



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-3-36-40>
УДК 621.74:517.977

Поступила 09.07.2020
Received 09.07.2020

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМИСТОГО ЧУГУНА

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. М. ИЛЮШЕНКО, В. А. ПУМПУР, В. М. АНДРИЕНКО, П. Ю. ДУВАЛОВ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: info@itm.by. Тел.: +375 29 650-46-43

Описаны результаты экспериментальных исследований по определению влияния легирования и термической обработки на механические свойства высокохромистого чугуна. При легировании расплава никелем, молибденом и марганцем, а также при термической обработке закалкой изучены удельный износ, предел прочности при изгибе полученных образцов, их твердость и микротвердость. Выполнен сравнительный анализ влияния легирующих элементов и способов термической обработки. При легировании Ni, Mo и Mn наибольший удельный износ имеют литые образцы, не подвергавшиеся термической обработке. Установлено, что наибольшую прочность при изгибе имеют закаленные образцы, легированные Ni, значительно меньшую твердость и микротвердость – литые образцы, не подвергавшиеся термической обработке. Определен примерный состав хромистого чугуна для дальнейших исследований по увеличению его износостойкости. Результаты исследований используются в процессе изготовления деталей дробильно-размольного оборудования.

Ключевые слова. Износостойкий хромистый чугун, легирование хромистых чугунов, термическая обработка, механические свойства

Для цитирования. Марукович, Е. И. Влияние легирующих элементов и термической обработки на механические свойства хромистого чугуна / Е. И. Марукович, В. М. Ильюшенко, В. А. Пумпур, В. М. Андриенко, П. Ю. Дувалов // *Литье и металлургия*. 2020. №3. С. 36–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-36-40>.

INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS AND HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CHROMIUM CAST IRON

E. I. MARUKOVICH, V. M. ILYUSHENKO, V. A. PUMPUR, V. M. ANDRIENKO, P. Yu. DUVALOV, Institute Technology of Metal of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Byalynitskogo-Biruli str. E-mail: info@itm.by. Tel.: +375 29 650-46-43

The results of experimental studies to determine the effect of alloying and heat treatment on the mechanical properties of the high-chromium cast iron are described. When alloying the melt with nickel, molybdenum and manganese, as well as during heat treatment by quenching, specific wear, tensile strength in bending of the obtained samples, their hardness and microhardness were studied. A comparative analysis of the influence of alloying elements and heat treatment methods has been performed. When alloying Ni, Mo, and Mn, cast specimens that have not undergone heat treatment have the highest specific wear. It was established that the hardened Ni alloyed samples have the greatest bending strength. It was found that cast samples that were not subjected to heat treatment have much lower hardness and microhardness. The approximate composition of chromium cast iron was determined for further studies to increase its wear resistance. The research results are used in the manufacturing process of parts for crushing and grinding equipment.

Keywords. Wear-resistant chrome cast iron, alloying of chrome cast iron, heat treatment, mechanical properties.

For citation. Marukovich E. I., Ilyushenko V.M., Pumpur V. A., Andrienko V.M., Divalov P. Yu. Influence of alloying elements and heat treatment on the mechanical properties of chromium cast iron. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 36–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-3-36-40>.

В связи с необходимостью экономии сырьевых ресурсов все большую актуальность приобретают технологии, повышающие механические свойства литых деталей из износостойких белых хромистых чугунов. Поиск путей повышения эксплуатационных характеристик в значительной степени связан с различными методами подготовки расплавов, их легированием, затвердеванием и последующей термической обработкой литых деталей.

Высокой износостойкостью обладает высокохромистый чугун. В высокохромистых чугунах, содержащих более 3,6% углерода, при кристаллизации выпадают крупные заэвтектические карбиды, которые сравнительно легко выкрашиваются. Поэтому для повышения твердости в них вводят элементы, способствующие переохлаждению аустенита, такие, как никель (Ni), молибден (Mo), ванадий (V), вольфрам (W), титан (Ti), ниобий (Nb).

До настоящего времени за рубежом ведущими научными школами и учеными проводятся исследования комплексного влияния легирующих элементов и термообработки на структуру и эксплуатационные свойства износостойких хромистых чугунов [1–3] с целью их дальнейшего применения в машинах и различном оборудовании. К примеру, целью научной работы [1] являлось улучшение механических свойств существующего материала футеровки мельницы из высокохромистого белого чугуна (ВХБЧ) путем измельчения зерна. Было обнаружено, что добавление ниобия изменяет морфологию эвтектических карбидов от пластинчатой и стержнеобразной формы до изотропной. Вначале увеличение количества Nb привело к повышению твердости, а дальнейшее увеличение – к снижению твердости ВХБЧ. Кроме того, добавление Nb привело к значительному улучшению прочности на разрыв как литых, так и термически обработанных сплавов. После термической обработки наблюдалось общее снижение прочности на разрыв.

