

## Оптимизация режимов смягчающего отжига износостойких хромомарганцевых чугунов для улучшения их обрабатываемости резанием

*Исследовано влияние разных режимов отжига на твёрдость и структуру хромомарганцевых чугунов (2,8...3,2 % С, 18...20 % Cr, 2,5...4,4 % Mn). Установлено, что твердость чугунов как в литом состоянии так и после термической обработки зависит, главным образом, от содержания марганца и мало зависит от микролегирующих и модифицирующих добавок. Марганец влияет на стабильность аустенита и определяет степень его распада при отжиге. Режим изотермического ступенчатого отжига может быть с успехом использован для снижения твёрдости хромомарганцевых чугунов на 10...15 HRC, что даёт возможность осуществить механическую обработку износостойких деталей, которые имеют высокую твёрдость в литом состоянии.*

**Ключевые слова:** хромомарганцевый чугун, отжиг, механическая обработка, твёрдость, структура, марганец, аустенит

Термическую обработку высокохромистых (хромомолибденовых, хромоникелевых, хромомарганцевых) износостойких чугунов осуществляют с целью снятия литейных напряжений, снижения твёрдости для улучшения обрабатываемости или повышения твёрдости и износостойкости сплава. Термическую обработку литых деталей из высокохромистых чугунов выполняют следующим образом: отливки загружают в печь с температурой не выше 200...300 °С, выдерживают в течение 1...3 ч и затем нагревают со скоростью не выше 70...100 °С/ч в зависимости от конфигурации деталей [1...3].

Чугуны 300X15M3, 290X12M и 290X12Г3М, в которых при медленном охлаждении с высоких температур металлическая основа может быть преобразована в зернистый перлит, для улучшения обрабатываемости подвергают отжигу, проводят механическую обработку, затем нагревают и закалывают на воздухе.

Чугуны 280X28H2, 280X28H2M2 и 210X12Г5 характеризуются повышенной устойчивостью аустенита, который при медленном охлаждении не превращается в перлит, а потому обрабатываемость их не улучшается. Для повышения износостойкости чугуна 280X28H2M2 и 210X12Г5 производят закалку на воздухе, а чугун 280X28H2 подвергают отпуску для снятия напряжений.

Перспективными износостойкими сплавами, не содержащими дорогих молибдена и никеля, являются хромомарганцевые чугуны, в которых марганец способствует образованию аустенитной структуры и повышению прокаливаемости сплава. Результатами предыдущих исследований и анализом литературных данных [1, 2, 4, 5] установлено, что для измельчения структуры (и, следовательно, улучшения технологических и эксплуатационных свойств) хромомарганцевые чугуны целесообразно дополнительно микролегировать и модифицировать Ti, V, Sb, B, P3M и другими элементами. В технической литературе [1, 2, 5] описано большое количество перспективных износостойких высокохромистых чугунов, однако их широкое

промышленное использование осложняется рядом трудностей, которые возникают в процессе изготовления из них литых деталей. Среди таких трудностей – склонность к образованию трещин в отливках во время их охлаждения в литейной форме и термической обработки, а также сложность механической обработки вследствие высокой твёрдости отливок.

Большинство отливок, изготовленных из износостойких чугунов, для получения готовых деталей подвергают механической обработке. Твёрдость высокохромистых и, в частности, хромомарганцевых чугунов в литом состоянии колеблется в пределах 40...55 HRC. При такой твёрдости механическая обработка традиционными методами затруднена. Кроме того, твёрдость поверхности хромомарганцевых чугунов может возрасти вследствие мартенситного превращения в микрообъёмах легированного аустенита под действием высоких давлений в зоне режущей кромки резца во время механической обработки [1, 2, 6].

Для успешного проведения механической обработки необходимо правильно подбирать химический состав хромомарганцевых чугунов, а также оптимальный для этого состава режим смягчающего отжига.

Целью данной работы является исследование влияния различных режимов отжига на твёрдость и структуру нескольких вариантов хромомарганцевого чугуна базового состава, дополнительно микролегированного и модифицированного титаном, ванадием, бором и P3M.

Химический состав исследованных чугунов приведен в табл. 1.

