

О СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ФАЗОЙ ЧУГУНА ДЛЯ ОТЛИВОК СТЕКЛОФОРМ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ НА ОСНОВЕ СПЛАВА ЧС5Ш

И.О. Леушин, Д.Г. Чистяков

Рассмотрен вопрос получения необходимой структуры отливок стеклоформ посредством регулирования процессов легирования, заливки и внепечной обработки жидкого чугуна. Управление поведением графитовой фазы чугуна позволяет контролировать процесс создания заготовки детали стеклоформы с заданными теплофизическими и механическими свойствами. Установление закономерностей образования высокоуглеродистой фазы чугуна и потребительских свойств готового металлоизделия позволяет получить отливку с требуемой структурой и обеспечить ресурсоспособность деталей стеклоформ выше уровня мировых аналогов.

Ключевые слова: чугун, отливка, стеклоформа, графитизация, ферритизация.

Введение

Конкурентная борьба российских литейных заводов и иностранных производителей за рынки сбыта металлопродукции наводнила отечественные стекольные заводы металлоизделиями зарубежного производства. Такая тенденция сформировалась на том основании, что отечественные литые детали значительно уступают западным аналогам как по качеству изготовления, так и по себестоимости (исключением не является и демпингование иностранных импортеров). Естественный выход из такой ситуации – вытеснение неликвидной металлопродукции с внутреннего рынка страны. В числе таких «неликвидов» находятся отечественные детали стеклоформ (рис. 1) – основные детали, характеризующие формовой комплект для массового изготовления стеклянной тары. Именно поэтому на данный момент перед российскими производителями литых заготовок деталей

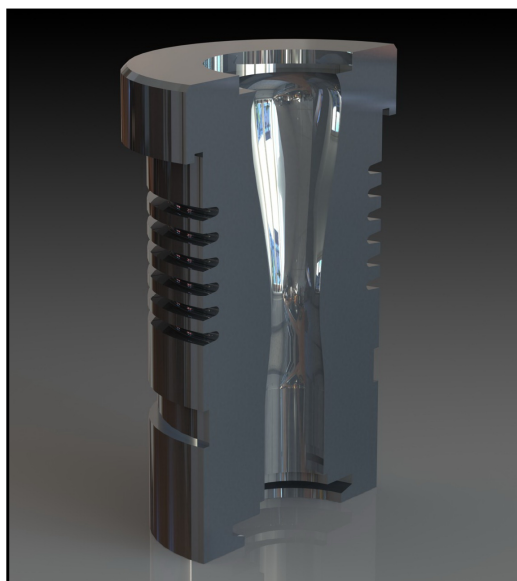


Рис. 1. Деталь «Стеклоформа»

стеклоформ остро стоит проблема внедрения в заводские условия термо- и жаростойкого чугуна собственного химического состава и со структурой материала, позволяющего использовать детали стеклоформ в бесперебойном режиме до количества съёмов с одного формокомплекта в 1 млн стеклоизделий. Такой подход позволит отечественным предприятиям занять серьёзную экономическую нишу на внутреннем рынке страны.

Анализ производственных данных и выявление проблем

Главной проблемой при изготовлении литых заготовок деталей стеклоформ является установление закономерностей, объединяющих полученную структуру чугуна с его потребительскими свойствами. Это связано с тем, что готовая отливка (ввиду использования принципа литья расплава чугуна в песчаную форму на металлургический холодильник) представляет собой многослойный комплекс «отбеленный слой → переходная зона → основная масса будущей детали → прибыльная (зашлакованная) зона», и такой чугун обладает относительно высокой гетерогенностью строения при рассмотрении его по сечению отливки. Ввиду этого создается значительная трудность в определении закономерностей между структурой заготовки и комплексом рабочих свойств получаемого металлического изделия. Данные проблемы изучались и ранее рядом авторов [1], которые установили, что свойства гетерогенного строения, складывающиеся из свойств отдельных структурных компонентов, не соответствуют правилу простого суммирования, а перекрываются влиянием формы, размеров и взаимного расположения структурных составляющих чугуна. Однако именно создание структуры чугуна высокой гетерогенности по сечению, когда внутренние слои детали имеют достаточную прочность, а внешние – высокую термо- и окислительную стойкость, и является наиболее приемлемым вариантом получения деталей стеклоформ с высокой ресурсоспособностью.