Ученые малайзийской научной школы провели сравнительный анализ износостойких свойств высокохромистого чугуна и стали Гадфильда [2]. Сравнивали износостойкие свойства двух различных дробилок, используемых для измельчения сырья цементной промышленности. Испытание на износ проводили при различных нагрузках. Результаты исследований показали, что абразивный износ хромистого чугуна ниже, чем стали Гадфильда, благодаря присутствию карбидов M_7C_3 в матрице высокохромистого чугуна.

Совместные исследования канадских и австралийских ученых [3] посвящены измельчению микроструктуры заэвтектических чугунов с высоким содержанием хрома. Исследования проводили на основе дополнительного легирования высокохромистых заэвтектических чугунов карбидообразующими элементами: ванадием, ниобием, бором и молибденом. Оценивали эффективность каждого элемента в улучшении износостойкости. Было установлено, что наилучшие общие характеристики показали В и Nb, и что изменения износостойкости сплавов по отношению к добавленным карбидообразующим элементам в основном вызваны изменениями твердости за счет измельчения микроструктуры.

Цель настоящей научно-исследовательской работы – изучение отдельного влияния легирующих элементов никеля, молибдена, марганца и термической обработки на механические свойства чугуна ИЧХ18ВМ базового состава (см. таблицу).

Химический состав образцов

Марка чугуна	Содержание элементов, %								
	C	Cr	Ni	Mn	V	Mo	Si	W	Ti
ИЧХ18ВМ	3,45	18,7	0,34	0,348	0,21	0,43	Следы	Следы	Следы

Для проведения лабораторных исследований механических свойств отливали образцы необходимой формы и размеров. Расплав чугуна ИЧХ18ВМ готовили в индукционной печи ИСТ-0,25/032И1 в количестве 150 кг. Были отлиты три группы по 72 образца из чугуна ИЧХ18ВМ, легированные никелем в количестве 0,33; 0,55; 0,71 и 0,9%; молибденом в количестве 0,36; 0,45; 0,75 и 0,9% и марганцем в количестве 0,32; 0,59; 1,03 и 1,43%.

Химический состав полученных образцов определяли с помощью спектрографа ДРС-8 и фотоэлектрического регистратора фотометра МФ-4. Содержание углерода определяли химическим способом по ГОСТ 22536.1–88 с использованием трубчатой печи СУОЛ-0,25.1/12,5-У1 УХЛ 4,2 и газоанализатора ГОХ-1.

Термическая обработка отлитых образцов заключалась в их закалке или закалке с отпуском. Все образцы загружали в лабораторную печь СНОЛ-1,6.2.0,8/9-М1 и осуществляли их равномерный нагрев до температуры 960 °С в течение 5 ч. После выдержки в печи при температуре 960 °С в течение 1 ч образцы быстро извлекали на воздух, где охлаждали для получения мартенситной структуры основы. Часть закаленных образцов подвергали низкотемпературному отпуску для снятия внутренних напряжений, который заключался в нагреве образцов до температуры 200 °С в течение часа и последующей выдержке 15 мин при данной температуре, после чего печь отключали.

Исследования износостойкости образцов из чугуна ИЧХ18ВМ проводили по методике, описанной в работе [4]. Испытания на прочность при изгибе выполняли на испытательной машине ИР-5143–200–11, измерения твердости – по методу Роквелла на приборе ТК-14–250, а микротвердости по Виккерсу – на приборе KASON-59-HV.

Проведены исследования влияния термической обработки на удельный часовой износ m_w , г/(ч·см²), образцов из ИЧХ18ВМ при легировании никелем, молибденом и марганцем (рис. 1).