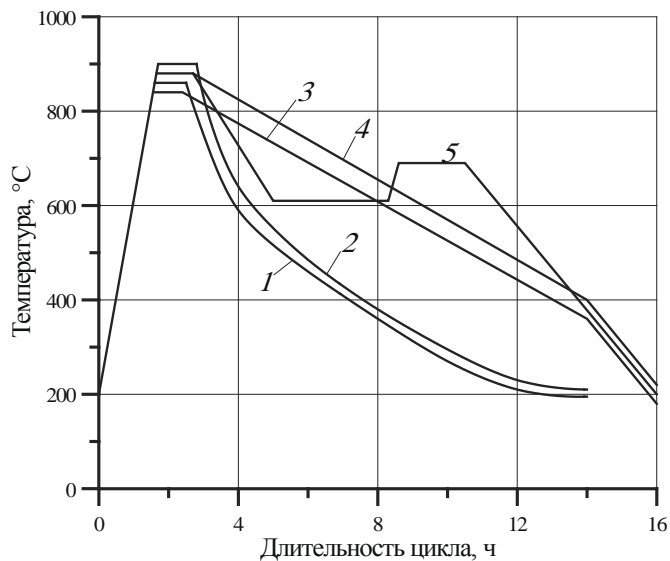
Чугун с индексом 6 является комплексномодифицированным (B, Ti, V, P3M), выплавлен специально для исследования возможностей его термической обработки. По данным [5, 6] комплекснолегируемые белые чугуны имеют ряд преимуществ при механической обработке, поскольку их твёрдость после отжига может снижаться до 30...40 HRC.

Для отжига использовали следующие режимы (рис. 1):

**Химический состав исследованных хромомарганцевых чугунов**

Индекс сплава	Обозначение чугуна	Химический состав, %							
		C	Si	Cr	Mn	Ti	PЗМ*	P	S
1	300X20ГЗ	3,0	0,6	19,6	2,5	–	–	0,05	0,05
2	320X19ГЗ	3,2	0,8	19,1	3,0	–	–	0,05	0,05
3	320X20ГЗ	3,2	0,7	19,8	3,2	–	–	0,05	0,05
4	280X20Г4Тц	2,8	1,0	20,0	4,4	0,1	0,1	0,05	0,05
5	290X19Г4Т	2,9	0,9	19,2	3,9	0,1	–	0,05	0,05
6	290X19ГЗРТФц**	2,9	1,0	19,1	2,7	0,2	0,2	0,05	0,05

\* - По присадке \*\* - Дополнительно содержит 0,02% бора и 0,1% ванадия



**Рис. 1.** Режимы отжига исследованных хромомарганцевых чугунов

1 – нагрев до температуры 840 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение с печью (скорость охлаждения не контролируется);

2 – нагрев до температуры 900 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение с печью (скорость охлаждения не контролируется);

3 – нагрев до температуры 820 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение в печи со скоростью около 40 °С/ч;

4 – нагрев до температуры 870 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение в печи со скоростью около 40 °С/ч;

5 – нагрев до температуры 870 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение с печью до 610 °С, выдержка в течение 3 ч, нагрев до 690 °С, выдержка в течение 2 ч и охлаждение с печью (ступенчатый отжиг).

Ступенчатый отжиг (режим 5) исследовали с учётом данных предыдущих исследований, а также литературных данных [1, 4, 7], согласно которым отжиг хромомарганцевых чугунов в диапазоне температур 800...1050 °С не всегда уменьшает твёрдость чугуна, а иногда она становится даже выше, чем в литом состоянии. Именно в таких случаях перспективным может быть изотер-

**Таблица 1**

мический ступенчатый отжиг. По данным [4, 7] он менее чувствителен к температуре аустенизации, легче контролировать изменение температуры, а скорость охлаждения и нагрева практически не регламентируются.

Твёрдость литых образцов различных плавок колебалась в пределах 49...56 HRC (табл. 2), причем она мало зависела от содержания углерода (в пределах 2,8...3,2 %), кремния (0,6...1,0 %), хрома (19,1...20,0%) и модифицирующих добавок (до 0,2 % титана

и до 0,2 % PЗМ). Основным элементом, влияющим на твёрдость образцов в литом состоянии, является марганец (рис. 2).

После отжига по режимам 1 и 2 (нагрев до температур 840 и 900 °С соответственно, выдержки в течение часа и охлаждения вместе с печью) твёрдость чугунов уменьшалась незначительно, или даже увеличивалась, что отрицательно влияет на их механическую обработку.

