

плавлення одночасно з руйнуваннями зв'язків дальнього порядку. Висока концентрація конвективних мікропотоків забезпечує вирівнювання мікроструктури розплаву. Інакше кажучи, додаткова енергія, акумульована в дефектах та вивільнена під час лазерного оплавлення поверхні, спричиняє подрібнення атомних групувань (кластерів), які в світлі сучасних уявлень, виконують роль потенційних центрів зародків при подальшій кристалізації. Концентрація кластерів внаслідок подрібнення зростає, однак, імовірність досягнення зародком критичного розміру, відповідно, зменшується.

Під час подальшого охолодження розплаву із швидкістю $4 \cdot 10^5$ К можлива реалізація двох варіантів: чи одержується супердисперсна, так звана "рентгеноаморфна" структура поверхні; чи завдяки дефіциту розплаву та враховуючи специфіку ближнього впорядкування, кластери не встигають досягти критичного розміру, внаслідок чого реалізується квазіаморфізація.

Виходячи з термодинамічних міркувань, під час лазерного легування треба очікувати суттєвого переохолодження розплаву як завдяки дилатаційних явищ, так і внаслідок переважаючого ентропійного ефекту кристалізації над ентропією плавлення системи. Отже, під час теплофізичних розрахунків, пов'язаних з моделюванням повної структури поверхні при її лазерному легуванні, поряд із швидкістю кристалізації треба враховувати також термодинамічні властивості самого розплаву.

На підставі проведених досліджень відмітимо, що лазерне легування поверхні нержавіючих сталей ніобієм та цирконієм суттєво підвищує їх ресурс працездатності в розплаві евтектики $Li_{17}Nb_{83}$ в інтервалі температур $300^{\circ}-500^{\circ}C$. При цьому, більшою стабільністю структури та властивостей поверхні, характеризуються сталі аустенітного класу після лазерного легування ніобієм. Це можна пояснити утворенням однорідного, високолегованого твердого розчину, армованого дисперсними включеннями фаз Fe_2Nb , Ni_3Ti та численними карбідами.

Одержані експериментальні та теоретичні результати можна покласти в основу нових технологій лазерної обробки, зокрема, лазерного легування, що суттєво розширить можливості управління структурою поверхні, а відповідно і об'ємними властивостями матеріалу.

УДК 620.178.152.

Керницький І.С., Козуб В.В., Панкевич Б.В.

ДУ "Львівська політехніка", кафедра "Нарисна геометрія і графіка"

СТІЙКІСТЬ КОМПЛЕКСНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ ПОКРИТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

© Керницький І.С., Козуб В.В., Панкевич Б.В., 2000

Розроблена реакційна суміш для поверхневого зміцнення сталейних деталей. Показана висока зносостійкість такого покриття в умовах абразивного зношування при різних навантаженнях та швидкостях ковзання.

A reactionary mixture for steel part surface intensification has been developed. Tests have confirmed high resistance of such covering against wearing in conditions of abrasive wearing under various loads and slipping speeds.

Відомо, що боридні та хромові евтектичні покриття, отримані з реакційних сумішей, ефективно підвищують зносостійкість деталей машин в умовах абразивного зношування порівняно із стійкістю проти зношування вуглецевої сталі 45 із структурою дрібнодисперсного мартенситу [2,3]. Такий стан зумовлений високою поверхневою мікротвердістю евтектичних покриттів, які змінюють процес взаємодії абразивної частини в зоні контакту пар тертя спряжених деталей. Суттєвий вплив на тертя та зношування покриттів має їхня товщина, яка може досягати 4 мм. Під дією контактних напружень, які виникають в зоні тертя від абразивної частини, евтектичні покриття не руйнуються; цьому сприяє використання спеціальної поверхневої обробки деталей машин для підвищення їх довговічності в умовах абразивного зношування під час більш високих зовнішніх навантажень. Боридні та хромові евтектичні покриття також суттєво підвищують зносостійкість деталей порівняно з абразивною зносостійкістю сталі 45 після дифузійного борування, яке утворює покриття, що має високу мікротвердість. Особливо це спостерігається при навантаженнях, більше ніж 2 МПа, коли дифузійний боридний шар інтенсивно руйнується. Високі фізико-механічні властивості евтектичних покриттів сприяють їх абразивній зносостійкості в широкому діапазоні навантажень.

