

УДК 621.74:669.131.2:669.131.4

Матвеева М. О., Климович Б. В.

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ТИТАНОМ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ОТЛИВОК ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

Система железо – углерод является основой большинства сталей и многих сплавов – как наиболее распространенных в промышленности, так и обладающих уникальными физическими, механическими и химическими свойствами. Чугун, как экономичный сплав с высокой жидкотекучестью, малой усадкой, уникальным сопротивлением циклическим нагрузкам, получаемый по энерго- и ресурсосберегающим технологиям, относится к числу постоянно востребованных и прогрессивных материалов.

Титан всегда присутствует в чугуне, поскольку его содержат железные руды. Он также попадает в расплав из шихтовых материалов (стальных и чугуновых отходов). Практически весь титан находится в виде соединений типа карбида TiC , карбонитрида $Ti(C,N)$ или оксикарбонитрида $Ti(C,N,O)$ [1]. Все эти соединения изоморфны, образуют непрерывный ряд твердых растворов, поскольку углерод, азот, кислород являются элементами внедрения в кристаллической решетке титана, обладают очень высокой микротвердостью (свыше $HV\ 2500$), высокой энтальпией и температурой плавления, низкой энтропией (табл. 1), что определяет их уникальные свойства.

В количествах 0,03–0,1 % титан вводят в специальные конструкционные серые чугуны. Образовавшиеся карбиды или карбонитриды равномерно распределены в матрице. Включения $Ti(C,N)$ повышают износостойкость тормозных дисков и барабанов, даже при наличии в структуре чугуна повышенного количества феррита [3].

Титан как основной легирующий элемент для легирования белых износостойких чугунов пока не применяется. Однако в работе [4] отмечается, что исключительно высокая твердость карбида титана ($HV\ 3200$), а также его изоморфность с карбидом ванадия, его доступность определяют перспективность использования и как основного карбидообразующего элемента в белых износостойких чугунах. Препятствием к реализации титановых износостойких чугунов являются трудности выплавки и разлива высокоуглеродистых сплавов с титаном из-за взаимодействия расплава с газами атмосферы и огнеупорным материалом футеровки.

Целью настоящих исследований является изучение влияния микролегирования титаном на износостойкость и динамику износа отливок из серого чугуна.

Износостойкость испытывали на экспериментальной установке (рис. 1). Установка имитирует реальные условия влияния абразива на поверхность отливки и состоит из корпуса 7, заполненного необходимой средой. Экспериментальные образцы 4, выполнены в виде металлических колец (внутренний диаметр 10 мм, внешний не более 100 мм), устанавливаются на внешний вал 3 и фиксируются запорной гайкой 6. Вал приводится во вращение электродвигателем 1, который соединен с ним муфтой 2. Удаление абразива после каждого эксперимента проводится через специальное окно камеры в поддон 5. Абразив разделяется в зависимости от размеров зерна калибровочными ситами.

Таблица 1

Термодинамические характеристики соединений титана [2]

Соединение титана	Параметр		
	$-\Delta fH^0(100)$, кДж/моль	S^0 , кДж/град.	$T_{пл.}$, °C
TiC	208,6	24,3	2781±20
TiN	322,5	30,1	2947±20

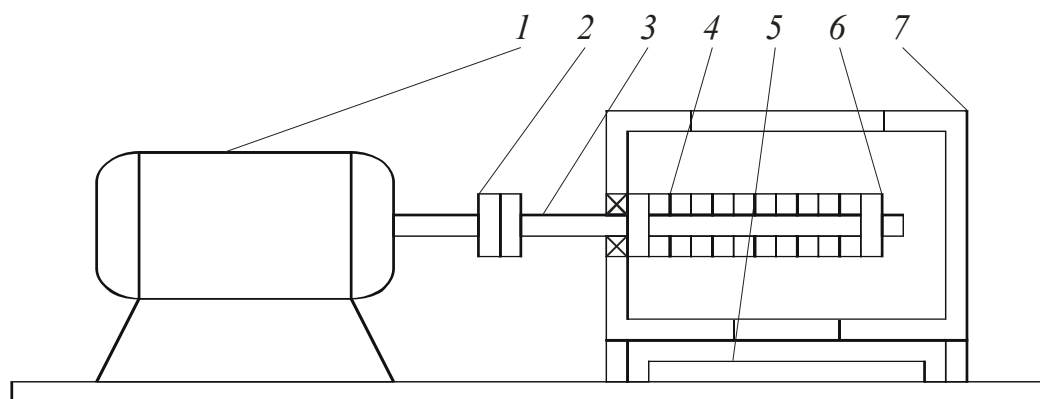


Рис. 1. Схема установки для испытаний на износостойкость (пояснения в тексте)

