

Роль міді в формуванні поверхневих зносостійких шарів тертя високохромистих чавунів

В. В. Тихонович, кандидат фізико-математичних наук

В. Г. Новицький*, кандидат технічних наук

В. П. Гаврилук*, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук

В. І. Тихонович*, доктор технічних наук

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Показано, що введення в чавун 120X15 структурно вільних виділень міді скорочує час переходу пари тертя від режиму припрацювання в стаціонарний режим з мінімальними коефіцієнтом тертя та зносом, завдяки збільшенню швидкості формування на поверхнях контакту зносостійких ультрадисперсних і наноструктурних шарів. Основною відмінністю матеріалу цих шарів тертя, що формуються на робочих поверхнях чавунів 120X15 та 120X15Д10, є присутність в останніх від 6,0 до 9,5 ат. % міді. Незважаючи на суттєві розміри мідних включень, що виходять на поверхню тертя чавуну 120X15Д10, формування на ній будь-яких шарів на основі міді не відбувається.

Високохромисті чавуни зарекомендували себе як зносостійкі матеріали, що мають комплекс необхідних механічних і спеціальних властивостей. Вибір хімічного складу чавунів обумовлюється умовами їх експлуатації [1, 2]. Деякі автори з метою покращення технологічних характеристик високохромистих чавунів рекомендують легування їх міддю. Встановлено, що присадки міді в високохромистих чавунах збільшують корозійну тривкість, опір ударним навантаженням, поліпшують оброблюваність різанням [1].

Досвід використання міді з метою підвищення зносостійкості залізобуглецевих сплавів свідчить про її позитивний вплив при вибіркового перенесенні, коли утворюється мідна плівка на поверхні тертя [3], та при введенні ультрадисперсних порошоків на основі міді в мастильно-охолоджуючі рідини [4].

Перспективними є дослідження надмірного вмісту міді (понад межі розчинності в α - і γ -фазах) на формування гетерогенної структури і зносостійких характеристик високохромистих чавунів [5 – 7]. Збільшення вмісту в високохромистих чавунах міді до 5 % (по масі) призводить до виділення її на міжфазних поверхнях [1]. Якщо вміст міді перевищує 10 %, спостерігається виділення великої кількості включень (ε -фази) на основі міді. При цьому в аустеніті матриці розчинено до 7,7 % міді [5]. Можна припустити, що при виході на поверхню тертя включень ε -фази діє

подвійний ефект від присутності в чавунах міді: нашарування на поверхні контакту пластичної мідної фази та специфічна поведінка збагаченого міддю поверхневого шару, в якому мідь істотно впливає на позитивний градієнт механічних властивостей.

Сьогодні практичне застосування легування високохромистих чавунів міддю стримується відсутністю достатньої кількості фундаментальних знань про фізико-хімічні процеси, що відбуваються в поверхневих шарах металів при терті, де структурно-фазові перетворення, при інтенсивних імпульсних зовнішніх впливах, докорінно відрізняються від традиційних механізмів фізико-хімічних взаємодій металів в умовах близьких до рівноважних.

Тому більш детальне комплексне дослідження впливу міді на закономірності формування та фізико-механічні властивості ультрадисперсних поверхневих шарів тертя високохромистих чавунів має велике значення як для розвитку наших знань у галузі фундаментальної та прикладної фізики, так і для науково-обґрунтованого вибору трибосистем при заданих умовах експлуатації.

В якості матеріалів для дослідження були обрані високохромисті чавуни 120X15 і 120X15Д10. У другому чавуні вміст міді перевищував межу її розчинності у твердому стані. Це забезпечувало утворення структурно-вільних виділень міді, розмір і розподіл яких у відливках контролювали за допомогою модифікування і регулювання швидкості охолодження [6, 7].

Випробовування матеріалів на тертя проводили у водно-повітряному середовищі на стандартній машині тертя 2070 СМТ-1 в умовах тертя ковзання при нормальному навантаженні $5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ та швидкості ковзання 1 м/с за схемою колодка-диск. Досліджували дві контактні пари тертя: чавун 120X15 (колодка) – сталь 20X13 (диск) і чавун 120X15Д10 (колодка) – сталь 20X13 (диск).

