

УДК 621.74:669.13

Поступила 02.08.2017

## **ХРОМИСТЫЙ ЧУГУН, ЛЕГИРОВАННЫЙ НИОБИЕМ** **CHROMIUM CAST IRON ALLOYED WITH NIOBIUM**

*Е. И. МАРУКОВИЧ, В. М. ИЛЬЮШЕНКО, П. Ю. ДУВАЛОВ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: info@itm.by,  
А. Г. АНИСОВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10, E-mail: anna-anisovich@yandex.ru,  
К. Э. БАРАНОВСКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65, тел. +375 29 627 69 38.*

*E. I. MARUKOVICH, V. M. ILYUSHENKO, P. YU. DUVALAU, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Byalynitskogo-Biruli str. E-mail: info@itm.by,  
A. G. ANISOVICH, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru,  
K. E. BARANOUSKI, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave., tel. +375 29 627 69 38.*

*Исследовано влияние легирования ниобием на фазовый состав, структуру и механические свойства чугуна ИЧХ18ВМ эвтектического и заэвтектического составов. Установлено, что введение ниобия повышает износостойкость на 30%, прочность на изгиб – на 20%. Изменение механических свойств может быть связано с диспергированием карбидной составляющей, а также с повышением количества аустенита в структуре.*

*Influence of alloying with niobium on the phase composition, structure and mechanical properties of eutectic and hypereutectic chromium cast iron are studied. It is established that niobium doping increase the wear resistance by 30% and the bending resistance by 20%. The change of mechanical properties can be attributed to the dispersion of carbide phase as well as to the increase of austenite amount in structure.*

**Ключевые слова.** Износостойкость, хромистый чугун, легирование ниобием, прочность на изгиб, фазовый состав, аустенит.

**Keywords.** Wear resistance, chromium cast iron, alloying with niobium, bending resistance, phase composition, austenite.

### **Введение**

Задача повышения эксплуатационных свойств износостойких легированных хромистых чугунов, применяемых для литья деталей, работающих в условиях сухого абразивного изнашивания, может быть решена созданием условий для измельчения карбидной фазы при наличии в составе чугуна карбидообразующих элементов, таких, как Hf, Ta, Nb, Mo и других с низкой растворимостью в фазе внедрения (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Среди них можно выделить как наиболее перспективный ниобий [1].

### **Методика исследования и проведения экспериментов**

Исследование проводили на чугуне ИЧХ18ВМ [2] эвтектического и заэвтектического составов при дополнительном легировании ниобием. Экспериментальные составы чугуна выплавляли в индукционной печи ИСТ-250. Образцы (рис. 1) заливали в специальные шестиместные комбинированные формы. Верхнюю часть формы изготавливали из холоднотвердеющей смеси, нижней частью формы служила металлическая плита, на которую укладывали теплостойкую ткань в качестве защитно-разделительного покрытия.

Приготовление расплава и заливку форм осуществляли следующим образом. В печи готовили расплав чугуна ИЧХ18ВМ эвтектического состава в количестве 220 кг. При достижении температуры рас-



Рис. 1. Литые образцы (а), образец, подготовленный к испытаниям на износ (б)

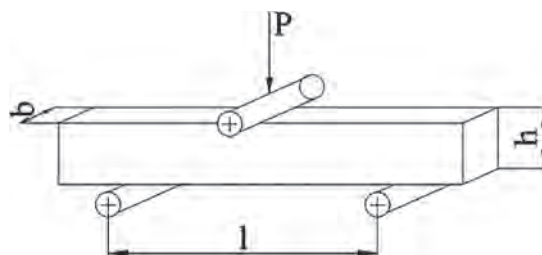


Рис. 2. Схема нагружения образца

плава 1550 °С и выдержке в течение 10 мин часть его сливали в разливочный ковш и заливали формы с образцами. Температуру заливаемого металла измеряли пирометром, она составляла 1485 °С. Остаток расплава сливали в печь и туда же добавляли феррониобий. При тех же температурных параметрах, что и в первом случае, заливали следующую партию образцов. Затем последовательно, еще дважды, процесс заливки образцов повторяли с добавлением феррониобия. Таким образом, из одной плавки были получены 24 образца из чугуна ИЧХ18ВМ эвтектического состава с разным содержанием ниобия. По этой же схеме, только из чугуна ИЧХ18ВМ заэвтектического состава были отлиты 24 образца с разным содержанием ниобия.

