

УДК 669.14

Канд. техн. наук В. В. Нетребко, д-р техн. наук И. П. Волчок

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ ЛЕГИРОВАННЫХ Mn И Ni

Определены особенности влияния термической обработки на высокохромистые чугуны различных типов. Изделия из чугунов, эксплуатируемых в условиях коррозионного воздействия среды, не рекомендуется подвергать высокотемпературной термической обработке. Предложены режимы термической обработки для повышения или понижения твердости чугунов. Для улучшения обрабатываемости чугунов целесообразно применять обезуглероживание поверхности.

Ключевые слова: чугун, легирование, термообработка, твердость, коррозия.

Введение

Требования, предъявляемые к износостойким чугунам, требуют комплексного подхода при выборе марки сплава. Сочетание износостойкости и коррозионной стойкости обеспечивается увеличением содержания хрома. Однако в процессе охлаждения отливок и их термической обработки возникают зоны, обедненные хромом, с низкой коррозионной стойкостью [1–3].

Требования к чугунам могут быть взаимоисключающими, например, высокая износостойкость и хорошая обрабатываемость резанием. В этом случае, перед обработкой резанием, проводится смягчающая термическая обработка, а затем восстанавливающая.

Основными видами термической обработки высокохромистых чугунов являются отжиг и нормализация. ГОСТ 7769 – 82 [4] регламентирует режимы термической обработки этих сплавов. Для снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием отливок рекомендуется проведение отжига (высокого отпуска) при 963...1023 К (690...750 °С) с выдержкой в течение 6...12 часов с последующим охлаждением с печью, а для повышения твердости нормализация от 1323...1373 К (1050...1100 °С) с выдержкой 1...2 часа.

Влияние легирующих элементов на положение критических точек сплава проявляется в смещении их по осям температуры и концентрации [5,6]. Поэтому рекомендации стандарта являются общими и не учитывающими специфику систем легирования чугунов.

Многими исследователями были проведены работы по разработке эффективных режимов термической обработки комплекснолегированных чугунов. Однако эти режимы требуют значительных затрат энергоносителей и не всегда приводят к значительному повышению свойств. Результаты, приведенные в работах [7–10], содержат рекомендации по термической обработке конкретных сплавов.

В процессе первичной кристаллизации происходит формирование неравновесных структур, что связано с

быстрым охлаждением отливок. Поэтому при нагреве и изотермической выдержке происходит изменение химического состава карбидов и соответственно металлической основы с образованием равновесных фаз. Снижение содержания хрома в основе менее 12 % может способствовать активизации коррозионных процессов. Особенно значительные изменения химического состава происходят в зонах возле карбидов и внутри эвтектических колоний. При изменении состава основы могут возникнуть $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения, которые вызовут образование закалочных структур или продуктов распада аустенита.

В процессе термической обработки износостойких высокохромистых чугунов возможно обезуглероживание поверхности до 4 мм и образование окалины обогащенной хромом. Обезуглероживание поверхности деталей применяется с целью улучшения их обрабатываемости [11].

Цель работы заключалась в изучении процессов перераспределения хрома при термической обработке, а также в разработке рекомендаций по выбору режимов термической обработки, обеспечивающих заданные технологические и эксплуатационные свойства.

Материал и методики исследований

Объектом исследования были высокохромистые чугуны, легированные Mn и Ni (табл.1), которые выплавливали в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 60 кг. Литые образцы подвергались отжигу при 690 и 720 °С с выдержкой в течение 9ч и охлаждением с печью, а так же нормализации от 1050 °С после выдержки в течение 1,5 и 4,5 часов.

Анализ структуры выполняли на оптических микроскопах МИМ-8 и Sigeta MM-700, а также с использованием микроскопа РЕМ 106И. Неравномерность распределения хрома в металлической основе оценивалась отношением $HP_{Cr} = Cr_{max}/Cr_{min}$.

Коррозионные испытания чугунов проводили в среде HCl с pH 2,5. Макротвердость измеряли на твердомере Роквелла.

