

III КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК.669.14

Канд. техн. наук В. В. Нетребко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ТВЕРДОСТЬ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ Mn И Ni

Методом математического планирования эксперимента установлены регрессионные зависимости твердости чугунов от содержания в них C, Cr, Mn и Ni после отжига при 690 и 720 °С. Проведенные исследования позволяют более рационально оптимизировать составы чугунов и режимы отжига в зависимости от условий эксплуатации и технологических потребностей. Рекомендованы оптимальные температуры отжига для различных составов чугунов.

Ключевые слова: чугун, легирование, отжиг, твердость.

Введение

ГОСТ 7769 – 82 [1] рекомендует с целью снижения твердости и улучшения обрабатываемости отливок из высокохромистых износостойких чугунов проведение отжига (высокого отпуска) при 963...1023 °К (690...750 °С) с выдержкой в течение 6...12 часов с последующим охлаждением с печью.

Легированные элементы, применяемые для получения заданных структур и свойств чугунов, оказывают значительное влияние на положение критических точек сплава, смещая их положение одновременно по осям температуры и концентрации. Поэтому рекомендации стандарта являются общими и не учитывающими специфику систем легирования чугунов. Результаты, приведенные в работах [2–6], содержат рекомендации по термической обработке конкретных сплавов.

Влияние элемента зависит от наличия и концентрации других компонентов сплава и ряда факторов, воздействующих на процессы кристаллизации и структурообразования.

В процессе первичной кристаллизации происходит формирование неравновесных структур, что связано с быстрым охлаждением отливок. Поэтому при нагреве и выдержке происходит изменение химического состава карбидов и, соответственно, металлической основы с образованием равновесных фаз. Особенно значительные изменения происходят в околокарбидных зонах [7, 8]. В процессе изотермической выдержки при отжиге могут возникнуть $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения, которые вызовут образование закалочных структур вместо продуктов распада аустенита.

На содержание хрома в металлической основе влияет его общее количество в сплаве и распределение между структурными составляющими, которое зависит от вида кристаллической решетки основы, раство-

римости в ней углерода, количества и типа карбидов, а также наличия других легирующих элементов, влияющих на его содержание в карбидах [9, 10].

Количество марганца в металлической основе зависит от тех же факторов, что и хрома. Однако с увеличением содержания хрома в чугунах количество марганца в карбидах снижается. В марганцовистых чугунах количество марганца в карбидах в 1,5 раза выше, чем в основе [11, 12]. В чугуне, содержащем 17 % Cr и 4 % Mn, марганец распределяется равномерно между основой и карбидами. При уменьшении содержания марганца в высокохромистом сплаве его концентрация в карбидах снижается, а в металлической основе увеличивается. При содержании марганца в чугуне менее 0,6 % он практически отсутствует в карбидах [13].

В высокохромистых чугунах никель, в небольших количествах, входит в состав первичных карбидов хрома и распределяется между основой и карбидами в соотношении 1:10 [7].

При термической обработке высокохромистых чугунов в карбидах происходит замещение атомов никеля, железа и марганца атомами хрома [7], в результате чего никель не обнаруживается в карбидах, а марганец остается в концентрациях, равновесных с металлической основой. При прогнозировании химического состава металлической основы следует учитывать, что весь никель находится в основе и, соответственно, при увеличении количества карбидной фазы концентрация никеля в основе возрастает.

По данным [14], твердость высокохромистых чугунов в литом состоянии без термической обработки описывается зависимостью: $HRC = 9,961C + 2,755Mn + 0,416Cr + 2,134Ni - 1,299C^2 - 0,316Mn^2 - 0,606Ni^2 + 0,485CMn + 0,113CCr - 0,092MnCr + 10,676$.

