

Структура та властивості спеціальних антифрикційних сплавів на основі заліза

Є.А. Марковський, доктор технічних наук, професор
В.П. Гаврилюк, член-кореспондент НАН України
І.В. Олексенко

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Виконано комплекс досліджень особливостей структури сплавів на основі сірого чавуну, легованого міддю та сіркою, а також додатково алюмінієм і титаном. Вивчено структуру і склад сульфідної фази, що утворюється в результаті реакції сірки з основними елементами сплаву при гартуванні та відпалюванні. Встановлено, що склад сульфідних включень визначає антифрикційні та зносостійкі властивості сплавів. Порівняльні випробування на зношування в умовах тертя ковзання при граничному змащуванні показали високу зносостійкість сплавів з сульфідною фазою порівняно з легованими хромом та нікелем чавунами та бронзами.

Мідь є ефективним легуючим елементом для підвищення зносостійкості чавунів в умовах зовнішнього тертя, при обмеженому змащуванні (граничне тертя) або сухому терті. Використання в якості легуючих елементів сірки та міді дозволяє в значній мірі підвищувати опір інтенсивності зношування. Так, в [1 – 7] наведені дані, що при збільшенні масової частки міді від 0 до 5 %, зносостійкість чавуну з масовою часткою 1 % сірки збільшується більш, ніж в 1,5 рази. Ці показники одержані на чавуні після відпалу, що має перлітно-феритну структуру та твердість 240 НВ. Однак, виконані дослідження щодо триботехнічних властивостей сірих чавунів, легованих міддю та сіркою, мають два недоліки: відсутність досліджень морфології сульфідної фази та її впливу на опір зношуванню при зовнішньому терті та впливу структури на зносостійкість пари тертя. За літературними даними легування чавунів міддю проводили від 0,1 % до 11,0 %, а сіркою від 0,1 % до 1,5 % [2, 8 – 10].

В наших дослідженнях в якості вихідного базового матеріалу взято чавун складу (мас. частка, %): С = 3,5 – 3,8, Si = 2,0 2,3, Mn = 0,6 – 0,8, P = 0,06 – 0,10. Кількість легуючих елементів вибирали виходячи з розчинності їх в матриці сплаву за умов утворення в структурі самостійної сульфідної фази, а також мідистої ϵ -фази, що також, як і сульфід, забезпечує проявлення ефекту „беззношування” [11]. Розчинність за експериментальними даними сплавів СЧ5Cu1S складала менше 2,5 міді та менше 0,03 сірки (мас. частка, %).

Дослідженнями сплавів цієї системи на основі чавунів в литому стані встановлено, що вони мають гетерогенну структуру, яка містить кілька фаз (рис. 1). Матриця: перліт, сорбіт або троостит; зміцнююча фаза – карбід; фази з властивостями мастила – включення мідистої фази, графіт, сульфід. Формування такої структури залежить від зародження центрів кристалізації фаз в рідкому стані у вигляді кластерних утворень тих чи інших фаз. Встановлено, що виділення ϵ -фази знаходяться біля сульфідних компактних включень (рис. 1). Високомідиста фаза в більшості випадків розташована у вигляді оторочки компактних включень сульфідів або в середині їх.

