

УДК.669.15

Канд. техн. наук В. В. Нетребко*Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ НА ТВЕРДОСТЬ Cr-Mn-Ni ЧУГУНОВ

Комплексное легирование чугунов требует корректировки режимов термической обработки. Методом математического планирования эксперимента установлены регрессионные зависимости твердости чугунов от содержания C, Cr, Mn и Ni, после изотермической выдержки в течение 1,5 и 4,5 ч при 1050 °С с последующей нормализацией. Рекомендованы оптимальные режимы термической обработки чугунов различного состава.

Ключевые слова: чугун, легирование, нормализация, структура, твердость.

Введение

Термическая обработка чугунов имеет большое значение при формировании структуры и свойств, обеспечивающих долговечность, надежность и эксплуатационную стойкость деталей [1–4].

Формирование структур для конкретных условий эксплуатации или технологических потребностей достигается путем легирования и оптимизации режимов термической обработки.

Структура высокохромистых чугунов, состоящая из металлической основы и карбидов, определяется количеством углерода и его растворимостью в твердом растворе. Углерод, связанный в карбиды не оказывает влияние на свойства металлической основы. Растворимость углерода в α -Fe очень мала, поэтому сплавы на основе железа, которые не претерпевают $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения при нагреве и охлаждении практически не закаляются и соответственно не обладают высокой твердостью. Повышение твердости таких сплавов достигается за счет твердорастворного упрочнения или измельчения структуры.

Легирование высокохромистых чугунов марганцем и никелем способствует образованию γ -Fe и оказывает влияние на растворимость углерода. Марганец повышает растворимость углерода, а никель понижает. Применение марганца и никеля для повышения износостойких свойств высокохромистых чугунов оказывает большое влияние на положение критических точек структурных диаграмм, что вызывает необходимость оптимизировать режимы термической обработки.

При комплексном легировании Cr, Mn и Ni наблюдается большое взаимное влияние этих элементов на их распределение и процессы структурообразования. Марганец повышает содержание хрома в карбидах. Хром изменяет распределение марганца между основой и карбидами. Никель, уменьшая растворимость углерода в основе, влияет на процессы карбидообразования и

стабилизирует аустенит [5–8]. При комплексном легировании чугунов, воздействие элементов на положение критических точек проявляется очень сложно, а иногда противоречиво. Влияние элемента зависит от наличия и концентрации других компонентов сплава и ряда факторов.

При термической обработке комплексно легированных чугунов большое значение имеет время изотермической выдержки и скорость охлаждения. В связи с низкой теплопроводностью и низкой пластичностью высоколегированных чугунов, охлаждение деталей из этих сплавов рекомендуется проводить в спокойном воздухе (нормализация) или в печи (отжиг) [10]. Время изотермической выдержки при определенной температуре должно обеспечивать полноту протекания диффузионных процессов. Различная скорость диффузии легирующих элементов в металлической основе связана как с их свойствами, так и с содержанием большого количества других легирующих элементов, препятствующих перемещению атомов.

Твердость чугунов является комплексным показателем, зависящим от твердости металлической основы, количества карбидов, их твердости, дисперсности и характера распределения, а так же других факторов.

В высокохромистых чугунах, в зависимости от соотношения Cr / C образуются карбиды типа Me_3C , Me_7C_3 и $Me_{23}C_6$. Карбиды Me_3C имеют твердость 800...1100, а Me_7C_3 – 1200...1700 HV. Карбиды $Me_{23}C_6$ имеют твердость незначительно меньшую, чем Me_7C_3 . Увеличение времени выдержки при высоких температурах способствует процессу замещению атомов железа атомами хрома. Повышение содержания хрома в карбидах повышает их твердость, но обедняет металлическую основу хромом. Обеднение основы хромом способствует протеканию $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения железа и может повышать твердость металлической основы. Металлическая основа высокохро-

мистых чугунов, в зависимости от условий формирования структуры (отжиг, закалка) и наличия легирующих элементов (твердорастворное упрочнение) может иметь твердость от 275 HV (феррит) до 940 HV (мартенсит) [1, 8, 11].

Для повышения твердости отливок из высокохромистых износостойких чугунов ГОСТ 7769 – 82 рекомендует нормализацию от 1323...1373 °K (1050...1100 °C) с выдержкой 12 часов. Рекомендации стандарта не учитывают специфику систем легирования чугунов, а также низкую скорость протекания диффузионных процессов в комплексно-легированных чугунах.

