавтоматы резко ужесточились требования к минимальному количеству съёмов стеклоизделий в пересчете на один формокомплект, которые составляют не менее 1 млн штук. При этом на данный момент стойкость деталей стеклоформ, зависящая от режима работы стекловыдувных автоматов и скорости попадания расплавленного стекла во внутреннюю полость формокомплекта, не превышает 0,55 млн стеклоизделий с одной формы, что не удовлетворяет современным требованиям производства.

Традиционным материалом для деталей стеклоформ является чугун, обладающий оптимальным сочетанием механических, теплофизических, технологических и литейных свойств. В качестве материала для черновых форм (металлоконструкций, в которых выдувается стеклоизделие предварительной конфигурации) применяют серые чугуны с пластинчатым графитом (СЧПГ), обладающие высокой теплопроводностью и легко поддающиеся упрочняющей наплавке. Чистовые формы (металлоконструкции, в которых выдувается изделие потребительских размеров и формы) изготавливают из чугунов с вермикулярным (ЧВГ) и/или шаровидным (ЧШГ) графитом, ввиду их высокой прочности и циклической вязкости.

В процессе эксплуатации в стеклоформе возникают значительные термические напряжения вследствие чередующихся резких нагревов (при соприкосновении стекломассы с металлоформой) и охлаждений. Согласно [1] средняя температура поверхности стекломассы при выдувании в чистовой форме узкогорлой тары составляет 891°C , тары с широким горлом – 926°C . При этом время процесса выдувания составляет $0,6...0,8$ с.

По данным стекольных заводов (ОАО "Березичский стекольный завод", Калужская обл.; ООО "Каменский стеклотарный завод", Ростовская обл.; ООО "ЧСЗ-Липецк", Липецкая обл.) температура внутренней поверхности стеклоформы достигает $550...750^{\circ}\text{C}$, в то время как её наружная поверхность нагревается лишь до $230...280^{\circ}\text{C}$. В результате такого перепада температур возникают внутренние напряжения, приводящие к короблению деталей стеклоформ и, в конечном счете, снятию с производственной линии (их ремонтонепригодности) [2, 3].

Наиболее нагруженным в ходе эксплуатации стеклоформ является поверхностный ("рабочий") слой толщиной от 1 до 10 мм, который, во-первых, испытывает значительный тепловой удар при выдуве стеклоизделия, и, во-вторых, подвержен механическому, термическому и химическому воздействию стекломассы, что вызывает сложное напряженно-деформированное состояние стеклоформы. В этом слое наблюдается максимальный температурный перепад по толщине стенки детали, а интенсивность теплового удара может достигать $250^{\circ}\text{C}/(\text{мм}\cdot\text{с})$. За счет этого происходит накопление пластической деформации и истощение запаса пластичности материала [4].

Кроме знакопеременных термических напряжений в материале формы могут протекать сложные структурные изменения и химические процессы различной направленности. При нагревании чугуна происходит его графитизация (при температуре выше 480°C) и окисление (при температуре выше 620°C), протекающие с необратимым увеличением объема детали. Суммарное расширение материала стеклоформы в итоге определяется величиной термического расширения, газонасыщением и степенью графитизации чугуна. Из-за растяжения, возникающего в металле, основной материал детали ослабевает вблизи границ графитовых включений и дает возможность проникнуть внутрь кислороду [5]. Интенсивность обезуглероживания матрицы зависит от теплового нагружения металлоформы. В местах частичного или полного выгорания графита создаются благоприятные условия для образования зон окисления разной плотности и глубины залегания. Глубина распространения окислительных процессов зависит во многом от природы формирования и наличия несплошностей в чугуне. Присутствие на рабочей поверхности стеклоформ пористости также оказывает отрицательное влияние на их технологические свойства, интенсифицируя процессы окисления и трещинообразования. Для получения беспористой рабочей поверхности применяют следующие способы воздействия на корковый слой отливки [6]:

- добавляют в облицовочные смеси и противопопригарные краски материалы, которые после заливки жидкого чугуна расплавляются и способствуют спеканию поверхности песчаной формы, обеспечивая направленный газовый поток [7];
- остекляют поверхность литейной формы, изготовленной из песчаной жидкостекольной смеси или покрытой специальным составом [8]. Остекление проводят нагревом поверхности плазменной или газовой горелкой до установления устойчивого высоко-температурного соединения дикремниевой кислоты, которое и переводит поверхность формовочной смеси в твердое остекленное состояние.

Все эти меры, так или иначе, способствуют ориентации тепловых потоков при кристаллизации отливки, что обуславливает формирование требуемой определенной структуры литья. Однако наиболее эффективным и технологически оправданным методом обеспечения направленного затвердевания чугунной отливки является применение внешних металлических холодильников [5].