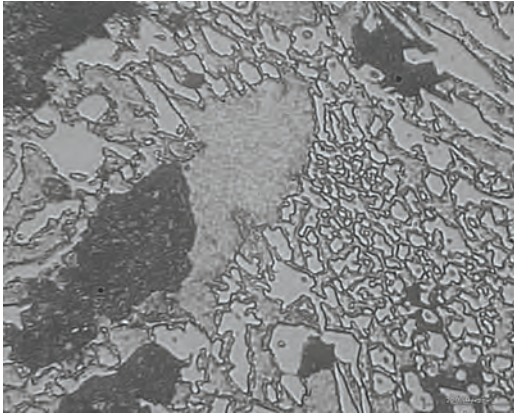
Скорость охлаждения печи (неконтролируемая) в начальный период составляет 200...150 °С/ч и изменяется по гиперболической зависимости. По данным работ [2, 7] максимальная скорость эвтектоидного распада аустенита чугунов подобного класса достигается при температуре около 600 °С. Скорость охлаждения печи в диапазоне от температуры выдержки до 600 °С не даёт возможности легированному аустениту хромомарганцевого чугуна распасться на перлит. Поскольку при данных режимах термической обработки охлаждения в области 600 °С осуществляется достаточно быстро, то аустенит чугунов распадается только частично (чугун 290X19ГЗРТФц – рис. 2, а), или вообще не распадается (чугун 280X20Г4Тц – рис. 2, б). Зато в легированном хромом и марганцем аустените такого чугуна выделяется большое количество вторичных карбидов (аустенит имеет тёмный цвет), которые повышают микротвёрдость аустенита, в результате повышает твёрдость чугуна.

После отжига по режимам 3 и 4 (охлаждение с контролируемой скоростью 40 °С/ч), твёрдость чугунов уменьшилась также недостаточно. Исключением является только чугун 300X20ГЗ (рис. 3, а) с твёрдостью 40 HRC, что способствует его удовлетворительной

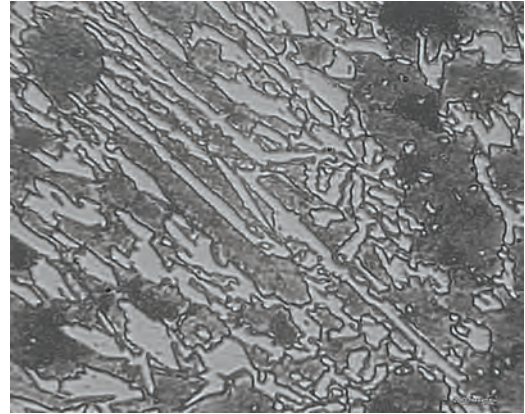
**Таблица 2**

**Твёрдость исследованных хромомарганцевых чугунов в литом состоянии и после различных режимов отжига**

Обозначение чугуна	Твёрдость, HRC					
	в литом состоянии	после отжига по режимам				
		1	2	3	4	5
300X20ГЗ	56,0	44,0	42,0	40,0	40,0	40,0
320X19ГЗ	53,0	48,0	45,0	48,0	52,0	43,0
320X20ГЗ	51,5	48,0	52,0	47,5	45,0	46,5
280X20Г4Тц	49,0	60,0	59,0	56,0	53,0	55,0
290X19Г4Т	50,0	46,0	48,5	50,0	50,0	50,0
290X19ГЗРТФц	54,0	46,2	52,0	43,0	44,0	39,5