Результаты работ [8, 11–15] содержат рекомендации по термической обработке конкретных сплавов.

Литературные данные не позволяют объективно оценить влияние C, Cr, Mn и Ni при их комплексном применении на твердость чугунов после нормализации от 1050 °C.

Цель работы заключалась в получении регрессионных зависимостей твердости чугуна от содержания C, Cr, Mn и Ni после изотермической выдержки 1,5 и 4,5 часа при 1050 °C с последующей нормализацией.

Материал и методики исследований

Чугун выплавлялся в индукционной печи с основной футеровкой. Литые образцы подвергались нормализации от 1050 °C после выдержки в течение 1,5 и 4,5 часов. Анализ структуры выполняли на оптических микроскопах МИМ-8 и Sigeta MM-700 и микроскопе РЕМ 106И. Макротвердость сплава определяли на твердомере Роквелла.

Для построения математической модели зависимости твердости от химического состава чугуна, после изотермической выдержки при 1050 °C и нормализации, использовали метод активного планирования эксперимента (табл. 1).

Таблица 1 – Матрица планирования факторного эксперимента 2⁴⁻¹

Уровни варьирования факторов		Факторы, масс. %			
		C	Cr	Mn	Ni
Основной	0	2,5	18,5	3,0	1,6
Интервал	Δ	1,0	5,0	1,7	1,0
звездное плечо	1,414Δ	1,41	7,07	2,4	1,41
Верхние	+1	3,5	23,5	4,7	2,6
	+1,414	3,91	25,57	5,4	3,01
Нижние	-1	1,5	13,5	1,3	0,6
	-1,414	1,09	11,43	0,6	0,19

Анализ полученных результатов

В результате математической обработки экспериментальных данных получены регрессионные зависимости твердости чугуна от содержания C,

Cr, Mn и Ni после нормализации от 1050 °C с выдержкой 1,5 и 4,5 ч:

$$HRC_{1050-1,5} = 11,22C + 2,38Cr - 4,91Ni - 0,45CCr - 0,18MnCr + 1,39MnNi + 8,7;$$

$$HRC_{1050-4,5} = 8,196C - 0,897CMn - 2,761CNi + 0,323CrNi + 38,379.$$

Данные уравнения являются математически вероятностными в соответствии с критериями Стьюдента, Фишера и Кохрена.

Структура чугунов после изотермической выдержки в течение 1,5 ч незначительно отличалась от структуры чугунов после выдержки 4,5 ч. Типичные виды структуры чугунов после изотермической выдержки в течение 4,5 ч при 1050 °C и последующей нормализации представлены на рис. 1.

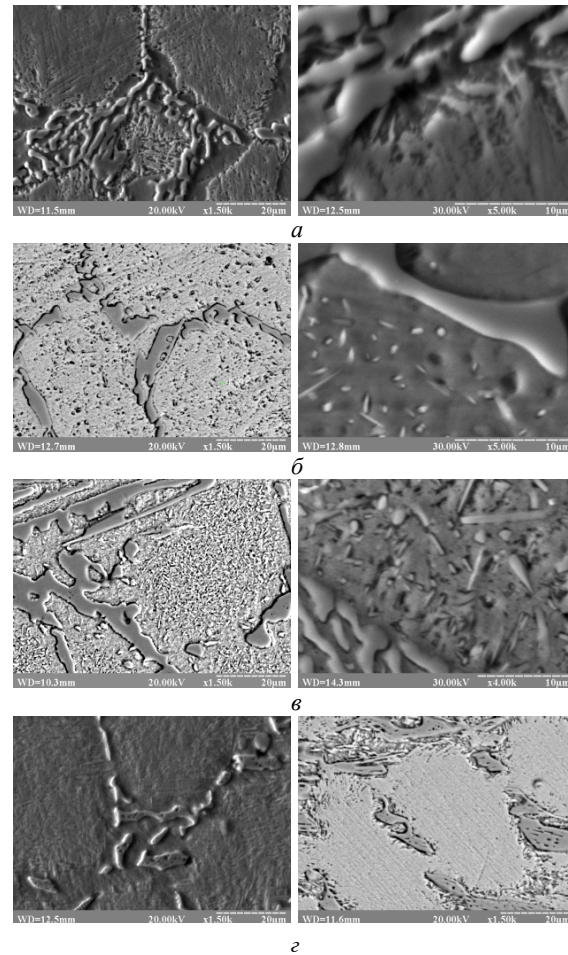


Рис. 1. Структуры исследуемых чугунов после нормализации с выдержкой 4,5 часа:

- а – чугуны без α↔γ превращений и выделений вторичных карбидов;
- б – чугуны без α↔γ превращений с незначительными выделениями карбидов;
- в – чугуны с α↔γ превращениями и большим количеством вторичных карбидов;
- г – чугуны без α↔γ превращений с трансформацией первичных карбидов

В чугунах, содержащих минимальное или максимальное количество Mn и Ni, $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращение не протекало. Структура чугунов, в которых не происходило $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращение, представлена на рис. 1, а. В процессе нагрева и выдержки при 1050 °С, увеличивалась растворимость углерода, вызывающая частичное растворение карбидной фазы. В этих чугунах после нормализации наблюдались выделения отдельных мелкодисперсных карбидов рис. 1, б. В чугунах, в которых протекали $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения, возрастала растворимость углерода (карбидов). После нормализации в структуре чугунов присутствовало большое количество мелкодисперсных вторичных карбидов рис. 1, в. Выдержка при 1050 °С вызывала трансформацию карбидов с образованием вкраплений аустенита в центральных частях карбидов рис. 1, г.

Составы чугунов с минимальной и максимальной твердостью после нормализации от 1050 °С с выдержкой 1,5 и 4,5 ч представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Твердость и составы чугунов после нормализации от 1050 °С

Химический состав, масс. %				HRC _{1050-1,5}
C	Mn	Cr	Ni	
1,09	0,60	11,43	3,01	29,0
1,09	0,60	25,57	0,19	65,6
Химический состав, масс. %				HRC _{1050-4,5}
C	Mn	Cr	Ni	
3,91	5,40	11,43	3,01	30,10
3,91	0,60	25,57	0,19	67,70

Анализ табл. 2 показывает, что увеличение времени выдержки при 1050 °С до 4,5 ч увеличивает минимальный и максимальный уровни твердости чугунов в данной системе легирования.

Максимальную твердость после выдержки 1,5 ч имел чугун, содержащий 1,09% С, а после 4,5 ч – 3,91% С. Данный факт свидетельствует о том, что выдержка в течение 1,5 ч не обеспечивает полную протекания диффузионных процессов.

Не зависимо от времени выдержки минимальную твердость имели чугуны, содержащие 11,43% Cr (минимальное количество) и 3,01% Ni (максимальное количество), что связано с образованием аустенита, обладающего низкой твердостью. Максимальная твердость наблюдалась при 25,57% Cr (максимальное количество) и 0,19% Ni (минимальное количество), что связано с образованием закалочных структур.

Влияние С, Cr, Mn и Ni на твердость чугуна после нормализации от 1050 °С представлено на рис. 2 (выдержка 1,5 ч) и рис. 3 (выдержка 4,5 ч).

Анализ влияния углерода на твердость чугуна после выдержки 1,5 ч при 1050 °С и нормализации показал, что по мере его увеличения твердость чугуна возрастала, однако при повышении содержания хрома в чугуне интенсивность влия-

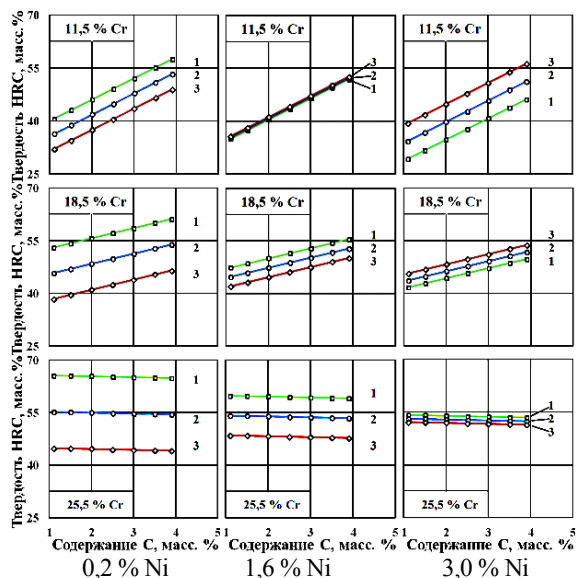


Рис. 2. Влияние С, Cr, Mn и Ni на твердость чугуна после выдержки в течение 1,5 ч при 1050 °С и нормализации: 1 – 0,6 % Mn; 2 – 3,0 % Mn; 3 – 5,4 % Mn

