

УДК 621.74

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-7-290-26-31

*Н. И. Габельченко, Е. Ю. Карпова, В. В. Аушев,
Ю. А. Смирнов, И. В. Дьяченко, Д. Н. Зайдинов*

**РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК С РАЗНОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ
ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА С ПЛАСТИНЧАТЫМ ГРАФИТОМ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mitlp@vstu.ru

В работе приведены исследования по повышению качества отливок с разной толщиной стенки из серого чугуна, выплавленного на единой шихте. Приведены результаты исследования по разработке режимов термоциклической термообработки для графитизирующего отжига отбеленных отливок и получения структуры дисперсного перлита и заданной твердости в толстостенных отливках. Показано, что применение термоциклической обработки вместо изотермических видов графитизирующей и упрочняющей обработки отливок из чугуна дает лучший эффект в исправлении структур, сокращает продолжительность процесса, снижает энергоемкость производства.

Ключевые слова: чугун, термическая обработка, термоциклическая ТО, механические свойства, химический состав, микроструктура

*N. I. Gabelchenko, E. Yu. Karpova, V. V. Aushev,
Yu. A. Smirnov, I. V. Dyachenko, D. N. Zaidinov*

**DEVELOPMENT OF THERMAL CYCLIC TREATMENT MODES
TO IMPROVE THE QUALITY OF CASTINGS WITH DIFFERENT WALL THICKNESS
FROM GRAY CAST IRON WITH LAMLINE GRAPHITE**

Volgograd State Technical University

The paper presents research on improving the quality of castings with different wall thicknesses made of gray cast iron, smelted on a single charge. The results of a study on the development of thermal cyclic heat treatment modes for graphitizing annealing of bleached castings and obtaining a dispersed pearlite structure and a given hardness in thick-walled castings are presented. It has been shown that the use of thermal cycling treatment instead of isothermal types of graphitizing and hardening treatment of cast iron castings gives a better effect in correcting structures, reduces the duration of the process, and reduces the energy intensity of production.

Keywords: cast iron, heat treatment, thermal cycling, mechanical properties, chemical composition, microstructure

Введение

Уникальной особенностью железоуглеродистых сплавов является способность претерпевать превращения в соответствии со стабильной (Fe-C) и метастабильной (Fe-Fe₃C) диаграммами состояния. Они описывают равновесия в двух совершенно автономных системах, которые отличаются друг от друга высокоуглеродистыми фазами. В стабильной системе высокоуглеродистая фаза – графит, а в метастабильной – цементит, карбид железа Fe₃C. В соответствии с фазовым составом эвтектики, получаемой при затвердевании, различают: серые чугуны с аустенитно-графитной эвтектикой; белые чугуны с аустенитно-цементитной эвтектикой и половинчатые чугуны, у которых в состав эвтектики входят аустенит, графит и цементит.

В качестве конструкционного материала для литых деталей преимущественно применяют серые чугуны.

Для достижения необходимых технологических и эксплуатационных свойств чугунных изделий необходимо обеспечить полную графитизацию чугуна в области температур эвтектического превращения, т. е. кристаллизацию из жидкости по стабильной диаграмме Fe-C, чтобы исключить отбел, и добиться эвтектоидного превращения по метастабильной диаграмме Fe-Fe₃C с формированием перлитной структуры металлической основы [1, 2].

В условиях производства широкой номенклатуры отливок, существенно различающихся по весу и толщине стенки, изготовленных из чугуна, выплавленного по единой шихте, весьма вероятен высокий уровень брака по отбелу

и пониженной твердости. При этом в тонкостенных отливках обычно отмечается брак по отбелу, а в массивных – по пониженной твердости.