Морфологію та хімічний склад поверхневих шарів тертя досліджували за допомогою сканівного електронного мікроскопу JSM-6490LV виробництва компанії JEOL Ltd (Японія). Металографічні дослідження контактних зон тертя виконували на оптичному мікроскопі Neophot-30 (Carl Zeiss).

У роботах [8 – 10] показано, що перехід пари тертя чавун 120X15 – сталь 20X13 від режиму припрацювання в стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом та коефіцієнтом тертя відбувається лише після формування на поверхнях контакту обох тіл зносостійких ультрадисперсних і наноструктурних шарів, що містять до 38 ат. % кисню, який не утворює будь-яких хімічних сполук з атомами вихідних металів. Дана робота присвячена дослідженню впливу введення в чавун 120X15 структурно вільних виділень міді на процес формування та властивості цих шарів.

На рис. 1 наведено залежності коефіцієнтів тертя від шляху тертя для контактних пар: чавун 120X15 – сталь 20X13 і чавун 120X15Д10 – сталь 20X13. Видно, що введення в чавун 120X15 структурно вільних виділень міді скорочує шлях тертя, необхідний для переходу системи з режиму прироблення в стаціонарний режим з мінімальними коефіцієнтом тертя і зносом. При цьому знижуються знос чавуну та коефіцієнт тертя в

стаціонарному режимі роботи (табл. 1).

Дослідження еволюції структурно-фазових перетворень в зоні контактної взаємодії пари тертя чавун 120X15Д10 – сталь 20X13 свідчить про те, що в даному випадку, так само як і для пари тертя чавун 120X15 – сталь 20X13, перехід системи від режиму припрацювання в стаціонарний режим роботи з мінімальними коефіцієнтом тертя і зносом відбувається лише після формування на

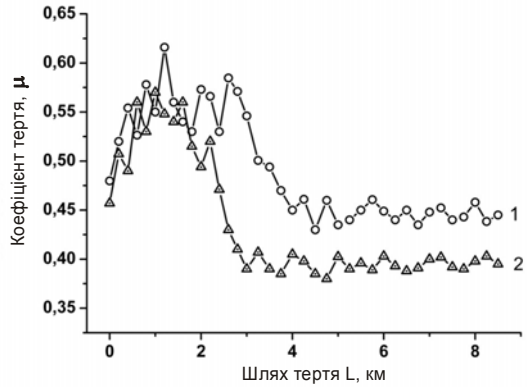


Рис. 1. Залежності коефіцієнтів тертя від шляху тертя для контактних пар чавун 120X15 – сталь 20X13 (1) і чавун 120X15Д10 – сталь 20X13 (2).

Таблиця 1

Знос чавунів та коефіцієнт тертя в стаціонарному режимі роботи

Номер	Чавун	Знос, $г/м \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт тертя
1	120X15	6,6	0,45
2	120X15Д10	1,6	0,40

поверхнях контакту обох тіл поверхневих шарів, позначених на рис. 2 літерою А. Вони утворюються в результаті фізико-хімічних процесів, що відбуваються в поверхневій зоні контактуючих тіл в початковий період тертя на стадії прироблення. Як видно з рис. 2, шари тертя розташовані поверх деформованого вихідного металу, який позначений на рисунку літерою В, мають з ним чітку межу і відрізняються ступенем травлення. Недеформований вихідний метал позначений на рис. 2 літерою С. Поверхневі шари (зони А) займають у різних випадках від 40 до 85 відсотків поверхні контакту і розташовані таким чином, що повністю екранують при терті деформований вихідний метал, що лежить під ними.

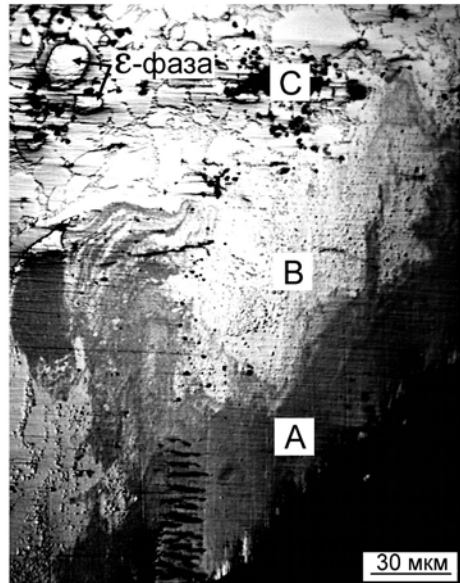


Рис. 2. Структура контактної зони чавуну 120X15Д10 після випробувань на тертя. Косий шліф під кутом 30°. А – поверхні шари тертя, В – деформований вихідний метал, С – вихідний метал.