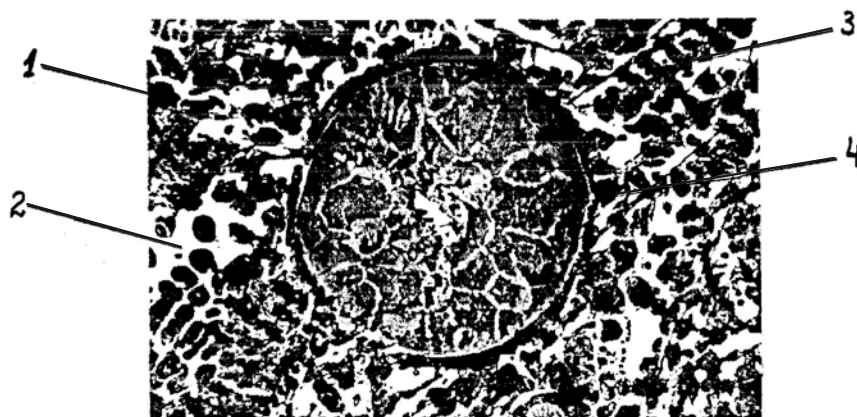


Рис. 1. Структура чавуну, легованого 5 % міді та 0,5 % сірки. 1 – металева матриця, 2 – карбід, 3 – сульфід, 4 – мідиста ϵ -фаза.

Хімічний склад фаз сплавів сірого чавуну, легованого міддю та сіркою, визначали локальним мікроспектральним аналізом. В табл. 1 за п'ятьма плавками наведено середні дані загального хімічного складу сплаву та складу матриці, сульфїду та мідистої ϵ -фази. Встановлено, що в ці фази входять всі елементи, які є в складі сплаву. Розчинність міді в матриці складає 2,3, а сірки $\sim 0,05$ %. Таку кількість сірки слід пояснити її високою хімічною спорідненістю до міді. В складі сульфїдного включення, окрім заліза (25 %), міститься значна кількість марганцю, який згідно термодинамічним розрахункам є сильним сульфїдоутворюючим елементом [12]. Оскільки структура сульфїдного включення (рис. 1) складається із конгломерату різноманітних фрагментів, було проведено встановлення мікрохімічного складу окремих структурних складових сульфїду. Мікрорентгеноспектральним аналізом встановлена хімічна неоднорідність структурних ділянок сульфїдного включення сплаву системи C45Cu1S (табл. 2).

Таблиця 1

Середній хімічний склад фаз сплаву C45Cu1S

Сплав	Середній хімічний склад, % (мас. частка)						
	C	Si	Mn	P	Cu	S	Fe
C45Cu1S	3,20	0,90	0,65	0,60	4,90	0,80	залишок
Мікрорентгеноспектральний аналіз							
C45Cu1S металева матриця	-	0,800	0,500	0,450	2,300	0,050	залишок
C45Cu1S сульфід	-	1,100	10,000	0,300	39,800	18,400	25,000
C45Cu1S мідиста ϵ -фаза	-	0,210	6,800	0,180	82,550	5,100	5,700

Хімічний склад сульфїду (точка 1) близький до складу Cu_3FeS_4 , темно-сірих ділянок (точка 2) Cu_3FeS_4 . Кольори сульфїдних включень мають характерні відтінки: мідної основи – голубий, залізної основи – брунатний, а марганцевистий – чорний. В залежності від хімічного складу сульфїдів інтенсивність кольору змінюється.

Структура, зношування, руйнування

Таблиця 2

Хімічний склад окремих ділянок сульфїду

Номер точки	Колір	Масова частка елементів, %					
		Si	Mn	Fe	Cu	S	Al
1	світло-сірий	0,20	0,76	12,14	64,55	20,94	0,00
2	темно-сірий	0,15	2,86	26,70	30,59	31,03	1,86
3	чорний	0,20	17,01	25,76	26,98	27,71	0,00
4	сірий	0,17	5,09	25,09	39,21	26,58	2,37
5	світлий	0,85	0,23	84,62	11,20	2,47	0,09

Були виконані дослідження впливу додаткового легування алюмінієм і титаном сплавів системи СЧ5Cu1S на структуру та властивості цих матеріалів. Встановлено, що при легуванні алюмінієм від 0,5 до 3,5 %, сульфїдна фаза має компактну

сферичну форму (рис. 1), як і в базовому сплавї СЧ5Cu1S. У випадку легування титаном 1 % і більше сульфїди втрачають компактну форму. Крім того, в структурї спостерігаються графітові включення в тому числі, пластинчастої форми; обидва легуючі елементи значно впливають на склад сульфїдної фази та її твердість. Чим більше вказаних елементів в сплавї, тим більша їх кількість в складї сульфїдної фази. На прикладї двох сплавів СЧ5Cu1S2Al та СЧ5Cu1S0,7Ti розглянемо деякі їх структурні особливості.