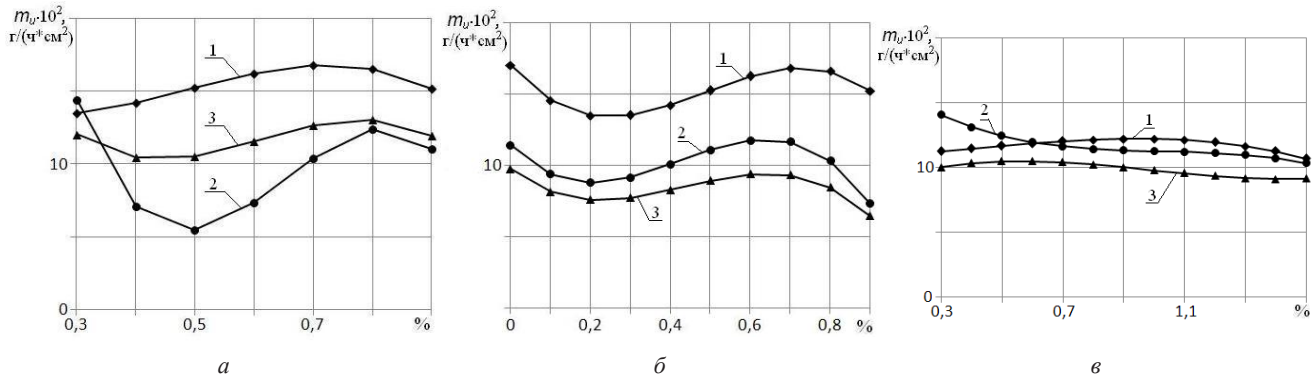


Рис. 1. Влияние содержания Ni (а), Мо (б) и Mn (в) на износ литых (1), закаленных (2) и закаленно-отпущенных (3) образцов из ИЧХ18ВМ

Как видно из рисунка, наибольший часовой износ имеют литые образцы, не подвергавшиеся термической обработке, что говорит об эффективности ее применения для увеличения износостойкости. Сравнивая наибольшие и наименьшие значения удельного часового износа, можно сделать вывод о большем влиянии легирования никелем и молибденом по сравнению с марганцем.

Результаты исследований предела прочности образцов на изгиб (рис. 2) показали, что наибольшую прочность при изгибе имеют закаленные образцы (кривые 2), легированные никелем и марганцем в количестве до 0,3% (около 100 и 85 кг/мм² соответственно), а также образцы, легированные молибденом до 0,2%.

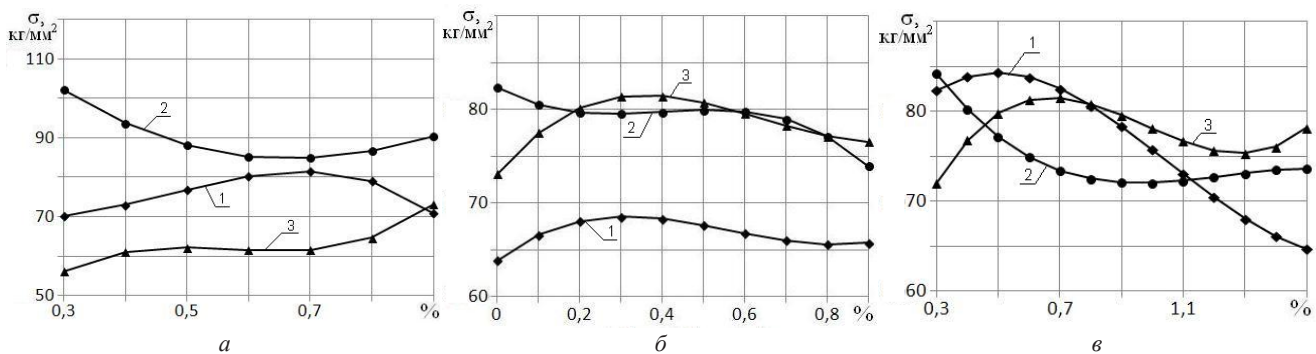


Рис. 2. Влияние содержания Ni (а), Мо (б) и Mn (в) на предел прочности при изгибе литых (1), закаленных (2) и закаленно-отпущенных (3) образцов из ИЧХ18ВМ

Из анализа результатов следует, что термическая обработка имеет первостепенное влияние на прочность при изгибе хромистого чугуна ИЧХ18ВМ, особенно при его легировании никелем или молибденом. Причем применение закаливания без отпуска при легировании чугуна Ni, Мо и Mn в значительных диапазонах является более предпочтительным способом термической обработки для получения заготовок с более высокой прочностью на изгиб. Наибольшая прочность достигается при закаливании чугуна, легированного никелем в пределах 0,3–0,45%, которая выше прочности, полученной во всех остальных экспериментах.

Как известно, механические свойства высокохромистых чугунов зависят, в первую очередь, от формируемой карбидной фазы. Легирующие элементы способны влиять на процесс карбидообразования, что отражается на твердости и микротвердости образцов.

