

Днепропетровский государственный технический университет, г. Камьянское

## ГРАФИТИЗИРУЮЩЕЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК

**Введение.** Чугунное литье является наиболее распространенным в литейном производстве. На данный момент чугунные отливки – это наиболее перспективные и экономичные заготовки для различных деталей. Наряду с широко распространенным серым чугуном расширяется производство отливок из высокопрочного чугуна. Отливки из высокопрочного чугуна имеют повышенную прочность, износостойкость, твердость, но при этом обладают склонностью к затвердеванию с отбелом, что затрудняет их обрабатываемость.

**Постановка задачи.** Тонкостенные отливки с толщиной стенки 3-8мм из высокопрочного чугуна для взрывобезопасных электродвигателей получают с отбелом в литом состоянии. Наличие свободного цементита в структуре чугуна является браковочным признаком, так как значительно повышает твердость, которая может превышать допустимые пределы и усложняет механическую обработку литых заготовок в механических цехах. Поэтому для разложения цементита и получения требуемой структуры отливки подвергают графитизирующему отжигу. Проведение термической обработки требует выполнения дополнительных операций и оборудования, производственных площадей, удлиняет производственный цикл изготовления отливок, намного увеличивает энергозатраты и стоимость литья, что делает его неконкурентоспособным на рынке продукции. Для устранения этих недостатков проведены исследования получения отливок без структурно свободного цементита в литом состоянии за счет совершенствования существующей технологии и дополнительного графитизирующего модифицирования.

**Результаты работы.** По требованию отливки изготавливали из чугуна марки ВЧ35 с ферритно-перлитной структурой, наличие свободного цементита не допускается. Исходный чугун с содержанием 3,4-3,6% С, 1,6-1,8% Si, 0,3-0,5% Mn, до 0,03% S, до 0,1% P, до 0,1% Cr получали дуплекс-процессом вагранка-электродуговая основная печь ДСП-3М.

Перед выпуском чугуна из электродуговой печи при необходимости для повышения содержания углерода в жидкий металл присаживают 1,5% электродного боя. Содержание кремния довели до 1,6-1,8%, присаживая в печь ФС45. Для снижения содержания серы до 0,035% чугун обрабатывали в печи основным шлаком. В случае, если после обработки содержание серы превышало требуемые пределы, то наводили новый шлак и операцию повторяли. На выпуске из печи чугун должен иметь температуру 1773К и следующий химический состав: 3,4-3,8% углерода, 1,4-1,8% кремния, 0,3-0,5% марганца, до 0,035% серы, до 0,1% фосфора и до 0,1% хрома.

Для получения шаровидного графита чугун обрабатывали сендвич-процессом в 1,5т барабанном ковше – 2,8% комплексного модификатора ЖКМК-4р (45% Si; 2,4% Ca; 9,6% Mg; Fe – остальное). После модифицирования чугун отбирали в 300 кг разливочные ковши. Металлоемкость заливаемых форм составляла 30-60кг. Время разлива ковша составляло до 15 минут.

Отливки без вторичного модифицирования могли иметь в литом состоянии структуру половинчатого чугуна, состоящую из перлита и ледебурита с включениями

шаровидного графита. Глубина отдела в клиновой пробе составляет от 10 мм до сквозного.

Для разложения цементита и получения ферритно-перлитной структуры необходимо, чтобы отливки проходили двухступенчатый графитизирующий отжиг. Первая стадия протекает при температуре 950-960°C, общее время отжига до 28 часов.

Для выявления корреляционной зависимости структуры и механических свойств серийных отливок от химического состава металла выполнена статистическая обработка данных промышленных плавов. В качестве зависимых переменных  $Y$  приняты:  $Y_1$  – количество перлита в литом состоянии, %;  $Y_2$  – количество цементита в литом состоянии, %;  $Y_3$  – временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$ , МПа;  $Y_4$  – относительное удлинение  $\varphi$ , %;  $Y_5$  – ударная вязкость КС, Кдж/м<sup>2</sup>. Механические характеристики образцов ( $Y_1 \dots Y_5$ ) определялись после графитизирующего отжига по режиму: нагрев до температуры 980°C; выдержка в течение 5 час.; охлаждение вместе с печью.