Таблица 1 – Составы исследуемых чугунов

№ сплава	Марка чугуна	Химический состав, масс. %				
		C	Cr	Mn	Ni	Si
1	110X18Г2Н	1,09	18,33	1,99	1,28	1,38
2	150X18Г2Н	1,52	18,93	1,49	1,45	1,33
3	300X18Г2Н	2,94	18,31	1,64	1,29	1,31
4	250X12Г2Н	2,61	11,26	2,08	1,58	1,06
5	250X12Г4НЗ	2,55	11,91	3,80	2,76	1,27
6	210X22ГНЗ	2,24	22,82	1,21	2,86	1,15
7	210X22Г5	2,12	22,06	4,82	0,16	1,43
8	330X20Г5НЗ	3,33	20,23	5,53	2,69	1,12
9	330X22Г2	3,24	21,07	1,35	0,13	1,18
10	300X28Н2	3,01	29,68	0,72	1,95	1,04

Анализ полученных результатов

Структура чугунов в литом состоянии без термической обработки состояла из карбидов железа и хрома в металлической основе различного типа. (рис. 1). Количество карбидов изменялось от 9 до 36 % в зависимости от количества углерода в чугуне и типа металлической основы.

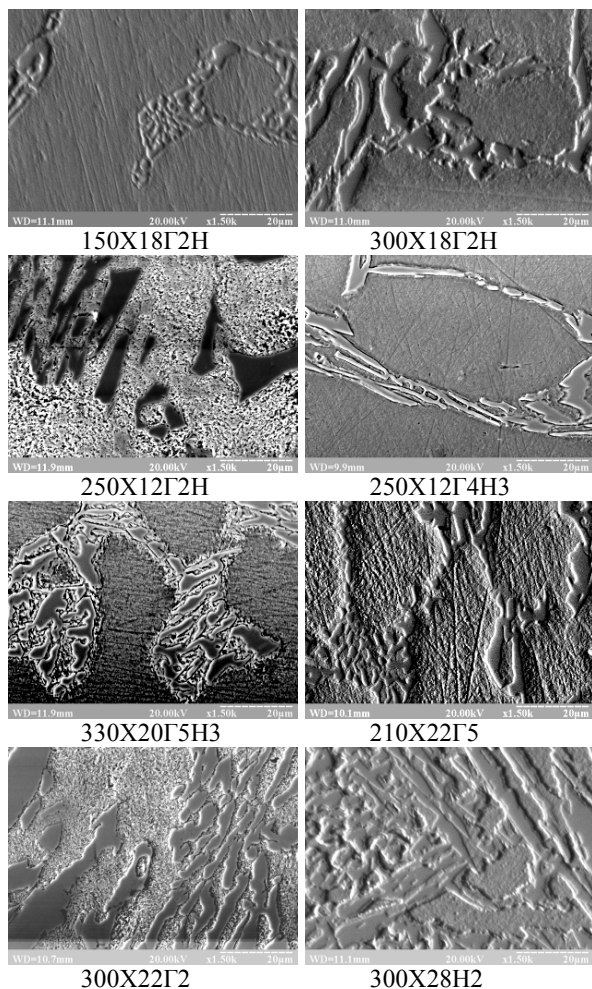


Рис. 1. Структура чугунов в литом состоянии

Металлическая основа чугунов, содержащих более 18 % хрома при сумме никеля и марганца до 4 %, состояла из легированного феррита. У остальных чугунов она изменялась от феррито-цементитной до аустенитной в зависимости от количества аустенитообразующих элементов.