В этой связи к структуре деталей стеклоформ предъявляются следующие требования:

1) мелкое зерно как металлической матрицы чугуна (феррита/аустенита), так и высокоуглеродистой фазы, на глубину до 10–15 мм от рабочего (контактирующего с расплавленным стеклом) слоя;

2) достаточная прочность рабочих поверхностей ($\sigma_b = 250\text{--}350$ МПа) при отсутствии карбидной фазы, являющейся концентратором напряжений в детали при ее термоциклировании;

3) гомогенность структуры в пределах отдельных слоев отливки и ее высокая степень гетерогенности по сечению металлоизделия.

Управление высокоуглеродистой фазой в отливках стеклоформ

Общеизвестно, что самым изученным способом регулирования теплофизических и механических свойств будущих чугунных деталей является управление формой, дисперсностью и количеством графитовой фазы в отливке, что подтверждается исследованиями современных авторов [2, 3]. Самыми распространенными способами управления поведением высокоуглеродистой фазы в отливках из чугуна являются:

1) легирование карбидообразующими и/или стимулирующими графитизацию чугуна элементами;

2) модифицирование расплава чугуна элементами, уменьшающими (или увеличивающими) поверхностное натяжение на границе «графит – расплав»;

3) регулирование скоростного режима охлаждения отливок, основанное на применении захлаживающих (или теплоизолирующих) компонентов литейной формы.

При рассмотрении чугуна для деталей стеклоформ с точки зрения его легирования требуемыми элементами нужно отметить, что в настоящее время запатентовано и внедрено в действующее про-

изводство огромное число химических составов чугунов для деталей стеклоформ (табл. 1), которые представляют собой систему Fe–C–X с микродозированием широкой гаммой элементов.

Выбор широкого спектра легирующих элементов связан с приданием материалу изделия комплекса свойств: термо-, жаро- и окалинстойкости. Однако такая совокупность элементов определенным образом влияет на температурный режим охлаждения отливок стеклоформ и, как следствие, изменение условий кристаллизации отдельных ее слоев, в первую очередь, переходной области «отбел – масса чугуна», что обуславливает формирование графитовых включений размеров и форм, отличных от прогнозируемых, а металлическая основа чугуна в пределах одного слоя имеет различную степень насыщенности углеродом. В этой связи даже создание определенного скоростного режима охлаждения отливки не гарантирует формирование требуемой градиентной структуры заготовок.

Модифицирование расплава чугуна – в виде процессов предсфероидизирующего инокулирования, глобуляризации графитовых включений, а также вторичного инокулирования – играет важную роль в создании слоистой градиентной структуры литья. Однако важным этапом при этом является выбор и точное дозирование вводимых в чугун добавок, обеспечивающих синтез отдельных фаз, развивающих диффузионную активность различных атомов (глобуляризаторы) или предупреждающих эффект переохлаждения чугуна (графитизаторы).

Создание определенного скоростного режима охлаждения отливки стеклоформы позволяет регулировать состояние зерен графита по критериям их размера, формы и величины дендритных ветвей, создающих необходимую прочность (каркас для металлической основы).

Таблица 1

Химические составы чугунов, применяемых для деталей стеклоформ

Элемент	Химический состав, %			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
C	3,6–3,8	3,0–3,5	3,0–3,5	3,0–3,5
Si	1,9–2,2	1,6–2,0	1,6–2,0	1,9–2,4
Ti	< 0,1	0,05–0,1	–	–
Cr	< 0,1	< 0,08	< 0,07	0,3–0,5
Mn	0,3–0,7	0,5–0,8	0,5–0,7	0,4–0,6
Ni	< 0,4	0,1–0,3	0,1–0,3	1,0–1,5
Mo	< 0,5	0,3–0,6	0,3–0,6	–
V	< 0,1	0,1–0,2	–	–
Cu	–	0,1–0,2	–	–
P	< 0,07	< 0,07	< 0,05	< 0,2
S	< 0,15	< 0,07	< 0,05	< 0,1

Примечание. № 1 – ОАО «Буньковский экспериментальный завод» (Московская обл.); № 2 – ООО «Красное Эхо» (Владимирская обл.); № 3 – BRK (Великобритания); № 4 – ЗАО «Завод «Флакс-Орел» (Орловская обл.).

