

УДК 621.865.6

Г. І. КОСТЮК, О. М. МЕЛКОЗЬОРОВА

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ОЦІНКА АДГЕЗІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ З ПОКРИТТЯМИ

У цій роботі запропоновано методика для приблизної оцінки характеристик адгезії контактуючих матеріалів з покриттями. Показано, що значення енергії адгезії для пар матеріалів, отримані із застосуванням різних теорій, відрізняються один від одного не дуже сильно. Виявлено зв'язок між міцністю зчеплення та енергією адгезії, що дозволяє визначати характеристики адгезії практично для довільних матеріалів. Показано, що міцність зчеплення пов'язана з товщиною покриття обернено пропорційною залежністю. У якості прикладу запропоновано розрахунок енергії та сили адгезії, а також міцності зчеплення для сталі 38ХС та титанового сплаву ВТ14 з рядом покриттями оксидом алюмінію, карбідами та нітридами.

Ключові слова: енергія адгезії, міцність з'єднання, сила адгезії, покриття.

Вступ

В даний час для підвищення зносостійкості металорізного інструменту широко застосовуються спеціальні зносостійкі покриття, які підвищують експлуатаційні характеристики як інструменту, так і деталей машин і механізмів. Дослідження ефективності будь-якого покриття можна оцінити експериментально, що значною мірою збільшує витрати, часу, ресурсів. Тому підвищення ефективності експериментальних даних необхідно підготувати достатню теоретичну базу визначення основних механічних характеристик, що дозволяє побудувати методика вибору найбільш перспективних напрямів у варіюванні хімічного складу поверхні інструменту для заданих умов обробки.

У цій роботі розроблено методика розрахунку адгезійних характеристик для однокомпонентних та багатокомпонентних пар матеріалів. В даний час існує велика різноманітність теорій, які дозволяють визначати адгезію.

Основними характеристиками адгезії є: енергія адгезії, міцність зчеплення та сила адгезії [1-13]. Перша характеристика в основному визначає властивості матеріалів, не враховуючи конкретні умови, в яких знаходяться матеріали, що контактують. Також дуже важливою характеристикою адгезії є міцність зчеплення з підкладкою покриття. Існує безліч способів для визначення цієї характеристики, в основному - це проведення різноманітних експериментів з випробуванням на вигин, розтягування, нанесення сітки подряпин, приклеювання і т.п. Основними методами, як показують численні роботи, є метод відриву (для товстих плівок) та метод дря-

пання (для тонких плівок) [1]. Всі ці методи мають свої переваги та недоліки, в результаті ми отримуємо велику кількість даних, які важко зіставити та визначити, де має місце високе значення адгезії, а де – ні.

У цій статті запропоновано варіант визначення адгезійних характеристик з використанням характеристик взаємодіючих матеріалів, товщини покриття та параметрів інденторів, які, як правило, беруть участь у проведенні експериментів.

Робота виконувалася в рамках програми Міністерства освіти і науки України «Нові та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» (підсекція 13 «Аерокосмічна техніка та транспорт») та за темами: «Створення фізико-технічних засад підвищення якості матеріалів аерокосмічних конструкцій» та «Розробка технологічних засад інтегрування технологій плазово-іонної обробки деталей аерокосмічної техніки», госпдоговірних робіт про співробітництво.

Методи визначення енергії адгезії контактуючих матеріалів

Адгезія характеризує міцність зчеплення між двома матеріалами, виникнення зв'язку між поверхневими шарами двох різнорідних тіл, наведених у дотик. Існує безліч теорій та виразів для визначення приблизного значення енергії адгезії пар матеріалів, що вступають у контакт, наприклад:

- адгезія металів та напівпровідників у рамках діелектричного формалізму (А.Н. Вакілов, М.В. Мамонов, В.В. Прудніков) [2];

- визначення енергії адгезії за допомогою потенціалів іонізації для пари метал-окис (Ф. Лондон) [3];

- визначення енергії адгезії за допомогою теорії електроорієнтовності (Т.В. Молодечкіна, В.П. Глибін, Л.М. Линьков) [4] та ін.