Содержание элементов в образцах определяли при помощи спектрографа ДФС-8. Металлографический анализ выполняли на металлографическом комплексе на основе микроскопа МИКРО-200. Изготовление образцов производили по стандартной методике. Травление шлифов проводили 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Рентгеноструктурный анализ осуществляли на аппарате ДРОН-3 в излучении  $\text{Cu}_{K\alpha}$ . Фазовый состав сплавов определяли по общепринятой методике [3]. Количество аустенита рассчитывали в соответствии с методикой, описанной в [4] по формуле:

$$V_{\gamma} = \frac{1,4I_{\gamma}}{I_{\alpha} + 1,4I_{\gamma}}, \quad (1)$$

где  $I_{\gamma}$  – средняя интегральная интенсивность интерференционных линий  $(220)_{\gamma}$  и  $(311)_{\gamma}$ ;  $I_{\alpha}$  – интегральная интенсивность интерференционной линии  $(211)_{\alpha}$ . Коэффициент 1,4 определяли из теоретического расчета рентгенограммы.

Для испытаний на прочность при изгибе из каждой партии было отобрано по четыре образца. Испытания проводили на испытательной машине ИР-5143-200-11, скорость нагружения составляла 0,5 мм/мин. На рис. 2 показана схема нагружения образца.

Предел прочности при изгибе рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{3P_{\text{max}}l}{2bh^2},$$

где  $\sigma_{\text{изг}}$  – предел прочности при изгибе, кгс/см<sup>2</sup>;  $P_{\text{max}}$  – разрушающее давление, МПа;  $l$  – расстояние между опорами, см;  $b$ ,  $h$  – соответственно ширина и высота образца.

Сравнительные испытания на износ проводили на лабораторном стенде по методике, приведенной в [5]. В качестве взаимодействующего с образцом абразивного элемента использовали шлифовальный

круг марки 63С40К7V352 диаметром 250 мм и толщиной 32 мм. Шлифовальный материал круга – карбид кремния с зернистостью 400 мкм и микротвердостью 2400–3500 НV. Исследовали нижнюю часть образцов, закристаллизовавшуюся в контакте с металлической плитой.

**Результаты и их обсуждение**

Результаты определения химического состава образцов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Химический состав образцов

Номер образца	Классификация*	Содержание элементов, мас.%									
		C	Cr	Ni	Mn	Si	W	Ti	V	Mo	Nb
19.1	Эвтектический	3,55	19,6	0,31	0,52	0,79	0,29	0,08	0,28	0,5	0
19.2											0,5
19.3											0,82
19.4											1,41
20.1	Заэвтектический	4,11	19,5	0,31	0,39	0,63	0,30	0,10	0,27	0,39	0
20.2											0,43
20.3											1,45
20.4											2,0

\* Для чугунов данного состава эвтектический сплав соответствует ~3,55–3,65 мас.% углерода.

Для определения фазового состава сплавов был проведен рентгеноструктурный анализ образцов № 19.1 и 20.1 без ниобия; № 19.2 и 20.2 – с содержанием ниобия 0,5 и 0,43% соответственно; № 19.4 и 20.4 – с содержанием ниобия 1,41 и 2,0% соответственно (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Фазовый состав чугуна

Номер образца	Содержание ниобия, мас.%	Карбидные фазы	Карбид ниобия	Твердые растворы
19.1	0	(CrFe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	–	γ-Fe, α-Fe
19.2	0,29	(CrFe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	–	γ-Fe, α-Fe
19.4	1,41	(CrFe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , (FeCr) <sub>3</sub> C	NbC	γ-Fe, α-Fe
20.1	0	(CrFe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	–	γ-Fe, α-Fe
20.2	0,43	(FeCr) <sub>3</sub> C, (CrFe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	–	γ-Fe, α-Fe
20.4	2,00	(CrFe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	NbC	γ-Fe, α-Fe