Составы чугунов с максимальной и минимальной твердостью в литом состоянии приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы чугунов с минимальной и максимальной твердостью в литом состоянии без термообработки

Состав	Химический состав, масс. %				HRC
	C	Mn	Cr	Ni	
1	1,09	0,60	11,43	0,19	27,8
2	3,91	3,67	25,57	1,76	57,8

Целью работы являлась разработка рекомендаций по выбору температуры отжига высокохромистых чугунов, легированных Mn и Ni.

Материал и методики исследований

Чугун выплавляли в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 60 кг. Содержание кремния составляло 0,8...1,2%, серы до 0,02%, фосфора до 0,03%. Литые образцы подвергались отжигу при 690 и 720 °С с выдержкой в течение 9 ч и охлаждением с печью. Анализ структуры выполняли на оптических микроскопах МИМ-8 и Sigeta MM-700, а также с использованием микроскопа РЕМ 106И. Макротвердость измеряли на твердомере Роквелла.

Для построения математической модели использовали метод активного планирования эксперимента (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица планирования дробного многофакторного эксперимента 2⁴⁻¹

Уровни варьирования факторов		Факторы			
		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 проведенного эксперимента и математической обработки результатов получены регрессионные зависимости макротвердости чугуна от содержания C, Cr, Mn и Ni после отжига при 690 и 720 °С:

$$HRC_{690} = 70,458 - 9,922 Mn - 3,094 Cr + 12,889 Ni - 1,517 C^2 + 0,038 Cr^2 - 1,527 Ni^2 + 1,22 CMn + 0,459 CCr - 2,502 CNi + 0,454 MnCr;$$

$$HRC_{720} = 16,605Mn + 3,555Cr - 1,282Mn^2 - 0,043 Cr^2 - 1,724 Ni^2 - 0,157 CCr + 1,782 CNi - 0,326 MnCr + 0,658 MnNi - 15,4.$$

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

Структура чугунов после отжига при 690 °С (рис. 1) состояла из карбидов (первичных и вторичных) и металлической основы: легированного феррита (рис. 1, а) и легированного аустенита (рис. 1, б), а также их сочетания (рис. 1, в). В процессе выдержки наблюдалось частичное растворение карбидной фазы (рис. 1, з) вызывающее образование бейнитных структур (рис. 1, д) или продуктов распада аустенита (сорбит, тростит, зернистый перлит) (рис. 1, е).

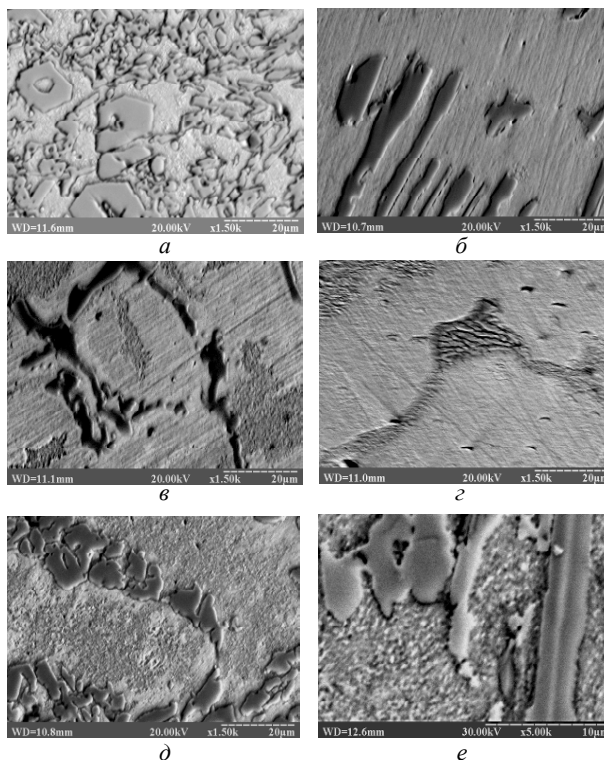


Рис. 1. Структуры чугунов после отжига при 690 °С:

а – легированный феррит; б – аустенит; в – сочетание феррита и аустенита структура; з – частичное растворение карбидной фазы; д – бейнит; е – выделение вторичных карбидов (зернистый перлит)

Повышение температуры отжига до 720 °С способствовало более полному протеканию процессов α↔γ превращения и перераспределению элементов, что значительно увеличивало растворимость углерода в основе. Это вызывало появление закалочных структур в чугунах с повышенным содержанием углерода, марганца и никеля. В чугунах с минимальным содержанием углерода, хрома и марганца наблюдали структуры отжига, состоящие из феррита и вторичных карбидов (рис. 2). При этом в низкоуглеродистых чугунах выделение карбидов происходило по границам зерен (рис. 2, а), а в высокоуглеродистых чугунах, легированных марганцем и никелем выделения наблюдались во всем объеме металлической основы (рис. 2, б).

Выделение вторичных карбидов снижало количество углерода, хрома и марганца в металлической основе, а никеля увеличивало, что способствовало понижению твердости.

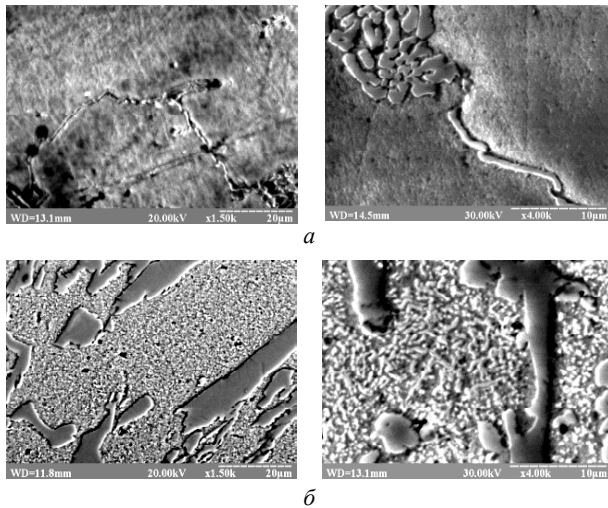


Рис. 2. Выделение вторичных карбидов в структуре чугунов после отжига при 720 °С:

а – выделение вторичных карбидов по границам зерен;
б – выделение вторичных карбидов в объеме зерна (зернистый перлит)

Составы чугунов с минимальной и максимальной твердостью после отжига при 690 и 720 °С представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы чугунов с минимальной и максимальной твердостью после отжига

Химический состав, масс. %				HRC ₆₉₀
C	Mn	Cr	Ni	
1,09	5,40	11,42	0,19	27,5
3,91	5,40	25,57	0,99	75,4
Химический состав, масс. %				HRC ₇₂₀
C	Mn	Cr	Ni	
1,09	0,60	11,42	3,01	16,2
3,91	5,40	13,63	3,01	61,0

Анализ таблицы 3 показывает, что отжиг при 720 °С эффективней снижает твердость, чем отжиг при 690 °С.

Минимальную твердость (16 HRC) после отжига при 720 °С имели чугуны, содержащие 1,09 % С, 11,42 % Cr и 0,6 % Mn при содержании никеля 0,19...3,0. Снижение твердости при увеличении содержания никеля объясняется его графитизирующей способностью и снижением растворимости углерода в твердом растворе. Максимальную твердость (61 HRC) после отжига имели чугуны, содержащие 5,4 % Mn.

Анализ влияния термической обработки на твердость чугунов состава 1 и 2 (табл. 1) показал (табл. 4), что отжиг при 690 °С привел к некоторому повышению, а отжиг при 720 °С – к снижению твердости.

Во время отжига при 690 °С определяющим фактором влияния на твердость чугуна являлась диффузия углерода. При более высокой температуре отжига увеличилась диффузия легирующих элементов, что вызвало перераспределение элементов между фазами и значительно снижало твердорастворное упрочнение

основы. Наличие $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения, при повышении содержания марганца и никеля, вызывало образование закалочных структур с высокой твердостью. При больших концентрациях марганца и никеля образовывался остаточный аустенит.