У роботі [5] можна підраховувати енергію адгезії двох різних, різнорідних середовищ, використовуючи вільну поверхневу енергію кожного середовища за формулою (поверхнева енергія та енергія адгезії дорівнюють енергії пружних деформацій, що виникають при утворенні вільної поверхні та вступу тіл в адгезійний контакт):

$$E_a = \frac{E_a^{(1)} E_a^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{E_a^{(1)} k^{(2)2} + E_a^{(2)} k^{(1)2}}, \quad (1)$$

де $E_a^{(1)}$ і $E_a^{(2)}$ – поверхневі енергії контактуючих речовин.

$$k^{(1)} = \frac{v^{(1)}}{1 - v^{(1)}}, \quad k^{(2)} = \frac{v^{(2)}}{1 - v^{(2)}}, \quad (2)$$

де $v^{(1)}$ і $v^{(2)}$ – коефіцієнти Пуассона контактуючих речовин. Верхні індекси (1) та (2) показують, що відповідні індекси відносяться до різних речовин.

Для випадку вільної поверхні (роль другого середовища відіграє вакуум) поверхневу енергію можна визначити за формулою [6]:

$$E_a = \frac{3\pi_0^2 \gamma}{2b(2\mu + \lambda)}, \quad (3)$$

де μ і λ – коефіцієнти Ламе, які можна визначити за формулами:

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (5)$$

де π_0 і b – деякі константи, що характеризують механічні властивості середовища;

π_0 – характеризує натяг поверхневого шару;

$$\pi_0 = \frac{2\mu}{\beta}, \quad (6)$$

де β деякий коефіцієнт пропорційності, який можна визначити через середню міжатомну відстань l за формулою:

$$\beta = \frac{45}{4l}, \quad (7)$$

$$l = 1,41l_0, \quad (8)$$

$$l_0 = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}, \quad (9)$$

де n – число атомів середовища в одиниці обсягу середовища.

b – додаткова постійна, що характеризує здатність матеріалу чинити опір розвитку нерівномірності деформацій, зокрема появи згинів матеріальних волокон і нерівномірності їх відносного подовження, може мати сенс ефективної товщини прикордонного шару, в якій концентрується поверхнева енергія;

γ – величина, яка показує, у скільки разів збільшиться поверхня, що концентрує енергію;

ν – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль пружності речовини.

З урахуванням деяких перетворень формулу (3) можна записати кількома способами та отримати кілька виразів для визначення поверхневої енергії певного середовища. Наприклад:

$$E_a = 0,16\mu R, \quad (10)$$

де R – радіус атома, або:

$$E_a = 8E \cdot 10^{-12}. \quad (11)$$

Таким чином, у нас є три способи, придатні для розрахунку поверхневої енергії одиничної системи. У табл. 1 наведено значення енергії адгезії для деяких простих матеріалів та для оксиду алюмінію, які були розраховані різними способами. Таким чином, поверхнева енергія залежить тільки від властивостей матеріалу та не залежить від інших характеристик.

Крім теорії, запропонованої в [5] та [6], існує також теорія Ю.В. Найдича, яка передбачає наявність зв'язку між енергією Гіббса хімічної реакції та крайовим кутом змочування [7]. Відповідно до цієї теорії енергію адгезії двох середовищ можна записати так:

$$E_a = (\cos\theta + 1) \cdot \sigma_{lv}, \quad (12)$$

де θ – крайовий кут змочування;

σ_{lv} – поверхневий натяг на межі рідина – газ.

Таким чином, можна визначити енергію адгезії двома способами, використовуючи формули (1) та (12). У табл. 2 наведено значення енергії адгезії для деяких матеріалів, які були підраховані описаними вище способами.