Отбеленные отливки плохо обрабатываются резанием и отличаются повышенной хрупкостью. При небольшом количестве ледебурита в структуре отливок отбел можно устранить графитизирующим отжигом отливок при температуре 950–970 °С, что неблагоприятно отражается на себестоимости отливок (дополнительные трудозатраты, энергозатраты, оборудование). Кроме того, устранить отбел отжигом не всегда удается [3] и готовые отливки приходится отправлять на переплав. Термоциклическая обработка может быть использована для повышения качества отливок с разной толщиной стенки, отлитых из чугуна одного состава. Вместе с тем большинство результатов по термоциклической обработке получено для высокопрочного чугуна с шаровидным графитом [4] и поэтому использованные режимы должны быть утонены для применения к серому чугуна с пластинчатым графитом.

Целью настоящего исследования являлась разработка режимов графитизирующего термоциклического отжига для тонкостенных отлив-

вок и стабилизирующей перлитную структуру ТЦО для толстостенных отливок из серого чугуна с пластинчатым графитом.

Методика исследования

Для исследования отбирались образцы, вырезанные из ступенчатых проб серого чугуна двух плавок с толщиной стенки 8, 25 и 60 мм (см. табл. 1), содержащего в своем составе 3,20 % С; 0,91 % Мn, 1,85 % Si; 0,11 % S; 0,18 % Р и 3,51 % С; 0,68 % Мn; 2,40 % Si; 0,09 % S; 0,14 % Р соответственно.

Отбеливаемость чугуна оценивали на клиновых пробах, которые заливали в сырую песчано-глинистую форму лезвием клина на металлическую плиту.

Термоциклирование образцов проводили путем нагрева в лабораторной печи SNOL 40/1180, охлаждения на спокойном воздухе и с обдувом сжатым воздухом. Для выбора оптимальных режимов ТЦО ускоренной и полной графитизации эвтектического цементита в отбеленных отливках и перлитизации и стабилизации твердости на заданном уровне в массивных отливках варьировали верхнюю и нижнюю температуры термоциклов, а также их количество в интервалах, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Исследованные варианты основных параметров ТЦО и традиционной ТО образцов

№ режима ТО	Температурный интервал цикла, $T_{\text{н}}^{\text{в}} - T_{\text{н}}^{\text{н}}$, °С	Количество циклов	Температура нагрева, °С	Время ТО, ч	Охлаждение
1	1000–620	3	–	2	
2	930–620	3	–	2	До 600°С в воде, далее на воздухе
3		5	–	2	
4	860–600	3	–	1,5	
5	–	–	980	6	На воздухе
6	–	–	880	3	На воздухе

Охлаждение после термоциклирования с 930 и 880 °С проводили до 600 °С в воде, затем – на воздухе, в соответствии с рекомендациями [5].

Влияние термоциклирования на структуру и свойства чугуна оценивали с использованием металлографического метода исследования, контролируя микроструктуру в соответствии

с ГОСТ 3443 [6] и определения твердости по методу Бринеля [7].

Обсуждение полученных результатов

Отбел по клину, микроструктура и твердость образцов, вырезанных из разных сечений ступенчатых проб, показаны в табл. 2 и на рис. 1, 2.

Таблица 2

Характеристики структуры и свойств твердости в разных сечениях ступенчатых проб

Отбел по клину, мм	№ плавки – толщина стенки пробы, мм	Микроструктура		Твердость, НВ
		эвтектика	металлическая основа	
21	1–8	Ледебурит, мелкий графит	Вторичный цементит, сорбит	450
	1–25	Пластинчатый графит, включения эвтектического цементита	Перлит	315
	1–60	Пластинчатый графит	Перлит	227
7	2–8	Пластинчатый графит	Перлит	220
	2–25	Пластинчатый графит	Перлит + 8 % феррита	160
	2–60	Пластинчатый графит	Перлит + 35 % феррита	132

Исходная структура отливки из чугуна первой плавки в тонкой стенке 8 мм имела очень сильный отбел; графитизация эвтектики находилась в начальной стадии и характеризовалась мелкими включениями графита; большая часть эвтектики представляла собой ледебурит; структура металлической основы являлась высоко-

дисперсным эвтектоидом, содержащим сорбит и включения вторичного цементита (рис 1). Вследствие формирования преимущественно ледебуритной эвтектики твердость резко повысилась до НВ 450, что практически исключало возможность механической обработки литых заготовок в условиях механических цехов завода.



