

Повышение качества, надежности и срока эксплуатации деталей из железоуглеродистых сплавов

Ю.Ф. Абакумов, канд.техн.наук, доцент
(тел.:8(917)515-05-88; nabakumova@yandex.ru)

А.В. Козлов, канд.техн.наук, доцент
(тел.:8(965)438-18-78)

Р.Ф. Юсипов, канд.техн.наук, доцент
(тел.:8(903)736-88-58)

С.С. Зуйков, ст. преподаватель
(тел.:8(916)484-23-90)

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация. *Технический прогресс современного машиностроения возможен лишь за счет резкого улучшения качества, надежности и долговечности выпускаемых машин и агрегатов. Одним из важнейших факторов развития машиностроения всегда было и будет совершенствование технологии производства.*

Ключевые слова: *железоуглеродистые сплавы, церий, магний, модифицирование, графитовые включения, износостойкость, металлическая матрица.*

Совершенствование технологии, направленное на улучшение качества, повышение надежности и эксплуатационных свойств литых деталей из железоуглеродистых сплавов, из которых преимущественно состоят многие машины, приборы и устройства, в настоящее время приобретают огромное экономическое значение. К железоуглеродистым сплавам относятся углеродистые и легированные стали, серые, ковкие, высокопрочные и белые чугуны.

В современном машиностроении чугун является наиболее распространенным конструкционным литейным материалом. Так, около 74% из всех отливок по массе являются чугунными, примерно 21% - стальными и 5% - цветными. Это положение прочно удерживается, несмотря на все возрастающие требования к литейным материалам в отношении их особых физических, химических, механических, технологических и эксплуатационных свойств. Доля кокильного литья в общем выпуске отливок по весу составляет около 15%.

Преимущества литья чугуна в кокиль общеизвестны - это улучшение экологии и условий труда, повышение производительности, снижение брака, уменьшение припусков на механическую обработку, повышение механических свойств литого металла, появление возможности более легкой механизации производства и т.д.

Однако более широкое внедрение этого способа литья тормозится из-за меньшей износостойкости чугунных отливок.

С целью увеличения износостойкости чугунных кокильных отливок проводится научно-исследовательская работа. При решении этого вопроса исследовались причины их низкой износостойкости и предложены меры, способствующие увеличению.

Износостойкость - это способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.

Результаты многочисленных исследований позволяют указать на факторы, влияющие на износостойкость чугуна, которые можно условно разделить на две группы.

В первую очередь необходимо принять во внимание группу «внешних» факторов, которые определяются конструкцией кинематической пары трения или условиями проведения эксперимента. К внешним факторам необходимо отнести следующие:

характер трения (трение скольжения, качения или смешанное; сухое или со смазкой);

скорость взаимного перемещения трущихся тел и величину удельной нагрузки;

температурные условия, а также условия смазки (способ подвода, количество и качество);

начальное состояние трущихся поверхностей;

свойства продуктов износа, степень и характер их удаления.

Очень большое значение имеет следующая группа факторов, которая определяется технологическим процессом изготовления отливок. Это макроструктура, структура основной металлической матрицы, количество, форма, величина и характер распределения графитовых включений.

Вопросы износа являются центральными в общей проблеме повышения надежности и долговечности деталей машин. Наиболее разработанной в теоретическом плане является механическая сторона этого явления. Что же касается явлений деформации и разрушения, то они рассматриваются с позиций микроскопических представлений. Для успешного решения этих явлений, их необходимо рассматривать с точки зрения тонкой структуры и с учетом несовершенства кристаллического строения металла.

Среди факторов, определяющих износ чугунных деталей, основная роль принадлежит структуре и физико-химическим свойствам трущихся поверхностных слоев, формируемым в зависимости от химического состава, легирования, модифицирования и термической обработки, т. е. второй группе факторов.

Основная металлическая матрица чугуна состоит из феррита, перлита, цементита, мартенсита и различной формы графитовых включений: междендритной, пластинчатой, хлопьевидной и шаровидной или глобулярной. Механические свойства чугуна (прочность, твердость и пластичность) зависят от микроструктуры чугуна и формы графитовых включений.