Материалы деталей стеклоформ, непосредственно соприкасающиеся со стекломассой,

должны иметь высокие механические и технологические свойств на стадии изготовления из них металлоизделия, а также обладать повышенной теплопроводностью, ростоустойчивостью и окалиностойкостью, иметь минимальную диффузию отдельных элементов при циклическом воздействии температур, противостоять термической усталости и коррозии, в условиях высоких температур на стадии процесса эксплуатации металлоформ.

Первым показателем, определяющим стойкость стеклоформ, является микроструктура чугуна на глубине 5...15 мм, которая соответствует зоне “рабочего” слоя формы после механической обработки. Необходимо получение на рабочей поверхности стеклоформ очень мелкого и однородного графита с целью улучшения обрабатываемости, полировки поверхности и повышения трещиностойкости металлоформ при циклическом воздействии высоких температур [9, 10].

Другим показателем, определяющим теплопроводность и отсутствие коробления форм, является микроструктура чугуна на глубине 25...40 мм. Основным требованием, предъявляемым к структуре слоев на таких глубинах в отливках для деталей стеклоформ, является наличие крупных включений пластинчатого и/или вермикулярного (в некоторых случаях шаровидного) графита, обеспечивающих высокую теплопроводность и соответственно пониженные термические напряжения в эксплуатируемых деталях [11]. Теплопроводность повышается также с увеличением количества феррита в структуре матрицы чугуна, что обуславливает применение для деталей такого типа именно ферритной металлической основы [10, 12].

Возможность получения подобной градиентной¹ структуры зависит, в первую очередь, от технологии изготовления отливок стеклоформ. Поэтому основная задача обеспечения качества и повышения эксплуатационной стойкости стеклоформ сводится к разработке технологических способов управления процессом формирования микроструктуры чугуна, обеспечивающей стабильное получение требуемых структурных параметров и механических свойств отливки.

Постановка задачи

Интенсивность отвода тепла от отливки в период ее затвердевания обуславливает, при постоянстве других прочих условий, скорость перемещения по ее сечению фронта кристаллизации и, как следствие, переходной области “отбел – масса чугуна”, что в итоге формирует температурный градиент затвердевания, от которого и будет зависеть ширина переходной области в толще отливки. Эти факторы оказывают непосредственное влияние на формирование структуры и свойств кристаллизующегося сплава.

В работах [13,14] отмечается, что кристаллизация различных форм графита определяется скоростью затвердевания и химическим составом чугуна, а при определенных условиях в одной отливке могут иметь место сразу несколько форм графита. Ввиду этого возрастает необходимость определения количественной зависимости морфологии графита от скорости затвердевания отливок стеклоформ.

На основании изложенного в рамках исследования требуется проведение экспериментальных работ, направленных на изучение влияния скорости затвердевания расплава чугуна на величину, распределение и форму включений графита с целью получения градиентной структуры, обеспечивающей высокую эксплуатационную стойкость деталей стеклоформ.

В качестве объектов исследования были выбраны:

- изменчивость графитовой фазы чугуна в температурном поле затвердевания отливки;
- комплексное влияние на структуру и свойства чугуна скорости затвердевания отливки, способа модифицирования расплава и химического состава модифицирующих реагентов.

¹ Данный термин применен в работе для обозначения требуемой "двухслойной" структуры деталей стеклоформ.

Конечной целью исследования является анализ динамики изменения микроструктуры и механических свойств деталей стеклоформ при регулировании скоростями затвердевания отливки и величиной навески модификатора.

Исследование влияния скорости затвердевания отливок на формирование микроструктуры и свойств деталей стеклоформ из СЧПГ

Важнейшими критериями определения эксплуатационных свойств деталей стеклоформ, формирующими заключение технологов на допуск металлоизделий к стекловудной производственной линии, являются предел прочности и величина теплопроводности стеклоформ.

Как показывает опыт стекольных заводов, предел прочности чугуна, обеспечивающий высокую эксплуатационную стойкость деталей черновых форм, должен быть не менее 220 МПа. При этом средняя теплопроводность по сечению черновой формы должна быть не менее 40 Вт/(м·К). На основании этих данных в рамках исследования была проведена работа, направленная на определение зависимости предела прочности чугуна от скорости затвердевания отливки. Образцы для определения предела прочности вырезались из различных участков массивной чугунной отливки сечением 120x120 мм и высотой 240 мм (рис. 1).

