

11. Cao C., Zhu J., Tanaka T. (2020) Influence of Burnishing Process on Microstructure and Corrosion Properties of Mg Alloy AZ31. In: Itoh S., Shukla S. (eds) Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_11.

12. Nagit, G.; Dodun, O.; Slatineanu, L.; Ripanu, M.; Mihalache, A.; Hrituc, A. Influence of some process input factors on the main dimensions of the grooves generated during the ball vibroburnishing. IOP Conf. Series Mater. Sci. Eng. 2020, 968, 012007.

13. Kyrychok, P. O. & Lototska, O. I. (2011). Eksperymentalni doslidzhennia heometrychnykh parametriv tsylindrychnykh detalei polihrafichnykh mashyn pry kompleksnii obrobtsi [Experimental Studies of the Geometric Parameters of Cylindrical Parts of Printing Machines in the Time of Complex Processing]. Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva, 3(33), 4–12. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(33\).2011.52142](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(33).2011.52142) [in Ukrainian].

14. Schneider, Yu. “Formation of surfaces with uniform micropatterns on precision machine and instruments parts”, Precision Engineering, 6(4), pp. 219-225, 1984. DOI: 10.1016/0141-6359(84)90007-2.

15. Wos, S., Koszela, W., & Pawlus, P. (2020). Comparing tribological effects of various chevron-based surface textures under lubricated unidirectional sliding. Tribology International, 146, 106205. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106205>

УДК: 681.891

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСНЕННЯ ЖАРОМІЦНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ СПЛАВІВ

Харченко В.В. завідувач ННЛ новітніх триботехнологій

Національний авіаційний університет

В роботі виконано термодинамічний аналіз взаємодії композиційних порошкових сплавів системи Co-TiC з повітрям. Встановлено основні закономірності їх окиснення. Показано взаємний вплив умісту хрому і карбіду титану на кількісний склад продуктів окиснення.

Покращення тягових та економічних характеристик авіаційних двигунів відбувається різними шляхами, і одним з найбільш ефективних – підвищення температури згоряння палива. Однак, це призводить до зростання температурно-силового навантаження елементів турбіни, і як наслідок – інтенсифікації зношування їх трибоспряжень, зокрема, контактних поверхонь бандажних полиць лопаток турбін, що працюють в умовах високотемпературного фретингу.

Для вирішення цього завдання було розроблено ряд композиційних порошкових сплавів на основі легованого кобальту і карбіду титану як зміцнювальної фази [1–4]. Для оцінки їх роботи в умовах високотемпературного тертя необхідно визначити склад оксидів, що будуть утворюватися внаслідок хімічної взаємодії з повітрям.

Поставлене завдання дослідження можна вирішити методом

термодинамічного аналізу взаємодії композиційних сплавів, легувальних елементів, основи (які формують матрицю композиційних сплавів) і зміцнювальних фаз із робочим середовищем.

Одним із варіантів реалізації цього підходу є програма АСТРА з використанням ЕОМ, яка дозволяє розрахувати термодинамічні характеристики рівноваги системи, яка складається не більше ніж з десяти хімічних елементів, причому у вихідний склад можна включати до двадцяти простих речовин. У програмі передбачено можливість виконувати розрахунки в технічній або СІ системах одиниць, отримані результати виражати в моль/кг, кгс/см², Па, масових або об'ємних частках, виводити результати для всіх компонентів системи, що розглядається або тільки тих, уміст яких перевищує 10⁻⁹ моль/кг.

Хімічна система Co–Cr–Fe–Al–TiC є складною, і в літературі немає даних щодо її взаємодії з повітрям і з киснем зокрема. Проте дані щодо взаємодії її окремих складових з повітрям, а також взаємодії елементів між собою дають можливість якісно оцінити можливі продукти реакцій. Для аналізу можливих сполук використовувалися діаграми стану металів з киснем, а також діаграми стану подвійних і потрійних сплавів. Хімічний склад сплавів, що піддавались аналізу, наведено в табл. 1. В усіх розрахунках склад повітря вважався наступним: азот – 75,5 % мас., кисень – 23,1 % мас., аргон – 1,29 % мас. Температурний діапазон випробувань визначався з урахуванням найнижчих і можливих найвищих температур газу на вході в турбіну авіаційного ГТД, а також виходячи із можливостей вдосконаленої машини тертя МФК–1 витримувати температурний режим. Таким чином, температурний діапазон випробувань і термодинамічного аналізу становить 650 – 1050 °С. Розрахунки виконувались за тиску 0,1МПа, що відповідає атмосферному, а також 1 і 3 МПа, що відповідає тиску газу в різних ступенях турбін ГТД.