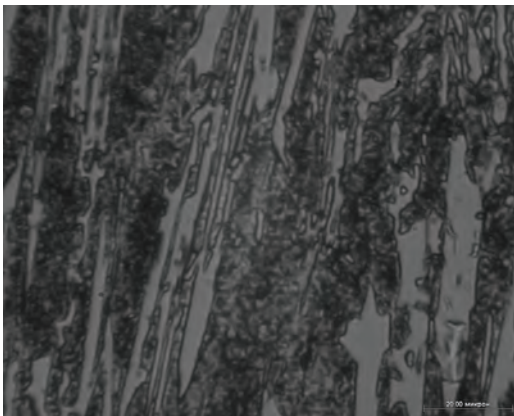


а

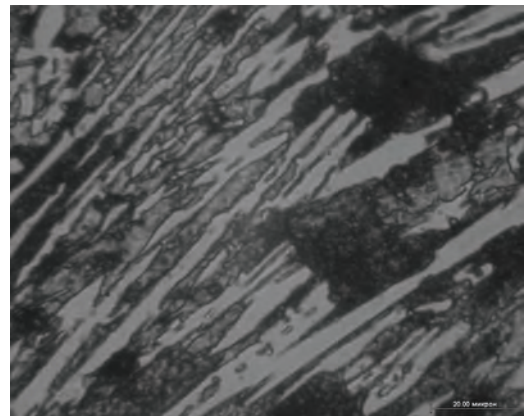


б

Рис. 2. Структура хромомарганцевых чугунов после отжига по режиму №1: а – чугун 290Х19ГЗРТФц; б – чугун 280Х20Г4Тц, ×500



а



б

Рис. 3. Структура хромомарганцевых чугунов после отжига по режиму №4: а – чугун 300Х20ГЗ; б – чугун 290Х19ГЗРТФц, × 500

механической обработке. Снижение твёрдости объясняется полным распадом аустенита на зернистый перлит вследствие медленного охлаждения в перлитной области. В то же время аустенит комплексномодифицированного чугуна 290Х19ГЗРТФц (рис. 3, б) распадается частично (тёмные участки).

Наиболее технологичным в данном исследовании оказался ступенчатый отжиг. Твёрдость образцов хромомарганцевого чугуна после ступенчатого отжига колебалась в пределах 39,5...55,0 HRC (табл. 2). Самую низкую твёрдость имели образцы с наименьшим содержанием марганца (образцы 1 и 6), а самую высокую – максимальное содержание марганца (образец 4).

Твёрдость образцов чугуна различных плавок после термической обработки находится практически в прямолинейной зависимости от содержания марганца (рис. 4) и мало зависит от содержания других элементов в пределах колебаний химического состава (табл. 1 и 2).

С увеличением количества марганца от 2,5 до 4,4 % твёрдость термообработанных образцов возрастает с 39,5 до 55 HRC. При содержании марганца 3,9% и выше твёрдость образцов после отжига не снижалась, а даже возрастала.

Это объясняется следующим образом. Структура образцов в литом состоянии состоит преимущественно из первичных дендритов аустенита и эвтектики  $\gamma + (Cr, Fe, Mn) 7C_3$ . Разница твёрдости литых образцов обусловлена разным количеством аустенита

вследствие разного содержания марганца, поскольку последний стабилизирует аустенит и повышает растворимость углерода в  $\gamma$ -железе [1, 2, 4, 8], в результате чего также несколько уменьшается количество хромистых карбидов в чугуне. Все эти факторы уменьшают жёсткость чугуна в литом состоянии.

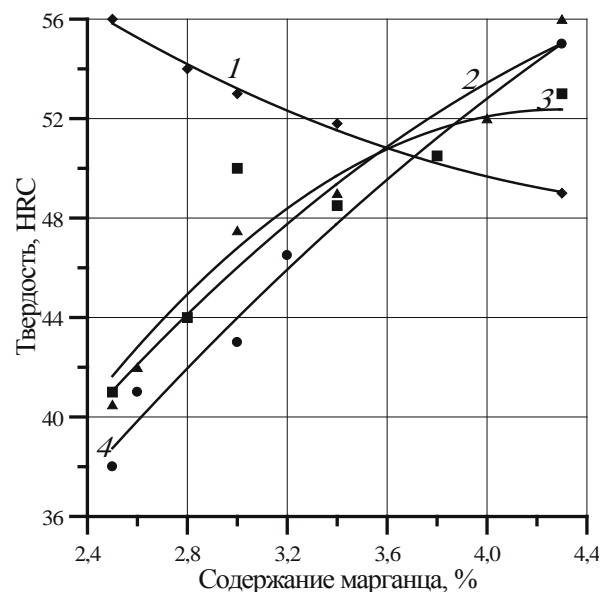


Рис. 4. Зависимость твёрдости хромомарганцевых чугунов от содержания в них марганца: 1 – в литом состоянии; 2 – после отжига по режиму 3; 3 – после отжига по режиму 4; 4 – после ступенчатого отжига (режим 5)