Преимущество этой установки – многопозиционность. На рабочем валу можно расположить от 16 до 20 образцов, что увеличивает производительность исследований. Непосредственная связь рабочего вала с электродвигателем обеспечивает стабильность частоты вращения образцов, а горизонтальное размещение рабочего вала – идентичность процесса износа образцов по глубине их погружения в абразив и хорошую воспроизводимость результатов экспериментов. По окончании эксперимента определяется потеря веса и пересчитывается износ на единицу площади поверхности. Для уменьшения погрешности одновременно испытывают не менее трех образцов одного состава.

При проведении лабораторных испытаний на износ точное воспроизведение напряженного состояния поверхности образца, соответствующее реальным условиям эксплуатации детали, практически невозможно. Тем не менее, результаты лабораторных испытаний износостойкости помогают более обоснованно выбрать материал для промышленных испытаний. Установить сходство условий разрушения поверхностного слоя при изнашивании помогают «ряды износостойкости». Если последовательность расположения материалов по величине износа в данных условиях лабораторных испытаний и в промышленных условиях сохраняется, можно считать, что избранная методика испытаний даст правильный ответ о выборе материала [4]. Подобие рядов износостойкости, как правило, означает, что механизмы разрушения в принятых условиях лабораторных испытаний и в реальных условиях эксплуатации одинаковы или близки. В идеальном случае попарные отношения всех коэффициентов относительной износостойкости не меняются. Надежность выводов тем выше, чем менее сходные материалы по структуре и свойствам включены в ряды износостойкости.

В серии плавов по исследованию влияния титана на износостойкость чугуна в навеску исходного чугуна помещали его возрастающее количество, далее металл расплавляли в печи, выдерживали температуру перегрева 1390–1410 °С. Результаты химического анализа чугуна опытных плавов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав металла опытных плавов

№№ п/п	Элемент, % по массе (Fe остальное)					
	C	Si	Mn	S	P	Ti
Исх. чугун	3,75–3,80	2,00–2,10	0,61–0,65	0,03–0,04	0,04–0,05	–
1	3,73–3,77	1,79–1,86	0,61–0,65	0,02–0,03	0,04–0,05	0,017–0,019
2	3,60–3,68	2,00–2,15	0,61–0,68	0,03–0,04	0,04–0,05	0,022–0,024
3	3,75–3,80	1,80–1,86	0,60–0,68	0,02–0,03	0,04–0,05	0,030–0,032
4	3,51–3,60	1,72–1,78	0,60–0,68	0,02–0,03	0,04–0,05	0,041–0,044

Износостойкость образцов отливок исследовали в абразивах: карьерный песок и карбид кремния. Результаты испытаний (% потери веса с площади 10 см^2) показаны на рис. 2.