Выбор химического состава и типа структуризации чугуна для отливок стеклоформ

На данный момент составить конкуренцию зарубежным аналогам деталей стеклоформ возможно двумя способами:

- 1) создать комплекс свойств (термо-, жаро- и окислительная стойкость) производимых деталей на уровне западных производителей;
- 2) снизить себестоимость производства готовых деталей за счет рационализации процессов изготовления литых заготовок, их последующей термической и механической обработки.

Добиться существенного прорыва в этой области возможно лишь при совокупном решении данной проблемы с целью повышения эксплуатационного ресурса применяемых деталей стеклоформ, а также снижения себестоимости их изготовления. Таким образом, необходимо устранить добавки дорогих легирующих компонентов, обеспечить оптимальное действие требуемых легирующих элементов на уровне микродозирования, а желаемую структуризацию литой заготовки стеклоформы формировать посредством рационализации процессов заливки, выпечки, затвердевания и последующего термического улучшения структуры литья.

На этом основании наибольший интерес представляет собой легирование чугуна Si и формирование необходимой структуры литья при помощи дозирования Fe–C–Si-модифицированного чугуна микродобавками легирующих элементов.

В большинстве работ, посвященных легированному чугуну, отмечается пагубное действие чрезмерного содержания Si в расплаве ($> 4,5\%$) [1]. Это связано, в первую очередь, с отрицательным влиянием Si на предел пластичности чугуна и его вязкость. Однако основными преимуществами использования Si в качестве легирующего элемента с дозированием на уровне не более $4,5\%$ являются ферритизация металлической основы и уменьшение размеров включений графита [4], то есть формирование металлической основы и размеров графитовой фазы чугуна, удовлетворяющих требованиям деталей стеклоформ.

Важнейшим моментом в процессе изготовления чугуна для отливок стеклоформ является первичная графитизация, определяющая величину графитовых включений как в рабочем слое, так и во внутренней части отливки, а также их форму и/или дисперсность. Ввиду этого необходимым условием контроля качества получаемых отливок стеклоформ выступает степень графитизации чугуна и формирование графитовых включений [5]. При этом

основными преимуществами полного протекания процесса первичной графитизации являются [6–8]:

- 1) устранение микропористости в отливках, снижающей теплофизические характеристики детали в процессе ее эксплуатации;
- 2) снижение концентрации внутренних напряжений в структуре литья за счет минимизации процессов выделения карбидной фазы;
- 3) ферритизация металлической основы чугуна;
- 4) увеличение коррозионной стойкости металлической матрицы.

В этой связи возникает необходимость в подборе модификаторов и легирующих элементов, одновременно интенсифицирующих процесс первичной графитизации и снижающих склонность чугуна к отбелу [7].

Экспериментальные исследования

На основании вышеизложенных доводов авторами в производственных условиях ННИИММ «Прометей» проводились экспериментальные работы по контролю поведения графитовой фазы чугуна марки ЧС5Ш при разных скоростях охлаждения отливок, задаваемых различными массами применяемых металлических холодильников (3,38; 2,45; 1,54; 0,62 кг).

Предметами исследования являлись:

- состояние графита в отдельных слоях заготовки;
- степень ферритизации металлической основы чугуна.

Выплавка чугуна осуществлялась в индукционной печи ИСТ-0,4 с кислой футеровкой. Температура выпуска расплава чугуна из печи составляла $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура заливки – $1380\text{ }^{\circ}\text{C}$. Модифицирование чугуна производилось по сэндвич-процессу в температурном интервале $1400\text{--}1480\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сфероидизирующим модификатором служил СферомагTM 611 в количестве $1,2\text{--}1,5\%$ (по массе), графитизирующим – SIBARTM 4 в количестве $0,4\%$ (по массе) производства компании NPP Company (г. Челябинск).