Независимо от химического состава во всех образцах присутствуют аустенит, феррит, карбиды состава (CrFe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>; количество феррита незначительно. В образцах № 19.4 и 20.2 дополнительно присутствует карбид состава (FeCr)<sub>3</sub>C. В образцах с максимальным содержанием ниобия (образцы № 19.4 и 20.4) содержится карбид ниобия.

Изменение количества аустенита в зависимости от содержания ниобия и суммарного количества легирующих элементов приведено на рис. 3. Зависимости в обоих случаях аналогичны.

Изменение твердости при изменении содержания ниобия незначительно; при этом твердость заэвтектического сплава практически постоянна и несколько ниже по сравнению с эвтектическим сплавом (рис. 4).

На рис. 5 представлены зависимости предела прочности при изгибе от содержания Nb в чугуне ИЧХ18ВМ эвтектического и заэвтектического составов.

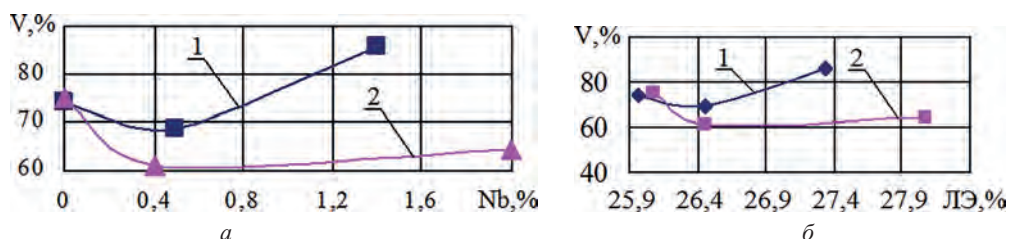


Рис. 3. Изменение содержания остаточного аустенита (V) в образцах чугуна в зависимости от изменения содержания ниобия (а) и общего количества легирующих элементов (ЛЭ) (б): 1 – эвтектический сплав; 2 – заэвтектический сплав

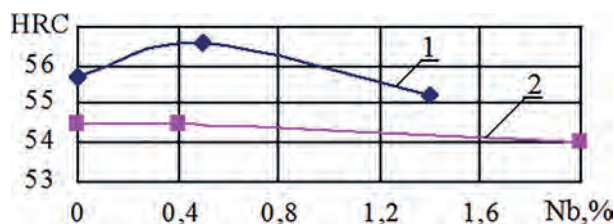


Рис. 4. Изменение твердости образцов в зависимости от содержания ниобия: 1, 2 – соответственно твердость HRC эвтектического и заэвтектического сплавов

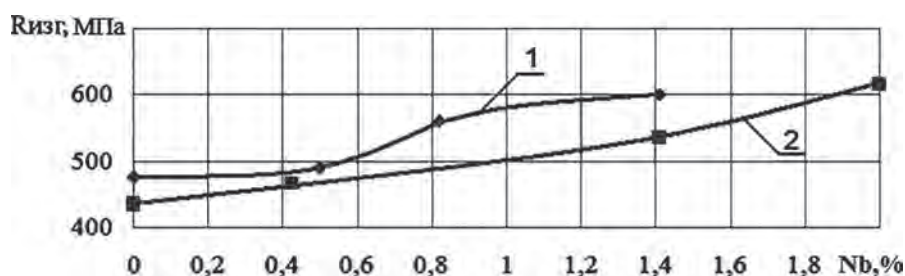


Рис. 5. Зависимость предела прочности при изгибе от содержания Nb в чугунах ИЧХ18ВМ эвтектического (1) и заэвтектического (2) составов

