

УДК 621.865.6

Г.И. КОСТЮК, О.М. МЕЛКОЗЕРОВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ОЦЕНКА АДГЕЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ

*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 ВТ14 с рядом покрытиями оксидом алюминия, карбидами и нитридами.*

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

### Введение

В настоящее время для повышения износостойкости металлорежущего инструмента широко применяются специальные износостойкие покрытия, которые повышают эксплуатационные характеристики, как инструмента, так и деталей машин и механизмов. Исследование эффективности любого покрытия можно оценить экспериментально, что в значительной мере увеличивает затраты труда, времени, ресурсов. Поэтому для повышения эффективности экспериментальных данных необходимо подготовить достаточную теоретическую базу для определения основных механических характеристик, позволяющую построить методику для выбора наиболее перспективных направлений в варьировании химического состава поверхности инструмента для заданных условий обработки.

В данной работе разработана методика расчета адгезионных характеристик для однокомпонентных и многокомпонентных пар материалов. В настоящее время существует большое разнообразие теорий, которые позволяют определять адгезию.

Основными характеристиками адгезии являются: энергия адгезии, прочность сцепления и сила адгезии [1-13]. Первая характеристика в основном определяет свойства материалов, не учитывая конкретные условия в которых находятся контактирующие материалы. Также очень важной характеристикой адгезии является прочность сцепления покрытия с подложкой. Существует множество способов для определения этой характеристики, в основном – это проведение различного рода экспериментов с испытанием на изгиб, растяжение, нанесение сетки царапин, приклеивание и т.д. Основными ме-

тодами, как показывают многочисленные работы, являются метод отрыва (для толстых пленок) и метод царапания (для тонких пленок) [1]. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки, в результате мы получаем большое количество данных, которые трудно сопоставить и определить, где имеет место высокое значение адгезии, а где – нет.

В данной статье предложен вариант определения адгезионных характеристик с использованием характеристик взаимодействующих материалов, толщины покрытия и параметров инденторов, которые, как правило, участвуют при проведении экспериментов.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрирования технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», хозяйственных работ о сотрудничестве.

### Методы определения энергии адгезии контактирующих материалов

Адгезия характеризует прочность схватывания между двумя материалами, возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведенных в соприкосновение. Существует множество теорий и выражений для определения приблизительного значения энергии адгезии пар материалов, вступающих в контакт, например:

- адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма (А.Н. Вакилов, М.В. Мамонов, В.В. Прудников) [2];

- определение энергии адгезии при помощи потенциалов ионизации для пары металл-окисел (Ф.Лондон) [3];

- определение энергии адгезии при помощи теории электроорицательности (Молоденчикина Т.В., В.П. Глыбин, Л.М. Лыньков) [4] и др.

В работе [5] можно подсчитать энергию адгезии двух различных, разнородных сред, используя свободную поверхностную энергию каждой среды по формуле (поверхностная энергия и энергия адгезии равны энергии упругих деформаций, возникающих при образовании свободной поверхности и вступлении тел в адгезионный контакт):

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

где  $E_a^{(1)}$  и  $E_a^{(2)}$  – поверхностные энергии контактирующих веществ.

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

где  $v^{(1)}$  и  $v^{(2)}$  – коэффициенты Пуассона контактирующих веществ. Верхние индексы (1) и (2) показывают, что соответствующие индексы относятся к разным веществам.

Для случая свободной поверхности (роль второй среды играет вакуум) поверхностную энергию можно определить по формуле [6]:

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

где  $\gamma$  – величина, которая показывает, во сколько раз увеличится поверхность, концентрирующая в себе энергию;  $\pi_0$  и  $b$  – некоторые константы, характеризующие механические свойства среды;  $\mu$  и  $\lambda$  – коэффициенты Ламе, которые можно определить по формулам:

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

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

в которых  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости вещества.

Константа  $\pi_0$  характеризует натяжение поверхностного слоя;

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

где  $\beta$  – некоторый коэффициент пропорциональности, который можно определить через среднее межатомное расстояние  $l$  по формуле:

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

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

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

где  $n$  – число атомов среды в единице объема среды.