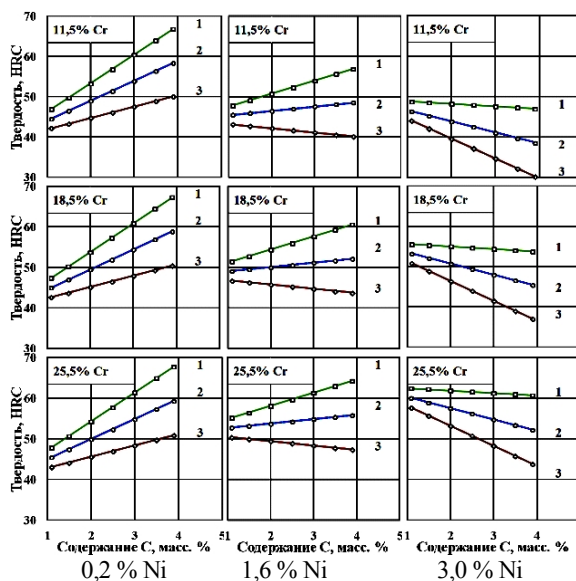


Рис. 3. Влияние С, Cr, Mn и Ni на твердость чугуна после выдержки в течение 4,5ч при 1050 °С и нормализации: 1 – 0,6 % Mn; 2 – 3,0 % Mn; 3 – 5,4 % Mn

ния углерода снижалась. При содержании в чугуне 25,57% Cr влияние углерода было незначительным, что объясняется преобладанием влияния твердости металлической основы как составляющей макротвердости.

Увеличение содержания хрома повышало твердость чугунов, кроме составов, содержащих 3,9% С и 3,5...5,4% Mn.

Влияние Mn и Ni на твердость чугунов зависела от их совместного содержания. При содержании 0,2...1,6% Ni увеличение содержания марганца понижало твердость чугунов. При 3,0% Ni

повышение количества марганца увеличивало твердость чугунов, содержащих 11,5...18,5% Cr, а при 25,5% Cr понижало.

Увеличение количества никеля в чугунах, содержащих 0,6% Mn, понижало твердость, а при 5,4% повышало.

При увеличении выдержки до 4,5 ч влияние элементов на твердость чугуна изменилось. Увеличение количества углерода в чугуне повышало твердость чугунов, содержащих 0,6...4,0% Mn и 0,2...1,8% Ni, а при больших концентрациях этих элементов снижало.

Снижение твердости чугунов, содержащих 0,2% Ni, по мере увеличения количества марганца происходило интенсивней по мере увеличения углерода.

Увеличение содержания хрома повышало твердость чугуна, при этом интенсивность влияния хрома возрастала по мере увеличения концентрации никеля.

Влияние никеля зависело от содержания углерода. В чугунах, содержащих 1,1% C никель повышал твердость, а при 3,9% C понижал.

Специфическое влияние C, Cr, Mn, и Ni на твердость чугуна объясняется процессами структурообразования. В случае образования мартенситной структуры или твердорастворного упрочнения феррита, твердость чугунов повышается, а при образовании карбидов цементитного типа Me_3C , обладающих низкой твердостью по сравнению с основой, понижается, за исключением случая образования жесткой сетки ледебурита.

Для чугунов, содержащих 22,5...25,5% Cr и 1,1...3,9% C, а также минимальное количество Mn и Ni нормализация от 1050 °C при выдержке 1,5 ч повышала твердость. Максимальное значение твердости наблюдалось в чугуне с 1,1% C. Минимальные значения твердости имели чугуны, содержащие 11,5...14,5% Cr, 1,1...2,1% C, 3,0% Ni и 0,6% Mn.

В чугунах, после нормализации от 1050 °C при выдержке 4,5 ч максимальная твердость наблюдалась при содержании 3,6...3,9% C, 17,5...25,5% Cr, 0,6% Mn и 0,2% Ni, а минимальная при 3,6...3,9% C, 11,5...14,5% Cr, 5,4% Mn и 3,0% Ni.