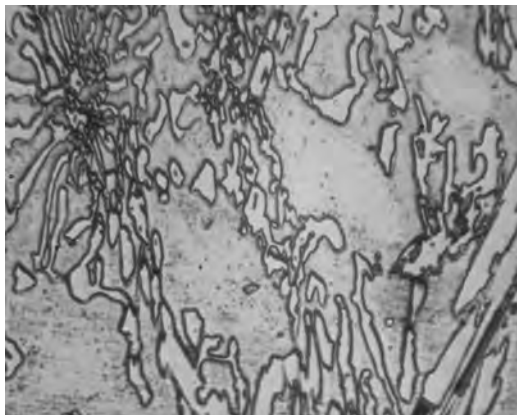


Аустенит чугунов с минимальным содержанием марганца (образцы 1 и 6) во время ступенчатого отжига распадается полностью на зернистый перлит (мягкие продукты распада) различной дисперсности (рис. 5, 6), что приводит к снижению твёрдости до 39...40 HRC (табл. 2).

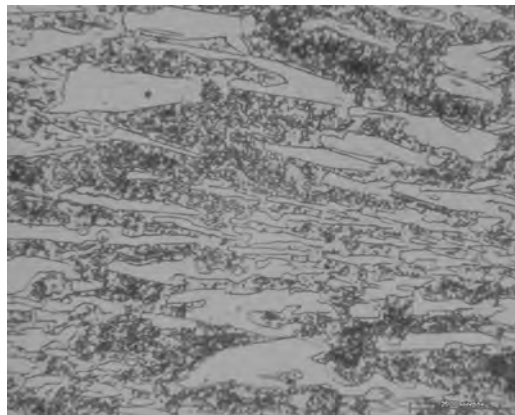
Высокохромистые чугуны с такой твёрдостью уже удовлетворительно обрабатываются на металлорежущих станках традиционными методами, что подтверждено лабораторными испытаниями (рис. 7). Для лучшей обрабатываемости необходимо уменьшать количество марганца в чугуне (рис. 4) или же уменьшать количество углерода, который является основным регулятором количества карбидов [1, 2, 4].

В сплавах со средним содержанием марганца (сплавы 2 и 3) твёрдость снизилась всего на 5...10 единиц (табл. 2). Матрица этих сплавов состоит из армированного вторичными карбидами аустенита, который не распался, и частично продуктов распада (рис. 8, 9). В результате этого твёрдость сплава уменьшилась недостаточно для выполнения механической обработки обычными режимами.

В образцах 5 и 4 после ступенчатого отжига снижение твёрдости не произошло, а в чугуне с максимальным содержанием марганца (4,4%) твёрдость даже возросла (табл. 2). Насыщенный марганцем аустенит таких чугунов распадается только частично (рис. 10, 11), в нем также выделяется большое

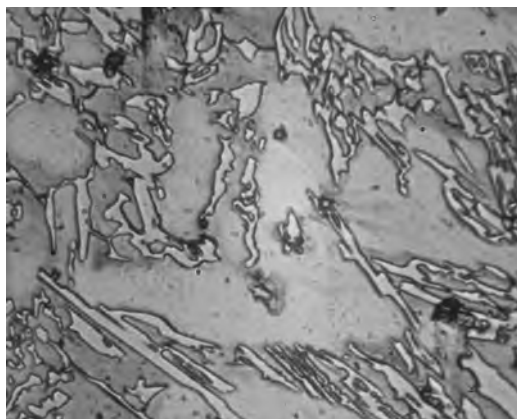


а



б

**Рис. 5.** Структура хромомарганцевого чугуна 300X20Г3 (2,5% Mn): а – в литом состоянии; б – после ступенчатого отжига (режим 5),  $\times 500$

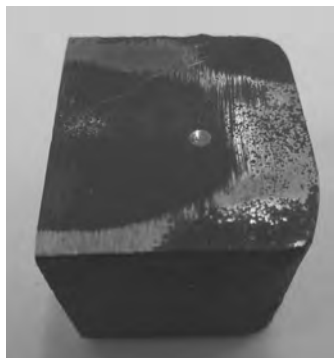


а

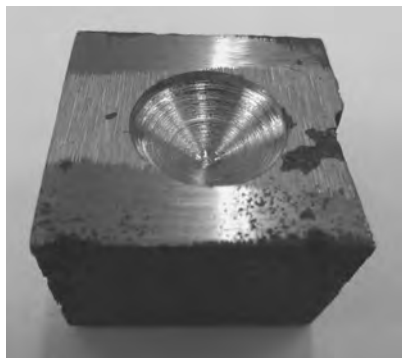


б

**Рис. 6.** Структура хромомарганцевого чугуна 290X19Г3РТФц (2,7% Mn): а – в литом состоянии; б – после ступенчатого отжига,  $\times 500$