Наиболее износостойкой структурой чугуна является цементит. Однако в связи с очень высокой твердостью она не поддается механической обработке, и такие чугуны крайне редко применяются как конструкционные.

Наиболее стойкой на износ структурой является перлит, и по мере увеличения его процентного содержания износостойкость изделий увеличивается. Феррит обладает незначительным сопротивлением износа.

Мартенситная структура обладает более высокой твердостью, чем перлитная, но уступает последней в сопротивлении износа из-за хрупкого строения, которое приводит к выкрашиванию структурных составляющих.

Механические свойства литого металла определяют фактическую площадь касания и через нее влияют на интенсивность износа. Соприкосновение двух трущихся поверхностей (их контакт) происходит главным образом по вершинам микронеровностей. Фактическая площадь контакта при этом очень мала. Поэтому даже при очень небольшой нагрузке удельные давления на площадках фактического контакта достигают очень высоких значений и, как следствие, вызывают пластическое течение металла.

Пластическая деформация продолжается до тех пор, пока площадь контакта не окажется достаточной для данной нагрузки:

$$S_{\Phi} = \frac{P}{\sigma_{0,2}} S_{\Phi} = \frac{P}{\sigma_{0,2}}, \dots\dots\dots(1)$$

где P - внешняя нагрузка;
 S_Φ - площадь фактического контакта;
 σ_{0,2} - предел текучести чугуна.

Отсюда:
 P = S_Φ·σ_{0,2} (2)

Из уравнения (2) следует, что повышение несущей способности чугуна может происходить за счет:

- а) увеличения поверхности контакта S_Φ;
- б) повышения предела текучести σ_{0,2}.

Вследствие достижения величинами S_Φ и σ_{0,2} некоторого предела, удовлетворяющего приведенному выше равенству, процесс стабилизируется. Таким образом, в процессе износа чугуна может наблюдаться увеличение фактической площади контакта и повышение микротвердости его поверхностного слоя.

В литых сплавах макроструктура характеризуется размерами дендритов первичных кристаллов.

Крупнозернистое строение чугуна возникает при медленном охлаждении после заливки в песчаные формы. При заливке того же чугуна в металлические формы возникает мелкозернистая структура вследствие быстрого охлаждения. Чугуны с крупнозернистым строением структуры деформируются значительно, чем мелкозернистые, так как отличаются большей пластичностью и всегда более низким пределом текучести. Чугуны с мелкозернистым строением структуры обладают более высоким сопротивлением разрушению и меньшей пластичностью.

При трении скольжения возникают большие сдвиговые деформации (тангенциальные силы), которые приводят к разрушению металла. Чтобы воспрепятствовать этому, макроструктура чугуна должна быть мелкозернистой. В данном случае необходимо отдать предпочтение кокильному литью.

Предсказать износостойкость чугуна только на основании исследования его механических свойств не всегда удается. Определить пределы прочности и текучести, а также динамические и пластические свойства поверхностных слоев очень сложно, поэтому в большинстве случаев определяют зависимость износостойкости чугуна от его твердости.

Исключительно важное влияние на износостойкость чугуна оказывает общее количество, форма и характер распределения в основной структуре графитовых включений. Это положение также подтверждается некоторыми исследователями при испытании чугуна в различных условиях.

Графит при работе чугуна на износ играет двоякую роль. Являясь рыхлой составляющей структуры чугуна, он ослабляет его сопротивление разрушительному действию сил трения. Одновременно графит, как продукт износа, оказывает на поверхности трущихся тел благоприятное смазывающее действие. Положительное влияние графита усматривается также в том, что он заполняет собой мелкие впадины, шероховатости трущихся тел, выравнивая фактические удельные давления на их поверхностях.

Двойственная роль графита при износе чугунов ставит вопрос об оптимальном количестве, форме и равномерном распределении его в структуре.

Кроме того, графитовые включения являются концентраторами напряжений. Чем острее его угол, тем больше у кромки образуются пики

напряжений. Теоретически коэффициент концентрации напряжений α_σ в присутствии графита определяется в зависимости от длины острия t и его радиуса кривизны ρ :

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ср}} = 1 + 2 \cdot \frac{t}{\rho}$$

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ср}} = 1 + 2 \cdot \frac{t}{\rho} ; \dots\dots\dots (3)$$

Учитывая форму графитовых включений можно отметить, что коэффициент концентрации напряжений α_σ у чугуна с междендритным графитом высок, поскольку длина острия графита t значительно больше его радиуса кривизны ρ .