Химический состав чугуна определялся на спектроанализаторе FOUNDRY MASTER и представлен в табл. 2.

Расчет скорости затвердевания расплава в различных частях отливки проводился по методике, предложенной Г.Ф. Баландиным [9].

На рис. 2 представлена микроструктура отливок в месте контакта с металлическими холодильниками (МХ) массой $1,54$ и $0,62$ кг, а также с песчано-глинистой формой (ПГФ) на глубине ~ 40 мм от нижней кромки. При рассмотрении микроструктур чугунов, охлаждаемых при использовании МХ с массами $3,38$ и $2,45$ кг, распределение

Таблица 2

Химический состав чугуна, %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Al	S	P
Содержание	3,55	4,55	0,44	0,081	0,003	0,004	0,111	0,0296	0,038

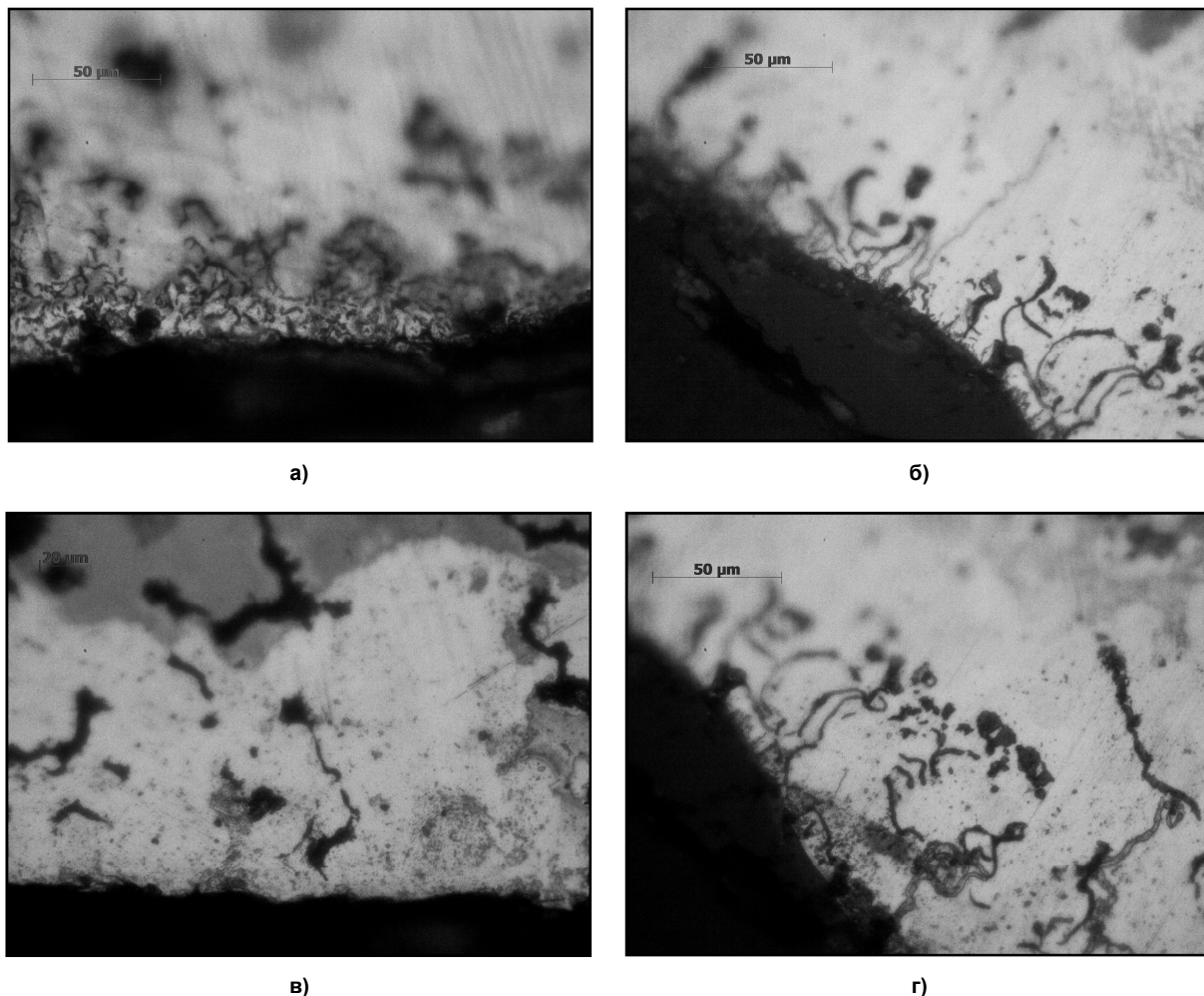


Рис. 2. Микроструктура чугуна на границе контакта с ($\times 500$): МХ массой 1,54 кг (а) и ПГФ (б) при охлаждении со скоростью $\sim 0,36$ мм/с; МХ массой 0,62 кг (в) и ПГФ (г) при охлаждении со скоростью $\sim 0,26$ мм/с

графитовых включений аналогичное, однако количество углерода в связанном состоянии значительно больше, чем в свободной форме. Соответственно, такой чугун является неприемлемым для деталей стеклоформ.

Из рис. 2 видно, что скорость охлаждения отливок (масса применяемых МХ) при прочих равных условиях (температурный режим заливки, степень модифицирования расплава и т. д.) формирует структурные компоненты (цементит, феррит, перлит, графит) различной ориентации, размеров и форм. При использовании МХ массой 1,54 кг была получена структура литья с шаровидным (ШГФ3) и вермикулярным (ВГФ3) графитом размером 10–15 мкм на перлит-ферритной металлической основе в пределах рабочего слоя и на глубине до 40 мм. При этом количество цементита и цементита ледебурита находилось в пределах 10–40 % в зависимости от места исследования. Более низкая скорость охлаждения отливок ($\sim 0,26$ мм/с) обеспечила формирование графитовых включений размером 15–20 мкм при неизменной зернистости металлической основы (величина ферритного зерна в первом и втором случае варьи-

ровалась от 30 до 90 мкм на глубину до 40 мм, с увеличением ее до 120–140 мкм в толще отливки – на глубине 60–70 мм). Зернистость феррита, а также присутствие карбидных включений на глубине ~ 40 мм от рабочей поверхности представлены на рис. 3.

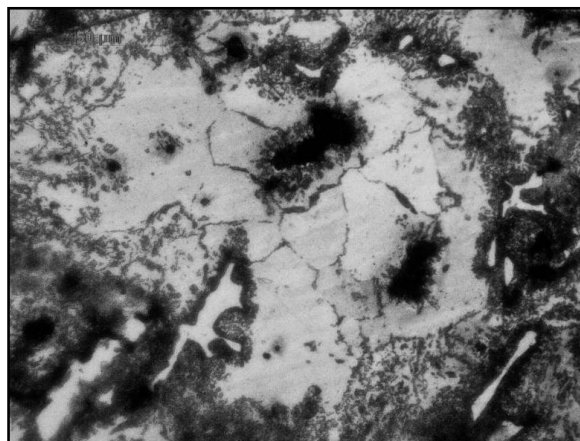


Рис. 3. Зернистость феррита на глубине ~ 40 мм, $\times 500$

Таким образом, создание определенного скоростного режима охлаждения отливок формирует структуру литья в прогнозируемом режиме, то есть с требуемым количеством карбидной фазы, графитовыми включениями заданных размеров и форм и металлической матрицей чугуна с высокой термостойкостью.

Одним из способов регулирования как скоростного режима охлаждения отливок, так и степени полноты прохождения графитизации чугуна является создание теплоизоляционного барьера на поверхности МХ. В качестве такого теплоаккумулятора применялась литейная краска на циркониевой основе. Микроструктура полученных чугунов пред-

ставлена на рис. 4. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 3.