а

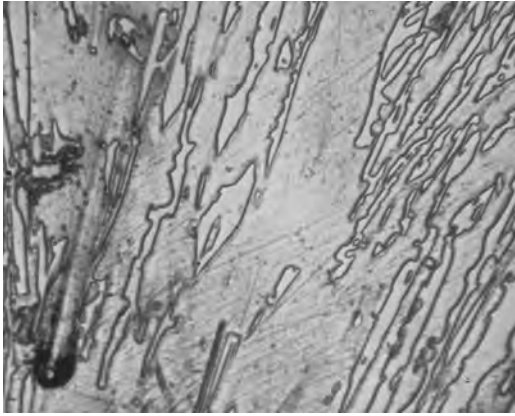


б

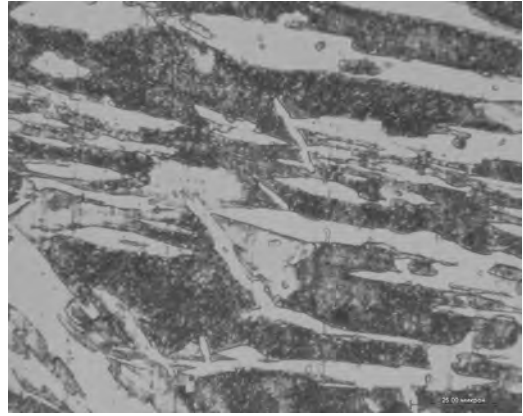


в

**Рис. 7.** Пробное сверление образцов из хромомарганцевых чугунов после ступенчатого отжига (режим 5): а – чугун 280X20Г4Тц; б – чугун 320X20Г3; в – чугун 290X19Г3РТФц

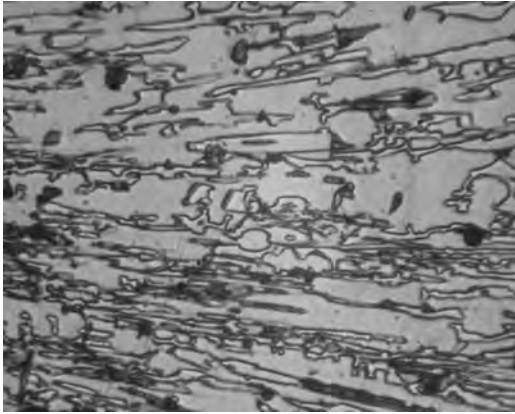


а

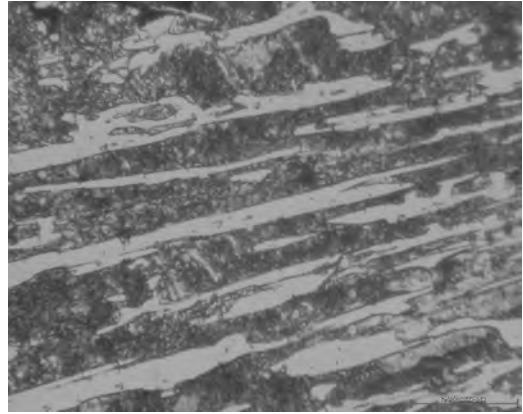


б

Рис. 8. Структура хромомарганцевого чугуна 320X19ГЗ (3,0% Mn): а – в литом состоянии; б – после ступенчатого отжига,  $\times 500$