При незначительных удельных нагрузках, порядка (1-5) МПа, возникает срезающее напряжение $\tau_{ср}$, которое приводит к разрушению сопрягающихся деталей.

У чугуна с шаровидным графитом $t \approx \rho$ и, соответственно, коэффициент концентрации $\alpha_\sigma = 3$.

У чугуна с пластинчатым графитом α_σ занимает промежуточное значение: он больше, чем у чугуна с шаровидным графитом, но значительно меньше, чем у чугуна с междендритным графитом.

Таким образом, глобулярный (шаровидный) графит в чугуне, работающем на износ при трении скольжения, является наиболее благоприятной формой, так как он менее всего ослабляет прочность матрицы. Коэффициент концентрации напряжений у этого чугуна меньше, чем у чугуна с пластинчатым и междендритным графитом. Такой чугун может быть с успехом применен для деталей, работающих в более тяжелых условиях при более высоких удельных давлениях и скоростях относительного перемещения трущихся поверхностей.

При литье чугуна в металлические формы чаще всего образуется структура, состоящая из феррита и междендритного графита (после термической обработки). Износостойкость такого чугуна очень низка. Это объясняется тем, что его металлическая масса обладает сравнительно низким α_σ и к тому же «изрешечена» включениями графита, что еще больше снижает его прочностные свойства.

Наличие перлитной составляющей в структуре чугуна, как более прочной, повышает его износостойкость.

Таким образом, для того чтобы повысить износостойкость трущихся деталей, необходимо увеличивать процентное содержание перлитной составляющей в их структуре, как более прочной, менее пластичной и мало подвергающейся окислению и разрушению в результате тепловых нагрузок, возникающих при трении скольжения. Графит при этом должен быть пластинчатым, или лучше всего - шаровидным.

Достигнуть желаемой структуры и формы графитовых включений можно изменением химического состава чугуна, его легированием, модифицированием и термообработкой.

Согласно поставленной задаче исследований, химический состав исходного чугуна был принят следующим: C=3,5... 3,75%, Si=1,7...2,1%, Mn=0,45...0,65%, P = 0,20...0,30 % и S не более 0,1 %. Степень эвтектичности такого чугуна $S_\Sigma = 1,0$.

Этот чугун выплавлялся в высокочастотной индукционной печи емкостью 100 кг [2,3]. Для того чтобы исключить влияние колебания химического

состава на образование структуры чугуна, исходный чушковый чугун переплавлялся в индукционной печи и разливался брикетами в песчаные формы. Пробы на химический анализ заливались размером 50x50x50 мм. В дальнейшем этот переплав плавился с добавлением хрома и никеля в количестве 0,15% от веса жидкого металла. Процентное содержание углерода в чугуне достигалось путем введения электродного боя.

Температура жидкого металла замерялась стандартной платино-платинородиевой термопарой. В печи она была 1400-14500С, а при заливке кокиля – 1350-13800С.

Модифицирование проводилось сплавом ФЦМ-5 (Ce и Mg), а легирование – оловом и сурьмой в количестве 0,01%; 0,05%; 0,10%; 0,15%; 0,20% и 0,25% каждого. Модификаторы помещались на дно разливочного ковша под струю жидкого металла. Молотый ферросилиций (FeSi) вводился при заполнении чугуном 1/3 ковша в количестве 0,4% при модифицировании ФЦМ-5. Добавки перед введением в ковш дробились на зерна диаметром 2-4 мм.

Для исследований были взяты образцы от шести различных плавок, химический состав которых приведен в таблице №1.

Таблица №1

* Первая цифра указывает на модификатор 3-ФЦМ-5; Вторая – на номер плавки; Буква – на марку кокиля.