В результате экспериментов была получена структура литья одновременно с высокой термо-, жаро- и окалинотойкостью и достаточной прочностью и твердостью рабочего слоя (35–40 HRC) за счет легирования ферритной матрицы Si, Cr и Al, которые обеспечили диффузионную активность атомам углерода, то есть их перемещение и осаждение на поверхностях растущих кристаллов – центрах графитизации, и внедрение в α -фазу чугуна. Ввиду этого наибольший эффект в создании требуемой структуры литья был достигнут при применении МХ незначительной массы (0,62 кг)

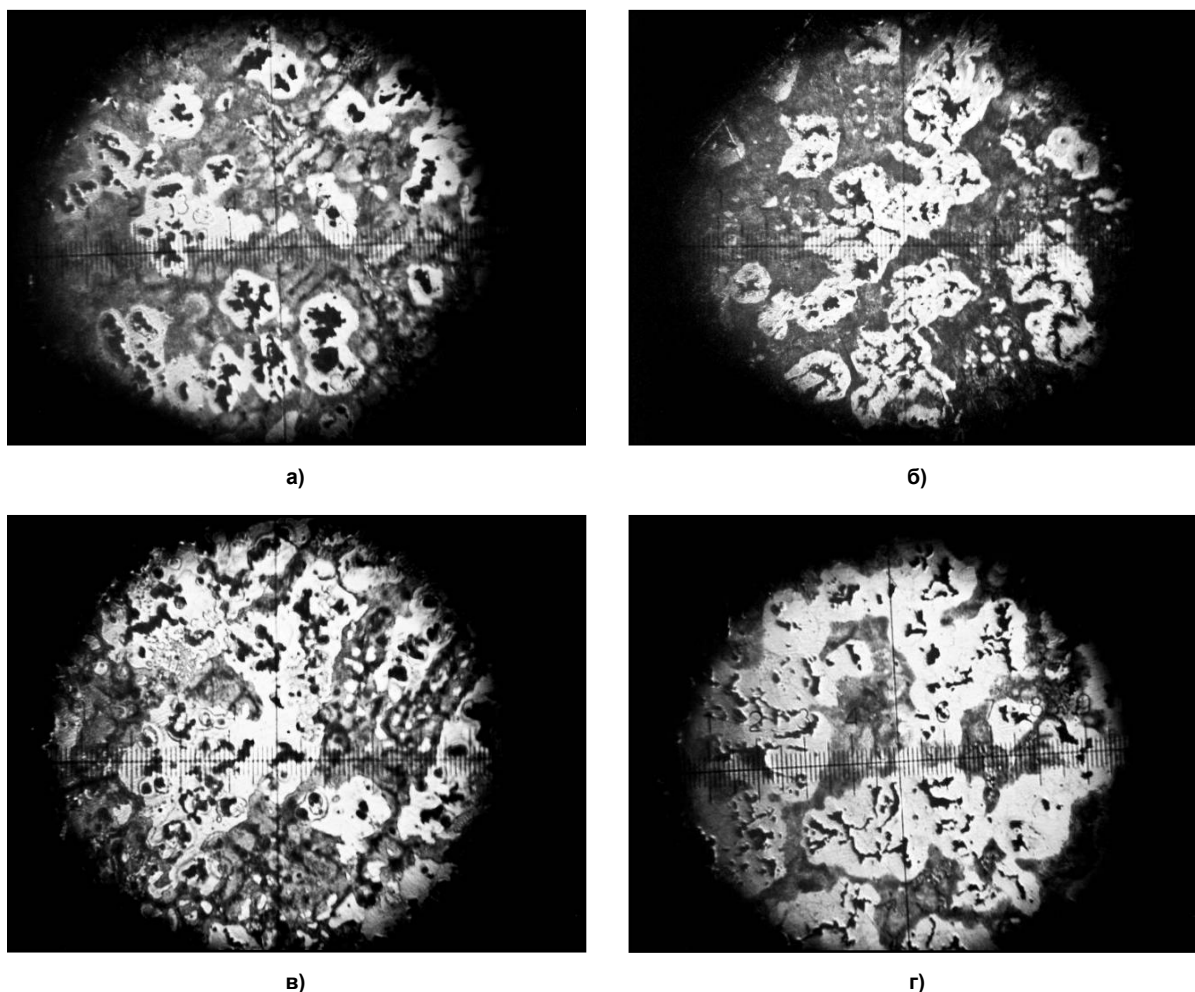


Рис. 4. Микроструктура отливок на глубине ~40 мм при массе МХ и толщине нанесенной литейной краски, $\times 100$: а – 1,54 кг, 0 мм; б – 0,62 кг, 0 мм; в – 1,54 кг, 0,3 мм; г – 0,62 кг, 0,3 мм