а



б



в

Рис. 1. Микроструктура отливки из чугуна первой плавки в стенке толщиной 8 мм: а – мелкие графитовые включения (нетравленный шлиф), $\times 100$; б, в – ледебурит и сорбит (травление 4%-м раствором азотной кислоты в спирте), $\times 100$ и $\times 1000$ соответственно

При этом в толстых стенках 60 мм этой же отливки наблюдалась качественная структура: полная графитизация эвтектики без выделений эвтектического цементита и перлитная структура металлической основы. В стенке средней

толщины присутствовало некоторое количество включений эвтектического цементита, что вызвало превышение твердости относительно заданного чертежом интервала.

Микроструктура отливки из чугуна вто-

рой плавки имела качественную структуру в тонкой стенке 8 мм: перлит и графит. Но в толстых стенках этой отливки в металлической основе присутствовал феррит. Количество феррита достигало 35 % в стенке 60 мм

(рис. 2). Соответственно твердость в этой части отливки резко снизилась до НВ 132, что намного ниже уровня требований чертежа к отливкам с подобной толщиной стенок (163...229 НВ).



а



б

Рис. 2. Микроструктура отливки из чугуна второй плавки в стенке толщиной 60 мм:
а – графитовая фаза, нетравленный шлиф, $\times 100$; б – перлит и феррит $\sim 35\%$ в металлической основе, $\times 100$

В стенке со средней толщиной стенки твердость была чуть меньше нижнего предела, а в микроструктуре присутствовало около 8 % феррита.

Таким образом, для исправления структуры тонкого сечения отливки из чугуна первой плавки необходимо провести графитизирующую термическую обработку. Для толстостенной части отливки из чугуна второй плавки требуется упрочняющая термообработка.

Графитизирующий отжиг в изотермических условиях проводится при высокой температуре 950–980 °С в течение нескольких часов. Для

ускорения процесса графитизации некоторые исследователи рекомендуют высокотемпературную термоциклическую обработку.

Для выбора оптимального режима графитизирующей ТЦО варьировали количество термоциклов и верхний температурный предел термоциклирования $T_{\text{ц}}^{\text{в}}$; нижняя температура термоцикла, $T_{\text{ц}}^{\text{н}}$, оставалась постоянной.

Образцы чугуна первой, вырезанные из стенки отливки 8 мм, подвергали ТЦО по режимам 1–4 (см. табл. 1). Результаты исследования изменений микроструктуры и твердости приведены в табл. 3 и показаны на рис. 3.

Таблица 3

Микроструктура и твердость образцов чугуна первой плавки,
вырезанных из отливки с толщиной стенки 8 мм после ТЦО и изотермического отжига

№ режима	Температурные пределы циклов		Количество циклов	Микроструктура		Твердость, НВ
	$T_{\text{ц}}^{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ц}}^{\text{н}}, ^\circ\text{C}$		эвтектики	металлической основы	
1	1000	620	3	Крупные включения графита	Дисперсный перлит	195
2	930	620	3	Графит, эвтектический цементит	Перлит, мелкие включения вторичного цементита	280
3	930	620	5	Графит	Перлит	210
5	—	—	—	Графит	Перлит	180