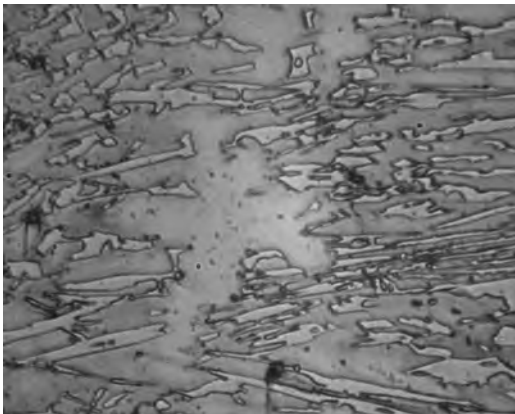


а

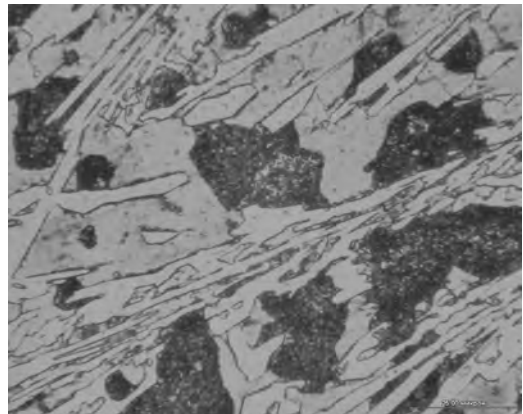


б

Рис. 9. Структура хромомарганцевого чугуна 320X20ГЗ (3,2% Mn): а – в литом состоянии; б – после ступенчатого отжига,  $\times 500$

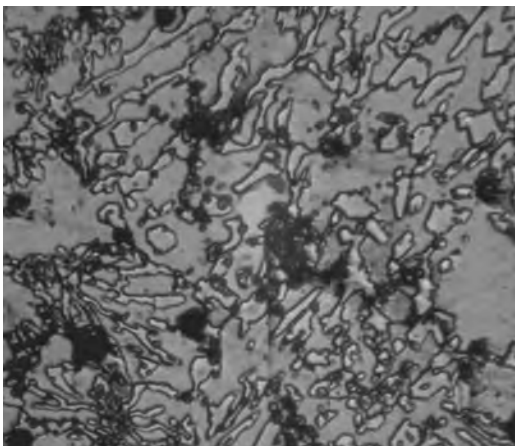


а

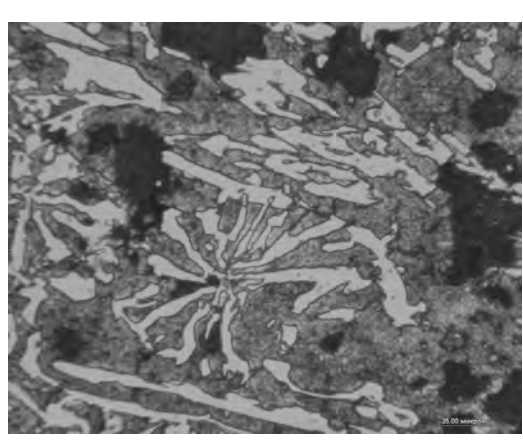


б

Рис. 10. Структура хромомарганцевого чугуна 290X19Г4Т (3,9% Mn): а – в литом состоянии; б – после ступенчатого отжига,  $\times 500$



а



б

Рис. 11. Структура хромомарганцевого чугуна 280X20Г4Тц (4,4% Mn): а – в литом состоянии; б – после ступенчатого отжига,  $\times 500$



количество вторичных карбидов, которые дополнительно упрочняют структуру и повышают твёрдость сплава. Частичный распад аустенита, очевидно, начинается в местах с минимальным содержанием марганца, вследствие его ликвации в зёрнах дендритов.

### Выводы

Таким образом, по данным влияния различных режимов отжига на свойства хромомарганцевых чугунов можно сделать следующие выводы:

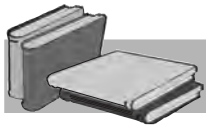
Для изготовления литых износостойких деталей, требующих механической обработки, необходимо применять хромомарганцевые чугуны со сниженным содержанием марганца (до 2,5...2,7%).

Для снижения твёрдости хромомарганцевого чугуна до уровня около 40 HRC его необходимо подвергать отжигу по одному из следующих режимов:

– нагрев до температуры  $840 \pm 20$  °С, выдержка в течение 1 ч (не менее 1 ч для каждой 20 мм толщины стенки отливки), охлаждение в печи со скоростью не выше 40 °С/ч;

– нагрев до 870 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение с печью до 610 °С, выдержка в течение 3 ч, нагрев до 690 °С, выдержка в течение 2 ч, и охлаждение с печью (ступенчатый отжиг).