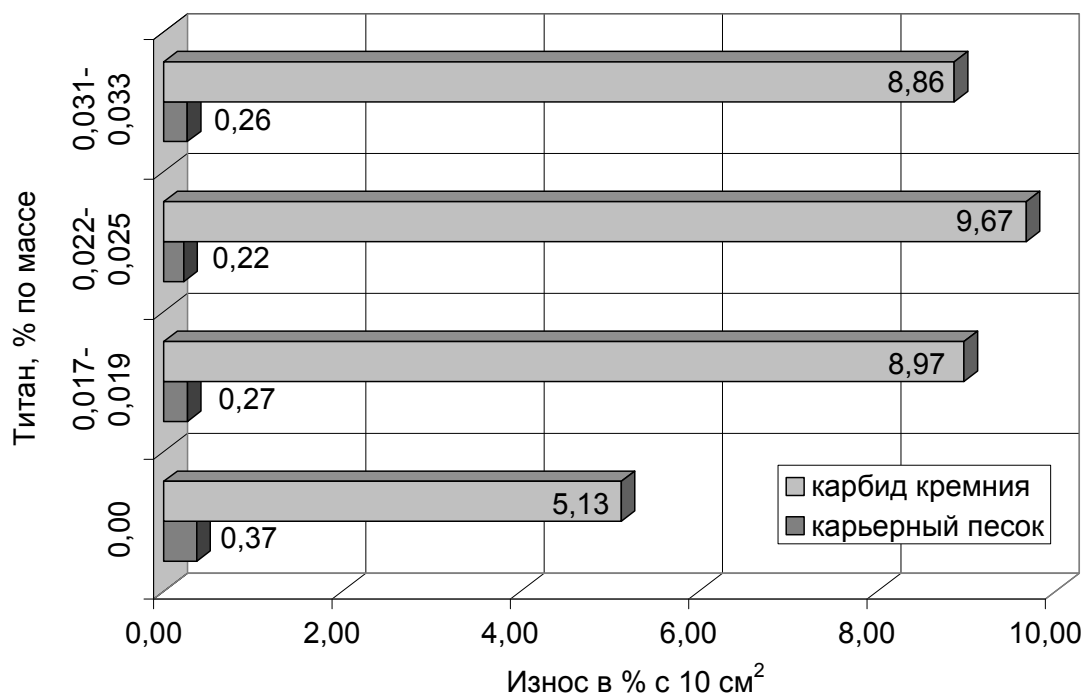


Рис. 2. Износ образцов при возрастающем содержании титана

Истирания при испытаниях образцов в карьерном песке практически нет, средняя потеря массы $0,25 \%$ с 10 см^2 . При аналогичных испытаниях в карбиде кремния износ значительно увеличился в 37 раз (в среднем до $9,2 \%$) с той же площади. Изменение содержания титана в исследованных пределах не оказывает значительного влияния на износостойкость. Образец, взятый для сравнения, имел на 32 % больший износ в карьерном песке и на 44 % меньший – в карбиде кремния. Во всех образцах структурные составляющие, по-видимому, разрушаются по сходному механизму – путем среза или отрыва, поскольку твердость абразива намного выше твердости всех структурных составляющих.

Для более полного объяснения полученных результатов проведен их анализ в комплексе с данными металлографических исследований. Способность металлической основы противостоять износу может быть косвенно определена по микротвердости структурных составляющих и твердости слитков. Было установлено, что микротвердость перлита была больше в образцах содержащих титан и с увеличением его количества возрастала. Аналогичные результаты получены и для твердости.

Анализ зависимостей величины износа в карьерном песке и в карбиде кремния от микротвердости перлита для экспериментальных чугунов (рис. 3) позволяет сделать следующие выводы. При испытаниях в абразиве меньшей твердости разница в микротвердости структурных составляющих играет определяющую роль: микротвердость перлита исходного чугуна ниже микротвердости образцов с титаном и соответственно его износостойкость хуже. При дальнейшем увеличении микротвердости перлита и количества титана износ незначительно уменьшается. Резкого возрастания износостойкости в данном случае и не может быть, так как критической величиной твердости металла при изнашивании кварцевым песком следует считать значение около $\text{HV } 600$. При такой твердости происходит смена механизма изнашивания: прямое разрушение путем среза или отрыва заменяется многократным деформированием и разрушением в результате усталостного или полидеформационного процесса.