№№ п/п	№№ плавки*	Химический состав чугуна, в процентах								
		C	Si	Mn	S	P	Ce	Mg	Ni	Cr
							Введено усвоено			
1	3-1А	3,65	1,98	0,52	0,034	0,25	0,010	0,0007	0,09	0,11
							0,004			
2	3-2С	3,63	2,01	0,59	0,027	0,24	0,05	0,002	0,08	0,1
							0,01			
3	3-3Д	3,60	1,95	0,57	0,023	0,24	0,10	0,005	0,09	0,11
							0,02			
4	3-4В	3,55	1,96	0,63	0,018	0,25	0,15	0,007	0,09	0,11
							0,027			
5	3-5А	3,70	1,89	0,60	0,016	0,24	0,20	0,010	0,07	0,10
							0,039			
6	3-6А	3,65	1,90	0,59	0,015	0,23	0,25	0,012	0,09	0,11
							0,05			

Экспериментально установлено, что сплав ФЦМ-5 оказывает рафинирующее действие на жидкий чугун и способствует почти полному удалению такой вредной примеси, как сера. Из таблицы №1 видно, что количество серы уменьшилось от 0,34% до 0,015% в зависимости от количества введенного модификатора. Процент усвоения церия соответствует 15-20%. На рис. 1 дана зависимость остаточного содержания серы от процентного содержания присадки. Наибольшая степень снижения ее наблюдается при количестве введенного модификатора 0,20-0,25% (рис. 1).

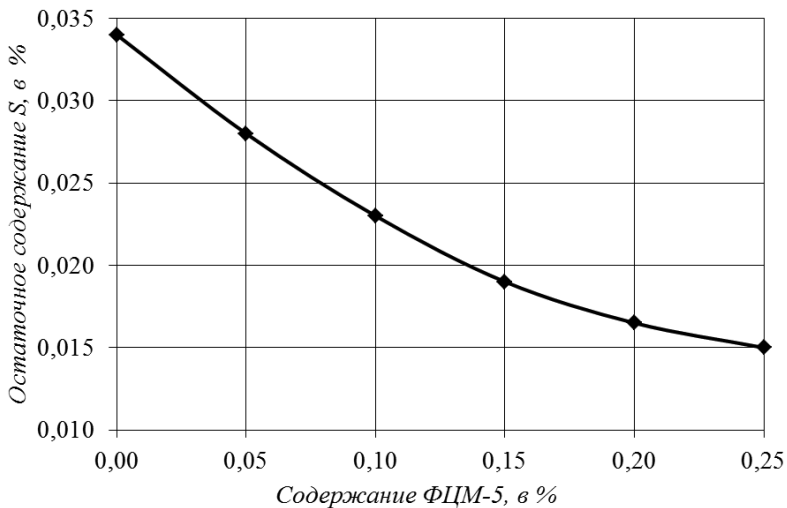


Рис. 1. Влияние количества введенного модификатора на десульфурацию чугуна

Одним из основных свойств церия и магния является их высокое химическое сродство к кислороду, сере, азоту, водороду и др. При модифицировании они создают тугоплавкие соединения с серой и кислородом, которые коагулируют и всплывают на поверхность металла. Это может служить одной из причин уменьшения серы в чугуне и неполного усвоения церия. Механические свойства чугуна, как видно из результатов испытаний, улучшаются в зависимости от количества введенного модификатора (рис. 2).

Особенностью структуры данных чугунов является наличие в ней графитовых включений шаровидной формы, которые разделены участками металлической массы. Металлическая матрица их состоит из перлита, свободного графита и эвтектики.