Влияние С, Cr, Mn и Ni на твердость чугуна после отжига при 690 °С на разных уровнях плана матрицы представлено на рисунке 3, 4.

Таблица 4 – Влияние отжига на твердость чугунов

Состав	Твердость, HRC		
	Без Т. О.	Отжиг 690 °С	Отжиг 720 °С
1	27,8	43,8	25,5
2	57,8	63,4	55,7

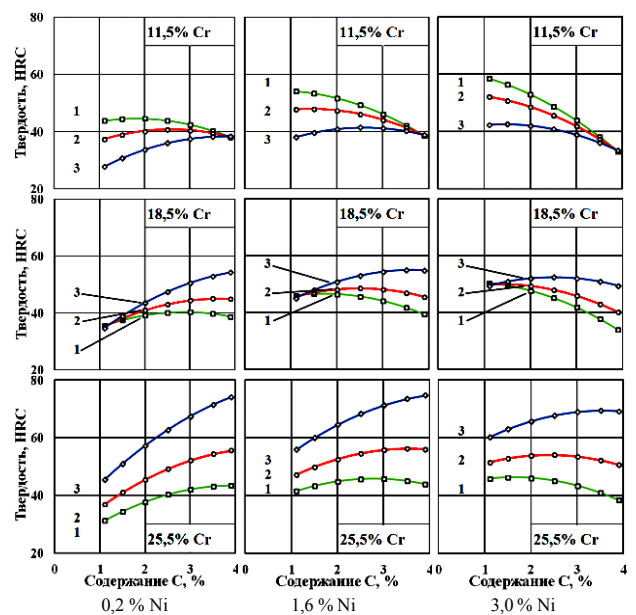


Рис. 3. Влияние С на твердость чугуна после отжига при 690 °С на разных уровнях Cr и Ni при: 1–0,6% Mn; 2–3,0% Mn; 3–5,4% Mn

Увеличение содержания углерода (см. рис. 1) в чугуне, с 0,6...5,4 % Mn, 18,5...25,5 % Cr, и 0,2 % Ni повышало, а с 11,5...18,5 % Cr и 3,0 % Ni понижало твердость. Такое изменение твердости связано с образованием закалочных структур при 25,5 % Cr и аустенитной основы при 11,5 % Cr.

Увеличение содержания углерода в чугуне, содержащем 11,5% Cr, 0,2 % Ni и 3,5...5,4 % Mn повышало, а с 0,6 % Mn понижало твердость.

При больших содержаниях хрома, увеличение содержания марганца способствовало протеканию $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения и, как следствие, приводило к появлению закалочных структур, что повышало твердость чугуна после отжига.

Увеличение количества хрома (см. рис. 4) в чугуне, содержащем 0,6 % Mn и 0,2...3,0 % Ni, понижало твердость, а с 5,4 % Mn повышало.

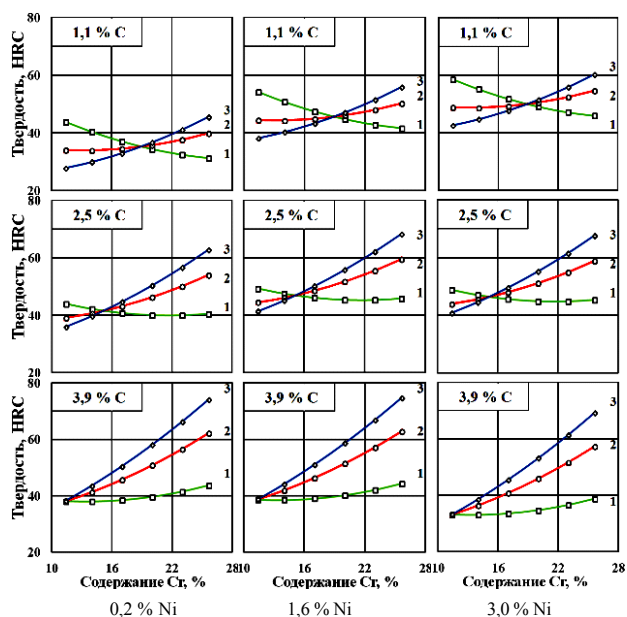


Рис. 4. Влияние Cr на твердость чугуна после отжига при 690 °С на разных уровнях С и Ni при: 1–0,6% Mn; 2–3,0% Mn; 3–5,4% Mn