Таблиця 1

Значення поверхневої енергії деяких матеріалів, розрахованих кількома способами

Матеріал	Характеристики матеріалу		Е _а , Дж/м ²		
			Розрахункова формула		
	R, 10 ¹⁰ м	E, 10 ⁻¹¹ Па	(10)	(11)	(3)-(9) або [6]
V	1,31	1,77	1,31	1,36	1,20
Cr	1,25	2,87	2,37	2,30	2,34
Ti	1,46	1,03	1,00	0,82	0,97
Mo	1,36	3,3	2,74	2,64	2,39
Al ₂ O ₃	1,43	3	2,84	2,40	2,18
Cu	1,28	1,2	0,89	0,96	0,77
Al	1,43	0,7	0,60	0,56	0,53

Таблиця 2

Значення енергії адгезії деяких пар матеріалів

Підкладки	Покриття	θ, °	σ _{IV} , Дж/м ²	Е _а , Дж/м ²	
				Розрахункова формула	
				(1)	(12)
Графіт (алмаз)	Fe	37,00	1,78	2,25	3,20
	Co	48,00	1,81	2,20	3,01
	Ni	45,00	1,70	2,27	2,90
	Al	38,00	0,91	0,74	1,63
Ni	NbC	16,58	1,70	3,40	3,33
	VC	14,20	1,70	4,29	3,35
	TaC	11,97	1,70	3,78	3,36
Ni	TiC	30,15	1,70	3,33	3,17
	ZrC	24,15	1,70	3,25	3,25
	HfC	28,13	1,70	3,17	3,20
Ni	TiN	69,42	1,70	3,47	2,30
	ZrN	71,90	1,70	3,73	2,23
	TiO ₂	103,60	1,70	3,29	1,30
	ZrO ₂	117,46	1,70	3,10	0,92

Визначення міцності з'єднання та сили адгезії покриття до основного матеріалу

Для повного опису адгезії покриття та підкладки необхідні значення енергії та сили адгезії, а також міцності зчеплення. Відповідно до [1] залежність між силою адгезії та міцністю зчеплення можна визначити за формулою:

$$F_a = \pi \sigma r^2, \quad (13)$$

де σ – міцність з'єднання;

r – радіус подряпини, отриманий внаслідок впливу індентора на поверхню підкладки.

Також існує вираз визначення енергії адгезії через силу адгезії:

$$F_a = \frac{E_a^2 \cdot h}{\pi r^4 \cdot E}, \quad (14)$$

де h – товщина покриття.

Використовуючи вирази (13) і (14) можна отримати вираз для міцності зчеплення:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} \sqrt{E_a \cdot E}. \quad (15)$$

Подібна формула була отримана в [8] і має вигляд:

$$\sigma = k \frac{1}{\sqrt{\pi r_{\text{инд}}}} \sqrt{F_a \cdot H}, \quad (16)$$

де $r_{\text{инд}}$ – радіус індентора при вершині;

H – критичне навантаження;

k – коефіцієнт Вівера (рекомендується приймати $k = 1$).

Знаючи енергію адгезії, підраховану за формулою (10) або (11), можна за формулою (15) розрахувати міцність зчеплення і потім за формулою (13) розрахувати силу адгезії F_a .

У табл. 3 наведено значення міцності зчеплення для деяких пар матеріалів (покриттів – карбідів, нітридів, а також простих матеріалів, що використовуються як підкладка) залежно від товщини покриття. Як показали розрахунки, значення міцності зчеплення даних матеріалів відрізняються один від одного на 8,4-9,18%.

У табл. 4 наведено значення характеристик адгезії (енергії адгезії та міцності зчеплення), а також їх значення, взяті з інших джерел. Таблиця показує наявність зв'язку між товщиною покриття і міцністю зчеплення, а також частковим або повним збігом енергії адгезії для пар різних матеріалів і збігом міцності зчеплення при відповідній товщині покриття.

У табл. 5 наведена міцність зчеплення, отримана двома способами, для деяких простих матеріалів (Al, Ni, Co, Si) та деяких покриттів (BN, Mo₂C, WC, Cr₃C₂, NbC, VC). Величина міцності зчеплення, отримана через енергію адгезії, схожа двома способами. Як показують підрахунки, міцність зчеплення та сила адгезії залежить від товщини покриття, і тим більше, чим менша товщина покриття.

На рис. 1 – 3 наведено тривимірні залежності сили адгезії, міцності зчеплення від товщини покриття та радіусу дряпання інденторів різних розмірів. За допомогою цих графіків можна визначити параметри покриття, за яких адгезійні характеристики матимуть необхідні значення.