В процессе термической обработки в чугунах протекали следующие процессы:

- замещение в карбидах атомов никеля, железа, кремния и марганца атомами хрома до уровня равновесной концентрации с металлической основой;

- снижение концентрации хрома и повышение содержания Mn и Ni в зонах возле карбидов, связанное с низкой диффузией атомов, не обеспечивающей выравнивание состава (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние термической обработки на неравномерность распределения хрома и скорость коррозии

№ сплава	V _{корр.} , гм ² /ч без ТО	Содержание Cr, масс. %	Термообработка			
			без ТО	690°C	720°C	1050°C τ -4,5ч
1	0,551	min	13,05	13,22	12,83	13,51
		HP _{Cr}	1,16	1,14	1,18	1,11
2	0,689	min	12,90	12,62	10,83	13,14
		HP _{Cr}	1,23	1,16	1,34	1,07
3	1,114	min	8,42	7,65	6,73	10,17
		HP _{Cr}	1,36	1,29	1,55	1,15
4	1,687	min	3,95	3,97	3,98	6,11
		HP _{Cr}	1,87	1,78	1,71	1,38
5	1,570	min	5,47	5,98	6,02	6,92
		HP _{Cr}	1,58	1,36	1,28	1,42
6	0,619	min	13,43	8,92	6,54	6,77
		HP _{Cr}	1,23	1,29	1,69	1,51
7	2,454	min	11,77	13,19	13,35	14,64
		HP _{Cr}	1,37	1,17	1,17	1,11
8	0,698	min	8,61	8,79	6,23	6,55
		HP _{Cr}	1,28	1,22	1,60	1,29
9	1,960	min	8,45	8,66	8,27	7,19
		HP _{Cr}	1,71	1,40	1,28	1,36
10	0,616	min	14,43	14,09	14,05	12,94
		HP _{Cr}	1,12	1,15	1,15	1,19

Снижение содержания хрома в металлической основе до 12 % и ниже вызывало возникновение местной коррозии этих зон, что связано с возникновением разности потенциалов между участками металлической основы, содержащими более 13 % Cr (положительный потенциал) и участками, содержащими менее 12 % (отрицательный потенциал) [6, 12].

Основные виды коррозионных процессов, наблюдаемых в исследуемых чугунах, представлены на рис. 2. Низкая скорость общей коррозии (рис. 2 а) наблюдалась в чугунах, содержащих более 13 % Cr в металлической основе. Коррозия зон возле карбидов (рис. 2 б),

связанная с обеднением этих участков хромом наблюдали в чугунах 110X18Г2Н и 150X18Г2Н. Местная язвенная коррозия (рис. 2 в) и общая коррозия с большой скоростью в сочетании с язвенной коррозией (рис. 2 з) возникали в чугунах, содержащих в основе менее 12 % хрома.

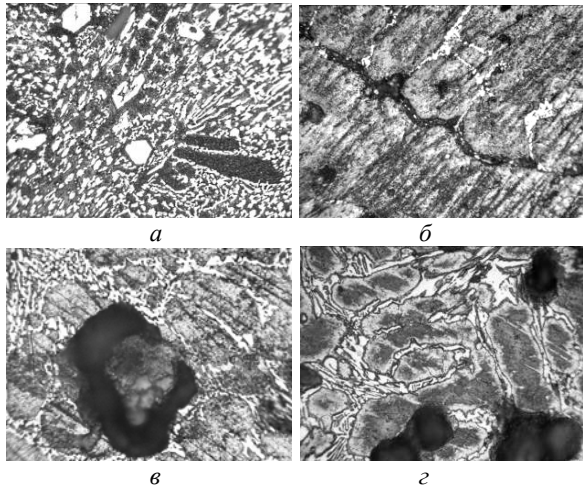


Рис. 2. Основные виды коррозии в исследуемых чугунах: а – общая коррозия; б – коррозия зон возле карбидов; в – коррозия язвами; з – общая коррозия в сочетании с язвами, $\times 400$

В чугунах 110X18Г2Н, 210X22ГНЗ и 300X28Н2 наблюдали общую коррозию со скоростью менее $0,62 \text{ гм}^2/\text{ч}$ (табл.2), при этом содержание хрома в металлической основе превышало 13 %.

Повышение содержания карбидообразующего элемента – углерода, снижало концентрацию хрома в основе и увеличивало скорость коррозии. В чугуне 110X18Г2Н (сплав 1) скорость коррозии составляла $0,55 \text{ гм}^2/\text{ч}$, а у 300X18Г2Н (сплав 2) в два раза выше (табл. 2). Увеличение содержания никеля в чугуне снижало скорость коррозионных процессов (сплавы 5 и 6).