Износостойкость материалов при абразивном изнашивании, как правило, прямо пропорциональна их твердости. Как видно из рис. 3, значительно меньшей твердостью обладают литые образцы (HRC < 58), причем она примерно одинакова при легировании разными элементами и в среднем равна 53–57 HRC.

Твердость закаленных и закаленно-отпущенных образцов в исследуемых диапазонах легирования отличается незначительно (максимум на 8%) и составляет 61–66 HRC. Причем при легировании марганцем твердость закаленных и закаленно-отпущенных образцов практически одинакова – 65–66 HRC.

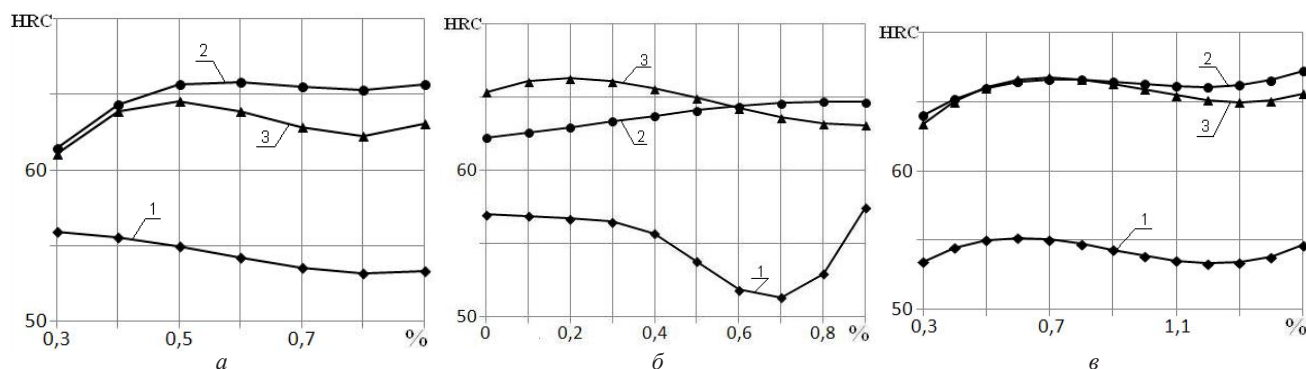


Рис. 3. Влияние содержания Ni (а), Мо (б) и Mn (в) на твердость литых (1), закаленных (2) и закаленно-отпущенных (3) образцов из ИСХ18ВМ

Из полученных результатов следует, что для литых образцов наибольшая прочность на изгиб ($84,3 \text{ кг/мм}^2$) достигается при легировании Mn в количестве от 0,4 до 0,6% (см. рис. 2, кривая 1), но твердость такого сплава равна 55 HRC (рис. 3). Наибольшую твердость имеет сплав, легированный Mo в количестве до 0,3% (рис. 3, б), но при этом прочность на изгиб закаленно-отпущенного сплава составляет от 63,9 до 68,6 кг/мм^2 (см. рис. 2, б), а износостойкость его наименьшая (см. рис. 1, б).

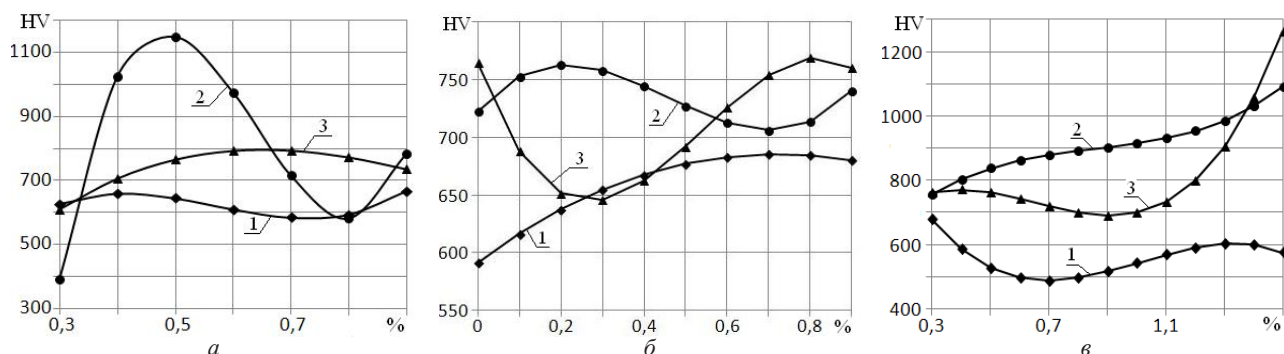


Рис. 4. Влияние содержания Ni (а), Мо (б) и Mn (в) на микротвердость литых (1), закаленных (2) и закаленно-отпущенных (3) образцов из ИСХ18ВМ