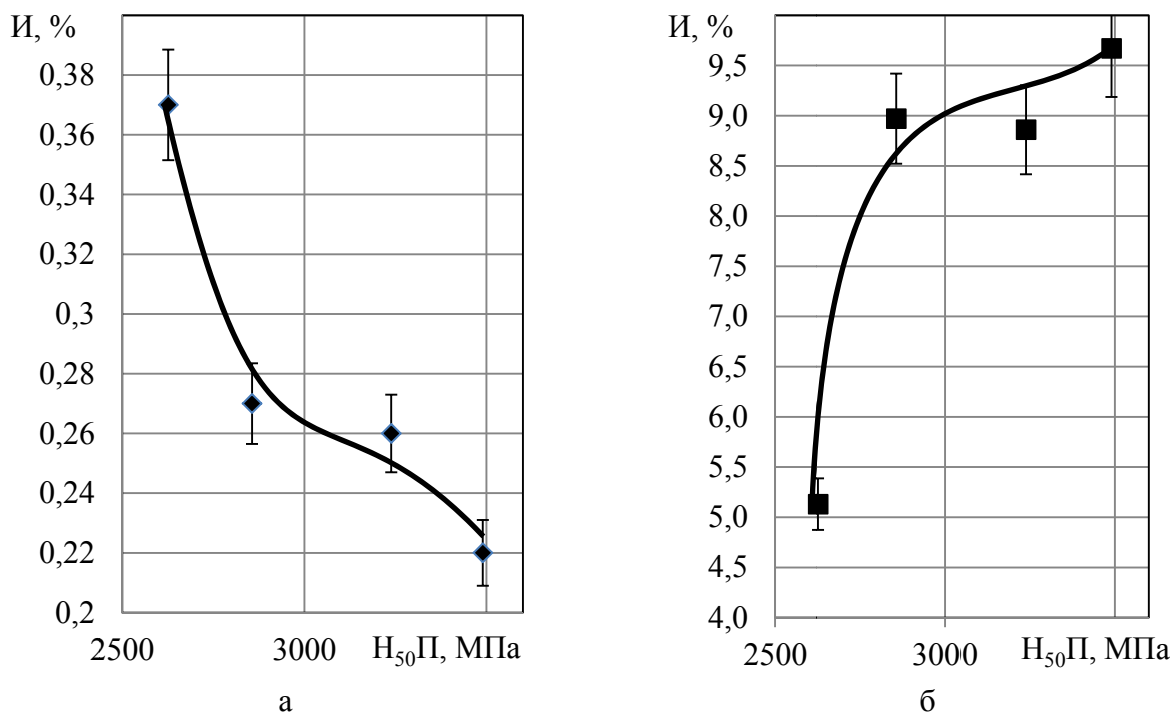


Рис. 3. Влияние микротвердости перлита на износ опытных отливок:
а – абразив карьерный песок; б – абразив карбид кремния

В случае испытания твердым абразивом (SiC) исходный чугун имел значительно лучшую износостойкость по сравнению с микролегированным титаном. Следовательно, микротвердость металлической матрицы не оказывала определяющего влияния на износ. Исходный чугун содержал около 1,0 % цементита, и в нем было меньше (хоть и незначительно) графита. Титан способствовал междендритному распределению графита и уменьшению длины его пластин, что ухудшило износостойкость чугуна.

Увеличение содержания титана в исследуемом концентрационном интервале не оказывало ожидаемого положительного влияния на износостойкость чугунов, возможно из-за того, что в структуре не образовалось достаточного количества упрочняющей высокотвердой фазы. Но увеличение содержания титана влияло на форму, распределение и длину включений графита. На рис. 4 показаны характерные структуры. При дальнейшем увеличении содержания титана до 0,041–0,044 % доля графита с междендритным пластинчатым распределением становилась преобладающей.