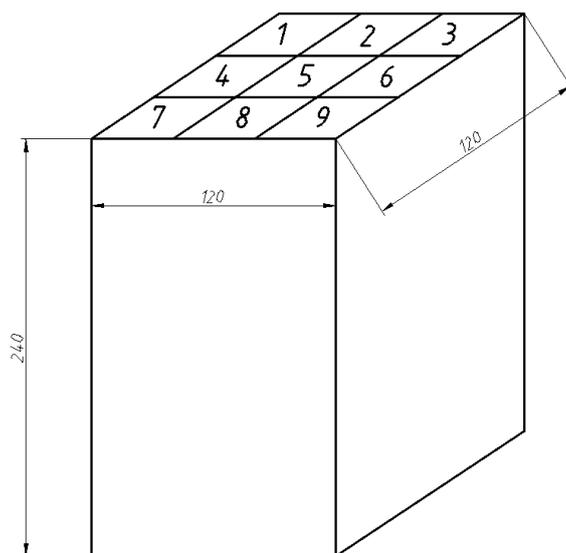


Рис. 1. Схема расположения вырезаемых образцов для определения предела прочности чугуна

С целью регулирования скорости затвердевания расплав чугуна заливали в формы из ПГС, ХТС и кокили. Скорость затвердевания рассчитывали по формулам, предложенным Г.Ф. Баландиным [15].

Отливки получали из чугуна следующего химического состава, %: 3,4С, 1,9Si, 0,4Mn, 0,05S, 0,07P. Температура изотермической выдержки составляла 1430...1450°С, температура заливки чугуна – 1340...1350°С.

На основе полученных экспериментальным путем данных был построен график зависимости предела прочности чугуна от скорости затвердевания отливки (рис.2). Математическая обработка данных, проводимая для визуализации динамики процесса затвердевания отливки, осуществлялась в MS Excel.

Объемная доля графита в структуре чугуна, как функция скорости затвердевания расплава, показана на диаграмме на рис. 3 (x – расстояние от поверхности затвердевания, мм).

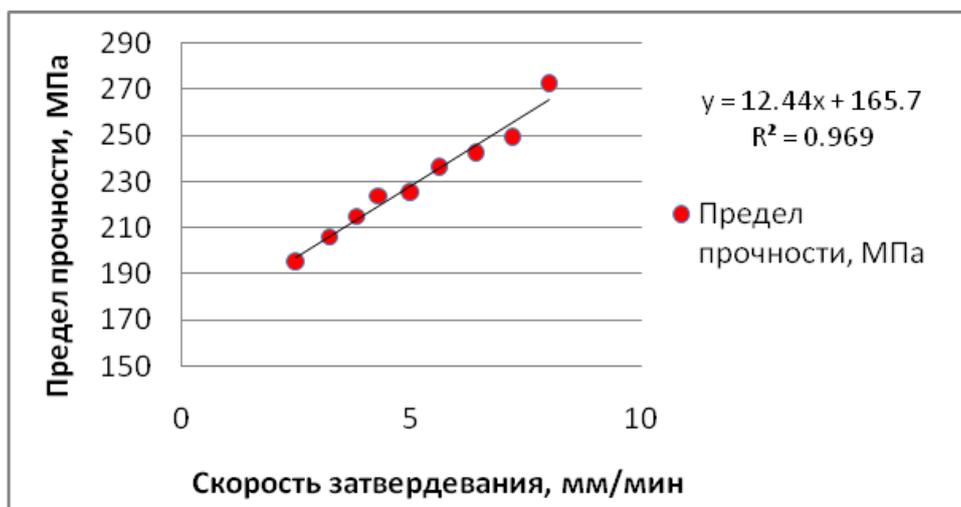


Рис. 2. Зависимость предела прочности чугуна от скорости затвердевания отливки

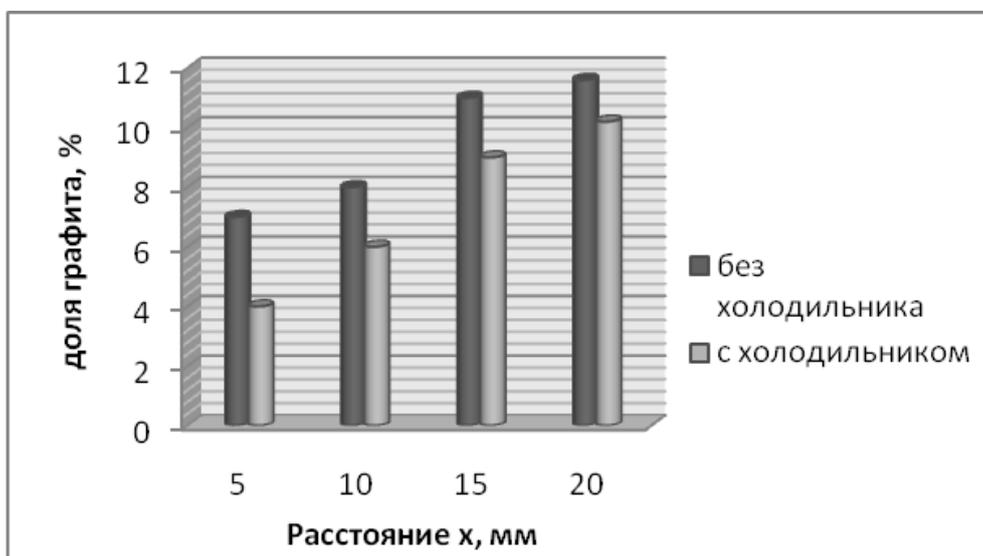


Рис. 3. Распределение графита по толщине стенки опытной отливки

Данные измерения предела прочности образцов при различных условиях охлаждения, а также значения теплопроводности, твердости и структурных параметров образцов приведены в табл. 1. На рис. 4 представлена структура графита в исследуемых образцах.