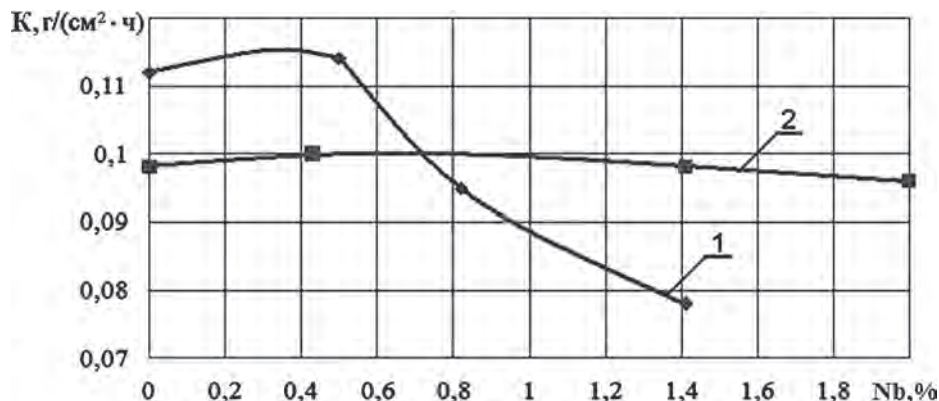


Рис. 6. Зависимость удельного износа (K) от содержания ниобия в чугунах ИЧХ18ВМ эвтектического (1) и заэвтектического (2) составов

Легирование ниобием положительно влияет на прочностные свойства чугуна как эвтектического, так и заэвтектического составов. Повышение прочности заметно уже при содержании Nb в количестве 0,5%. Предел прочности при введении в состав эвтектического и заэвтектического сплавов 1,4% ниобия повысился на 20% по сравнению с исходными сплавами без ниобия. Увеличение содержания ниобия до 2% в заэвтектическом сплаве повысило предел прочности при изгибе на 29%.

Удельный износ чугуна ИЧХ18ВМ эвтектического состава, легированного ниобием, остается практически одинаковым при содержании ниобия до 0,5%. С дальнейшим увеличением содержания ниобия износ уменьшается и при достижении 1,41% снижается на 30% по сравнению с исходным чугуном без ниобия (рис. 6, кривая 1). Изменение содержания ниобия в пределах 0–2% в заэвтектическом чугунах ИЧХ18ВМ практически не оказывает влияния на удельный износ, который в среднем составляет около 0,1 г/(см<sup>2</sup>·ч) (рис. 6). Возможно, это связано с постоянной твердостью заэвтектического сплава (см. рис. 4) вследствие большего количества карбидной фазы. При этом легирование ниобием может быть не заметно на фоне преобладающего влияния углерода. Кривая изменения удельного износа коррелирует с кривой изменения количества остаточного аустенита. Повышение количества остаточного аустенита повышает ресурс пластичности сплава. При этом накопление повреждений в зоне трения происходит медленнее и процесс съема материала замедляется.

Было рассмотрено влияние легирования ниобием чугунов ИЧХ18ВМ эвтектического и заэвтектического составов на их структуру. Изучали микроструктуры нижней части образца, затвердевшей на металлической плите, и верхней части, затвердевшей в контакте с песчаной формой для чугунов ИЧХ18ВМ эвтектического и заэвтектического составов с максимальным содержанием ниобия (образцы № 19.4, 20.4), а также образцы исходного чугуна без ниобия (№ 19.1, 20.1). В структуре всех образцов присут-