Метою цієї роботи є дослідження зношування в умовах тертя ковзання з наявністю абразиву зразків з покриттями, нанесеними на їх поверхню із реакційної суміші такого складу: сірий чавун – 45 - 50%, феромарганець – 15 - 18%, V_2O_3 – 2 - 5%, Cr_2O_3 – 10 - 15%, вапно – решта [1].

Зношування зразків проводили за схемою “вал-вкладиш” на експериментальній установці [4] при різних навантаженнях та швидкостях ковзання. Абразивним середовищем був кварцовий пісок з розмірами частинок 200 мкм. Зношування зразків контролювали ваговим методом на аналітичній вазі з точністю до п'ятого знаку після коми. Зразки валів виготовлялись із сталі 45. На поверхню валів наносили обмазку із реакційної суміші, потім їх просушували при температурі $100^{\circ}C$ протягом 30 хв, після чого нагрівали струмами високої частоти (СВЧ) до температури $1150...1200^{\circ}C$ протягом однієї хвилини з подальшим охолодженням на повітрі. Така технологія дала можливість отримувати покриття на поверхні деталі завтовшки до 3,5...4,0 мм. Після поверхневого зміцнення зразки шліфували до відповідного розміру, шорсткість поверхні визначали параметром $R_a = 2,25$ мкм. Проведені металографічний та рентгеноструктурний аналізи показали, що покриття має евтектичну структуру, яка складається із легованого бором, хромом, марганцем фериту та перліту, карбїду хрому $(Cr, Fe)_7C_3$ та включень Fe_2V фази. Мікротвердість такого покриття становить 9,5...12,5 ГПа. Зношування зразків валів з покриттями проводили за вкладишами, виготовленими із сталі 45 з мартенситною структурою і мікротвердістю 4,2...4,5 ГПа, отриманих після об'ємного загартування з подальшим низьким відпуском. Зношування пар тертя здійснювали при навантаженнях 1; 2; 3; 4; 5 МПа та швидкостях ковзання 0,4; 0,6; 0,8 м/с.

Проведені дослідження спряжених пар при різних навантаженнях та швидкостях ковзання в умовах тертя з присутністю абразиву свідчать, що зношування валів та вкладишів, а також їх стан під час експерименту залежать від фізико-механічних

властивостей кожного зразка у вихідному стані та вторинних структур, які утворюються в тонких шарах металів під час деформування. Так, зношування пар тертя з підвищенням навантаження та швидкості ковзання зростає (див. таблицю) і набуває максимальних значень при $p = 5$ МПа та $v = 0,8$ м/с.

**Вплив питомого навантаження та швидкості ковзання
на зношування пар тертя в абразивному середовищі**

Пара тертя		Швид- кість тертя, м/с	Знос G, мг/см ²					Дже- рело інфор- мації
вал	вкладиш		Питоме навантаження, МПа					
			1	2	3	4	5	
Загартування СВЧ	Об'ємне загартування	0,4	55	63	69	93	114	3
		0,6	60	75	84	105	120	
		0,8	75	86	96	110	128	
Евтектичне боридне покриття	Об'ємне загартування	0,4	15	18	26	31	36	3
		0,6	18	24	32	36	40	
		0,8	24	36	42	46	52	
Евтектичне хромове покриття	Об'ємне загартування	0,4	13	15	20	23	27	2
		0,6	16	21	26	28	32	
		0,8	20	27	33	37	42	
Евтектичне хромо-боридне покриття	Об'ємне загартування	0,4	14	18	20	21	23	
		0,6	18	21	23	26	29	
		0,8	20	25	29	33	37	