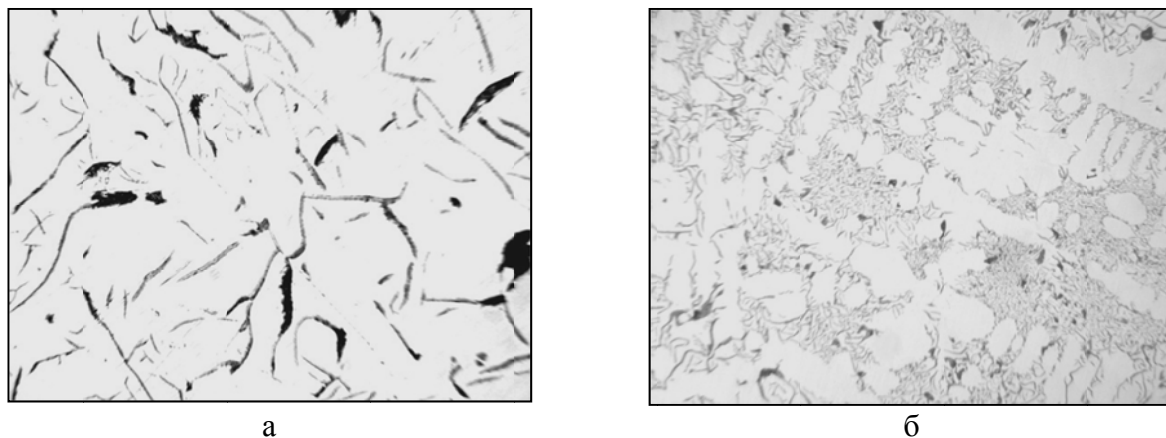


Рис.4. Характерные структуры металла опытных плавок, $\times 150$:
а – исходный чугун; б – Ti 0,041–0,044 %

Полученные результаты согласуются с ранее сделанными в работе [5] выводами, о том, что титан усиливает тенденцию к образованию междендритного графита. Распределение графита меньше влияет на прочность и твердость, но существенно улучшает служебные свойства: износостойкость, стойкость против задиrow.

По классификации легирующих элементов в отношении их распределения между структурными составляющими чугуна – титан относится к элементам, образующим, главным образом, специальные фазы (карбиды, карбонитриды) [6]. Эти фазы служат зародышами для графита, способствуют графитизации, несмотря на то, что Ti является активным карбидообразующим элементом. В связи с таким механизмом действия титана, его влияние проявляется, в основном, в процессе затвердевания чугуна. Как известно [7], чем сильнее отличие в строении и размерах атомов карбидообразующего элемента от атомов железа, тем меньше степень легированности ими цементита. В равновесных условиях затвердевания титан замещает железо в цементите в тысячных долях процента. Также незначительно его содержание в других структурных составляющих, хотя Ti стабилизирует перлитную структуру чугуна. После травления все образцы имели перлитную матрицу. Характерные структуры показаны на рис. 5.

На следующем этапе исследований рассматривали динамику износа во времени. По результатам расчета % износа в определенный промежуток времени от общего % потери массы построены гистограммы, показанные на рис. 6.

В карьерном песке максимальный износ для всех экспериментальных образцов происходил в первый час эксплуатации изделий от 36 до 44 %. Для базового чугуна установлены два пика потери массы 30 % в первый час и 37 % с четвертого по шестой. И хотя по общей картине износа влияние титана не очевидно, то по динамике процесса изнашивания в карьерном песке, можно установить, что с увеличением содержания титана износ в процессе эксплуатации изделия уменьшается.

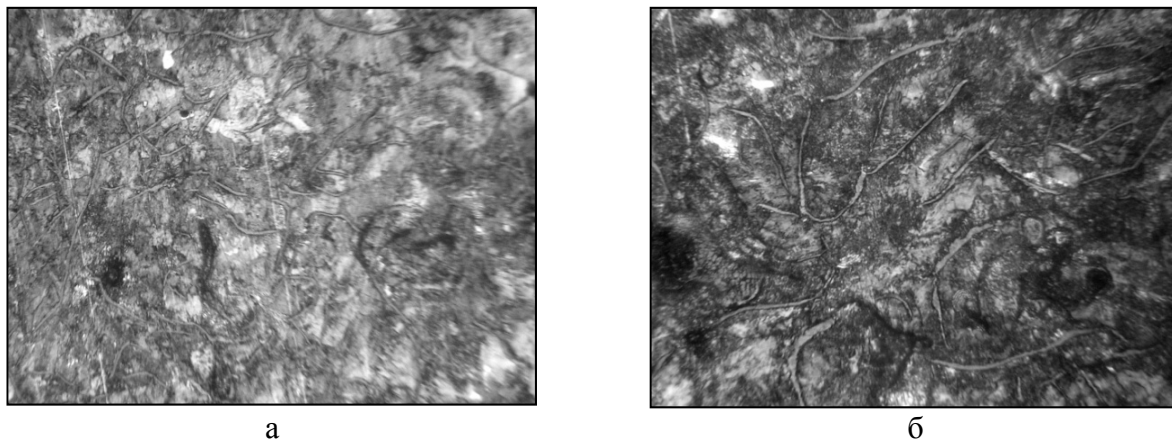


Рис. 5. Микроструктуры металлической матрицы чугунов, $\times 300$:
а – Ti 0,022–0,024 %; б – Ti 0,041–0,044 %