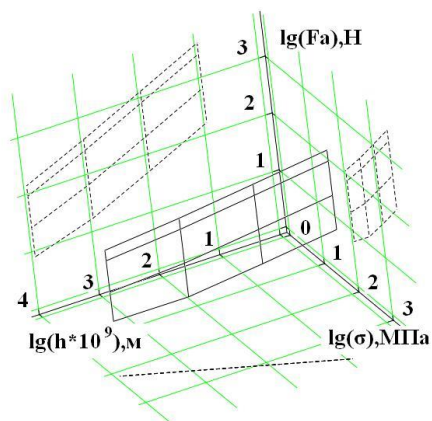


Рис. 1 Залежність сили адгезії, міцності зчеплення від товщини покриття Al₂O₃, основний матеріал – сталь 38XC

Наприклад, на рис. 1 показано залежність сили адгезії та міцності зчеплення від товщини покриття пари матеріалів – сталі 38XC та оксиду алюмінію, яка показує, що зі зростанням товщини покриття сила адгезії та міцності зчеплення зменшується. Максимальна міцність зчеплення в даному випадку може становити 5958 МПа, при силі адгезії $F_a = 4677$ Н, радіус заокруглення індентора r_a при вершині 500 мкм, при товщині покриття $h = 10^{-8}$ м. Мінімальна міцність зчеплення у цьому випадку

може становити 188 МПа, при силі адгезії $F_a = 9$ Н, радіус заокруглення індентора r_a при вершині 100 мкм, при товщині покриття $h = 10^{-5}$ м.

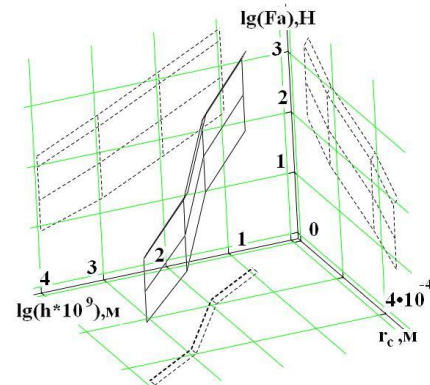


Рис. 2 Залежність сили адгезії від товщини покриття та радіусу дряпання для пари матеріалів Al₂O₃ та сталі 38XC

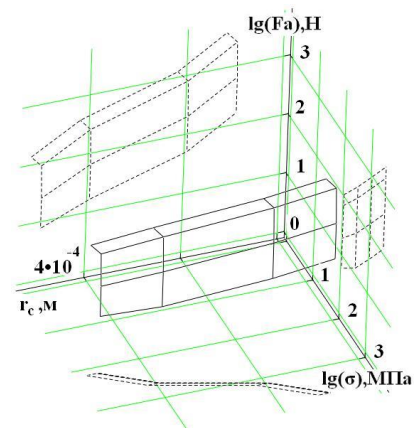


Рис. 3 Залежність сили адгезії, міцності зчеплення від радіусу дряпання для пари матеріалів Al₂O₃ та сталі 38XC

Нами були проведені розрахунки значень характеристик адгезії для матеріалів 38XC, BT14 та одинадцяти покриттів (Al₂O₃, HfN, 0,8ZrN+0,2HfN, ZrN, TaN, TiN, 0,5AlN+0,5TiN, AlN, Cr₃N₂, TiC, Cr₃C₂).

Висновки

Виходячи з розрахунків для сталі 38XC, мінімальне значення енергії адгезії було отримано для оксиду алюмінію (3,72 Дж/м²), максимальне для нітридів – 3,91-4,74 Дж/м², середнє значення займають карбіди з енергією адгезії – 3,73-3,74 Дж/м².

Для титанового сплаву BT14 мінімальне значення енергії утворюється при взаємодії з карбідами (2,0-2,05), максимальне – з нітридами (2,51-2,66).

Таким чином, було зроблено роботу з оцінки адгезійних характеристик для пари матеріалів – покриття – основний матеріал. Були враховані деякі механічні характеристики матеріалів, товщина покриття та геометричні параметри індентора.