Проведений візуальний аналіз зразків після зношування свідчить про те, що абразивні зерна, які потрапляють в зону контакту тертя взаємодіють з поверхнями вала та вкладиша по різному, що суттєво впливає на втрату ваги кожної деталі та спряженої пари в цілому. На поверхні валів з евтектичним покриттям після зношування при навантаженні $p = 1$ МПа та $v = 0,4$ м/с не спостерігаються сліди мікрорізання від абразивних частинок; поверхня блискуча, відшліфована під час тертя з наявністю окремих локальних мікрОВикришувань шару покриття. Такий стан поверхонь валів зберігається після тертя при більш високих навантаженнях та швидкостях ковзання. На поверхнях тертя вкладишів після зношування при мінімальному навантаженні є сліди мікрорізання, а також блискучі відшліфовані ділянки з незначними слідами мікрорізання. З підвищенням навантаження вплив абразиву збільшується, сліди стають глибшими, а ділянки відшліфованих поверхонь зменшуються. Утворення слідів мікрорізання сприяє інтенсивному потраплянню абразивних частинок в зону тертя, що збільшує зношування спряжених елементів і, особливо, вкладиша.

Проведений металографічний аналіз зразків валів з покриттями після зношування свідчить про те, що структура евтектичного шару залишається стабільною під дією температур, які виникають у зоні контакту тертя і змінюється в межах від $100...120^{\circ}\text{C}$ при $p = 1$ МПа до $350...450^{\circ}\text{C}$ при $p = 5$ МПа та швидкостях ковзання $v = 0,4...0,8$ м/с. Мікротвердість покриття залишається стабільною і становить $9,5...12,5$ ГПа.

Металографічний аналіз зразків вкладишів після зношування в абразивному середовищі показав, що в мартенситній структурі металу відбуваються фазові зміни з

утворенням білих шарів та окислів з різними фізико-механічними властивостями залежно від температурного режиму в зоні контакту тертя [3].

Поєднання елементів тертя з різними властивостями змінює взаємодію абразивних частин з поверхнями зразків, що впливає на їхнє зношування. Під дією навантажень абразивна частина створює напружений стан у зоні контакту тертя і може вклинитись у матеріал з меншою твердістю, яким є вкладиш з мартенситною структурою. Втілений абразив зумовлює мікрорізання і збільшує зношування вкладиша. У той же час абразивна частина не може вклинитись у покриття, яке має високу поверхневу твердість, а тому спричиняє втомне руйнування шару внаслідок багатократного його передоформування. Враховуючи структуру покриття та значно меншу крихкість порівняно з боридним шаром, борохромоване покриття руйнується менш інтенсивно під дією напружень, які виникають в ньому, що суттєво впливає на зношування пари тертя. Якщо підвищується мікротвердість фазових перетворень у мартенситній структурі, то взаємодія абразивних частин у зоні контакту змінюється. Абразивні зерна руйнуються, відбувається менш інтенсивне мікрорізання, а кількість циклів, які спричиняють втомне руйнування збільшується, що позначається як на зношуванні пар тертя, так і на стані поверхонь кожного зразка. На вкладишах з'являються блискучі поверхні з незначними слідами мікрорізання, а на зміцнених валах поверхня відшліфована з окремими локальними викришуваннями шару. Зменшення мікротвердості вторинних структур, а також високий їх напружений стан змінює взаємодію абразивної частини з елементами пар тертя та його рух у зоні контакту, що сприяє інтенсивнішому зношуванню деталей.