В качестве независимых переменных были приняты:  $X_1$  – содержание С, %;  $X_2$  – содержание Si в исходном чугуна перед сфероидизирующим модифицированием, %;  $X_3$  – конечное содержание Si, %;  $X_4$  ~ содержание Mn, %;  $X_5$  – конечное содержание S, %;  $X_6$  – остаточное содержание Mg, %.

В табл.1 приведены статистические характеристики независимых переменных. Как видно, в исследованных плавках содержание С, Si и Mg изменялось в довольно широких пределах, а содержание S и Mn имеет стабильный характер.

Таблица 1 – Статистические характеристики независимых переменных

Номер переменной	Наименование переменной	Пределы изменения	Размах	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
1	С	2,95-3,40	0,45	3,14	0,087	2,8
2	Si <sub>исх</sub>	1,78-2,10	0,32	1,93	0,090	4,7
3	Si <sub>кон</sub>	2,35-3,64	1,29	3,010	0,294	9,8
4	Mn	0,50-0,70	0,20	0,510	0,041	8,0
5	S <sub>кон</sub>	0,005-0,025	0,020	0,014	0,009	64,3
6	Mg	0,025-0,006	0,041	0,043	0,013	30,2

В табл.2 приведены статистические характеристики зависимых переменных. В исследованной выборке значения прочностных характеристик и твердости металла отличались высокой стабильностью, в то время как пластические характеристики металла колебались в довольно широких пределах. Большие колебания отмечены также в содержаниях перлита и особенно цементита в литом состоянии.

Таблица 2 – Статистические характеристики зависимых переменных

Номер переменной	Наименование переменной	Пределы изменения	Среднее значение	Размах	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
1	%П	30-70	63,770	40	12,960	20,3
2	%Ц	2-40	7,930	38	12,280	155,0
3	$\sigma_b$	300-650	548,000	350	45,700	8,3
4	КС	20-160	73,400	140	30,900	42,1
5	$\varphi$	5,6-18,0	15,880	16,4	3,900	24,6

На основании выборочных данных рассчитаны уравнения регрессии, связывающие зависимые и независимые переменные.

$$\%P = 259,23 - 59,93C - 37,15Si_{исх} - 15,86Si_{кон} - 82,60Mn + 152,82S_{кон} + 164,43Mg;$$

$$\%Ц = -181,76 + 59,3 C - 36,6 Si_{исх} - 15,3 Si_{кон} + 80,3 Mn - 112,4 S_{кон} - 155,3 Mg;$$

$$\sigma_B = 23,1 + 19,15 C - 13,18 Si_{исх} + 0,97 Si_{кон} + 35,22 Mn + 37,23 S_{кон} + 164,81 Mg;$$

$$KC = -12,77 + 15,14 C - 15,35 Si_{исх} - 0,98 Si_{кон} + 15,51 Mn - 36,76 S_{кон} - 5,87 Mg;$$

$$\varphi = 16,61 + 4,10 C - 5,74 Si_{исх} - 1,66 Si_{кон} - 14,14 Mn - 74,53 S_{кон} + 39,92 Mg.$$

Как видно из полученных данных, повышенное содержание углерода в металле в исследованных пределах концентраций приводит к увеличению количества перлита и к уменьшению количества цементита в литых образцах, несколько повышает предел текучести и относительное удлинение после отжига. Влияние содержания углерода на другие параметры в данной выборке не выявлено.

Повышение содержания кремния в исходном чугуна увеличивает количество перлита и уменьшает количество цементита, снижает предел прочности и относительное удлинение. Повышение конечного содержания кремния уменьшает содержание перлита и цементита, снижает показатели пластических свойств металла.

Повышение содержания марганца увеличивает количество цементита, прочностные характеристики чугуна при этом повышаются. Исходное и конечное содержание серы не оказывает значительного влияния на структуру и свойства чугуна. Повышение содержания остаточного магния увеличивает прочность и твердость металла.