Структурно-фазові перетворення в контактній зоні тертя сталі 20X13 аналогічні тим, що спостерігаються у чавунів 120X15 і 120X15Д10. Тому надалі для виключення повторень зосередимося на описі процесів, які відбуваються у чавунах.

Морфологія робочих поверхонь досліджувалась за допомогою сканівної електронної мікроскопії (рис. 3). Структура бокових границь поверхневих шарів тертя чавунів 120X15 і 120X15Д10 (зона А, рис. 3 а) свідчить про те, що в обох випадках вони складаються з окремих шарів і є результатом багаторазового нашарування на поверхні тертя мікрооб'ємів металу.

Так як кожен з шарів тертя, що утворюють зони А (рис. 2, 3), формується внаслідок окремого акта взаємодії мікрорівнів робочої пари, то для кращого розуміння їх природи проводився локальний рентгеноспектральний аналіз хімічного складу різних ділянок окремих шарів зон А чавунів 120X15 і 120X15Д10. В табл. 2 наведені хімічні склади різних ділянок характерних шарів зон А і розташованих під ними деформованого і вихідного металів чавунів 120X15 і 120X15Д10. Для чавуну 120X15Д10 в якості вихідного металу був приведений склад металевої матриці без мідних включень.

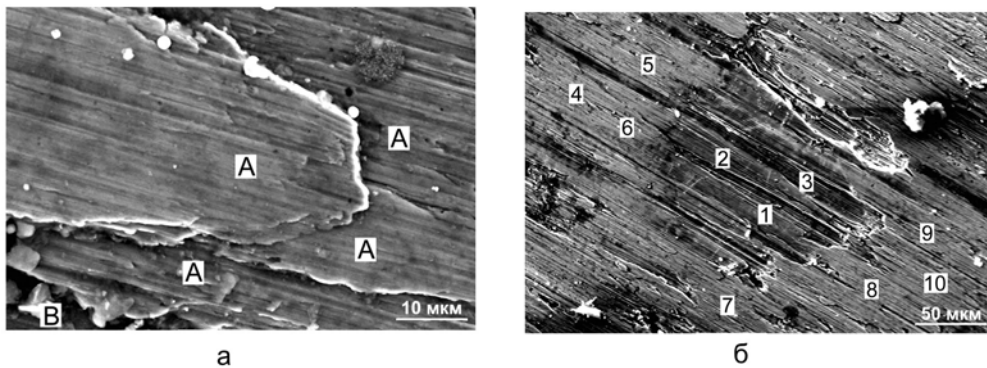


Рис. 3. Структура поверхні тертя чавуну 120X15Д10. а – структура бічних границь поверхневих шарів. А – поверхневі шари тертя, В – деформований вихідний метал, б – ділянка поверхні тертя з мідним включенням.

Для обох чавунів характерною особливістю хімічного складу шарів тертя зони А є присутність в них великої кількості атомів кисню. При русі вздовж окремих шарів від початкової частини до кінцевої концентрація кисню в матеріалі може збільшуватися від 4 до 28 ат. %. Незважаючи на те, що вміст кисню в матеріалі шарів значно змінюється, співвідношення кількості інших атомів в межах кожного з шарів залишається незмінним (табл. 2). При переході від одного з шарів зони А до іншого спостерігається зміна співвідношення цих атомів. Це свідчить про те, що кожен шар зони А формувався внаслідок окремого акту нашарування металу на поверхні контакту, яке супроводжувалось насиченням матеріалу атомами кисню з робочого середовища за рахунок термомеханічної деструкції молекул води в точках контакту мікрорівнів.