Ступенчатый изотермический отжиг – перспективный режим термической обработки хромомарганцевых чугунов (18...21% Cr), особенно с низким содержанием марганца (2,7% и меньше), что дает возможность снизить твёрдость исходного чугуна из 54...56 до 39...40 HRC. Такой режим термической обработки отливок из хромомарганцевых чугунов, несмотря на некоторые дополнительные энергетические затраты, существенно облегчает технологические процессы механической обработки.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М. Е. Гарбер. – М.: Машиностроение, 2010. – 280 с.
2. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
3. Неижко И. Г. Термическая обработка чугуна / И. Г. Неижко // АН Украины. Ин-т пробл. литья. – Киев: Наук. думка, 1992. – 208 с.
4. Чугун: Справ. изд. / А. Д. Шерман, А. А. Жуков, Э. В. Абдуллаев и др.; под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
5. Абразивостойкие высокохромистые чугуны: монография / В. П. Гаврилюк, В. И. Тихонович, И. А. Шалевская, Ю. И. Гутько. – Луганск: Ноулидж, 2010. – 141 с.
6. Жуков А. А. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов / А. А. Жуков, Г. И. Сильман, М. С. Фрольцов. – М.: Машиностроение, 1984. – 104 с.
7. Рожкова Е. В. Оптимизация режимов термической обработки хромистых чугунов (18 % хрома) / Е. В. Рожкова // Материалы сем. «Повышение служебных свойств высоколегированных литых сталей и чугунов». – М.: Знание РСФСР. – 1987. – С. 119-124.
8. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х томах, 2-е изд. / Э. Гудремон. – М.: Металлургия, 1966. – Т.1. – 736 с.

### Анотація

Радченко К. С., Ямшинський М. М., Федоров Г. Є.

Оптимізація режимів пом'якшуючого відпалу зносостійких хромомарганцевих чавунів для покращення їх оброблюваності різанням

Досліджено вплив різних режимів відпалу на твердість і структуру хромомарганцевих чавунів (2,8...3,2% С, 18...20% Cr, 2,5...4,4% Mn). Встановлено, що твердість чавунів як в литому стані так і після термічного оброблення залежить, головним чином, від вмісту марганцю і мало залежить від мікролегувальних та модифікувальних добавок. Марганець впливає на стабільність аустеніту і визначає ступінь його розпаду під час відпалу. Режим ізотермічного ступінчастого відпалу може бути з успіхом застосований для зниження твердості хромомарганцевих чавунів на 10...15 HRC, що дає можливість здійснити механічне оброблення зносостійких деталей, які мають високу твердість в литому стані.

### Ключові слова

хромомарганцевий чавун, відпал, механічне оброблення, твердість, структура, марганець, аустеніт

## Summary

Radchenko K., Yamshinskiy M., Fedorov G.

Optimization of annealing wear resistant chromium-manganese cast irons for improve their machinability

*Influence of the different modes of annealing on the hardness and structure of the chromium-manganese cast irons (2,8...3,2 % C, 18...20 % Cr, 2,5...4,4 % Mn) was investigated. It was shown, that the hardness of the cast irons when heated depended mainly on the content of manganese and only slightly on the microalloying elements and mod-ifiers. Manganese influences the stability of the austenite and determines the degree of its disintegration during anneal-ing. The isothermal stepwise annealing mode can be successfully applied to reduce the hardness of the chromium-manganese cast irons by 10....15 HRC that allows mechanical processing of wear-resistant details, which have high hardness in as-cast condition.*

## Keywords

*chromium-manganese cast iron, annealing, mechanical processing, hardness, structure, manganese, austenite*

Поступила 30.10.2015

**Продолжается подписка на журналы  
«Металл и литьё Украины»  
и «Процессы литья»  
на 2016 год.**

Для подписки на журналы необходимо  
направить письмо-заказ по адресу:  
03680, Украина, г. Киев-142, ГСП,  
бул. Вернадського, 34/1,

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України  
или факсом (044) 424-35-15.

Счёт-фактура согласно заказу высылается письмом, по факсу или E-mail.

Редакция готова предоставить электронную версию журналов  
на компакт-диске.

Стоимость одного журнала – 50 грн.

Годовая подписка (для Украины):

«Металл и литьё Украины» – 600 грн,

«Процессы литья» – 300 грн.

Годовая подписка для зарубежных стран – 100 \$.