Рассматривая результаты статистического анализа, необходимо иметь в виду, что возможная корреляция между независимыми переменными могла исказить индивидуальное влияние некоторых из них. Для повышения пластических свойств чугуна необходимо снизить исходное содержание кремния в чугуна, так как его максимальное конечное содержание, по данным выборки, превышает 3,0%, что приводит к легированию феррита и снижению пластических свойств чугуна. Одновременно необходимо повысить содержание углерода для подавления образования цементита. С этой целью в шихте необходимо уменьшить долю возврата, особенно высококремнистого, повысить долю стального лома и передельного чугуна, перейти на использование в шихте более низкокремнистых литейных чушковых чугунов, уменьшить интервал колебаний по содержанию углерода в пределах 0,2% при среднем содержании 3,5%. Исходное содержание кремния перед модифицированием не должно превышать 1,4%. Для стабилизации усвоения магния необходимо подбирать более однородный гранулометрический состав лигатуры и стабилизировать температуру обработки чугуна.

Проведение промышленных плавки с соблюдением разработанных рекомендаций не обеспечивало получение отливок с требуемой структурой и механическими свойствами, особенно по пластическим показателям в сечении отливок менее 16 мм. Поэтому для получения необходимых свойств отливки дополнительно направлялись на термическую обработку. Для устранения этих недостатков (подавления образования карбидов, снижения твердости, измельчения включений графита, повышения пластических свойств чугуна в литом состоянии) проведены плавки с вторичным модифицированием чугуна. Для вторичного модифицирования выбраны ферросилиций ФС75 и ферросилиций с активными добавками. Модифицирование проводили в разливочном ковше непосредственно перед разливкой. При использовании ферросилиция с увеличением присадки при расходе 0,3...0,5% уменьшалась глубина отбела с 25 до 12 мм. Однако увеличение присадки ферросилиция приводит к увеличению содержания кремния выше рекомендуемых пределов и образованию легированного феррита. Повысить эффективность вторичного модифицирования позволяет введение в

состав ферросилиция активных элементов. Вторичная обработка высокопрочного чугуна графитизирующим модификатором приводит к созданию в жидком чугуне локальных переохлажденных объемов металла с повышенным содержанием кремния и центров кристаллизации, что приводит к изменению характера кристаллизации. В качестве активной добавки использовали кальций. Кальций является активным элементом, обладающий высоким сродством к сере и кислороду даже при высоких температурах. Образующиеся при этом соединения могут служить подложкой для образования зародышей, в частности, для включений графита. Содержание кальция в модификаторе изменялось от 3 до 12%, общий расход модификатора составлял 0,3%. На рис.1 и 2 приведены графики влияния содержания кальция на глубину отбела в клиновой пробе, количество включений графита, цементита и феррита в структуре чугуна, удлинение.

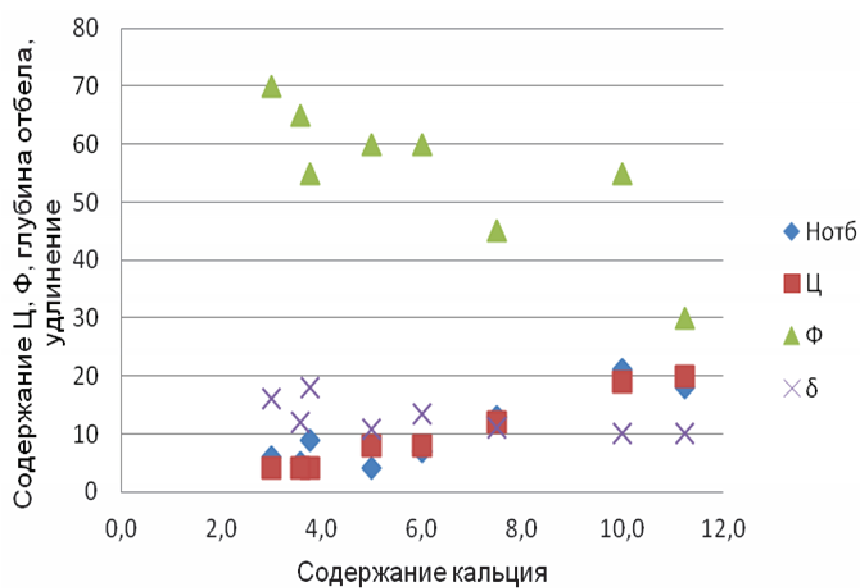


Рисунок 1 – Влияние содержания кальция на структуру и удлинение высокопрочного чугуна