Головною відмінною особливістю хімічного складу шарів тертя, що формуються на поверхнях контакту чавунів 120X15 і 120X15Д10, є присутність в шарах тертя чавуну 120X15Д10 від 6,0 до 9,5 ат. % міді. На рис. 3 б наведена фотографія ділянки поверхні тертя чавуну 120X15Д10 з розташованим на ній мідним включенням. Цифрами позначені ділянки, де

Таблиця 2

Хімічний склад шарів тертя зони А та розташованих під ними деформованого (зона В) та недеформованого (зона С) вихідних металів чавунів 120Х15 і 120Х15Д10

Елементи		Чавун 120Х15					Чавун 120Х15Д10				
		Зона А. Шар тертя.			Зона В	Зона С	Зона А. Шар тертя.			Зона В	Зона С
		Поча-ток	Сере-дина	Кінець			Поча-ток	Сере-дина	Кінець		
Хіміч-ний склад, ат. %	Fe	73,13	61,94	51,71	75,58	77,79	62,81	55,01	47,8	70,20	72,63
	Cr	16,01	13,65	11,38	16,09	15,96	16,3	14,19	12,39	15,85	15,73
	Si	0,53	0,42	0,37	0,55	0,50	0,73	0,64	0,42	0,77	0,71
	Mn	0,31	0,27	0,24	0,32	0,35	0,51	0,45	0,37	0,43	0,46
	Ti	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,29	0,24	0,19	0,26	0,30
	Cu	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	8,91	7,71	6,89	5,00	4,65
	P	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
	S	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
	O	4,31	18,88	32,19	1,92	0,00	4,83	16,7	27,52	1,84	0,00
C	5,63	4,78	4,05	5,56	5,41	5,58	5,03	4,40	5,61	5,48	
C _i / ΣC _j	Fe	0,76	0,76	0,76			0,66	0,66	0,66		
	Cr	0,17	0,17	0,17			0,17	0,17	0,17		
	C	0,06	0,06	0,06			0,06	0,06	0,06		

проводили локальний рентгеноспектральний аналіз хімічного складу матеріалу поверхні, результати якого наведені в табл. 3. Ділянки 1 – 3 відповідають мідному включенню, що лежить на поверхні, яке покрито плівкою оксиду міді CuO. Ділянки 4 – 10 розташовані на різних шарах тертя, що утворюють зони А (рис. 2, 3). З цих даних видно, що шари тертя, розташовані перед мідним включенням (ділянки 4 – 7), містять меншу кількість міді в порівнянні з шарами тертя, розташованими після нього (ділянки 8 – 10). Це свідчить про те, що розвинена пластична деформація металу при його нашаруванні на поверхні тертя призводить до розчинення мідних включень. При цьому кількість міді в окремих шарах тертя може істотно перевищувати межу її розчинності в α- і γ- фазах вихідного металу чавунів.

З даних табл. 3 і рис. 3 б також видно, що незважаючи на істотні розміри розташованого на поверхні мідного включення, формування на ній якихось шарів на основі міді не відбувається. Ці шари також не вдається виявити і на інших ділянках поверхні контакту тіл, що труться. Мабуть, плівка оксиду CuO, що знаходиться на поверхні мідних включень, перешкоджає адгезійній взаємодії поверхонь на цих ділянках і, як наслідок, нашаруванню міді на поверхні контакту.

Мікроструктуру та фазовий склад шарів тертя чавунів 120Х15 і 120Х15Д10 досліджували за допомогою трансмісійної електронної мікроскопії. Для обох чавунів шари тертя мали схожу ультрадисперсну кристалічну структуру, утворену просторово разорієнтованими фрагментами з кристалічною ґраткою ОЦК-заліза. Розмір структурних фрагментів змінювався вздовж окремих шарів від 160 до 10 нм. Зі зменшенням

Таблиця 3

Хімічний склад шарів тертя зони А чавуну 120X15Д10

Ді- лян- ка	Хімічний склад, % ат.									
	Fe	Cr	Si	Mn	Ti	Cu	P	S	O	C
1	0,63	0,07	0,02	0,21	0,00	49,13	0,00	0,00	49,11	0,83
2	0,71	0,09	0,03	0,18	0,00	47,23	0,00	0,00	48,05	3,71
3	0,58	0,06	0,01	0,30	0,00	55,01	0,00	0,00	44,04	0,00
4	61,54	15,23	0,69	0,47	0,29	5,64	0,02	0,02	10,81	5,29
5	51,81	13,23	0,63	0,42	0,23	6,71	0,01	0,02	22,19	4,75
6	50,88	12,57	0,45	0,38	0,25	5,92	0,02	0,02	25,03	4,48
7	61,89	15,59	0,66	0,40	0,28	6,98	0,01	0,01	8,86	5,32
8	54,56	14,30	0,64	0,43	0,24	8,95	0,01	0,01	15,77	5,09
9	57,50	15,01	0,67	0,46	0,26	9,23	0,01	0,02	11,68	5,16
10	50,71	13,07	0,54	0,39	0,21	9,05	0,01	0,01	21,34	4,67