У зв'язку з тим, що зносостійкість деталей визначається фізико-механічними властивостями металів, то важливою в цьому процесі є стабільність структури елементів тертя та її незмінність під впливом температур, які виникають під час ковзання. Але, якщо такі фазові перетворення і можуть мати місце, то необхідно, щоб вони відбувались при вищій температурі з утворенням нових структур, стійких проти зношування, і при цьому щоб їхні властивості не змінювались різко в гірший бік. Як встановили проведені експериментальні дослідження такими структурами є евтектичні боридні [2], евтектичні хромові [3] та хромово-боридні евтектичні покриття. У цих структурах не відбуваються фазові перетворення, а також не змінюється мікротвердість покриття за цих умов абразивного зношування. Мартенситна структура не є стабільною, в ній утворюються під час тертя нові структури, фізико-механічні властивості яких так само постійно змінюються при кожному значенні зовнішнього навантаження [2]. Це сприяє різній взаємодії абразивних частин з поверхнями зразків в зоні їх контакту, що змінює зношування спряженої пари. Тому твердість металу є важливим, хоч і не єдиним чинником, який суттєво впливає на зношування деталі. З підвищенням твердості однієї деталі підвищується стійкість проти зношування як зміцненої деталі, так і пари тертя в цілому в умовах абразивного зношування. Значний ефект отримується тоді, коли твердість металу максимально наближається до твердості абразиву або його перевищує.

Експериментальні дослідження зношування спряжених пар в умовах тертя ковзання з наявністю абразиву, в яких вали зміцнені покриттями з евтектичною хромово-боридною структурою показали (див. табл.), що їх зношування в інтервалі навантажень до 5 МПа та швидкостях ковзання до 0,8 м/с практично мало чим відрізняється від зношування пар тертя, в яких зразки валів зміцнені покриттями з евтектичною хромовою структурою [3], і

дещо менший порівняно з парами тертя, в яких вали зміцнені покриттям з евтектичною боридною структурою. У той же час хромово-боридне покриття в декілька разів підвищує стійкість проти абразивного зношування спряжених пар порівняно з парами тертя, елементи яких загартовані різними методами термічної обробки.

Отримані дані досліджень пар тертя дають підставу зробити висновок, що розроблена реакційна суміш дозволяє отримувати зносостійкі покриття, використання яких суттєво підвищить довговічність деталей машин, які працюють в умовах абразивного впливу.

1. Патент 2015205 Р.Ф. Состав для борохромирования / Козуб В.В., Керницький І.С., Калиновская О.П. и др. 1994, Б.И. № 12. – 4 с. 2. Керницький І.С., Козуб В.В., Пашечко М.І. Абразивна зносостійкість евтектичних покриттів // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. 1999, № 371. С. 93-96. 3. Панкевич Б.В., Козуб В.В., Керницький І.С. Стійкість евтектичних покриттів в умовах абразивного зношування // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. 1999, № 376. 4. Табинский К.П., Козуб В.В. Установка для исследования образцов на абразивное изнашивание // ФХММ, 1973, № 3. С. 88-89.

УДК 669.14.018

Кузін О.А.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра “Фізика металів та матеріалознавство”

ОПТИМІЗАЦІЯ МІКРОСТРУКТУРИ СТАЛЕЙ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ІНВАНІАНТНИХ МОДЕЛЕЙ

© Кузін О.А., 2000

Пропонується нова концепція керування структурним станом і властивостями металевих матеріалів, яка базується на оптимізації параметрів мікроструктури різних рівнів ієрархії, що визначають технологічні та експлуатаційні властивості економічно легированих сталей.

It is offering knew conception to control a structure state and metallic materials characterizations. This conception is based on parameters optimization of microcrystalline structure in different levels hierarchy, which define technological and exploitation features of economical alloyed steels.

Отримання металопродукції, властивості якої відповідають умовам експлуатації, набуває важливого значення для розвитку машинобудування, але вимагає врахування багаторівневого характеру структури сталей, наявності в ній різноякісних елементів, розробки засобів їх адекватного відображення. У зв'язку з цим є необхідність у використанні нових підходів, придатних для вирішення завдань системного аналізу формування структури сталей. Математичні, фізичні і квантово-хімічні моделі, які використовуються в матеріалознавстві при встановленні зв'язків між структурою і