В табл. 3 наведені дані щодо локального хімічного складу сульфїдів в литих, гартованих та відпалених сплавах. Що стосується сплаву з алюмінієм, то в результатї високотемпературної обробки масова частка його в металевїй матрицї збільшується, зменшується кількість фосфору, кількість міді зменшується незначно. Порівняння хімічного складу сульфїдів показує, що при тривалому відпалюванні кількість алюмінію і марганцю значно підвищується в цїй фазі. Після гартування має місце значне зростання в сульфїді кількості кремнію.

Таблиця 3

Середній хімічний склад сплавів та сульфїдної фази в різних структурних станах

Досліджуваній сплав	Хімічний елемент	Хімічний склад, % (мас. частка)			
		сплаву (загальний)	сульфїдної фази у сплавах різного стану		
			литого	гартованого	відпаленого
СЧ5Cu1S2Al	C	2,80	-	-	-
	Al	2,82	11,99	11,70	13,60
	Si	2,20	0,20	1,46	0,32
	Mn	0,17	3,64	8,50	9,67
	P	0,35	0,20	0,70	0,35
	S	0,80	24,12	38,15	32,61
	Fe	85,00	23,40	3,10	7,72
	Cu	7,96	33,06	31,80	32,00
СЧ5Cu1S0,7Ti	C	2,98	-	-	-
	Ti	0,67	8,54	7,01	5,22
	Si	0,37	0,05	0,00	0,14
	Mn	0,19	3,38	3,14	2,09
	P	0,55	0,00	0,11	0,51
	S	0,73	19,24	21,02	18,31
	Fe	90,90	16,64	17,09	34,38
	Cu	5,70	51,61	49,68	38,59

Структура, зношування, руйнування

Сплав СЧ5Cu1S0,7Ti характеризується незначною кількістю титану в металевій основі; після термічної обробки масова частка марганцю в ній зменшується, фосфору – зростає.

Локальний хімічний склад сульфідів після гартування та відпалу змінився – зменшився вміст титану, марганцю і міді (основних сульфیدоутворюючих елементів). Таким чином, за рахунок додаткового легування алюмінієм і титаном, а також термічної обробки можна в значній мірі впливати як на морфологію структурних складових сплавів СЧ5Cu1S, так і на склад матриці і сульфідної фази. Це, в свою чергу, значно впливає на механічні властивості і триботехнічні характеристики сплавів.

Твердість сплавів і мікротвердість їх структурних складових (табл. 4) свідчить про те, що цей новий клас матеріалів з самостійною сульфідною фазою має широкий спектр механічних властивостей. Так, твердість сплавів може бути змінена в інтервалі 210 – 240 до 530 – 590 НВ.

Таблиця 4

Твердість сплавів та мікротвердість фаз

Сплав	Стан	Твердість НВ	Мікротвердість Н _μ , кг/мм ²			
			матриця	карбід	ε-фаза	сульфід
СЧ5Cu1S	литий	470	430	760-810	115-120	230-250
	відпалений	210	330	-	те саме	130-135
СЧ5Cu1S2Al	литий	530	320	900	-"-	435
	відпалений	238	267	600	-"-	430
	гартований	590	738	870	-"-	440
СЧ5Cu1S0,7Ti	литий	410	470	850	-"-	240
	відпалений	240	292	620	-"-	170
	гартований	500	550	780	-"-	250

Було вивчено зносостійкість сплавів з урахуванням як зношування при терті ковзання сплаву і контртіла, зі сталі марки Ст 5, гартованої на твердість 45 НRC. Вузли машин, що працюють в умовах тертя ковзання, виходять із ладу при досягненні певного сумарного зношування пари тертя. Тому дані, що одержані нами щодо зношування дослідних сплавів СЧCuS, в тому числі, і з додатковим легуванням, для оцінки їх фактичної зносостійкості також оцінювали за загальною інтенсивністю зношування пари тертя.