величини структурних фрагментів спостерігали азимутальне розщеплення рефлексів заліза на мікродифрактограмах, що свідчить про більшу їх просторову розорієнтацію. Детально результати досліджень мікроструктури і фазового складу поверхневих шарів тертя чавуну 120X15 описані в роботах [8, 10].

З рис. 1 видно, що введення в чавун 120X15 структурно вільних виділень міді скорочує шлях тертя, необхідний для переходу системи з режиму прироблення в стаціонарний режим з мінімальними коефіцієнтом тертя та зносом. Цей перехід відбувається лише після формування на поверхнях контакту обох тіл зносостійких дрібнозернистих шарів тертя в кількості достатній для повного екранування деформованого вихідного металу, що лежить під ними. Отже, легування чавуну 120X15 міддю збільшує швидкість формування на поверхнях тертя цих шарів. З наведених вище даних видно, що основною відмінною особливістю зносостійких поверхневих шарів тертя, що формуються на чавунах 120X15 і 120X15Д10, є присутність в останніх від 6,0 до 9,5 ат. % міді.

Встановлено [8 – 10], що зносостійкі дрібнозернисті поверхневі шари тертя, завдяки яким контактна пара чавун 120X15 – сталь 20X13 переходить в сталій режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя, формуються лише при умові переходу мікрооб'ємів металу, що нашаровуються на поверхні контакту, в новий квазірідкий структурно нестійкий стан, при якому реалізується їх гідродинамічна течія без втрати суцільності.

В роботі [10] було показано, що деформація поверхневих шарів чавуну 120X15 при терті у воді супроводжується насиченням приграничних областей структурних фрагментів атомами вуглецю та кисню. Це призводить до виникнення в цих областях метастабільних атомних кластерів Fe-O-C, скупчення яких сприяє переходу мікрооб'ємів металу, взаємодіючих при терті нерівностей, в новий структурно нестійкий стан, при якому

реалізується їх гідродинамічна течія без втрати суцільності. Наслідком цього є формування на поверхнях контакту зносостійких понад дрібнозернистих поверхневих шарів тертя.

Насичення поверхневих шарів тертя атомами міді при використанні чавуну 120X15Д10 може призвести до формування в приграничних областях структурних фрагментів нових метастабільних атомних кластерів Fe-Cu-O-C, які можуть змінити просторовий розподіл електронної щільності та характер міжатомних зв'язків. Це може знизити величину потужності термо-механічних впливів, при якій ультрадисперсні системи взаємодіючих мікронерівностей переходять в квазірідкий структурно нестійкий стан. Наслідком буде скорочення часу, необхідного для формування зносостійких дрібнозернистих поверхневих шарів тертя в кількості достатній для переходу робочої пари в стаціонарний режим роботи з мінімальними зносом і коефіцієнтом тертя. Однак підтвердження цього припущення потребує подальших комплексних локальних досліджень атомної будови та електронної структури зносостійких поверхневих шарів тертя.

Висновки Введення в чавун 120X15 структурно вільних виділень міді скорочує шлях тертя, необхідний для переходу контактної пари від режиму прироблення в стаціонарний режим з мінімальними коефіцієнтом тертя та зносом. При цьому знижуються знос чавуну та коефіцієнт тертя в стаціонарному режимі роботи.

Перехід пар тертя від режиму прироблення в стаціонарний режим роботи з мінімальними коефіцієнтом тертя і зносом відбувається лише після формування на поверхнях контакту обох тіл зносостійких ультрадисперсних і наноструктурних поверхневих шарів тертя. Основною відмінністю поверхневих шарів тертя чавунів 120X15 і 120X15Д10 є присутність в них чавуну 120X15Д10 від 6,0 до 9,5 ат. % міді. Нашарування металу на поверхню тертя чавуну 120X15Д10 призводить до часткового розчинення мідних включень. Незважаючи на істотні розміри розташованих на поверхні тертя мідних включень, що залишилися, формування на поверхнях контакту якихось шарів на основі міді не відбувається.