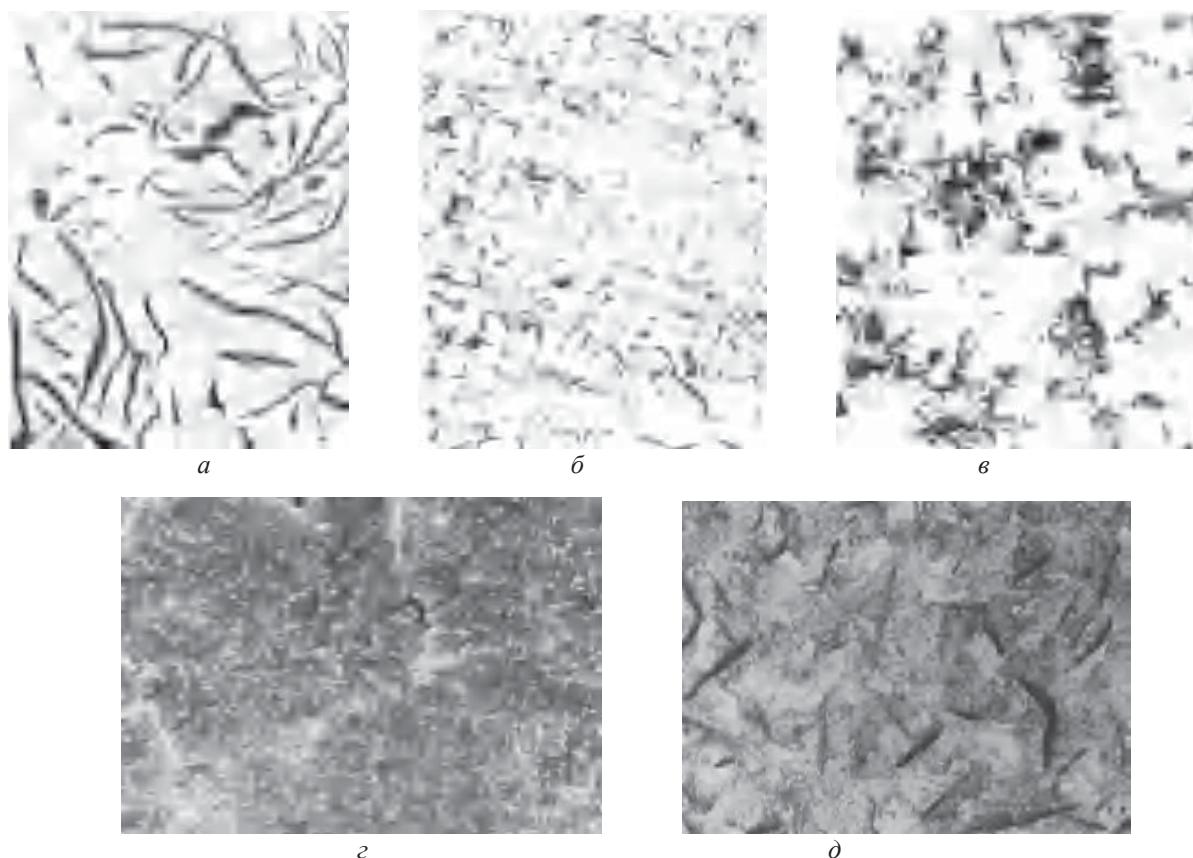


Рис. 3. Микроструктура образцов чугуна первой плавки, вырезанных из стенки толщиной 8 мм и обработанных по режимам графитизирующей ТЦО, $\times 100$: а, б, в – графитовая фаза после обработки по режимам 1, 2, 3, не травлено; з, д – структура металлической основы после ТЦО по 2-му (перлит и вторичный цементит) и 3-му (перлит) режимам, травление 4%-м раствором азотной кислоты, $\times 100$

Микроисследование образцов показало, что ТЦО по режиму 1 обеспечило полную графитизацию эвтектического цементита, но графитовые включения имели очень крупные размеры, очевидно вследствие высокой температуры $T_{\text{ц}}^{\text{в}} = 1000^\circ\text{C}$. Термоциклическая обработка по режиму 2, при более низком значении $T_{\text{ц}}^{\text{в}} = 930^\circ\text{C}$ и тех же трех термоциклах, оказалась недостаточной для графитизации ледебурита – в микроструктуре остались включения эвтектического цементита, рис 3, з. Полная графитизация эвтектики произошла при обработке по режиму 3 под действием пятикратного циклирования в интервале $930\text{--}620^\circ\text{C}$. После обработки по этому режиму были получены оптимальная микроструктура (графит и перлит) и заданная ТУ чертёжа твердость.

Графитизирующим отжигом в изотермических условиях также была получена полная графитизация эвтектики и обеспечена заданная твердость, но время термообработки оказалось в три раза выше, чем продолжительность ТЦО.