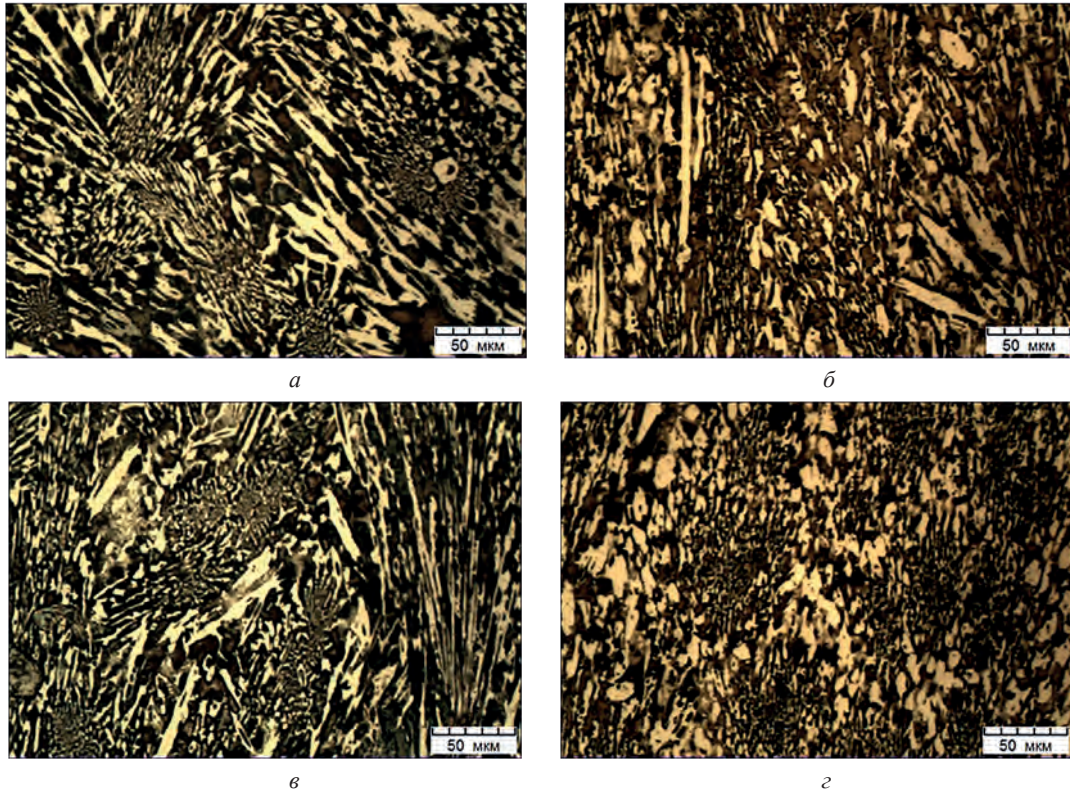


Рис. 7. Структуры образцов № 19.1 (а, в) и № 19.4 (б, г); а, б – кромка верхняя; в, г – кромка нижняя; поперечное направление