Таблиця 3

Міцність з'єднання для деяких пар матеріалів, отриманих двома способами

Покриття – основний матеріал	σ, МПа					
	Розрахункова формула для визначення Eа - (1)			Розрахункова формула для визначення Eа - (12)		
	h, м					
	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶
BN - Al	5445	1722	544	5944	1880	594
Mo ₂ C - Ni	7755	2452	775	7675	2427	767
WC - Ni	8801	2783	880	8768	2773	877
Cr ₃ C ₂ - Ni	6289	1989	628	6415	2028	641
NbC - Ni	6111	1932	611	6048	1913	605
VC - Ni	7662	2423	766	6771	2141	677
Mo ₂ C - Ni	7755	2452	775	7645	2418	765
Mo ₂ C - Co	7777	2459	778	7878	2491	788
Mo ₂ C - Si	7370	2331	737	5438	1720	544
Mo ₂ C - <u>Cu</u>	5639	1783	564	7757	2453	776
Mo ₂ C - Ge	5128	1622	513	5243	1658	524

Таблиця 4

Порівняння даних з розрахунків енергії адгезії, міцності зчеплення з даними інших джерел

Пара матеріалів	E _a розр, Дж/м ²	h, мкм	σ _{розр} , МПа	Дані із джерел		
				E _a , Дж/м ²	σ, МПа	
88%WC+12%Co - Cu	2,21	1-10	384,1-121,46		250-210-280	[9]
	2,59	1-10	688,36-217,68			
Cr ₃ C ₂ - Cu	1,75	10-500	145,71-20,61		15	[10]
Cr ₃ C ₂ - Ni	3,27	10-500	198,88-28,13			
Al ₂ O ₃ - Сталь	3,63	120-1300	53,76-16,33		40-70	[11]
	3,31	120-1300	51,32-15,59			
ZrO ₂ - Сталь	3,02	120-1300	38,58-11,72		40-70	[11]
	3,16	120-1300	39,43-11,98			
Cr - Fe	3,42	0,01-0,1	5591,84-1768,3	4,64-1,53-0,33	73210-820	[2]
Cu - Fe	2,07	0,01-0,1	2809,73-888,51	3,93-1,54-0,32	59040-800	[2]
Cu - Al	1,52	0,01-0,1	2408,41-761,61	3,04-0,88-0,26	43140-780	[2]
Al - Al ₂ O ₃	1,84	0,01-0,1	2022-639,63	1,38-0,19		[2]
				1,79		[6]
TiO ₂ - Cr	4,51	1-10	630,80-199,48	3,349		[4]
TiO ₂ - Fe	3,39	1-10	546,94-172,96	3,379		[4]
TiO ₂ - Ni	3,29	1-10	538,72-170,36	2,69		[4]
TiO ₂ - Si	2,90	1-10	505,81-159,95	4,866		[4]
WC+Co - Сталь	3,23	500-1000	20,79-14,7		25-40-60	[12]
	4,71	500-1000	41,49-29,34			
Cr - Сталь	3,58	10-30	180,94-104,47		більше 100	[12]
	3,28	10-30	173,23-10,01			
Cr ₃ C ₂ - Сталь	3,68	40-80	105,57-74,65		більше 80	[12]
	3,25	40-80	99,21-70,15			
Cu - Al ₂ O ₃	1,84	5-6	118,44-108,12		35	[1]
Ti - Al ₂ O ₃	2,53	2-3	203,58-166,22		101	[1]
Cu - Сталь	1,94	10-30	86,18-49,75		240	[1]
	2,28	10-30	93,37-53,91			
Cu - Mo	2,41	5-10	135,78-96,01		120	[1]
Al - AlN	2,05	1-3	213,87-123,48	1,95	127	[6], [1]
Ti - AlN	2,81	1-10	303,79-96,07		120	[1]
Al - Al ₂ O ₃	1,84	4-5	101,13-90,46	1,79	23	[6], [1]
Al - Al ₂ O ₃	0,01	4-5	22,50-6,36		23	