В процессе охлаждения сплава 210X22Г5 возле карбидов образовались зоны, в которых содержание хрома было менее 12 %. Это связано с образованием неравновесных карбидов $(\text{Cr,Fe,Mn})_7\text{C}_3$, в которых при остывании отливки протекал процесс замещения атомов марганца и железа атомами хрома. В процессе термической обработки произошло образование карбидов, равновесных с металлической основой и ее гомогенизация. Отношение концентраций хрома в основе HP_{Cr} понизилось с 1,37 в литом состоянии до 1,17 после отжига и до 1,11 после нормализации. Концентрация хрома в основе повысилась до 13 % и более (см. табл. 2).

В металлической основе чугуна 210X22ГНЗ, в литом состоянии, содержалось 13,43 % хрома. В процессе отжига при 690°C содержание хрома в карбидах повысилось, а в металлической основе снизилось до 8,9 %, а при отжиге при 720°C до 6,5 %. После нормализации этого чугуна содержание хрома в основе составляло 6,8 % (см. табл. 2).

Отжиг при 690°C незначительно уменьшал неоднородность распределения хрома в металлической основе, а в чугунах 210X22ГНЗ и 300X28Н2 отношение хрома в основе max/min повысилось с 1,23 до 1,29 и с 1,12 до 1,15 соответственно (см. табл. 2).

После отжига при 720°C максимальная неоднородность металлической основы по хромовому составу составила 1,69 и 1,71 у чугунов 210X22ГНЗ и 250X12Г2Н соответственно.

Нормализации от 1050°C с выдержкой 4,5 часа способствовала гомогенизации химического состава основы (табл. 2), при этом наблюдали процесс обогащения карбидов хромом, что снижало его концентрацию в основе. Минимальное значение HP_{Cr} хрома в основе составило 1,07 у чугуна 150X18Г2Н, а максимальное 1,51 у чугуна 210X22ГНЗ.

Повышение растворимости углерода в металлической основе в процессе нагрева и выдержки вызывало частичное растворение карбидов. Особенно большие изменения в структуре чугуна наблюдали после выдержки при 1050°C .

В чугуне 250X12Г2Н после отжига при 720°C наблюдали продукты распада аустенита (рис. 3). Образование зернистых структур понизило твердость чугуна с 53 до 37 HRC (табл. 3). Аналогичные процессы протекали в чугуне 330X22Г2.

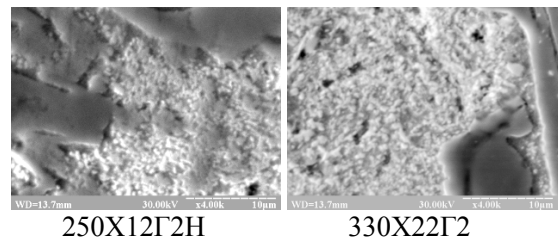


Рис. 3. Структура чугунов после отжига при 720°C

Таблица 3 – Влияние термической обработки на твердость чугунов

Состав	Твердость, HRC				
	без ТО	отжиг		нормализация	
		690°C	720°C	1050°C $\tau -1,5 \text{ ч}$	1050°C $\tau -4,5 \text{ ч}$
1	34,1	43	51,3	36,7	44,5
2	35,7	45	48,5	45,2	54,7
3	50,8	46	46,5	53,2	58,0
4	53,3	47,0	37	40,3	53,7
5	38,9	44,0	55,7	37,2	38,0
6	49,1	48	44,2	51,3	58,5
7	43,5	47	50	45,0	43,2
8	47,0	56,0	55,7	43,8	43,3
9	51,5	44	38,7	61,7	62,5
10	57,5	50	48,5	58,8	60,7

Легирование Mn и Ni снижало температуру $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения чугунов. В чугунах 110X18Г2Н и 250X12Г4НЗ в процессе отжига при 720°C образовались закалочные структуры, что повысило их твердость до 51...56 HRC (см. табл.3). В чугуне 330X20Г5НЗ полу-

чение закалочных структур наблюдалось после отжига при 690 и 720 °С.