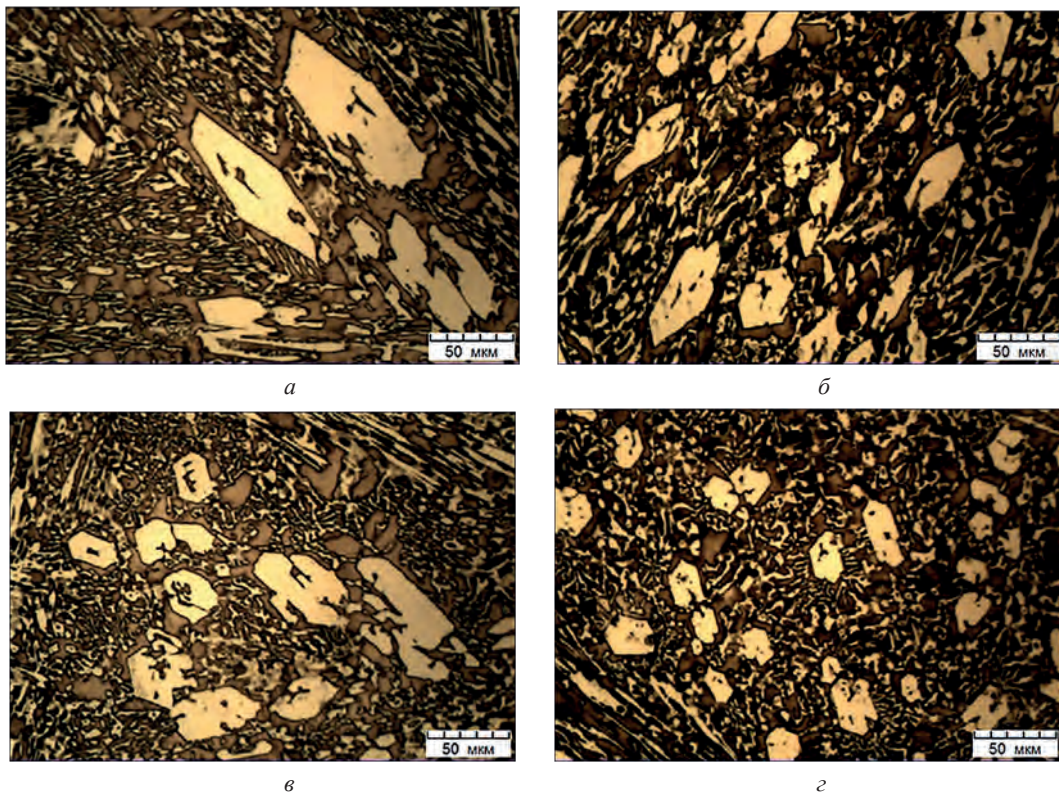


Рис. 8. Структуры образцов № 20.1 (а, в) и № 20.4 (б, г); а, б – кромка верхняя; в, г – кромка нижняя; поперечное направление

ствуют аустенит и карбиды. Ферритная фаза не идентифицируется, вероятно, вследствие ее незначительного количества. Микроструктуры поперечных сечений образцов 19-й серии из чугуна ИЧХ18ВМ эвтектического состава приведены на рис. 7. Легирование ниобием приводит к измельчению размера эвтектических карбидов в 1,8–2,0 раза. Микроструктура нижней части образца, затвердевшего в контакте с металлической плитой, имеет более мелкую структуру, чем верхняя часть образца.

Микроструктуры поперечных сечений образцов 20-й серии из чугуна ИЧХ18ВМ заэвтектического состава приведены на рис. 8. В образце с содержанием 2% ниобия видно уменьшение размеров первичных карбидов (в 3–4 раза) по сравнению с исходным образцом без ниобия.

### Выводы

Исследовано влияние ниобия на структуру, износостойкость и прочность при изгибе эвтектического и заэвтектического чугуна ИЧХ18ВМ. Установлено, что легирование ниобием увеличивает прочностные характеристики чугунов на 15–20%, износостойкость на ~ 30% по сравнению с нелегированным сплавом. Эффект изменения свойств следует связывать с повышением количества аустенита в структуре и диспергированием карбидной составляющей. Направление дальнейших исследований для повышения износостойкости заэвтектических чугунов будет связано с изучением влияния дополнительного легирования элементами, препятствующими распаду аустенита, а также исследованием возможностей термической обработки для получения мартенситной матрицы.

### Литература

1. Романов Л. М. Износостойкий хромистый чугун нового поколения / Л. М. Романов, П. А. Дубровин // Электрометаллургия. 2003. № 2. С. 28–31.
2. Износостойкий чугун: пат. 14155 Респ. Беларусь: МПК С22С 37/00 / В. М. Ильющенко, К. Э. Барановский; заявитель и патентообладатель ГНУ «ИТМ НАН Беларуси». – № а 20090689, заявл. 13.05.2009, опубл. 30.04.2011, Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці № 4. С. 178–179.
3. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. 2-е изд. М.: Металлургия, 1970. 366 с.
4. Анисович А. Г. Рентгеноструктурный анализ в практических вопросах материаловедения / А. Г. Анисович. Минск: Белорусская наука, 2017. 207 с.
5. Марукович Е. И. Изучение износостойкости деталей из хромистых чугунов, полученных литьем в кокиль / Е. И. Марукович, В. М. Ильющенко, П. Ю. Дувалов, А. И. Калентионок, К. Э. Барановский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: X Междунар. науч.-техн. конф.: сборник материалов. В 3-х кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением. Минск, 16–18 сент. 2015. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. С. 52–57.