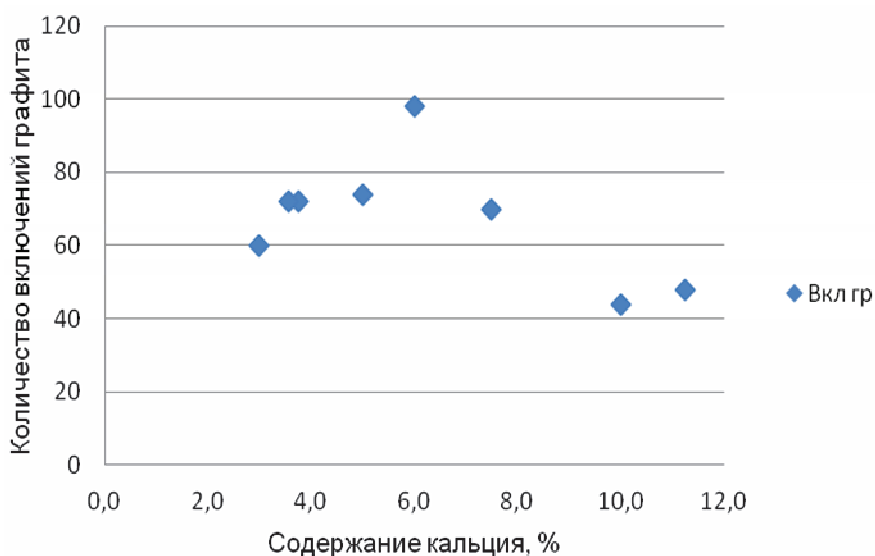


Рисунок 2 – Влияние содержания кальция на количество включений графита в чугуне

Использование кальция в составе модификатора повысило показатели по пластическим свойствам с 10 до 18% за счет изменения структуры чугуна. Глубина отбела в клиновой пробе снизилась до 6мм, и количество цементита в структуре чугуна – до 4%. При этом увеличилось также количество включений графита с 40 до 98%, однако при этом наблюдались отдельные крупные включения. При повышении содержания кальция в составе модификатора выше 6% графитизирующий эффект снижался – увеличивались отбел и доля цементита, снижались количество феррита и пластические свойства чугуна. Прочность чугуна при использовании модификатора с кальцием находилась в пределах 520-580 МПа.

**Выводы.** Установлено, что для получения тонкостенных отливок для взрывобезопасных электродвигателей из высокопрочного чугуна без отбела с высокими пластическими свойствами необходимо обеспечить исходное содержание кремния в чугуне не выше 1,4%, так как существенное его количество вносится при модифицировании. Максимальное конечное содержание кремния не должно превышать 3,0%. Необходимо повысить содержание углерода для подавления образования цементита за счет уменьшения доли возврата, особенно высококремнистого, повысить долю стального лома и чушковых чугунов. Уменьшить интервал колебаний по содержанию углерода в пределах 0,2% при среднем содержании 3,5%.

Использование для вторичного модифицирования ферросилиция ФС75 не обеспечивает полного подавления образования структурно свободного цементита, а позволяет только сократить продолжительность термической обработки. Существенно повышает эффективность обработки добавка в состав модификатора активного элемента кальция в пределах 3-6%. При расходе модификатора с кальцием не более 0,3% количество цементита в структуре чугуна не превышает 4%, количество включений графита увеличивается до 80-100%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Худокормов Д.Н. Роль примесей в процессе графитизации чугунов / Худокормов Д.Н. – Минск: Наука и техника, 1968. – 153с.
2. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В.Захарченко, Ю.Н.Левченко, В.Г.Горенко, П.А.Вареник. – К.: Наукова думка, 1986. – 246с.

*Поступила в редколлегию 06.12.2017.*