При больших содержаниях хрома увеличение содержания марганца способствовало протеканию $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения и, как следствие, приводило к появлению закалочных структур, что повышало твердость чугуна после отжига.

Анализ влияния углерода и хрома на твердость чугуна после отжига при 690 °С показал, что оно зависит от содержания марганца и никеля, которые изменяют растворимость углерода в основе.

Увеличение содержания марганца в чугуне, содержащем 1,1...2,5 % С и 11,5 % Cr, снижало его твердость после отжига при 690 °С, а в чугуне с 3,9 % С практически не оказывало влияние на его твердость.

При этом увеличение марганца в чугуне с 11,5 % Cr и 3,0 % Ni понижало, а с 25,5 % Cr и 0,2 % Ni повышало твердость.

По мере увеличения количества никеля в этих чугунах твердость повышалась. При содержании 25,5 % Cr и 0,2...3,0 % Ni увеличение содержания марганца повышало твердость чугуна, особенно при 3,9 % С. Максимальную твердость 75 HRC имел чугун, содержащий 3,91 % С, 25,57 Cr, 5,4 % Mn и 1,0 % Ni.

Снижение твердости после отжига при 690 °С объясняется релаксацией внутренних напряжений и уменьшением содержания углерода в металлической основе.

Повышение температуры отжига чугуна до 720 °С вызывало $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращение в полном объеме, что увеличивало диффузионную подвижность атомов легирующих элементов и растворимость углерода в основе. Это способствовало появлению закалочных структур с высокой твердостью, а в составах с большим количеством марганца и никеля способствовало появлению остаточного аустенита, снижавшего твердость.

Влияние С, Cr, Mn и Ni на твердость чугуна после отжига при 720 °С на разных уровнях плана матрицы представлено на рисунке 5, 6.

Увеличение содержания углерода в чугуне с 0,2 % Ni (см. рис. 5) понижало твердость после отжига при 720 °С, а при 3,0 % Ni повышало. Увеличение содержания хрома (см. рис. 6) повышало твердость с различной интенсивностью, зависящей от содержания других компонентов.

Увеличение содержания марганца в чугуне, содержащем 11,5 % хрома, повышало твердость. При увеличении концентрации хрома наблюдалось снижение твердости чугуна, связанное с образованием остаточного аустенита.

При 18,5 % Cr снижение твердости чугуна происходило при содержании марганца более 4 %, а при 25,5 % Cr свыше 3 %. Увеличение содержания никеля до 1,6 % не изменяло характер влияния марганца, но оказывало влияние на уровень твердости чугуна в зависимости от содержания С и Cr. При 3 % Ni увеличение марганца понижало твердость только у чугунов с 11,5 % Cr.