Установлено, что образцы из различных частей отливки имеют существенные отличия по механическим свойствам. Наибольший предел прочности при растяжении был у образцов 1,3,7,9 при затвердевании отливки в кокиле, наименьший – у образца 5 из центральной части отливки затвердевающей в песчано-глинистой форме.

Анализ данных показал, что скорость затвердевания чугуна < 4 мм/мин является недостаточной для получения необходимой прочности деталей стеклоформ.

Низкие значения прочности образцов из центральной части исследуемых отливок связаны как с их “грубой” структурой, так и с повышенной пористостью [13].

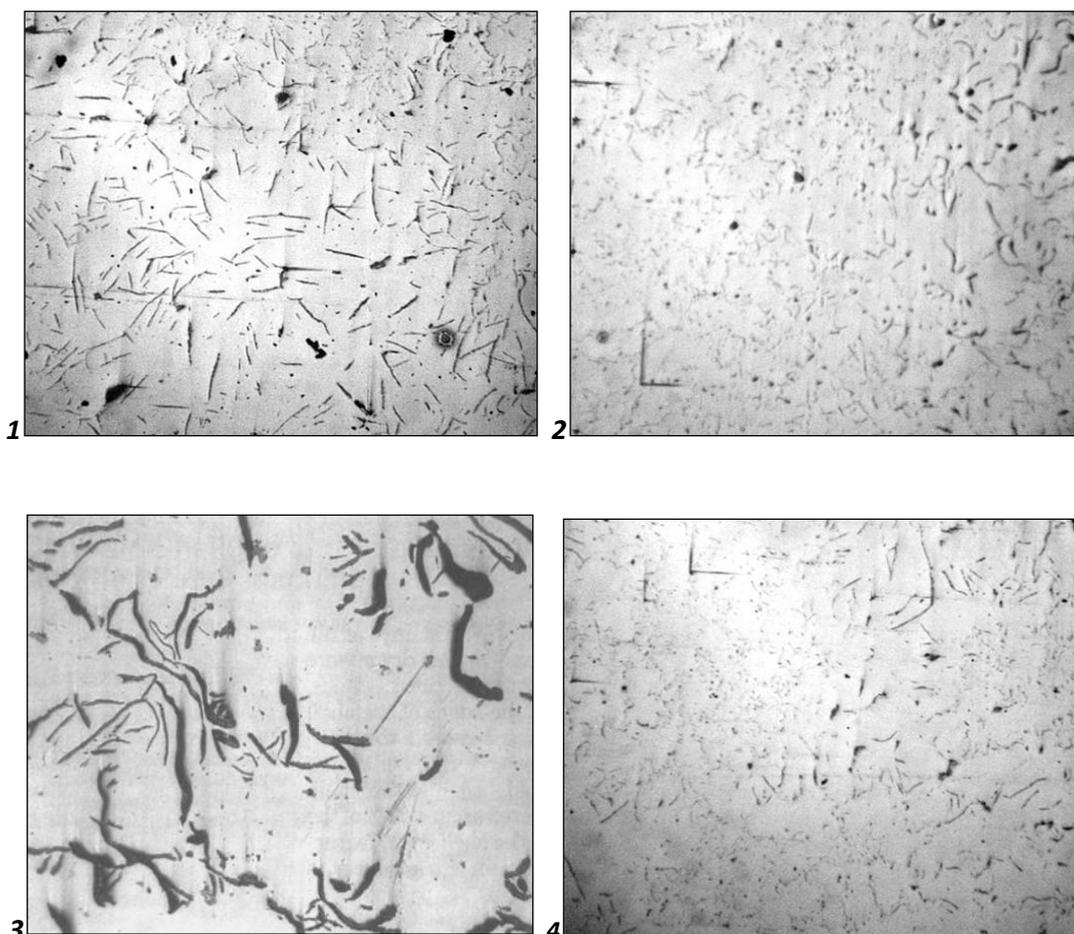
Полученные экспериментальные данные о формировании механических свойств отливок показали, что для повышения их прочности требуется интенсификация процесса теплообмена между отливкой и формой, что достигается применением металлических форм или холодильников.