В процессе нормализации избыточный углерод фиксировался в аустените и феррите, а в некоторых случаях выделялся в виде мелкодисперсных карбидов (рис.4), что повысило твердость чугунов 300X18Г2Н, 210X22ГНЗ, 300X22Г2 и 300X28Н2 до 58 HRC и более (см. табл. 3).

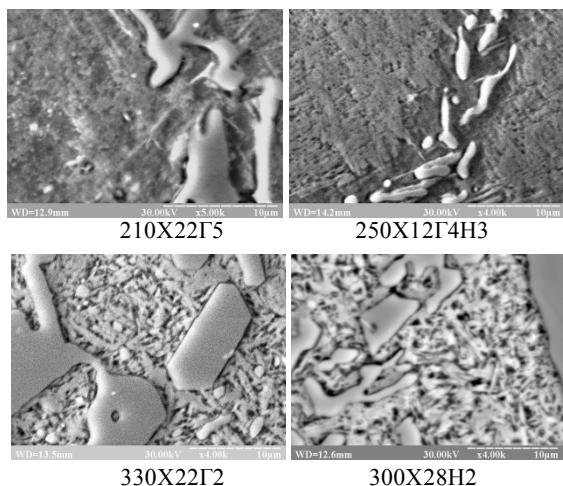


Рис. 4. Структура чугунов после нормализации от 1050 °С

В процессе термической обработки на поверхности образцов образовывалась окалина, содержащая до 37 % хрома (рис. 5). Затрудненная диффузия хрома к поверхности в процессе отжига при 720 °С вызвала образование слоя, содержащего до 2 % хрома.

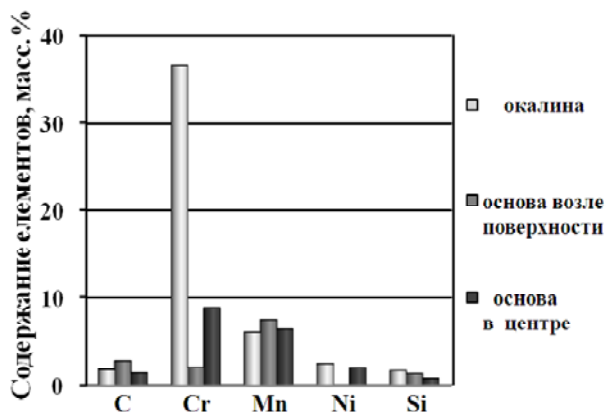


Рис. 5. Химический состав окалины, металлической основы поверхностного и центрального слоев в чугуне 330X20Г5НЗ после отжига при 720 °С

Повышение температуры термической обработки до 1050 °С, а так же отсутствие защитной атмосферы способствовало возникновению слоя обезуглероживания на глубину 20...30 мкм (рис. 6).

Отсутствие карбидов в обезуглероженном слое способствует улучшению обрабатываемости чугуна, а также повышению коррозионной стойкости из-за отсутствия зон с низким содержанием хрома.

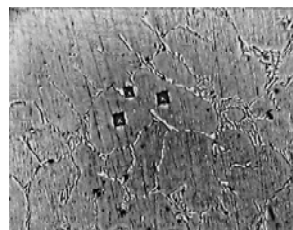


Рис. 6. Слой обезуглероживания в чугуне 210X22Г5 × 300

Выводы

1. Отжиг при 720 °С с выдержкой 9ч. гомогенизировал металлическую основу чугуна 210X22Г5, повысил минимальное содержание хрома в основе, увеличил его коррозионную стойкость и твердость.

2. Снижение твердости чугунов 250X12Г2Н, 330X22Г2 произошло после отжига при 720 °С с выдержкой 9 ч, а 110X18Г2Н, 250X12Г4НЗ после нормализации от 1050 °С с выдержкой 1,5 ч.