Таблица 5

Значения характеристик адгезии для сталей 38ХС та титанового сплаву ВТ14

Покрытия	Е _a , Дж/м ²	σ, МПа			F, H																		
		h, м																					
		Рей- тинг	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	
Гид, МКМ																							
Рей- тинг																							
500																							
400																							
200																							
100																							
38ХС																							
Al ₂ O ₃	3,72	1	5958	1884	596	188	187	59	20	9	749	237	77	30	2994	948	303	107	4677	1480	472	163	2
HfN	3,91	4	5853	1851	585	185	184	58	19	9	735	233	75	29	2941	931	298	105	4595	1454	464	160	1
0,8ZrN+0,2HfN	4,26	7	7055	2231	705	223	222	70	23	11	886	281	91	35	3545	1122	359	126	5539	1753	559	193	6
ZrN	4,29	8	7304	2310	730	231	229	73	24	11	918	291	94	37	3670	1162	371	131	5734	1815	579	200	7
TaN	4,74	11	9323	2948	932	295	293	93	31	14	1171	371	120	47	4684	1483	474	167	7319	2317	739	255	11
TiN	4,41	10	7780	2460	778	246	244	78	26	12	977	310	100	39	3909	1238	396	139	6108	1933	617	213	10
0,5AlN+0,5TiN	4,29	9	7305	2310	730	231	229	73	24	11	918	291	94	37	3670	1162	372	131	5735	1815	579	200	8
AlN	4,15	6	6803	2151	680	215	214	68	22	11	855	271	88	34	3418	1082	346	122	5341	1691	539	186	5
Cr ₃ N ₂	4,08	5	6449	2039	645	204	203	64	21	10	810	257	83	32	3241	1026	328	116	5063	1603	511	176	3
TiC	3,73	2	7374	2332	737	233	232	74	24	11	926	294	95	37	3705	1173	375	132	5789	1832	585	202	9
Cr ₃ C ₂	3,74	3	6724	2126	672	213	211	67	22	10	845	268	87	34	3379	1070	342	120	5279	1671	533	184	4
BT14																							
Al ₂ O ₃	2,13	3	4510	1426	451	143	142	45	15	7	567	180	58	23	2266	717	229	81	3541	1121	358	123	1
HfN	2,51	6	4693	1484	469	148	147	47	15	7	590	187	60	24	2358	746	239	84	3684	1166	372	128	2
0,8ZrN+0,2HfN	2,53	9	5442	1721	544	172	171	54	18	8	684	217	70	27	2734	866	277	97	4272	1352	431	149	7
ZrN	2,51	7	5590	1768	559	177	176	56	18	9	702	223	72	28	2809	889	284	100	4389	1389	443	153	8
TaN	2,66	11	6986	2209	699	221	219	70	23	11	878	278	90	35	3510	1111	355	125	5485	1736	554	191	11
TiN	2,56	10	5920	1872	592	187	186	59	20	9	744	236	76	30	2975	942	301	106	4648	1471	469	162	10
0,5AlN+0,5TiN	2,51	8	5591	1768	559	177	176	56	18	9	702	223	72	28	2809	889	284	100	4389	1389	443	153	9
AlN	2,47	4	5243	1658	524	166	165	52	17	8	659	209	67	26	2634	834	267	94	4116	1303	416	143	5
Cr ₃ N ₂	2,49	5	5035	1592	504	159	158	50	17	8	633	200	65	25	2530	801	256	90	3953	1251	399	138	4
TiC	2,00	1	5397	1707	540	171	170	54	18	8	678	215	69	27	2712	858	274	97	4237	1341	428	148	6
Cr ₃ C ₂	2,05	2	4976	1574	498	157	156	50	16	8	625	198	64	25	2500	792	253	89	3907	1237	395	136	3