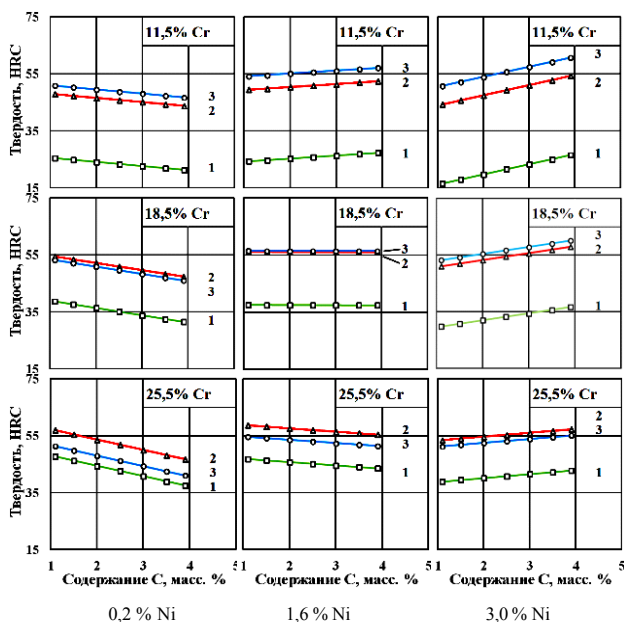


Рис. 5. Влияние С на твердость чугуна после отжига при 720 °С на разных уровнях Cr и Ni при: 1–0,6% Mn; 2–3,0% Mn; 3–5,4% Mn

Увеличение количества хрома в чугуне, содержащем 0,6...3,0 % Mn и 0,2...3,0 % Ni, повышало твердость (см. рис. 5). При 5,4 % Mn увеличение содержания хрома повышало твердость чугуна, а после определенной концентрации, зависящей от содержания углерода и никеля, понижало.

Увеличение содержания никеля не оказало значительного влияния на твердость чугуна как в литом состоянии, так и после отжига при 720 °С.

Увеличение содержания марганца в чугуне с 1,1...2,5 % С и 11,5 % Cr увеличивало его твердость после отжига при 720 °С.

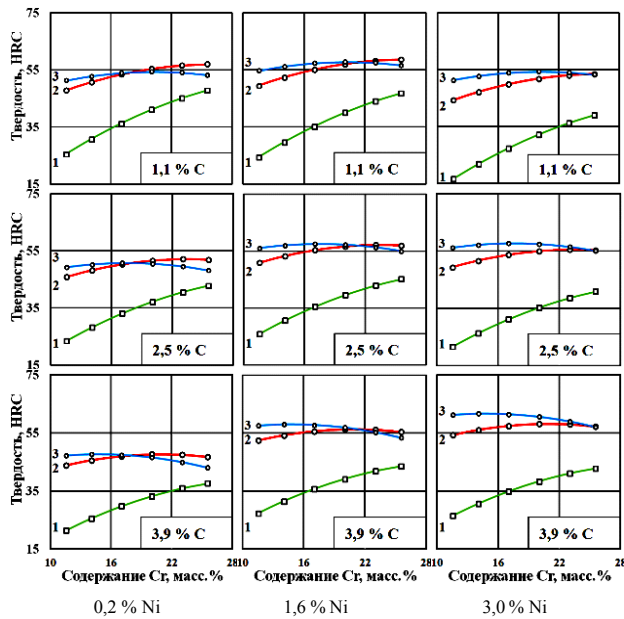


Рис. 6. Влияние Cr на твердость чугуна после отжига при 720 °С на разных уровнях С и Ni при: 1–0,6% Mn; 2–3,0% Mn; 3–5,4% Mn

Таким образом, отжиг при 690 °С повышается твердость чугунов, содержащих 1,1...1,9% С, 11,5...13,5% Cr при 0,6% Mn и 0,2% Ni с 25...35 до 40...45 HRC. Повышение температуры отжига до 720 °С существенно не изменяло твердость этих чугунов.

Для чугунов, содержащих 3,5...3,9% С, 23,5...23,5% Cr при 0,6% Mn и 0,2% Ni твердость снижалась с 50...55 HRC до 40...45 HRC после отжига при 690 °С, и до 35...40 HRC после отжига при 720 °С.