3. Повышение твердости чугунов 110X18Г2Н, 150X18Г2Н, 250X12Г4НЗ, 210X22Г5, 330X20Г5НЗ наблюдали после отжига при 720 °С с выдержкой 9 ч, а 150X18Г2Н, 300X18Г2Н, 210X22ГНЗ, 330X22Г2 после нормализации от 1050 °С с выдержкой 4,5 ч.

4. Для улучшения обрабатываемости чугунов с незначительной механической обработкой (шлифование) целесообразно применять обезуглероживание поверхности.

Список литературы

1. Belikov S. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron / S. Belikov, I. Volchok, V. Netrebko // Archives of Metallurgy and Materials. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 895–897.
2. Нетребко В. В. Особенности легирования хромом износостойких чугунов / В. В. Нетребко, И. П. Волчок // Литье и металлургия. – 2013. – № 3. – С. 75–78.
3. Нетребко В. В. Особенности процессов образования карбидов и распределения Cr, Mn и Ni в белых чугунах / В. В. Нетребко // Литье и металлургия. – 2015. – № 3. – С. 40–46.
4. ГОСТ 7769-82 Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки. – Введ. 1983-01-01. – М. : Изд-во стандартов. – 1982. – 15с.
5. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. – М.-Л. : Машиностроение. – 1966. – 564 с.
6. Гудремон Э. Специальные стали / Э. Гудремон. – М. : Металлургия. – 1966. – Т. 1. – 736 с.
7. Влияние термической обработки на свойства высокохромистого чугуна / [М. Н. Беркун, И. П. Волчок, И. В. Живица, В. И. Топал] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1971. – № 1. – С. 64–66.
8. Куцова В. З. Влияние температуры нагрева на формирование структуры, фазовый состав и свойства высокохромистых чугунов в исходном и термообработанном состоянии / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, А. В. Кравченко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 1. – С. 35–50.
9. Чабак Ю. Г. Влияние режима отжига на микроструктуру и твердость высокохромистых чугунов с повышен-

- ным содержанием аустенитообразующих элементов / Ю. Г. Чабак // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научных трудов. – Днепропетровск : ПГАСиА. – 2013. – Вып. 65. – С. 188–192.
10. Чейлях А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А. П. Чейлях. – Харьков : ННЦ ХФТИ. – 2003. – 212 с.
 11. Обезуглероживание высокохромистого чугуна при нагреве под закалку / [В. Г. Ефременко, Ю. Г. Чабак, В. Г. Гаврилова, Б. В. Ефременко] // Сб. научн. тр. «Вестник ПГТУ». – ПГТУ : Мариуполь. – 2013. – Вып. 26. – С. 99–108.
 12. Малахов А. И. Основы металловедения и теории коррозии / А. И. Малахов, А. П. Жуков. – М. : Высшая школа. – 1978. – 192 с.

Одержано 12.05.2016

Нетребко В.В., Волчок И.П. Особливості термічної обробки високохромистих чавунів легованих Mn та Ni

Визначені особливості впливу термічної обробки на високохромисті чавуни різних типів. Вироби з чавунів, які експлуатують в умовах впливу корозійного середовища, не рекомендується піддавати термічній обробці при високій температурі. Запропоновані режими термічної обробки для підвищення або зменшення твердості чавунів. Для поліпшення оброблюваності чавунів пропонується застосовувати знеуглецювання поверхні.

Ключові слова: чавун, легування, термообробка, твердість, корозія.

Netrebko V., Volchok I. Peculiarities of heat treatment of high-chromium cast irons alloyed by Mn and Ni

Peculiarities of the influence of heat treatment on different types of high-chromium cast irons were defined. It is not recommended to expose the products made of cast irons, operating in the corrosive medium to high-temperature heat treatment. Heat treatment modes for increasing or decreasing the cast irons' hardness were suggested. It is recommended to apply decarbonization of the surface to improve the cast irons' machinability.

Key words: cast iron, alloying, heat treatment, hardness, corrosion.