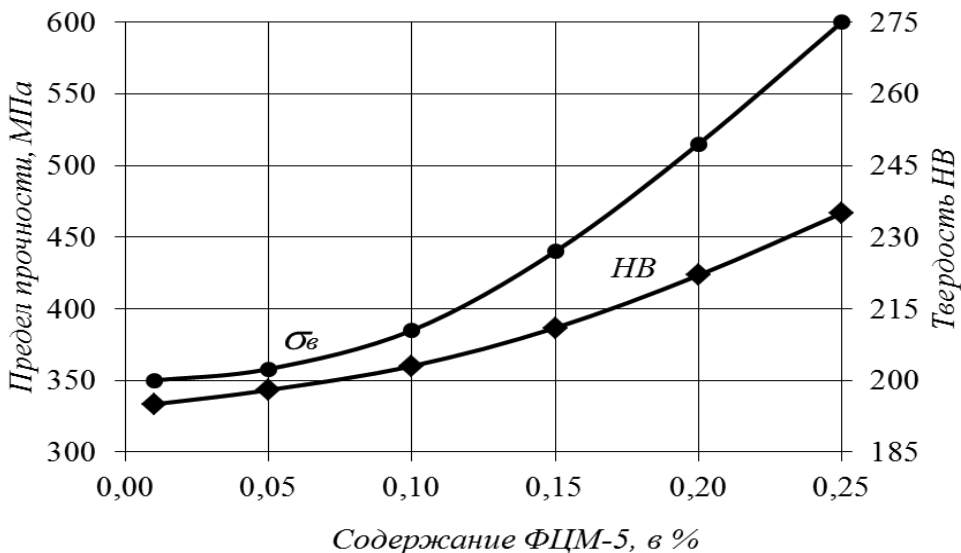


Рис. 2. Механические свойства чугуна в зависимости от количества введенного модификатора

На рис. 3 приведена структура серого чугуна образца 3-1А. Графит здесь находится в виде сфероидальных включений. При сравнении с микроструктурой остальных образцов можно заметить, что величина включений графита здесь несколько меньше, но по количеству их больше. Металлическая масса в основном состоит из ферритной составляющей. Перлит встречается в структуре отдельными полями и составляет около 25-30% от всей металлической матрицы. В структуре перлитных полей и по их границам с ферритом встречаются включения фосфидной эвтектики.

Таким образом, более низкие механические свойства серого чугуна со сфероидальным графитом образца 3-1А объясняются его ферритно-перлитной структурой.

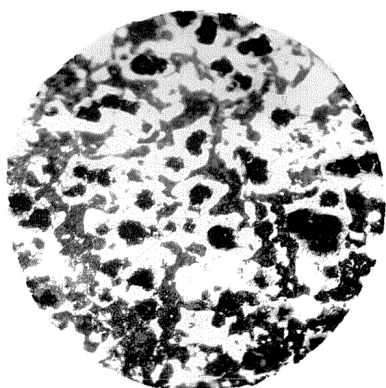


Рис. 3. Образец 3-1А x 120

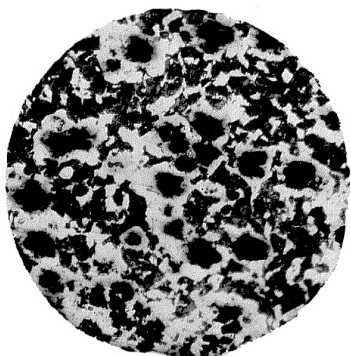


Рис. 4. Образец 3-2С x 120

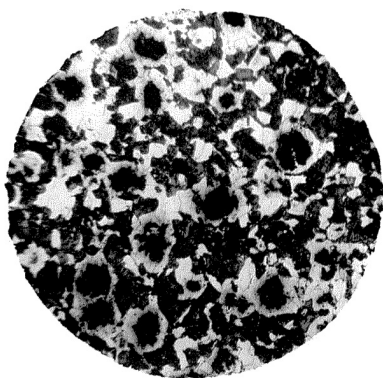


Рис. 5. Образец 3-3Д x 120

На рис. 4 и 5 приведены структуры чугуна образцов 3-2С и 3-3Д соответственно. Включения графита – шаровидной формы. По размерам они значительно больше, чем у образца 3-1А, но по количеству их меньше. В образцах 3-2С и 3-3Д его содержится 60 и 85% соответственно, остальное – феррит. Механические свойства чугуна повышаются с увеличением процентного содержания перлита в его структуре. При дальнейшем увеличении присадки (модификатора) в структуре чугуна появляются цементитные включения. Предел прочности на разрыв и твердость растут (рис. 2) [3].

При исследовании чугуна на износостойкость образцы 3-4В, 3-5А и 3-6А не использовались, т.к. цементитные включения, вырванные из матрицы, действуют как дополнительные абразивные частицы.