Такое изменение твердости можно объяснить тем, что в литом состоянии карбидная фаза была представлена карбидами Me_7C_3 и Me_3C . В процессе отжига при 690 °С в определенных составах чугуна, произошло $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращение, которое вызвало растворение карбидов Me_3C в основе, в результате этого при охлаждении образовались закалочные структуры с высокой твердостью до 75 HRC. В процессе отжига при 720 °С происходило формирование карбидов Me_7C_3 , что обедняло твердый раствор хромом и углеродом и, как следствие, исключило образование закалочных структур. Увеличение содержания марганца до 5,4% способствовало появлению аустенита, что снижало твердость чугуна после отжига при 690 °С, а после 720 °С повышало.

Проведенные исследования позволяют более рационально оптимизировать составы чугунов и режимы отжига в зависимости от условий эксплуатации и технологических потребностей, а именно смягчающей термической обработки для отливок, требующих большого объема механической обработки лезвийным инструментом.

Выводы

1. Для снижения твердости износостойких чугунов, содержащих 3,0...3,9% С, 11,5...23,5% Cr и 0,2...3,0% Ni

при 0,6% Mn, рекомендуется отжиг при 720 °С с выдержкой 9 часов и охлаждением с печью.

2. Для повышения твердости чугунов, содержащих 3,5...3,9% С, 23,5...23,5% Cr, 0,2...3,0% Ni и 5,4% Mn, а также с 1,1...1,9% С, 11,5...13,5% Cr, 0,6% Mn и 3,0% Ni, рекомендуется отжиг при 690 °С с выдержкой 9 часов и охлаждением с печью.

Список литературы

- ГОСТ 7769-82 Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки. – Введ. 1983-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 15 с.
- 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.
- Структурные изменения в литом чугуне 270X15Г2Н1МФТ при нагреве выше точки A_{c1} / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Т. В. Козаревская [и др.] // *Тезисы международной научно-практической конф. «Университетская наука-2011»*. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2011. – 187 с.
- 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.
- 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.
- Чейлях А. П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / Чейлях А. П. – Харьков : ННЦ ХФТИ – 2003 – 212 с.
- 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.
- Belikov S. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron / Belikov S., Volchok I., Netrobko V. // *Archives of Metallurgy and Materials*. – Vol. 58. 3. – 2013. – P. 895–897.
- Нетребко В. В. Особенности легирования хромом износостойких чугунов / В. В. Нетребко, И. П. Волчок // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 3. – С. 75–78.
- Нетребко В. В. Особенности распределения хрома в высокохромистых чугунах / В. В. Нетребко // *Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научных трудов*. – Вып. 65 – Дн-вск., ПГАСА, – 2013. – С. 346–349.
- Бунин К. П. Основы металлографии чугуна / Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. – М. : Металлургия – 1969. – 416с.
- Гудремон Э. Специальные стали / Э. Гудремон. – М. : Металлургия. т. 1. – 1966. – 736 с.
- 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.

14. Нетребко В. В. Особенности легирования белых износостойких чугунов / В. В. Нетребко // Литье и металлургия. – 2014. – № 2. – С. 37–41.

Одержано 11.12.2015

Нетребко В.В. Вплив відпалу на твердість чавунів з великим вмістом хрому, легованих Mn та Ni

Методом математичного планування експерименту встановлена регресивна залежність твердості чавунів від вмісту C, Cr, Mn та Ni після відпалу при 690 и 720 °C. Проведені дослідження дозволяють більш раціонально оптимізувати склад чавунів та режими відпалу залежно від умов експлуатації та технологічних потреб. Рекомендовано оптимальні температури відпалу для чавунів з різним складом.

Ключові слова: чавун, легування, відпал, твердість.

Netrebko V. The influence of annealing on the hardness of high-chromium cast irons alloyed with Mn and Ni

Regression dependences of cast irons' hardness on C, Cr, Mn and Ni after annealing at 690 and 720 °C are established by means of mathematical planning of the experiment. The conducted research allows a more rational optimization of cast irons' compositions and annealing modes depending on the exploitation conditions and technological needs. Optimal annealing temperatures for various cast iron compositions are recommended.

Key words: cast iron, alloying, annealing, hardness.