Константа  $b$  – дополнительная постоянная, характеризующая способность материала сопротивляться развитию неравномерности деформаций, в частности появлению изгибов материальных волокон и неравномерности их относительного удлинения, может иметь также смысл эффективной толщины пограничного слоя, в которой концентрируется поверхностная энергия;

С учетом некоторых преобразований формулу (3) можно записать несколькими способами и получить несколько выражений для определения поверхностной энергии некоторой среды. Например:

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

где  $R$  – радиус атома, или

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

Таким образом, у нас есть три способа, пригодных для расчета поверхностной энергии единичной системы. В табл. 1 приведены значения энергии адгезии для некоторых простых материалов и для оксида алюминия, которые были рассчитаны различными способами. Таким образом, поверхностная энергия зависит только от свойств материала и не зависит от других характеристик.

Таблица 1

Значения поверхностной энергии некоторых материалов, рассчитанные несколькими способами

Материал	Характеристики материала		$E_a, \text{ Дж/м}^2$		
			Расчетная формула		
	$R, 10^{10} \text{ м}$	$E, 10^{-11}, \text{ Па}$	(10)	(11)	(3)-(9) или [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
$\text{Al}_2\text{O}_3$	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

Кроме теории, предложенной в [5] и [6], существует также теория Ю.В. Найдича, которая предполагает наличие связи между энергией Гиббса химической реакции и краевым углом смачивания [7]. Согласно этой теории энергию адгезии двух сред можно записать следующем образом:

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

где  $\theta$  – краевой угол смачивания;  $\sigma_{lv}$  – поверхностное натяжение на границе жидкость – газ.

Таким образом, можно определить энергию адгезии двумя способами, используя формулы (1) и (12). В табл. 2 приведены значения энергии адгезии для некоторых материалов, которые были подсчитаны описанными выше способами.

#### Определения прочности сцепления и силы адгезии покрытия к основному материалу

Для полного описания адгезии покрытия и подложки необходимы значения энергии и силы адгезии, а также прочности сцепления. Согласно [1] зависимость между силой адгезии и прочностью сцепления можно определить по формуле:

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

где  $\sigma$  – прочность сцепления;

$r$  – радиус царапины, полученный результате воздействия индентора на поверхность подложки.

Так же существует выражение для определения энергии адгезии через силу адгезии

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

где  $h$  – толщина покрытия.

Используя выражения (13) и (14) можно получить выражение для прочности сцепления:

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

Сходная формула была получена в [8] и имеет вид:

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

где  $r_{\text{инд}}$  – радиус индентора при вершине;  $H$  – критическая нагрузка;  $k$  – коэффициент Вивера (рекомендуется принимать  $k = 1$ ).

Зная энергию адгезии, подсчитанную по формуле (10) или (11) можно по формуле (15) рассчитать прочность сцепления и затем по формуле (13) рассчитать силу адгезии  $F_a$ .

В табл. 3 приведены значения прочности сцепления для некоторых пар материалов (покрытий – карбидов, нитридов, а также простых материалов, используемых в качестве подложки) в зависимости от толщины покрытия. Как показали расчеты, значения прочности сцепления для данных материалов отличаются друг от друга на 8,4-9,18%.

В табл. 4 приведены значения характеристик адгезии (энергии адгезии и прочности сцепления), а также их значения, взятые из других источников. Таблица показывает наличие связи между толщиной покрытия и прочностью сцепления, а также частичное или полное совпадение энергии адгезии для пар различных материалов и совпадение прочности сцепления при соответственной толщине покрытия.