Таблица 1

Параметры структуры и свойства исследуемых образцов

Вид формы	Предел прочности, МПа			Твердость, НВ			Графит (ГОСТ 3443-87)			Теплопроводность, Вт/м·К			Пористость, %		
	№ образца														
	1,3,7,9	2,4,6,8	5	1,3,7,9	2,4,6,8	5	1,3,7,9	2,4,6,8	5	1,3,7,9	2,4,6,8	5	1,3,7,9	2,4,6,8	5
ПГС	236	215	195	166	155	147	ПГф1 ПГр1,9	ПГф1 ПГр1,3	ПГф1 ПГр1,2	50	52	54	4,0	6,7	8,2
ХТС	249	224	206	168	158	149	ПГф1 ПГр1,9	ПГф1 ПГр1,7	ПГф1 ПГр1,2	47	48	51	3,2	5,1	7,6
Кокиль	272	242	225	182	176	163	ПГф1 ПГр8	ПГф1 ПГр1,9	ПГф1,2 ПГр1,2	45	45	47	2,5	4,4	7,3

Повышение скорости затвердевания чугуна с 3 до 8 мм/мин путем применения металлических холодильников или литья в кокиль позволяет повысить предел прочности при растяжении СЧПГ с 190 до 270 МПа, при этом в массивных сечениях отливки также повышается теплопроводность чугуна с 45 до 54 Вт/(м·К) за счет увеличения количества и размеров графитовых включений.

Рис. 4. Структура графита в исследуемых образцах ($\times 200$):

1 - образец 4 (ХТС); 2 - образец 6 (кокиль); 3 - образец 5 (ПГС); 4 - образец 3 (кокиль)

Экспериментальные исследования по получению заданного структурного состояния и свойств деталей стеклоформ из ЧВГ и ЧШГ

Для выявления наилучшего способа ввода модификатора, его оптимальной навески для получения чугуна с компактной формой графита, а также для исследования динамики изменения морфологии графита в отливках чистовых стеклоформ было изготовлено четыре образца с различной технологией модифицирования [16]. Исследование микроструктуры проводили на следующих участках получаемых образцов:

1. Зона, прилегающая к “рабочей” поверхности отливки (непосредственно вблизи металлического холодильника);
2. Зона на глубине 10 мм от наружной поверхности отливки, затвердевающей в контакте с песчано-глинистой формой.

Способы обработки расплавов, применяемые в ходе исследования, представлены в табл. 2.

Внепечная обработка жидкого чугуна для выплавки образцов 1 и 2 осуществлялась по следующей технологии: сфероидизирующий модификатор помещался на дно разливочного ковша перед его наполнением и накрывался стальной высечкой, после чего ковш заполнялся расплавом на 2/3 и его заливка чугуном прекращалась. После окончания реакции расплава чугуна с магнийсодержащей лигатурой заливка ковша продолжалась с одновременной подачей на струю металла графитизирующего модификатора. Образцы 3 и 4 изготавливались по технологии, заключающейся в присадке графитизирующего модификатора совместно с магнийсодержащей лигатурой.

Таблица 2

Величины навесок применяемых модификаторов

Образец	Применяемый модификатор			
	ФСМГ7 (изготовитель – РФ), кг	CompactMag™, кг	ФС75, кг	ФС65Ba4, кг
1	0,50	–	0,15	–
2	–	0,21	0,15	–
3	–	0,21	0,10	–
4	–	0,22	–	0,15

Исследование микроструктуры образцов проводилось с использованием оптического микроскопа, оборудованного программным обеспечением фирмы Elkem AS Foundry Products (Норвегия) по автоматическому распознаванию снимков микроструктур. При этом определяли основной показатель, характеризующий степень шаровидности графита, – фактор формы F [17]:

$$F = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{D^2},$$

где A – площадь частицы; D – максимальный диаметр частицы по Фере².

Химический состав опытных образцов представлен в табл. 3 (образец 5 – базовый чугун предприятия). Обобщенные результаты исследований микроструктур полученных образцов представлены в табл. 4. На рис. 5 показаны снимки микроструктур исследуемых образцов в зоне, прилегающей к “рабочей” поверхности отливки, а также на глубине 10 мм от наружной поверхности отливки, затвердевающей в контакте с ПГФ.

² Линейный размер частицы как максимальная величина проекции ее изображения на горизонтальную и вертикальную оси

Таблица 3

Химический состав опытных образцов

Химический элемент	Химический состав, %				
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
C	3,41	3,39	3,40	3,14	3,55
Si	2,59	2,34	2,26	2,98	1,96
Mn	0,353	0,353	0,352	0,351	0,366
P	0,029	0,030	0,029	0,030	0,030
S	0,016	0,018	0,019	0,019	0,020
Mg (AAS)	0,020	0,013	0,015	0,025	0,005
Ce	0,010	0,016	0,011	0,005	0,003
La	0,008	0,012	0,010	0,004	0,002
Cu	0,205	0,205	0,207	0,234	0,204
Ni	0,558	0,554	0,559	0,476	0,557
Cr	0,140	0,139	0,138	0,132	0,140
Mo	0,019	0,019	0,019	0,039	0,023
Ca	0,002	0,002	0,002	0,007	0,003
CE	4,27	4,17	4,15	4,13	4,20