Зносостійкість дослідних сплавів і пар тертя з контртілом (Ст 5 у гартованому стані) досліджували в умовах граничного тертя при наявності тонкої плівки мастила, малої швидкості ковзання і значних питомих навантажень (P = 10 МПа).

Для визначення відносної зносостійкості сплавів СЧ5Cu1S з додатковим легуванням алюмінієм і титаном і без нього одночасно були випробувані на зносостійкість пари тертя БрОФ10-1 – Ст. 5_{гарт} та легований чавун ЧХ9Н9Л – Ст. 5_{гарт}.

Аналіз даних зношування пар тертя зі сплавом із сірого чавуну, обмежено легovanого міддю та сіркою, а також додатково алюмінієм і титаном, дозволив зробити висновок, що в литому стані вони можуть перевищувати зносостійкість чавуну ЧХ9Н9Л і бронзи марки БрОФ10-1 в 2,0 – 3,0 рази, а відповідно пар тертя в 1,5 – 2,5 рази. Отже, досліджені сплави, можуть бути заміниками дорогих легованих чавунів та бронз.

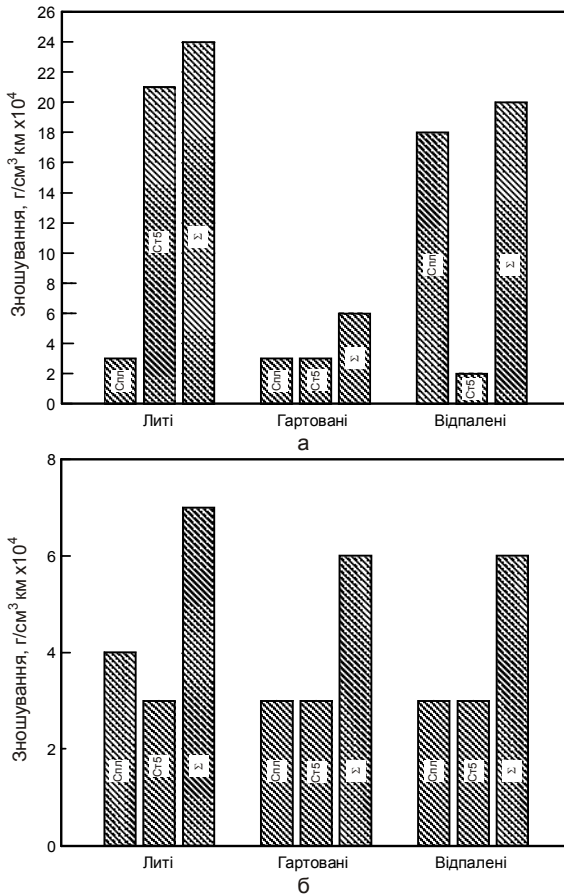


Рис. 2. Зношування пар тертя залежно від їх структурного стану. Пари тертя: а – С45Cu1S2Al – Ст.5_{гарт¹}, б – С45Cu1S0,7Ti – Ст.5_{гарт}.

створення нового класу антифрикційних зносостійких природно композиційних литих сплавів з високими триботехнічними властивостями. Ці економнолеговані антифрикційні матеріали на основі заліза не поступаються за зносостійкістю чавунам типу ЧХ9Н9Л та бронзам, легованим оловом, і можуть бути їх повними заміниками у вузлах тертя з високими навантаженнями.