Результаты исследований

Таблица 3

№ п/п	Величина наносимой на МХ литейной краски, мм	Масса применяемого МХ, кг	Средний размер графитовых включений на глубине ~40 мм, мкм	Металлическая основа по ГОСТ 3443	Твердость, HRC
1	0	1,54	25	Ф55	43
2	0,3	1,54	37,5	Ф80	40
3	0	0,62	35	Ф55	39
4	0,3	0,62	47,5	Ф80	35

с нанесенной на них литейной краской на циркониевой основе толщиной ~0,3 мм.

Заключение

До настоящего времени в литейном производстве не сформировалось определенной концепции по формированию необходимой структуры литых деталей стеклоформ, применяемых на различных стекловыводных автоматах при разных скоростных и тепловых режимах эксплуатации. Аналогично ситуация выглядит и при рассмотрении технологии совершенствования химического состава чугуна для деталей такого типа. Все это вызвано недостаточностью, а нередко и противоречивостью информации по повышению термо-, окалино- и жаростойкости чугунов для деталей ответственного назначения, работающих при знакопеременных циклических тепловых нагрузках в условиях агрессивных сред и абразивного износа. В первую очередь это объясняется разнообразием подходов к созданию необходимой структуры литья: от дозирования расплава чугуна сложнокомпонентными лигатурами до установления термовременного режима охлаждения отливок. Однако осуществление совокупного механизма управления структурой литья, заключающегося в применении эффективных и недорогих легирующих элементов (например, Si), использовании наиболее действенных способов модифицирования жидкого чугуна (например, сэндвич-процесс), создании необходимого теплового режима охлаждения отливки, способствует получению гомогенной металлической матрицы чугуна и высокоуглеродистой фазы (карбиды, графит) с необходимыми выходными параметрами (зернистость, форма, степень распределения и т. д.).

Комплекс разработанных мероприятий по оптимизации структуры литья позволяет:

– снизить затраты на продолжительную термическую обработку отливок (за счет получения феррит-перлитной структуры – Ф80 – уже в литом состоянии);

– обеспечить высокую эксплуатационную стой-

кость деталей стеклоформ (за счет получения термо-, жаро- и окалиностойкой структуры);

– снизить себестоимость изготовления литой заготовки (за счет использования относительно недорогих легирующих элементов – Si, Cr, Al).

Литература

1. Высококачественные чугуны для отливок / В.С. Шумихин, В.П. Кутузов, А.И. Храмченков и др.; под ред. Н.Н. Александрова. – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.
2. Naydek, V.L. On the Theories of Graphite Formation in Iron / V.L. Naydek, V.P. Garvilyuk, I.G. Neizhko // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 457. – P. 48–51.
3. Loper, C.R. Jr. Structure of Spheroidal Graphite in Cast Iron / C.R. Loper Jr., K. Fang // *American Foundry Society [Schaumburg]*. – 2008. – No. 08-066 (05). – P. 1–10.
4. Курганов, В.А. Жаростойкий чугун с шаровидным графитом / В.А. Курганов // *Литейщик России*. – 2011. – № 10. – С. 25–27.
5. Неижко, И.Г. Графитизация и свойства чугуна. АН УССР. Институт проблем литья / И.Г. Неижко. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.
6. Волощенко, М.В. Коррозионная стойкость высокопрочного чугуна с различным содержанием кремния / М.В. Волощенко, Т.Г. Цапко // *Литейное производство*. – 1986. – № 12. – С. 5.
7. Соловьев, В.П. Оценка влияния химических элементов на графитизацию чугуна / В.П. Соловьев, О.В. Курагин // *Литейное производство*. – 1991. – № 7. – С. 7–8.
8. Кабинов, Д.А. Предотвращение отбела в тонкостенных отливках из высокопрочного чугуна графитизирующими добавками / Д.А. Кабинов // *Литейное производство*. – 1978. – № 5. – С. 6–7.
9. Баландин, Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Ч 1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки / Г.Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.