Література

1. Скобло Т.С., Можарова Н.М. Разработка высокохромистых чугунов для рабочего слоя двухслойных прокатных валков // Литейн. пр-во. – 2008. – № 4. – С. 2 – 3.
2. Гаврилюк В.П., Тихонович В.И., Шалевская И.А. Абразивостойкие высокохромистые чугуны. – Луганск: Ноулидж, 2010. – 139 с.
3. Кубич В.И., Ивченко Л.И. Износостойкость деталей трибосопряжения «шейка-вкладыш» с медьсодержащими покрытиями // Проблемы трибологии. – 2011. – № 2. – С. 103 – 110.
4. Фришберг И.В., Кишканаров Н.В., Золотухина Л.В. Воздействие ультрадисперсных порошков медного сплава на стальную поверхность в процессе трения // ДАН (РАН). – 1999. – 365, № 5. – С. 621 – 624.
5. Тихонович В.И., Коваленко О.И., Бобро Ю.Г. Особенности формирования литой структуры сплавов системы Fe-Cr-Cu-C // Процессы литья. – 1994. – 3. – С. 23 – 30.

6. Novytskyy V.G., Tikhonovich V.I., Havriliuk V.P. Elaboration of cast Fe-Cr-Cu-C system composites for sliding friction // Proceedings of International Conference "TED-2000". – Bournemouth (uk), 2000. – P. 267 – 274.
7. Новицкий В.Г., Гаврилюк В.П., Тихонович В.И. Влияние Al, Pb, Sn на интенсивность изнашивания и формирование вторичной структуры литых композитов системы Fe-Cr-Cu-Ti-C при трении скольжения // Трение и износ. – 2006. – 27, № 6. – С. 628 – 636.
8. Тихонович В.В. Формирование нано- и ультрадисперсных материалов при трении сталей // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – 33, № 12. – С. 1671 – 1685.
9. Горский В.В., Тихонович В.В., Шаповал Б.С. Изменение структуры и физико-механических свойств поверхностных слоев сталей при трении в смазочно-охлаждающих средах с серосодержащей присадкой // Трение и износ. – 1986. – 7, № 2. – С. 308 – 317.
10. Тихонович В.В., Уваров В.Н. Влияние активных элементов рабочей среды на электронную структуру и механизм деформации поверхностных слоев металла при трении // Успехи физики металлов. – 2011. – 12, № 2. – С. 209 – 239.

Одержано 11.12.13

В. В. Тихонович, В. Г. Новицкий, В. П. Гаврилюк, В. И. Тихонович

Роль меди в формировании поверхностных износостойких слоев трения высокохромистых чугунов

Резюме

Показано, что введение в чугун 120X15 структурно свободных выделений меди снижает износ чугуна, коэффициент трения и путь трения, необходимый для перехода рабочей пары в стационарный режим работы с минимальными коэффициентом трения и износом. Переход пар трения в стационарный режим работы происходит только после формирования на поверхностях контакта обоих тел износостойких сверхмелкозернистых поверхностных слоев трения. Основным отличием поверхностных слоев трения чугунов 120X15 и 120X15Д10 является присутствие в последних от 6,0 до 9,5 ат. % меди. Несмотря на существенные размеры медных включений, выходящих на поверхность трения чугуна 120X15Д10, формирование на ней каких-либо слоев на основе меди не происходит.

V. V. Tykhonovych, V. G. Novytskyi, V. P. Havryliuk, V. I. Tykhonovych

The role of copper on the formation of surface friction wear resistant layers of high chrome cast iron

Summary

Introduction to cast iron 120X15 the structure free copper inclusions reduces wear and friction coefficient of cast iron. The transition of friction pairs to stationary mode occurs after the formation on the contact surfaces of alloys the wear-resistant surface layers with fine grains. The main difference between the surface wear-resistant layers of cast irons 120X15 and 120X15Д10 is the presence in the latter from 6.0 to 9.5 at. % copper. Despite the significant size of Cu inclusions on the friction surface of 120X15Д10 cast iron any layers based on Cu are not formed.