Несколько другая динамика износа наблюдается при испытаниях в карбиде кремния. Все зависимости имеют немонотонный характер (рис. 6). Для большинства образцов (за исключением 2) максимальная потеря массы приходилась на 4–6 час эксплуатации изделия. При этом базовый чугун в первый час имел самый низкий износ, а с 4 по 6-ой самый высокий. Такая динамика износа, по-видимому, обусловлена тем, что переход к интенсивному разрушению поверхностного слоя чугуна при изнашивании обычно происходит резко и не описывается каким-либо одним из факторов, влияющих на износ. Этот переход зависит от сочетания скорости движения, твердости и прочности абразива, его энергии удара, остроугольности и угла атаки, прочностных и пластических характеристик чугуна. Как правило,

для пластичних матеріалів залежність інтенсивності изнашивания від всіх цих факторів має плавний характер, скоріше всього це стосується і к більш м'якому абразиву кар'єрному піску. Для хрупких матеріалів і жорстких абразивів вона більш різка. В роботі [6] встановлено, що коли досягається поріг, визначаючий інтенсивне хрупке руйнування, износоустійкість білого чугуна різко, часто скачками, зменшується. Чітке описання границь кожної з областей руйнування поки не піддається кількісному визначенню, тому користуються якісним описанням з урахуванням головних характеристик процесу: абразива, умов навантаження, несучої середовища.

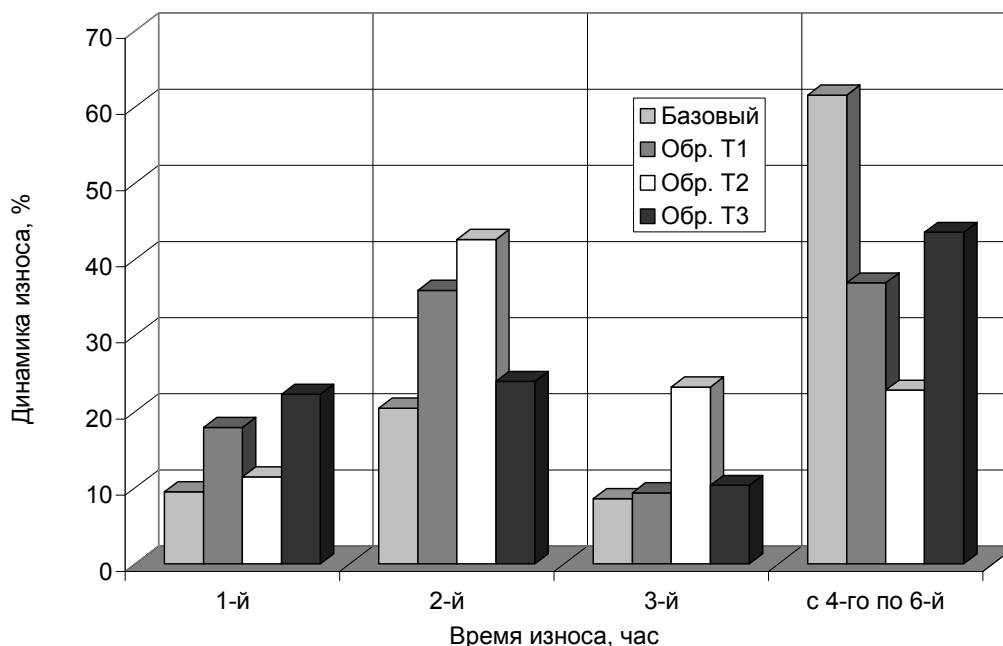


Рис.6. Динамика износа образцов при испытании в карбиде кремния

В результате проведенных исследований установлено, что изменение содержания титана в исследованных пределах не оказывало значительного влияния на износостойкость, но его присутствие – да. Исходный образец в карьерном песке изнашивался на 32 % сильнее экспериментальных, при испытаниях в карбиде кремния наоборот – его износ был на 44 % меньше. Износостойкость опытного перлитного чугуна в исследуемых абразивах определялась разными факторами. При более мягком абразиве основным фактором определяющим величину износа была микротвердость перлита, с ее увеличением износ уменьшался. А в карбиде кремния этот параметр определялся распределением графита, и с появлением междендритного – увеличивался [7].