Как известно, уровень свойств карбидной фазы можно оценить по микротвердости. Анализ результатов исследований микротвердости образцов из хромистого чугуна (рис. 4) показал, что у литых образцов, не подвергшихся термообработке (кривые 1), микротвердость наименьшая (от 500 до 690 HV) при легировании марганцем; выше при легировании никелем и молибденом (от 590 до 680 HV); у литых образцов, подвергшихся закаливанию (кривые 2), микротвердость наибольшая (свыше 1100 HV) при легировании никелем в пределах 0,5% (изменяется синусоидально в диапазоне от 400 до 1150 HV); меньше при легировании марганцем (динамично растет от 750 до 1100 HV) и молибденом (изменяется от 700 до 770 HV); у литых образцов, подвергшихся закаливанию с последующим отпуском (кривые 3), микротвердость достигает наибольших значений при легировании марганцем от 700 HV (при Mn = 0,9%) до 1250 HV (при Mn = 1,5%); меньше при легировании никелем (от 600 до 800 HV) и молибденом (от 650 до 770 HV).

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что:

1) для улучшения механических свойств хромистых чугунов ИСХ18ВМ наиболее эффективным является легирование расплава никелем в пределах 0,3–0,5% с последующей термической обработкой получаемых заготовок посредством их закалки;

2) легирование расплава молибденом в диапазоне 0,1–0,3% приводит к улучшению механических свойств при условии применения закалки и, возможно, закалки с отпуском, так как закаленно-отпущенные заготовки имеют несколько большую прочность на изгиб и твердость, чем закаленные;

3) легирование марганцем в пределах 1,0–1,2% приводит к повышению твердости и микротвердости хромистого чугуна при условии применения закалки, но его прочность на изгиб становится ниже, даже чем у образцов, не подвергшихся термической обработке.

На основе полученных результатов определен примерный химический состав чугуна ИЧХ18ВМ для проведения дальнейших исследований по повышению его износостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Maja M. E., Maruma M. G., Mampuru L. A., Moema S. J.** Effect of niobium on the solidification structure and properties of hypoeutectic high-chromium white cast irons // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016. Vol. 38. No. 10, P. 981–986.
2. **Atabaki Mehdi Mazar, Jafari Sajjad, Abdollah-pour Hassan** Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel – A Comparison // *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2012. Vol. 19(4). P. 43–50.
3. **Chung R. J., Tang X., Li D. Y., Hinckley B., Dolman K.** Microstructure refinement of hypereutectic high Cr cast irons using hard carbide-forming elements for improved wear resistance // *Journal Wear*. 2013. No. 301. P. 695–706.
4. **Марукович, Е. И.** Изучение износостойкости деталей из хромистых чугунов, полученных литьем в кокиль / Е. И. Марукович, В. М. Ильюшенко, П. Ю. Дувалов, А. И. Калентионюк, К. Э. Барановский // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: X Междунар. науч.-техн. конф. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 16–18 сент. 2015. С. 52–57.*

REFERENCES

1. **Maja M. E., Maruma M. G., Mampuru L. A., Moema S. J.** Effect of niobium on the solidification structure and properties of hypoeutectic high-chromium white cast irons. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2016, Vol. 38, no. 10, pp. 981–986.
2. **Atabaki Mehdi Mazar, Jafari Sajjad, Abdollah-pour Hassan.** Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel – A Comparison. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, vol. 19(4), pp. 43–50.
3. **Chung R. J., Tang X., Li D. Y., Hinckley B., Dolman K.** Microstructure refinement of hypereutectic high Cr cast irons using hard carbide-forming elements for improved wear resistance. *Journal Wear*. 2013, no. 301, pp. 695–706.
4. **Marukovich E. I., Ilyushenko V. M., Duvalov P. J., Kalentionok A. I., Baranovski K. E.** Izuchenie iznosostoykosti detaley iz khromistykh chugunov, poluchennykh lityom v kokil [Study of the wear resistance of parts made of chrome cast iron obtained by casting in a chill mold]. *Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov = Modern methods and technologies for the creation and processing of materials*, Minsk, FTI of NAS of Belarus Publ., 2015, pp. 52–57.