Леушин Игорь Олегович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой литейно-металлургических процессов и сплавов, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 26/2. Тел.: (831)4364395. E-mail: igoleu@mail.ru.

Чистяков Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры литейно-металлургических процессов и сплавов, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 26/2. Тел.: (831)4364395. E-mail: chistyakov.nstu@mail.ru.

ON CONTROLLING THE CARBON PHASE OF THE CAST IRON FOR GLASS-MOLDS PRODUCED ON THE BASIS OF ChS5Sh ALLOY

I.O. Leushin, Nizhny Novgorod R.E. Alekseev State Technical University,
Nizhny Novgorod, Russian Federation, igoleu@mail.ru,

D.G. Chistyakov, Nizhny Novgorod R.E. Alekseev State Technical University,
Nizhny Novgorod, Russian Federation, chistyakov.nstu@mail.ru.

The article is devoted to obtaining necessary structure of glass-mold castings by regulation of the processes of alloyage, out-of-furnace processing and form filling of liquid cast iron. Controlling of behaviour of the structure components of the cast iron allows to regulate the process of creation of preform of glass-molds with specified physical and mechanical properties. Determination of rules of formation of high-carbon phase of cast iron and consumer properties of finished metal products allows to receive casting with demanded structure and to provide resource-ability of glass-mold parts above the level of world analogues.

Keywords: cast iron, casting, glass-mold, graphitization, ferritization.

References

1. Shumikhin V.S., Kutuzov V.P., Khramchenkov A.I. *Vysokokachestvennyye chuguny dlya otlivok* [High-Quality Cast Irons]. Ed. by N.N. Aleksandrov. M.: Mashinostroenie, 1982. 222 p.
2. Naydek V.L., Gavrilyuk V.P. Neizhko I.G. On the Theories of Graphite Formation in Iron. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 457, pp. 48–51. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.48.
3. Loper C.R. Jr., Fang K. Structure of Spheroidal Graphite in Cast Iron. *AFS Transactions*, 2008, 08-066, pp. 673–682.
4. Kurganov V.A. Spheroidal Graphite Heat-Resistant Cast Iron [Zharostoykiy chugun s sharovidnym grafitom]. *Liteyshchik Rossii*, 2011, no. 10, pp. 25–27.
5. Neizhko I.G. *Grafitizatsiya i svoystva chuguna* [Graphitization and the Properties of Cast Iron]. Kiev, Naukova dumka, 1989. 208 p.
6. Voloshchenko M.V. Corrosion Resistance of Ductile Cast Iron with Different Silicon Content [Korroziyona stoykost' vysokoprochnogo chuguna s razlichnym sodержaniem kremniya]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1986, no. 12, p. 5.
7. Solov'ev V.P. Estimation of the Effect of Chemical Elements on Graphitization of Cast Iron [Otsenka vliyaniya khimicheskikh elementov na grafitizatsiyu chuguna]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1991, no. 7, pp. 7–8.
8. Kabinov D.A. Prevention of Chilling in Thin-Wall Castings from Ductile Cast Iron by Graphitizing Additives [Predotvrashchenie otbela v tonkostennykh otlivkakh iz vysokoprochnogo chuguna grafitiziruyushchimi dobavkami]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1978, no. 5, pp. 6–7.
9. Balandin G.F. *Osnovy teorii formirovaniya otlivki. Ch. 1. Teplovye osnovy teorii. Zatverdevanie i okhlazhdenie otlivki* [Casting Formation Theory Basics. Pt. 1. Thermal Basics of the Theory. Solidification and Cooling of Casting]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 328 p.

Поступила в редакцию 10 сентября 2013 г.