Таблица 2

Значения энергии адгезии некоторых пар материалов

Подложка	Покрытие	$\theta, ^\circ$	$\sigma_{lv}, \text{ Дж/м}^2$	$E_a, \text{ Дж/м}^2$	
				Расчетная формула	
				(1)	(12)
Графит (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
Ni	Al	38,00	0,91	0,74	1,63
	NbC	16,58	1,70	3,40	3,33
	VC	14,20	1,70	4,29	3,35
Ni	TaC	11,97	1,70	3,78	3,36
	TiC	30,15	1,70	3,33	3,17
	ZrC	24,15	1,70	3,25	3,25
Ni	HfC	28,13	1,70	3,17	3,20
	TiN	69,42	1,70	3,47	2,30
	ZrN	71,90	1,70	3,73	2,23
Ni	TiO <sub>2</sub>	103,60	1,70	3,29	1,30
	ZrO <sub>2</sub>	117,46	1,70	3,10	0,92

Таблица 3

Прочность сцепления для некоторых пар материалов, полученных двумя способами

Покрытие (основной материал)	$\sigma, \text{ МПа}$					
	Расчетная формула для определения $E_a$ - (1)			Расчетная формула для определения $E_a$ - (12)		
	$h, \text{ м}$					
	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
BN - Al	5445	1722	544	5944	1880	594
Mo <sub>2</sub> C - Ni	7755	2452	775	7675	2427	767
WC - Ni	8801	2783	880	8768	2773	877
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Ni	6289	1989	628	6415	2028	641
NbC - Ni	6111	1932	611	6048	1913	605
VC - Ni	7662	2423	766	6771	2141	677
Mo <sub>2</sub> C - Ni	7755	2452	775	7645	2418	765
Mo <sub>2</sub> C - Co	7777	2459	778	7878	2491	788
Mo <sub>2</sub> C - Si	7370	2331	737	5438	1720	544
Mo <sub>2</sub> C - Cu	5639	1783	564	7757	2453	776
Mo <sub>2</sub> C - Ge	5128	1622	513	5243	1658	524

Таблица 4

Сравнение данных по расчетам энергии адгезии, прочности сцепления с данными их других источников

Пара материалов	$E_a$ расч., Дж/м <sup>2</sup>	h, мкм	$\sigma$ расч., МПа	Данные из источников		
				$E_a$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma$ , МПа	ссылка
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 <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Cu	1,75	10-500	145,71-20,61		15	[10]
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Ni	3,27	10-500	198,88-28,13			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Сталь	3,63	120-1300	53,76-16,33		40-70	[11]
	3,31	120-1300	51,32-15,59			
ZrO <sub>2</sub> - 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	0,01-0,1	2022-639,63	1,38-0,19		[2]
				1,79		[6]
TiO <sub>2</sub> - Cr	4,51	1-10	630,80-199,48	3,349		[4]
TiO <sub>2</sub> - Fe	3,39	1-10	546,94-172,96	3,379		[4]
TiO <sub>2</sub> - Ni	3,29	1-10	538,72-170,36	2,69		[4]
TiO <sub>2</sub> - 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		более 100	[12]
	3,28	10-30	173,23-10,01			
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Сталь	3,68	40-80	105,57-74,65		более 80	[12]
	3,25	40-80	99,21-70,15			
Cu - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	5-6	118,44-108,12		35	[1]
Ti - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	4-5	101,13-90,46	1,79	23	[6], [1]
Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	4-5	22,50-6,36		23	

В табл. 5 приведена прочность сцепления, полученная двумя способами, для некоторых простых материалов (Al, Ni, Co, Si) и некоторых покрытий (BN, Mo<sub>2</sub>C, WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, NbC, VC). Величина прочности сцепления, полученная через энергию адгезии, сходна по двум способам. Как показывают подсчеты, прочность сцепления и сила адгезии зависит от толщины покрытия, и тем больше, чем меньше толщина покрытия.

На рис. 1 – 4 приведены трехмерные зависимости силы адгезии, прочности сцепления от толщины покрытия и радиуса царапания инденторов различных размеров. При помощи этих графиков можно определить параметры покрытия, при которых адге-

зионные характеристики будут иметь требуемые значения. Например, на рис. 1 показана зависимость силы адгезии и прочности сцепления от толщины покрытия пары материалов – стали 38ХС и оксида алюминия, которая показывает, что с ростом толщины покрытия сила адгезии и прочности сцепления уменьшается. Максимальная прочность сцепления  $\sigma$  в данном случае может составлять 5958 МПа, при силе адгезии  $F_a$  – 4677 Н, радиус скругления индентора  $r_a$  при вершине 500 мкм, при толщине покрытия  $h$  -  $10^{-8}$  м. Минимальная прочность сцепления  $\sigma$  в данном случае может составлять 188 МПа, при силе адгезии  $F_a$  – 9 Н, радиус скругления индентора  $r_a$  при вершине 100 мкм, при толщине покрытия  $h$  -  $10^{-5}$  м.