Таблица 4

Результаты исследования микроструктур³

Образец	Исследованная площадь, мм ²	Количество включений вермикулярного графита/мм ²	Степень компактности включений, %	Графит, %	Феррит, %	Перлит, %	Средний размер включений графита, мкм	Фактор формы
1	5,2	141	64	10	71	19	29,3	0,58
2	5,2	196	79	8	70	22	27,9	0,48
3	5,2	182	77	10	65	25	30,1	0,52
4	5,2	38	31	8	78	14	30,5	0,80

Исследования микроструктур однозначно показали, что образцы 1, 2 и 3 имеют наиболее подходящую структуру для использования в качестве материала, как для черновых, так и для чистовых стеклоформ, ввиду сосредоточения наибольшего количества включений графита вермикулярной формы в глубинных слоях отливки, а также наличия шаровидного графита в зоне “рабочей” поверхности отливки. Образец 4 имеет структуру высокопрочного чугуна с шаровидным графитом по всему сечению отливки, что определяет использовать данный чугун в качестве материала для деталей чистовых стеклоформ. Все образцы характеризуются увеличением доли шаровидного графита на участках непосредственно прилегающих к “рабочей” поверхности. Так же было установлено, что химический состав образцов отличается друг от друга, различия особенно заметны в содержании C, Si, Mg, а также S. Подобные отклонения состава оказывают заметное влияние, как на микроструктуру образцов, так и на их свойства [12]. Однако твердость всех исследованных образцов находилась в пределах 174–197НВ, что соответствует требованиям стеклотарных заводов и значениям, регламентируемым ОСТ 21-75-88 “Формовые комплекты для стеклоформирующих машин. Общие технические условия”.

³ Усредненные данные, полученные на участке до 15 мм от “рабочей” поверхности каждого образца.