Література

1. Жуков А.А., Давыдов С.В., Фролов В.В. // Литейн. про-во. – 1983. – 3. – С. 5 – 6.
2. Жуков А.А., Давыдов С.В., Иваненко С.М. // Литейн. про-во. – 1986. – 6. – С. 27.
3. Жуков А.А., Заречный А.М., Пахнючий И.О. // Трение и износ. – 1980. – 10, 6. – С. 1104 – 1107.
4. Гетьман А.А., Лернер Ю.С. // «Повышение долговечности литых материалов». – Киев: ИПЛ АН УССР, 1969. – С. 51 – 58.
5. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. – М.: Металлургия, 1976. – 287 с.
6. Сильман Г.П., Камышин В.В., Тарасов А.А. // Металлургия машиностроения. – 2002. – 4(7). – С. 17 – 22.
7. Бобро Ю.Г., Парфентьева Н.А., Гусачук Д.А. // Процессы литья. – 2001. – 4. – С. 42 – 44.

Термічною обробкою сплавів, додатково легованих алюмінієм та титаном, можна також значно впливати на інтенсивність зношування компонентів пар тертя. Як видно з рис. 2, гартування сплаву С45Cu1S2Al значно знижує інтенсивність зношування контртіла при підвищенні зносостійкості.

Після відпалу зносостійкість сплаву зменшується в кілька разів, але при цьому зношування контртіла мінімальне.

Для сплаву з титаном як гартування, так і відпал знижують інтенсивність зношування сплавів.

Висока зносостійкість досліджуваних сплавів пояснюється ефективною роботою сульфідів в процесі деформації поверхні тертя, в результаті чого, між робочими поверхнями пари тертя проходять процеси масопереносу речовини сульфідної фази, яка відіграє роль твердого мастила. Процес масопереносу забезпечує утворення на сталевій поверхні тонкої захисної плівки (товщиною ~ 0,01 мкм), що складається з атомів міді, сірки, алюмінію та титану у випадку додаткового легування сплаву [13].

Результати досліджень дозволяють зробити висновок про

8. А.С. 985124 СССР, МКН С22с37/10. Чугун. / Пузырьков-Уваров О.В., Калайчело Е.В., Ермолин И.Г. // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 48.
9. Кириевский Б.А., Изюмова Т.К. // Металл и литье Украины. – 1994. – 4 – 5. – С. 19 – 27.
10. Филипков М.Д., Поручиков Ю.П., Афонаскин А.В. // Литейн. про-во. – 1973. – 11. – С. 34 – 35.
11. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 210 с.
12. Гаврилюк В.П., Марковский Е.А., Тихонович В.И. Трибология литейных сплавов. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2007. – 428 с.
13. Марковский Е.А., Олексенко И.В., Гаврилюк В.П. // Процессы литья. – 2006. – 3. – С. 70 – 74.

Одержано 19.03.08

Е.А. Марковский, В.П. Гаврилюк, И.В. Олексенко

Структура и свойства специальных антифрикционных сплавов на основе железа

Резюме

Выполнен комплекс исследований особенностей структуры сплавов на основе серого чугуна, легированного медью и серой, а также дополнительно алюминием и титаном. Подробно изучена структура и состав сульфидной фазы, которая образуется в литом сплаве в результате реакции серы с основными элементами сплава и изменение этих параметров при закалке и отжиге. Установлено, что состав сульфидных включений определяет антифрикционные и износостойкие свойства опытных сплавов. Сравнительные испытания на изнашивание в условиях трения скольжения при граничной смазке показали высокую износостойкость сплавов с самостоятельной сульфидной фазой в сравнении с легированными хромом и никелем чугунами и бронзами.

Ye.A. Markovskyy, V.P. Gavryliuk, I.V. Oleksenko

Structure and properties of special antifrictional alloys on the basis of iron

Summary

The research of structure of alloys on the basis of grey cast iron alloyed by copper and sulfur, and also in addition by aluminium and titanium is done. The structure and composition of a sulphide phase which is formed in cast alloy as a result of reaction of sulfur with basic elements of the alloy and variation of these parameters under the influence of thermal processing of the alloys is studied. It is found that composition of sulfide determine antifrictional and wear-resistant properties of the alloys. The comparative testing on wear at sliding friction with thin-film lubrication show high wear-resistance of alloys with sulfide phase and iron alloyed with chrome, nickel and bronze.