Таблиця 1 – Склад композиційних сплавів для моделювання впливу вмісту хрому на окиснення

№ з/п	Co	Cr	Fe	Al	TiC
1	55,6	16,6	2,9	2,9	9
2	46	19,2	2,9	2,9	9
3	44	15	2,3	2,3	6
4	40	13	2	2	3
5	35,6	11	1,7	1,7	0
6	49,8	9,6	2,3	2,3	6
7	37	22,4	2,3	2,3	6
8	35	8,8	2,3	2,3	6

Для вивчення впливу вмісту хрому на окиснення композиційних порошкових сплавів випробувано ряд сплавів з однаковим вмістом алюмінію, заліза і карбиду титану. В цих сплавах зростання вмісту хрому відбувалось за рахунок зменшення частки кобальту. Хімічний склад цих сплавів наведено в табл. 1. Уміст елементів у композиційних порошкових сплавах наведено у масових частках, %.

Сплави 1–5 мають однаковий склад матриці (Co = 65–68, Cr = 20–24, Al = 3,6–4, Fe = 3,1–3,5 % мас), але різний уміст карбиду титану (відповідно 30, 40, 50,

60, 70 % об). Сплави 6–8 мають однаковий вміст карбіду титану (50% об), але різний вміст хрому (відповідно 15, 35 і 45% мас). Для аналізу використовували термодинамічні властивості індивідуальних речовин.

Обговорення результатів термодинамічного аналізу Термодинамічний аналіз взаємодії порошкового сплаву з повітрям проводили за наступних співвідношень (в масових частках) до повітря: 9:1; 1:1; 1:2. Такий підхід дає можливість простежувати процеси окиснення за нестачі повітря, що має місце в контакті пар тертя в умовах високотемпературного фретингу, а також – взаємодію з повітрям глибинних шарів матеріалу. Розглянемо взаємодію з киснем кобальту, легувальних елементів (Cr, Fe, Al), що входять до складу матриці, і зміцнювальної фази (TiC).

Окиснення кобальту. Результати аналізу свідчать, що у разі нестачі повітря кобальт не окиснюється, що зумовлено вибіркоким окисненням менш благородних металів. Подальше зростання кількості повітря сприяє утворенню рівноважного для високих температур оксиду CoO. Однак за великого вмісту карбіду титану (сплави 4 і 5) спостерігається утворення в незначній кількості нерівноважних оксидів Co_3O_4 , Co_2O_3 за температури 1327 K, особливо у разі надлишку повітря. Ці сполуки переходять одна в одну, а присутність при цьому оксиду CoO свідчить, що Co_3O_4 і Co_2O_3 утворюються на його основі. Маючи більший атомний радіус, вони можуть спричинювати руйнування оксидного шару за механізмом, схожим до водневого руйнування.

Окиснення хрому. Дослідження показали, що вміст хрому в сплавах відіграє ключову роль в формуванні оксидних шарів. В той же час, алюміній окиснюється першим і повністю, навіть за нестачі кисню у всіх варіантах складів проаналізованих сплавів. При цьому, окиснення завершується окисненням кобальту, що свідчить про захисну дію легувальних елементів. Окиснення хрому починається разом з окисненням алюмінію і завершується утворенням термодинамічно стійкої сполуки Cr_2O_3 . Причому, такий характер хімічної реакції спостерігається і за нестачі кисню. Проте, за високих температур (1373 K) і надлишку повітря починається утворення легкого оксиду CrO_3 , що свідчить про частковий розпад оксиду Cr_2O_3 . Газоподібний стан триоксиду хрому призводить до збіднення поверхневого шару хромом, порушення термодинамічної рівноваги і більш активного руйнування оксидних шарів.

За високого вмісту хрому (понад 25% мас.) істотно зменшується кількість інших, більш м'яких оксидів у продуктах зношування. Це призводить до утворення надто крихких поверхневих шарів, тому кількість хрому в сплавах не повинна перевищувати зазначеного значення.

Окиснення алюмінію відбувається у всіх варіантах сплавів вже на початковому етапі і протікає повністю навіть за недостатньої кількості повітря. Окиснення інших елементів в таких умовах слабо виражене або практично відсутнє. Це можна пояснити невеликою кількістю алюмінію і його активністю за високих температур. Окиснюючись, він утворює стабільний оксид Al_2O_3 , який вкриває поверхню сплавів тонким шаром дрібнодисперсних кристалів. Ці кристали, в свою чергу, за подальшого окиснення сплаву можуть слугувати

центрами кристалізації для оксидів хрому і подрібнювати їх мікроструктуру. При цьому забезпечується їх висока густина і міцне зчеплення з основою.