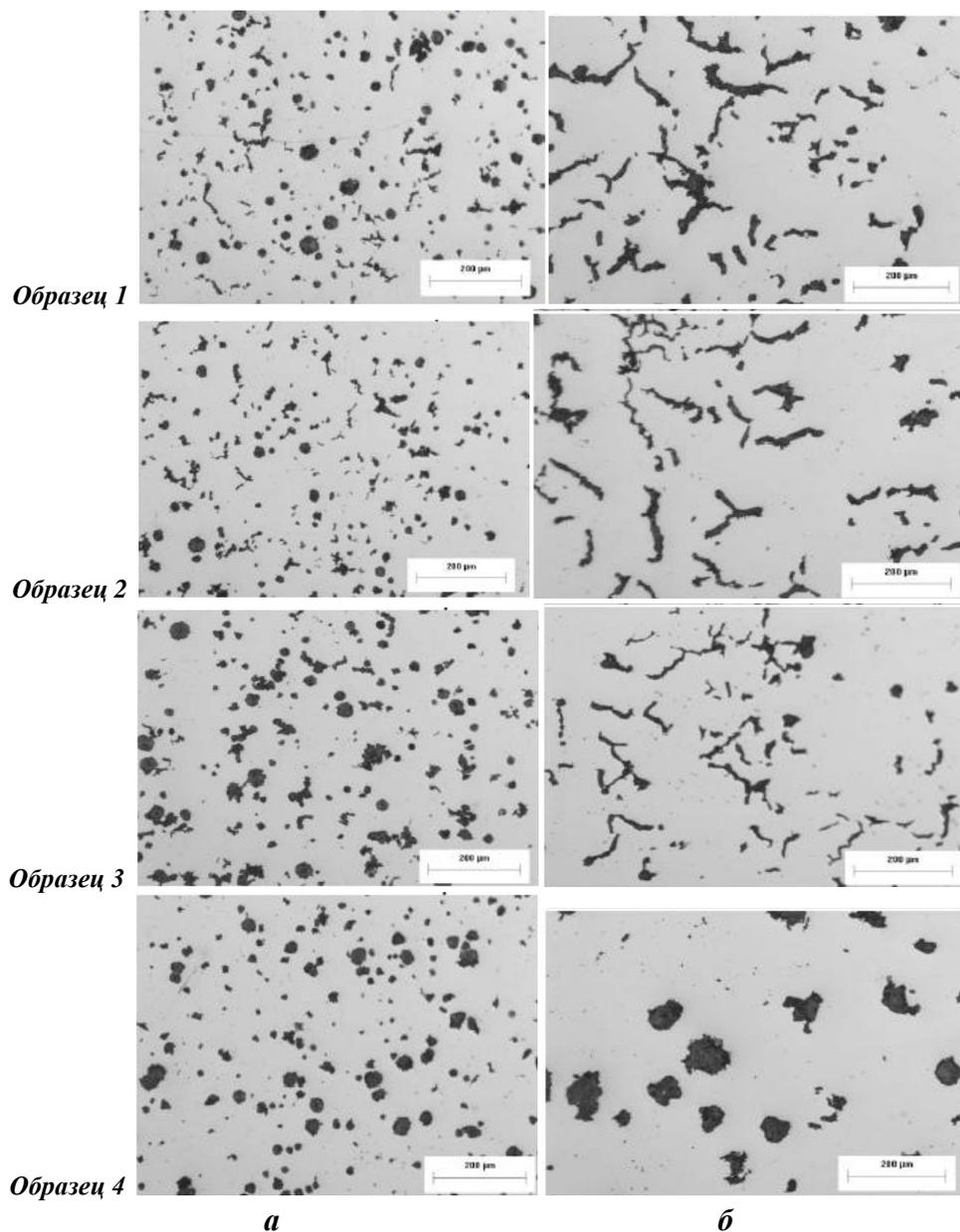


Рис. 5. Структура опытных образцов:
 а – в зоне рабочей поверхности отливки;
 б – на глубине 10 мм от наружной поверхности

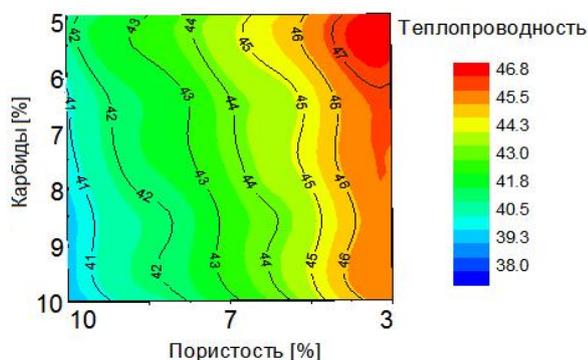


Рис. 6. Зависимость теплопроводности чугуна с вермикулярным графитом (CE=4,2%) от пористости и количества карбидов

При дальнейшем изучении характеристик отливок была установлена тенденция к

снижению объемной доли пор в структуре чугуна при использовании внешних металлических холодильников, что способствует повышению теплопроводности чугунного изделия в процессе его эксплуатации (рис. 6).

Одновременно с этим в процессе исследований была установлена зависимость предела прочности при растяжении чугунов от массы вводимого модификатора и его химического состава (рис. 7).

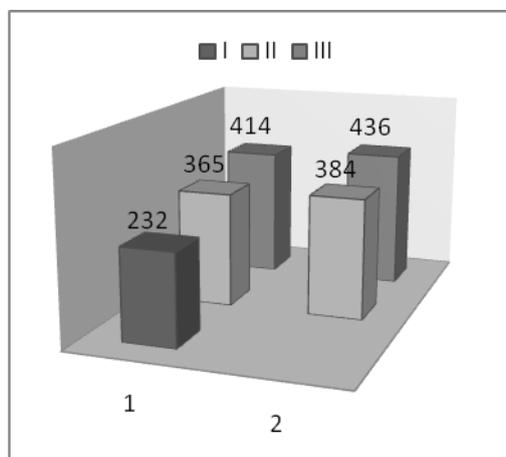


Рис. 7. Зависимость предела прочности (МПа) чугуна от массы вводимого модификатора и его состава:

I – без обработки; II – навеска 0,4% вес.; III – навеска 0,6% вес.,
1 – ФСМг7, 2 – CompactMag™

Заключение

В ходе проведенного исследования выполнен анализ особенностей эксплуатации деталей стеклоформ и определены факторы, влияющие на их эксплуатационную стойкость, изучена динамика изменения микроструктуры в серых и высокопрочных чугунах в зависимости от интенсивности теплообмена между отливкой и формой.

Проведенные исследования позволили выявить пути управления процессом формирования оптимальной литой структуры с требуемым уровнем механических, теплофизических и эксплуатационных свойств. Получение градиентной структуры стеклоформ с заданным комплексом свойств требует контроля поведения графитовой фазы чугуна в нестационарном температурном поле затвердевания отливки. Важным аспектом при этом является влияние на процесс графитообразования интенсификации теплообмена между отливкой и формой и протекание структурообразования в заданном скоростном режиме затвердевания отливки [18].

Определены основные параметры стабилизации механических и теплофизических свойств чугуна на основе варьирования химическим составом модификатора, массой его навески и способом его ввода.

Разработан технологический процесс, позволяющий получить в производственных условиях отливки из чугуна с регулируемым количеством в структуре шаровидного и вермикулярного графита. Разработанная технология обеспечивает стабильное получение ферритной матрицы чугуна при твердости отливок не выше 170–200 НВ, с пределом прочности $\sigma_B=360...430$ МПа и факторе формы графита на уровне 0,48.