Література

1. Лунев, В.М. Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения [Текст] / В.М. Лунев, О.В. Немашкало // ФИП. - 2010. - Т. 8, №1. - С. 64 - 71.
2. Вакилов, А.Н. Адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма [Текст] / А.Н. Вакилов, М.В. Мамонов, В.В. Прудников // Физика твердого тела. - 1997. - Т.39, №6. - С. 964 - 967.
3. Щауков, А.Г. Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам [Текст] / А.Г. Щауков // Прикладная физика. - 2006. - №5. - С. 16 - 21.
4. Молодечкина, Т.В. Определение адгезионных свойств диоксида титана к различным подложкам [Текст] / Т.В. Молодечкина, В.П. Глыбин, Л.М. Лыньков // Доклады БГУИР. - 2003. - №4. - С. 119 - 121.
5. Рогожина, Т.С. Контактная энергия в зоне адгезии металлов [Электронный ресурс] / Т.С. Рогожина. - Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/174.pdf> - 15.02.2011.
6. Витковский, И.В. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкометаллического blankets термоядерного реактора [Текст] / И.В. Витковский, А. Н. Конев, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. - 2009. - Т.28, Вып. 2. - С. 11 - 16.
7. Иванов, А.В. Связь между изменением энергии Гиббса химической реакции и краевыми углами смачивания в системах жидкий металл-оксид [Текст] / А.В. Иванов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Химия. - 2002. - Т.28, №5. - С.311 - 314.
8. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования подложки на прочность сцепления гальванических покрытий [Электронный ресурс] / Ю.В. Синькевич. - Режим доступа: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Ptsm/2009_37/228-232.pdf - 15.02.2011.
9. Погребняк, А.Д. Структура и свойства твердого сплава, нанесенного на медную подложку с помощью импульсно-плазменной технологии [Текст] / А.Д. Погребняк, М.В. Ильяшенко [и др.] // Журнал технической физики. - 2001. - Т. 71, Вып. 7. - С. 111 - 118.
10. Боровинская, И.П. СВЧ-твердые сплавы на пороге XXI века [Текст] / И.П. Боровинская // Машиностроитель. - 2000. - №3. - С. 15 - 21.
11. Практическое применение газотермических технологий нанесения защитных покрытий [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.t-s.ru/pdf/GTP-light-2.pdf> - 15.02.2011.
12. Балдаев, Л.В. Исследование возможности замены гальванических хромовых покрытий на газотермические покрытия, напыленные высокоскоростной струей TOP GUN-K [Электронный ресурс] / Л.В. Балдаев. - Режим доступа: http://www.tspc.ru/about/lit/tspc_lit_6.pdf - 15.02.2011.

Надійшла до редакції 10.06.2011.

Рецензент: д-р техн. наук., проф., зав. каф. Технології проектування авіаційних двигунів, А.І. Долматов, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ОЦЕНКА АДГЕЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ

Г.И. Костюк, О.М. Мелкозерова

В данной работе предложена методика для приблизительной оценки характеристик адгезии контактирующих материалов с покрытиями. Показано, что значения энергии адгезии для пар материалов, полученные с применением различных теорий, незначительно отличаются друг от друга. Выявлена связь между прочностью сцепления и энергией адгезии, что позволяет определять характеристики адгезии практически для произвольных материалов. Показано, что прочность сцепления связана с толщиной покрытия обратно пропорциональной зависимостью. В качестве примера предложен расчет энергии и силы адгезии, а также прочности сцепления для стали 38ХС и титанового сплава BT14 с рядом покрытиями оксидом алюминия, карбидами и нитридами.

Ключевые слова: энергия адгезии, прочность сцепления, сила адгезии, покрытие.

ESTIMATION OF ADHESIVE CHARACTERISTICS OF CONTACTING MATERIALS WITH COVERINGS

G. I. Kostyk, O. M. Melkozerova

In the given work the technique, for a rough estimate of characteristics of adhesion of contacting materials with coverings is offered. It is shown that values of energy of adhesion for pairs of the materials, received with application of various theories, slightly differ from each other. Communication between durability of coupling and energy of adhesion that allows to define adhesion characteristics practically for any materials is revealed. It is shown that durability of coupling is connected with thickness of a covering inversely proportional dependence. As an example calculation of energy and force of adhesion, and also durability of coupling for a steel 38XC and titanic alloy BT14 with a number coverings is offered.

Keywords: energy of adhesion, durability of coupling, force of adhesion.

Костюк Геннадій Ігоревич – д-р техн. наук., проф., зав. каф. Робототехнічних систем і комплексів, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна

Мелкозьорова Ольга Михайлівна – аспірант кафедри Робототехнічних систем і комплексів, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна, e-mail: olja.mex@gmail.com.