Чугунные детали, работающие в условиях сухого трения, встречаются во фрикционных передачах и тормозных устройствах. В подшипниках скольжения также наблюдаются случаи сухого трения – это в момент начала вращения вала и при его остановке. Одним из основных требований, предъявляемых к парам трения, является их малый износ и высокая фрикционная теплостойкость, т.е. способность пары сохранять устойчивое значение коэффициента трения.

Для решения задач, поставленных в данной работе, мы исследовали на износостойкость в условиях трения скольжения без смазки серые чугуны, модифицированные ФЦМ-5.

Анализ результатов, представленных в табл. №2, показывает, что наибольшим сопротивлением износу по сравнению с другими материалами обладают образцы 3-3Д.

Однако следует отметить, что величина износа образцов 3-2С и 3-3Д отличаются друг от друга всего на 20%, а износ образца 3-1А, по сравнению с ними – в 2,1-2,7 раза больший. Это объясняется разной структурой основной металлической матрицы образцов с шаровидным графитом. Структура образца 3-1А состоит из 30% перлита и 70% феррита, а образцов 3-2С и 3-3Д – на 60%, 85% перлита и 40%, 15% феррита соответственно.

Результаты исследований приведены в таблице № 2.

Таблица №2

№№ п/п	Испытуемые чугуны	Условное обозначение	Кол-во испытаний	Средний весовой износ, [мг]	Коэф- фициент трения
В паре с чугуном					
1	Модифи- рованный ФЦМ-5	3-1А	4	8,0	0,22
2	----- “ -----	3-2С	4	3,8	0,17
3	----- “ -----	3-3Д	4	3,1	0,16
4	Легированный сурьмой	2-2	4	5,7	0,20
5	Легированный оловом	1-3	4	5,8	0,20

№№ п/п	Испытуемые чугуны	Условное обозначе- ние	Кол-во испыта- ний	Средний весовой износ, [мг]	Коэф- фициент трения
В паре со сталью					
1	Модифи- рованный ФЦМ-5	3-1А	4	9,3	0,24
2	----- “ -----	3-2С	4	4,1	0,23
3	----- “ -----	3-3Д	5	3,5	0,21
4	Легированный сурьмой	2-2	4	5,9	0,23
5	Легированный оловом	1-3	4	6,1	0,24

Характер изменения величины износа серого чугуна с шаровидным графитом, в зависимости от процентного содержания перлита (феррита) в его структуре, показан кривой на рис. 6. Износостойкость чугуна повышается, как видно из графика, с уменьшением количества свободного феррита в его структуре.

Лучшей износостойкостью при трении скольжения без смазки обладают чугуны, имеющие в своей основе перлитную составляющую: чем больше её в структуре, тем меньше износ чугуна.

Соотношение перлита и феррита в структуре чугуна является основным, но не единственным фактором, который влияет на износ.