Таблица 5

Значения характеристик адгезии для стали 38ХС и титанового сплава ВТ14

Покрывтие	$E_{\text{св}}$ Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma$ , МПа										F, Н										Рей- тинг							
		$h$ , м										$r_{\text{грав.}}$ , МКМ																	
		10 <sup>-8</sup>					10 <sup>-7</sup>					10 <sup>-6</sup>					10 <sup>-5</sup>						500						
		10 <sup>-8</sup>		10 <sup>-7</sup>			10 <sup>-6</sup>					10 <sup>-8</sup>		10 <sup>-7</sup>			10 <sup>-6</sup>						10 <sup>-5</sup>						
38ХС																													
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,72	1	5958	1884	596	188	187	59	20	9	749	237	77	30	2994	948	303	107	4677	1480	472	163	2						
HN	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+ 0,2HN	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 <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	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 <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	3,74	3	6724	2126	672	213	211	67	22	10	845	268	87	34	3379	1070	342	120	5279	1671	533	184	4						
ВТ14																													
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,13	3	4510	1426	451	143	142	45	15	7	567	180	58	23	2266	717	229	81	3541	1121	358	123	1						
HN	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+ 0,2HN	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 <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	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 <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	2,05	2	4976	1574	498	157	156	50	16	8	625	198	64	25	2500	792	253	89	3907	1237	395	136	3						

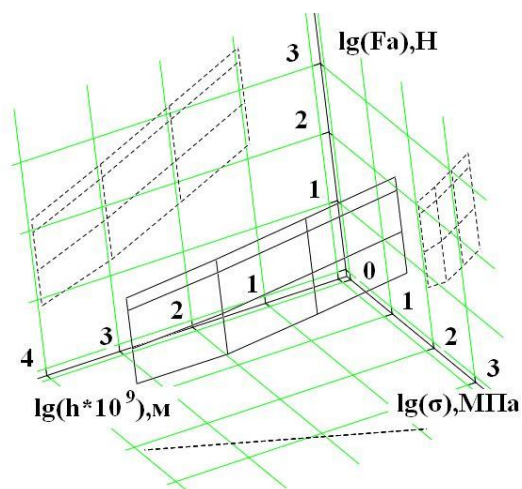


Рис. 1. Зависимость силы адгезии, прочности сцепления от толщины покрытия  $Al_2O_3$ , основной материал – сталь 38ХС

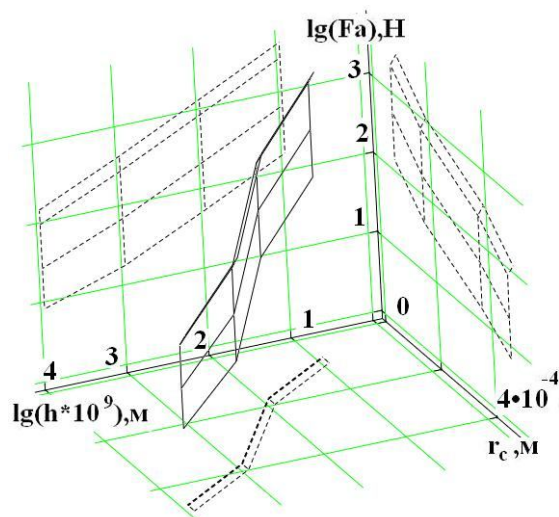


Рис. 2. Зависимость силы адгезии от толщины покрытия и радиуса царапания для пары материалов  $Al_2O_3$  и стали 38ХС