Установлено влияние микролегирования титаном (0,017–0,044 %) на динамику износа экспериментального серого чугуна [7]. Анализ показал, что на каждом этапе износ определялся разными факторами. На первом – эксплуатации изделия в течение 1–3 часов – преобладающими являлись размер и распределение графита. Исходный чугун характеризовался равномерным распределением пластинчатого графита с длиной включений 90–180 мкм, что повышало его износостойкость по сравнению с чугуном, который содержал титан. На втором этапе (эксплуатация изделий в течение 4–6 часов) определяющим фактором является количество графита, которое повышается с увеличением содержания титана в интервале 0,017–0,044 % и оказывает положительное влияние на износостойкость. Это связано с тем, что образующиеся поры от выкрошившегося графита в зоне износа, поглощают абразивные частицы и тем самым снижают темп износа. В этом случае значительную роль играет соотношение между размерами графита и абразивной частицы. И хотя по общей картине износа

влияние титана не очевидно, то по динамике процесса изнашивания в карьерном песке, можно установить, что с увеличением содержания титана износ в процессе эксплуатации изделия уменьшается.

ВЫВОДЫ

Установлено, что износ экспериментального серого перлитного чугуна с 0,017–0,044 % титана в карьерном песке и карбиде кремния определялся разными факторами: при мягком абразиве (карьерный песок) основным фактором являлась микротвердость перлита и с ее увеличением износ уменьшался; при истирании в твердом абразиве (карбид кремния) износ определялся распределением графита, измельчение и появление междендритного графита увеличивало износ чугуна. Исходный образец в карьерном песке изнашивался на 32 % сильнее экспериментальных, а при испытаниях в карбиде кремния наоборот – его износ был на 44 % меньше.

Установлены различные этапы износа образцов опытного чугуна. На первом этапе (эксплуатация изделия в течение 1–3 часов в карбиде кремния) преобладающим фактором являлся размер и распределение графита: равномерное распределение пластинчатого графита с длиной включений 90–180 мкм в исходном чугуне определяло его высокую износостойкость по сравнению с чугуном, который содержал титан. Такая динамика износа, по-видимому, обусловлена тем, что переход к интенсивному разрушению поверхностного слоя чугуна при изнашивании обычно происходит резко и не описывается каким-либо одним из факторов, влияющих на износ. На втором этапе (эксплуатация изделий в течение 4–6 часов) определяющим фактором являлось количество графита, которое повышалось с увеличением содержания титана в интервале 0,017–0,044 % и оказывало положительное влияние на износ. Это обусловлено тем, что образующиеся поры от выкрошившегося графита в зоне износа, поглощали абразивные частицы и тем самым снижали темп износа.

Чугун с содержанием титана 0,02–0,03 % может служить материалом для отливок испытывающих умеренное воздействие абразивной среды, таких как прокалочные опоки для литья по выплавляемым моделям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чугун : Справ.изд. / под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М. : Металлургия, 1991. – 576 с.
2. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справ.изд. / под ред. Т. Я. Косолаповой – М. : Металлургия, 1986. – 928 с.
3. Chapman J. Titanium Bearing Cast Irons for Automotive Bracing Application / J. Chapman, G. Mannion // Foundry Trade Journal 1982. February 25. P. 232; 235–237; 239–242; 244–248.
4. Цытин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цытин – М. : Металлургия, 1983. – 176 с.
5. Гиринович Н. Г. Чугунное литье / Н. Г. Гиринович. – М. : Металлургиздат, 1949. – 562 с.
6. Матвеева М. О. Белые износостойкие чугуны легированные марганцем, титаном и азотом / М. О. Матвеева // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 29–32.
7. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны / Ю. Г. Бобро – М. : Металлургия, 1976. – 288 с.