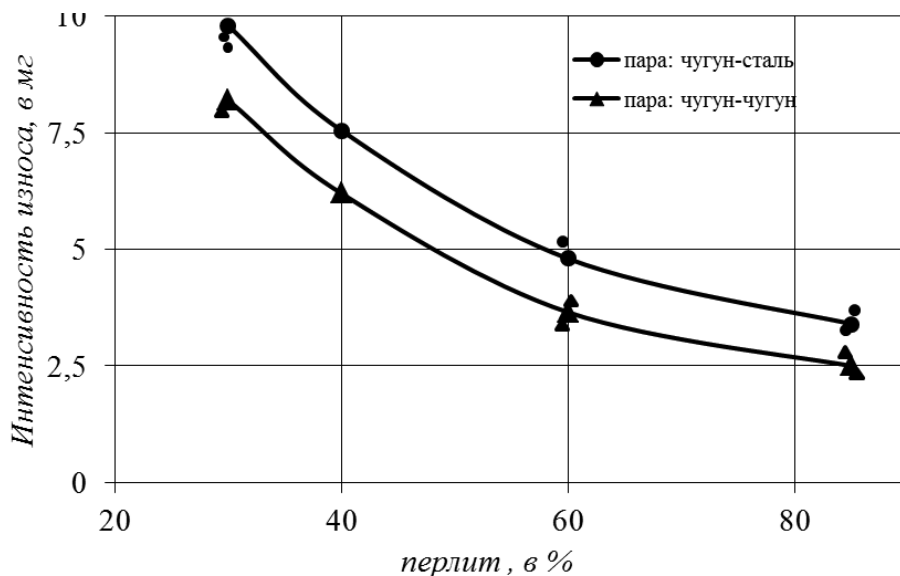


Рис. 6. Влияние содержания перлита на интенсивность износа экспериментальных пар

Нами отмечалось, что на износостойкость чугуна влияет форма графитовых включений, их количество и распределение в основной металлической массе, количество и форма включений фосфидной эвтектики, материал контртела и т.д. Влияние количества графитовых включений видно по уменьшению коэффициента трения не только пары чугун-чугун, но и пары чугун-сталь.

Из таблицы №2 видно, что коэффициент трения у образцов чугуна с шаровидным графитом в условиях трения скольжения без смазки по стали находятся в пределах 0,21-0,24, а по чугуну – 0,16-0,20. Каждое значение есть среднее арифметическое из трёх-пяти испытаний. Более низкие значения коэффициентов трения у пары чугун-чугун объясняется тем, что у нее в контакте находится большое количество графитовых включений, чем у пары чугун-сталь. Графит - это та же смазка, а поэтому с увеличением его включений коэффициент трения уменьшается и, следовательно, увеличивается износостойкость чугуна [4].

В процессе испытания чугуна на износостойкость при трении скольжения без смазки было зарегистрировано повышение температуры на поверхности трения, и вследствие этого – нагрев испытуемого образца и эталонного кольца. Повышение температуры происходит в результате деформации микрообъемов металла. Отвод тепла от поверхностных слоев происходит вглубь металла.

Анализ данных по испытанию чугуна, модифицированного ФЦМ-5, на износ в условиях эксперимента показал, что износостойкость пары чугун-чугун выше, чем у пары чугун-сталь, примерно, на 15%.

Выводы

В условиях трения скольжения без смазки при наличии удельной нагрузки и скорости относительного перемещения 1,0 см² наибольшей износостойкостью из всех испытанных чугунов обладает чугун, модифицированный ФЦМ-5. Износостойкость этого чугуна зависит, главным образом, от его структуры. С перлитной и перлитно-ферритной (до 15-20% феррита) структурой при наличии шаровидного графита чугун дает при указанных условиях в 2-2,4 раза меньший износ, чем промышленные чугуны образцов 4 и 5.

Литература

1. Лялякин В.П. Восстановление и упрочнение деталей машин – резерв экономии материальных ресурсов. // РВМ. Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2002. - №1 - С. 9-13.
2. Козлов А.В., Абакумов Ю.Ф. и др. Модифицирование серого чугуна индукционной плавки. // Технология металлов. -2013. -№8. – С.4-8.
3. Абакумов Ю.Ф., Козлов А.В. Исследование затвердевания сплавов системы Al – Mn // РВМ. Ремонт. Восстановление. Модернизация – 2012. - №5. – С.45 -49.
4. Дрижов В.С. Политика в области качества на предприятиях ремонтно-восстановительного направления. ТРУДЫ ГОСНИТИ. -2013. – С.269-277.

Increasing quality, reliability and service life of iron-carbon alloy details.

Annotation. *Technical progress of modern machine-building industry is only possible through dramatic increase of quality, reliability and service life of produced machines and components. Improvement of production*

technology always was and will remain one of the key factors of development of machine-building.

Keywords: *iron-carbon alloy, cerium, magnesium, modification, carbon inclusion, wear resistance , iron matrix.*

References

Lyalyakin, V.P. Restoring and strengthening of machine parts – reserves for material resources economy. // RVM. Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsija. – 2002. - #1 – P. 9-13.

Abakumov, Yu.F., Kozlov, A.V. et al. Modification of induction smelted grey cast iron. //Tehnologiya metallov.- 2013.- #8.- P. 4-8.

Abakumov, Yu.F., Kozlov, A.V. Study of solidification of Al-Mn system alloys. // RVM. Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsija. – 2012. - #5. – P. 45-49.

Drijov V.S. Repair-restoring enterprises quality policy. GOSNITI working papers.- 2013.- P. 269-277.