Комплекс разработанных мероприятий по оптимизации структуры чугуна позволил повысить стойкость деталей стеклоформ в среднем на 42% при испытании в лабораторных условиях. Производственные испытания на стеклотарных заводах России подтвердили факт повышения эксплуатационной стойкости на 75...100%: было произведено в среднем 946,5 тыс. стеклоизделий с отдельной чистой стеклоформы, предельное значение составило 1215 тыс. съемов.

Библиографический список

1. **Cesar de Sa, J.M.** Numerical modelling of glass forming processes / J.M. Cesar de Sa // Eng.Comput. 1986. V. 3.
2. **Баландин, Ю.Ф.** Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении / Ю.Ф. Баландин. – Л.: Судостроение, 1967. – 271 с.
3. **Дульнев, Р.А.** Термическая усталость металлов / Р.А. Дульнев, П.И. Котов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
4. **Петриченко, А.М.** Термостойкость литейных форм / А.М. Петриченко, А.А. Померанец, В.В. Парфенова. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
5. **Davis, J.R.** Cast irons / J.R. Davis. – ASM International, 1996. – 494 p.
6. **Кушнир, М.А.** Точнолитые пресс-формы для получения изделий из стекла: дисс. ... канд. техн. наук / М.А. Кушнир. – Одесса, 1984. – 232 с.
7. **Ващенко, К.И.** О связи пригарной корки с отливкой // Литейное производство. 1962. №9. С. 24.
8. **Иванова, Л.А.** Методы улучшения качества литой поверхности / Л.А. Иванова, В.А. Иванов // Литейное производство. 1984. №6. С. 24-26.
9. **Shimizu, K.** Formation and progression of erosion surface in spheroidal graphite cast iron / K. Shimizu, T. Noguchi, T. Kamada, H. Takasaki // AFS Transactions. 1996. №1. P. 511-515.
10. **Марукович, Е.И.** Износостойкие сплавы / Е.И. Марукович, М.И. Карпенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 428 с.
11. **Nadot, Y.** Fatigue crack propagation in spheroidal-graphite cast irons with different microstructures / Y. Nadot, N. Ranganathan, J. Mendez, A. S. Beranger // International Journal of Fatigue. 1994. №5. P. 344-350.
12. **Geier, G.F.** Microstructure transition from lamellar to compacted graphite using different modification agents / G. F. Geier, W. Bauer, B. J. McKay, P. Schumacher // Materials Science and Engineering. 2005. №1. P. 339-345.
13. **Гиршович, Н.Г.** Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
14. **Бунин, К.П.** Строение чугуна / К.П. Бунин, Ю.Н. Таран. – М.: Metallurgy, 1972. – 170 с.
15. **Баландин, Г.Ф.** Основы теории формирования отливки: в 2 ч. Ч.1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки / Г.Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1976. – 348 с.
16. **Jung, S.** Critical conditions for formation of spheroidal graphite / S. Jung, T. Ishikawa, H. Nakae // Materials Science and Engineering. 2008. №1-2. P. 350-356.
17. **Панов, А.Г.** Совершенствование технологии модифицирования чугунов с шаровидным графитом Mg-Ni-Fe лигатурой / А.Г. Панов, А.Э. Корниенко // Литейщик России. №3. 2009. С. 27-30.
18. **Itoufuji, H.** Comparison of substructure of compacted/vermicular graphite with other types of graphite / Y. Kawano, S. Yamamoto, N. Inoyama, H. Yoshida, B. Chang // Transactions of the American Foundrymen Society Proceedings of the Eighty Seventh Annual Meeting. 1983. №1. P. 313-324.

Дата поступления
в редакцию 20.06.2013

M.V. Aleksandrov¹, D.G. Chistaykov²

FORMATION OF GRADIENT STRUCTURE IN CAST IRON GLASS-MOLDS WITH DIFFERENT MORPHOLOGY OF GRAPHITE

State University – ESPC, Orel¹,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev²

Purpose: Development and the industrial introduction the improved manufacturing techniques castings of glass-molds, decrease in cost of production of cast details, improvement of quality of production.

Approach: The investigation is carried out by an application of various techniques of control by morphology of graphite in cast iron. The control of structural changes in casting was exercised on the basis of tracking of dynamics of behavior of components cast iron in the field of two phases "liquid-solid".

Findings: The study gives the results of the investigations concerning an effect of the casting solidification rate and method of inoculation of the melt on the morphology of flake and compacted graphite. It has been proved that reducing the solidification rate increases the content and size of graphite and thermal conductivity of cast iron. The possibility to control the tensile strength and thermal conductivity of glass-mold cast iron by changing the intensity of the heat transfer between the casting and the mold is shown.

Key words: cast iron, casting, glass-mold, modifying, solidification rate, compacted graphite.