Образцы чугуна второй плавки, вырезанные из стенки ступенчатой пробы толщиной 60 мм, которые в исходном литом состоянии имели в структуре металлической основы до 35 % феррита и низкую твердость, подвергали термоциклической обработке по режиму 4 (см. табл. 1) и нормализации в изотермическом режиме 6. После ТЦО образцы в металлической основе чугуна имели структуру высокодисперсного перлита без феррита (рис. 4, а) и твердость HB 197. Структура металлической основы образцов, нормализованных по традиционному режиму 6, состояла из крупнопластинчатого перлита, в некоторых полях зрения при исследовании встречались редкие включения феррита (рис. 4, б). Расстояние между пластинками эвтектоидного цементита, характеризующее дисперсность перлита в нормализованном образце, в 5–6 больше, чем в термоциклированном. Чем меньше межпластинчатое расстояние, тем выше твердость перлита. Твердость нормализованных образцов была близка к нижнему пределу требуемой по чертежу и составляла HB 168.

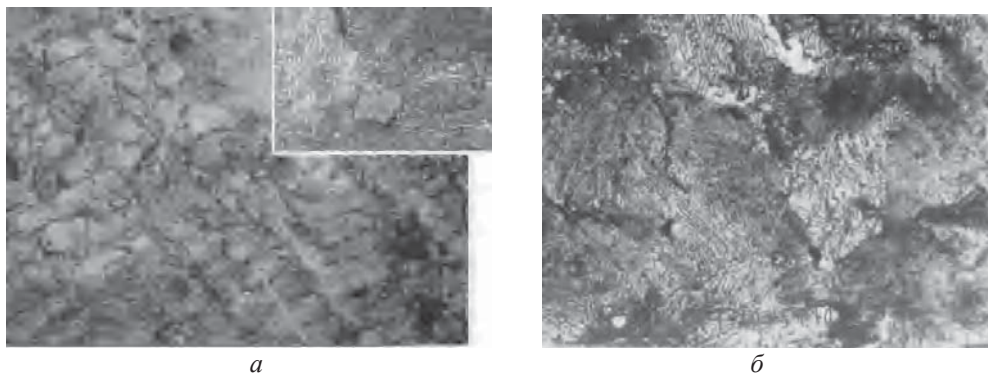


Рис. 4. Микроструктура образца второй плавки:
 а – после ТЦО по режиму 4, $\times 100$; на врезке $\times 1000$; б – после нормализации по режиму 6, $\times 100$

Выводы

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие выводы:

– наиболее результативным видом графитизирующей обработки отбеленного чугуна является ТЦО с интервалом циклирования 930–620 °С при пяти циклах;

– наиболее эффективной упрочняющей обработкой чугуна является ТЦО с трехкратным циклированием в интервале 880–600 °С и окончательным охлаждением от 880 до 600 °С в воде, затем – на воздухе;

– применение ТЦО вместо изотермических видов графитизирующей и упрочняющей обработки отливок из чугуна дает лучший эффект в исправлении структур, сокращает продолжительность процесса, снижает энергоемкость производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сильман, Г. И. Материаловедение / Г. И. Сильман. – М. : Академия, 2008. – 336 с.
2. Бунин, К. П. Основы металлографии чугуна / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. – М. : Metallurgia, 1969. – 416 с.
3. Литейные дефекты структуры тонкостенных чугунных отливок / В. А. Ильинский, Л. В. Костылева, Н. П. Рубцова, В. Г. Малков // Литейное производство. – 1988. – № 12. – С. 14–15.
4. Федюкин, В. К. Термоцилическая обработка сталей и чугунов / В. К. Федюкин. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. – 144 с.
5. А.с. 1122714 СССР, МКИ³ С 21 D 5/00, 1984. Способ термической обработки отливок из серого чугуна / В. А. Ильинский, Л. В. Костылева, В. В. Боева, Л. В. Юдина, С. С. Песковский.
6. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – М. : Стандартинформ, 2005. – 43 с.
7. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – М. : Стандартинформ, 2007. – 40 с.