Выводы

1. Нормализация от 1050 °C повышает твердость чугунов с минимальным содержанием марганца и никеля, и понижает твердость сплавов, легированных марганцем и никелем, что связано с образованием аустенитной металлической основы.

2. Увеличение времени выдержки при 1050 °C с 1,5 до 4,5 ч способствует более полной гомогенизации сплава и протеканию процессов перераспределения элементов, тем самым достигается минимальный и максимальный уровни твердости чугунов в данной системе легирования.

Список литературы

1. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны / Гарбер М. Е. — М. : Машиностроение. — 2010. — 280 с.
2. 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.
3. Gierek A. Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne / A. Gierek, L. Bajka. — Katowice : Slask. — 1976. — 230 p.
4. Analysis of the Structure and Abrasive Wear Resistance of White Cast Iron With Precipitates of Carbides / D. Kopycicki, M. Kawalec, A. Szczekny, R. Gilewski, S. Piasny // *Archives of Metallurgy and Materials. Institute of metallurgy and materials science of Polish academy of sciences*. — 2013. — Vol. 58, Issue 3. — P. 973–976.
5. Нетребко В. В. Влияние отжига на твердость Cr-Mn-Ni чугунов / В. В. Нетребко // *Литье и металлургия*. — 2015. — № 2. — С. 95–101.
6. Нетребко В. В. Влияние марганца на структуру высокохромистых чугунов / В. В. Нетребко // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. — 2012. — Вып. 42. — С. 167–169.
7. Belikov S. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron / Belikov S., Volchok I., Netrebko V. // *Archives of Metallurgy and Materials*. — Vol. 58. 3. — 2013. — P. 895–897.
8. Чейлях А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / Чейлях А. П. — Харьков : ННЦ ХФТИ. — 2003. — 212 с.
9. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Гиршович Н. Г. — М.-Л. : Машиностроение. — 1966. — 564 с.
10. ГОСТ 7769-82 Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки. — Введ. 1983-01-01. — М. : Изд-во стандартов. — 1982. — 15 с.
11. Цыпин И. И. Износостойкие отливки из белых легированных чугунов. — М. : НИИмаш. — 1983. — 56 с.
12. Чабак Ю. Г. Структурные изменения в комплексно-легированном белом чугуне при дестабилизирующем нагреве / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Р. Р. Станишевский // *Вестник ДНУЗТ им. В. Лазаряна : сб. науч. трудов*. — 2011. — № 38. — С. 229–232.
13. Структурные изменения в литом чугуне 270X15Г2Н1МФТ при нагреве выше точки Ac_1 / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Т. В. Козаревская [и др.] // *Тезисы международной*

- научно-практическая конф. «Университетская наука. – 2011». – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ». – 2011. – 187 с.
14. 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.
15. Чабак Ю. Г. Влияние режима отжига на микроструктуру и твердость высокохромистых чугунов с повышенным содержанием аустенитообразующих элементов / Ю. Г. Чабак // *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научных трудов.* – Днепропетровск: ПГАСиА. – 2013. – Вып. 65. – С. 188–192.

Поступила в редакцию 12.04.2016

Нетребко В.В. Вплив нормалізації на твердість Cr-Mn-Ni чавунів

Комплексне легування чавуну потребує коректури режиму термічної обробки. Методом математичного планування експерименту встановлені регресивні залежності твердості чавунів від вмісту C, Cr, Mn та Ni після ізотермічної витримки протягом 1,5 та 4,5 годин при 1050 °C з подальшою нормалізацією. Рекомендовані оптимальні режими термічної обробки чавунів з різним складом.

Ключові слова: чавун, легування, нормалізація, структура, твердість.

Netrebko V. The influence of normalization on the hardness of Cr-Mn-Ni cast irons

Complex alloying of cast irons requires the adjustment of heat treatment modes. Regression dependences of cast irons' hardness on C, Cr, Mn and Ni content after isothermal holding during 1.5 and 4.5 hours at 1050 °C with further normalization were established by means of the mathematical experiment planning method. Optimal heat treatment modes for cast irons of different compositions were recommended.

Key words: cast iron, alloying, normalization, structure, hardness.