Окиснення заліза. Залізо утворює з киснем ряд оксидів: FeO , FeO_2 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 . Нижчим оксидам характерна стабільність за низьких температур, однак, за високотемпературної взаємодії вони можуть переходити один в одного, окиснюватись до FeO і відновлюватись. Тому в процесі взаємодії можлива поява всіх перерахованих сполук з найвищою імовірністю утворення FeO і Fe_2O_3 .

Окиснення карбіду титану. Окиснення зміцнювальної фази починається вже за температури 650°C і супроводжується виділенням оксиду TiO_2 . Газоподібна фаза, що при цьому виділяється, складається з CO і CO_2 . Причому, за низького вмісту кисню (10% мас) може виділятися і чистий вуглець. Його взаємодія з іншими елементами системи, зокрема, утворення карбідів, термодинамічним аналізом не встановлена. Виділення вуглекислого газу з твердих продуктів окиснення сприяє зменшенню кількості вуглецю, що, в свою чергу, стабілізує рутил і зменшує кількість анатазу. У результаті утворюється стабільна форма діоксиду титану. Це сприяє утворенню більш щільних оксидних шарів, що захищатиме від подальшої дифузії кисню як матричну, так і карбідну фази.

Збільшення об'ємного співвідношення системи сплавів в сторону карбідної фази призводить до збільшення частки оксидів титану в продуктах взаємодії з повітрям. Слід відмітити, що вміст TiO_2 збільшується інтенсивніше ніж вміст TiC . Причому, при зміщенні складу сплаву в сторону карбіду титану вміст діоксиду титану зростає достатньо різко (рис. 1, *a* – 1373 K , $0,1\text{ МПа}$). Це можна пояснити тим, що значна площа поверхні сплаву покрита саме карбідними частинками. Частка оксидів хрому зменшується, знижується захист TiC від окиснення, що і спричиняє переважне утворення оксидів титану. Саме такий характер рівноваги оксидів хрому і титану спостерігається для сплавів з однаковим вмістом TiC і різним вмістом хрому (рис. 1, *б* – 1373 K , $0,1\text{ МПа}$).

Важливим є досягнення такого співвідношення оксидів хрому і титану, щоб утворювався суцільний шар Cr_2O_3 (з теоретичною твердістю до 20 ГПа), поверхня якого була б укрита більш м'якими оксидами TiO_2 (твердість $6\text{--}9\text{ ГПа}$), які можуть відігравати роль твердого мастила. Також бажаним є часткове змішування оксидів хрому і титану, що дещо зменшило б твердість і крихкість оксидного шару і різкий градієнт твердості оксидного шару і матричної фази.

Висновки. На основі проведених аналітичних досліджень визначено залежності кількісного і якісного складу продуктів взаємодії з повітрям порошкових сплавів системи Co-TiC від співвідношення їх компонентів. Формування захисних шарів можна прогнозувати, а їх утворенням – керувати, підбираючи відповідні легувальні елементи і зміцнювальні фази методом термодинамічного аналізу.

Встановлено загальні закономірності окиснення порошкових композиційних сплавів системи Co-TiC . Показано вплив вмісту хрому в матеріалі на склад і властивості оксидних шарів. Встановлено, що за високого вмісту хрому в матриці (понад 25% об.) збільшується крихкість оксидного шару,

що призводитиме до його інтенсивного зношування.

Список використаних джерел

1. *Духота О.І.* Композиційні сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць газотурбінних двигунів. / О.І. Духота, М.В. Кіндрачук, О.В. Тісов, Т.С. Черепова // Проблеми трибології. – 2010. – № 4. – С. 101–104.

2. *Черепова Т.С.* Триботехнічні властивості порошкового сплаву системи СО-ТІС в умовах високотемпературного фретингу/ Т.С. Черепова, О.В. Тісов, М.В. Кіндрачук, А.О. Юрчук, О.В. Радіоненко// Проблеми тертя та зношування.- 2020.- №3. С. 99 – 108.

3 Кіндрачук М. Зносостійкість газотермічних покриттів в умовах фретинг-корозії / О.Духота, В. Харченко, Н. Науменко//16-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Матеріали симпозіуму. – 18-19 травня 2023. – Львів. – С. 3 - 4.

4. Кіндрачук М. Комбінований метод поверхневого зміцнення швидкорізальних сталей/ В. Харченко, В. Марчук, І. Гуменюк, М. Гловин, І. Костецький // Проблеми тертя та зношування. - 2023.- №3 (100). С. 73 – 79.