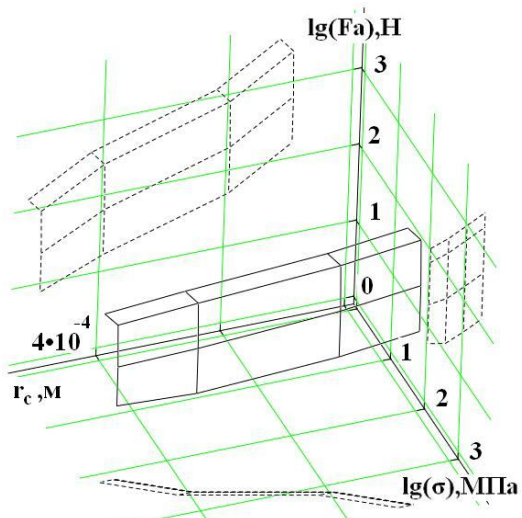


Рис. 3. Зависимость силы адгезии, прочности сцепления от радиуса царапания для пары материалов  $Al_2O_3$  и стали 38ХС

Нами были проведены расчеты значений характеристик адгезии для материалов 38ХС, ВТ14 и одиннадцати покрытий ( $Al_2O_3$ , HfN,  $0,8ZrN+0,2HfN$ , ZrN, TaN, TiN,  $0,5AlN+0,5TiN$ , AlN,  $Cr_3N_2$ , TiC,  $Cr_3C_2$ ).

## Выводы

Исходя из расчетов для стали 38ХС, минимальное значение энергии адгезии было получено для оксида алюминия ( $3,72 \text{ Дж/м}^2$ ), максимальное – для нитридов –  $3,91-4,74 \text{ Дж/м}^2$ , среднее значение занимают карбиды с энергией адгезии –  $3,73 - 3,74 \text{ Дж/м}^2$ .

Для титанового сплава ВТ14 минимальное значение энергии получается при взаимодействии с карбидами ( $2,0 - 2,05$ ), максимальное – с нитридами ( $2,51 - 2,66$ ).

Таким образом, была проделана работа по оценке адгезионных характеристик для пары материалов – покрытие – основной материал. Были учтены некоторые механические характеристики материалов, толщина покрытия и геометрические параметры индентора.

## Литература

1. Лунев В.М. Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения [Текст] / В.М. Лунев, О.В. Немайкало // 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. Щацук А.Г. Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам [Текст] / А.Г. Щацук // 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 г.
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 // Вестник Московского

университета. Серия 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](http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Ptsm/2009_37/228-232.pdf). – 15.02.2011 г.

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. СВС-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-t.ru/pdf/GTP-light-2.pdf>. – 15.02.2011 г.

12. Балдаев Л.В. Исследование возможности замены гальванических хромовых покрытий на газотермические покрытия, напыленные высокоскоростной грелкой TOP GUN-K [Электронный ресурс] / Л.В. Балдаев. – Режим доступа: [http://www.tspc.ru/about/lit/tspc\\_lit\\_6.pdf](http://www.tspc.ru/about/lit/tspc_lit_6.pdf). – 15.02.2011 г.

Поступила в редакцию 10.06.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии проектирования авиационных двигателей, А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.

### ОЦІНЮВАННЯ АДГЕЗІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ З ПОКРИТТЯМИ

*Г.І. Костюк, О.М. Мелкозьорова*

У даній роботі запропонований метод для приблизного оцінювання характеристик адгезії контактуючих матеріалів з покриттями. Показано, що значення адгезії для пари матеріалів, отриманих з допомогою різних теорій, незначно відрізняються одне від одного. Знайдено зв'язок між міцністю з'єднання та енергією адгезії, що дозволяє визначити характеристики адгезії для всіх матеріалів. Міцність з'єднання пов'язана з товщиною покриття зворотно пропорційною залежністю. У якості приклада, запропоновано розрахунок енергії та сили адгезії, а також міцності з'єднання для сталі 38ХС та титанового сплаву ВТ14 із різними покриттями.

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

### 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 Геннадий Игоревич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. робототехнических систем и комплексов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.

**Мелкозерова Ольга Михайловна** - аспирантка кафедры робототехнических систем и комплексов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина, e-mail: olja.mex@gmail.com.