

Г.И. КОСТЮК, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;
В.Н. ПАВЛЕНКО, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;
О.М. МЕЛКОЗЕРОВА, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков.

АДГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ ПАР ТРЕНИЯ

Запропоновано метод для приблизного оцінювання характеристик адгезії контактуючих матеріалів з покриттями. Показано, що значення адгезії для пари матеріалів, отриманих за 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 зв'язана з товщиною покриття обернено пропорційною залежністю. Як приклад запропоновано розрахунок енергії та сили адгезії, а також міцності зчеплення для сталі 38ХС і титанового сплаву ВТ14 з різними покриттями.

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

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 38ХС and titanic alloy ВТ14 with a number coverings is offered.

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

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 разными покрытиями.

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

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 методами, 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 чего 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 и договоров 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 с помощью потенциалов ионизации для пары металл–окисел (Ф. Лондон) [3];

- определение энергии адгезии с помощью теории электроорицательности (Т.В. Молоденчикина, 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]

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

где μ и λ - коэффициенты Ламе, которые можно вычислить по формулам

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

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

где π_o и b - некоторые константы, характеризующие механические свойства среды; π_o - характеризует натяжение поверхностного слоя,

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

где β - некоторый коэффициент пропорциональности, который можно определить через среднее межатомное расстояние l по таким формулам:

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

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

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

где n - число атомов среды в единице объема среды; 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; γ - величина, которая показывает, во сколько раз увеличится поверхность, концентрирующая в себе энергию; ν - коэффициент Пуассона; E – модуль упругости вещества.

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, рассчитанных несколькими способами

Материал	Характеристики материала		E _a , Дж/м ²		
			Расчетная формула		
	R, 10 ¹⁰ м	E, 10 ⁻¹¹ 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
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

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 таким образом:

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

где θ - краевой угол смачивания; σ_{IV} - 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 σ - прочность сцепления; r - радиус царапины, полученный результате воздействия индентора на поверхность подложки.

Также существует выражение для определения энергии адгезии через силу адгезии

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

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) – 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	$\theta, ^\circ$	$\sigma_{IV}, \text{Дж/м}^2$	$E_a, \text{Дж/м}^2$	
				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
	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

В табл. 5 приведена прочность сцепления, полученная двумя способами, для некоторых простых материалов (Al, Ni, Co, Si) и некоторых покрытий (BN, Mo₂C, WC, Cr₃C₂, NbC, VC). Величина прочности сцепления, полученная через энергию адгезии, сходна по двум способам. Как показывают подсчеты, прочность сцепления и сила адгезии зависят от толщины покрытия, и тем больше, чем меньше толщина покрытия.

На рис. 1 – 4 показана трехмерные зависимости силы адгезии, прочности сцепления от толщины покрытия и радиуса царапания инденторов различных размеров. С помощью этих графиков можно определить параметры покрытия, при которых адгезионные 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 свидетельствует о том, что с ростом толщины покрытия сила адгезии и прочности сцепления уменьшается. Максимальная прочность сцепления σ 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 σ 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.

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).

Таблица 3
Прочность сцепления для некоторых пар материалов, полученных двумя способами

Покрытие – основной материал	σ , МПа					
	Расчетная формула для определения E_a (1)			Расчетная формула для определения E_a (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 - Cu	5639	1783	564	7757	2453	776
Mo ₂ 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	$E_{a \text{ расч.}}$, Дж/м ²	h, мкм	$\sigma_{\text{расч.}}$, МПа	Данные из источников		
				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			

Пара материалов	E_a расч., Дж/м ²	h, мкм	σ расч., МПА	Данные из источников		
				E_a , Дж/м ²	σ , МПА	
Al ₂ O ₃ - Сталь	3,63	120-1300	53,76-16,33		40-70	[11]
	3,31	120-1300	51,32-15,59			
Cu - Fe	2,07	0,01-0,1	2809,73-888,51	3,93-1,54-0,32	5904 0-800	[2]
Cu - Al	1,52	0,01-0,1	2408,41-761,61	3,04-0,88-0,26	4314 0-780	[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		более 100	[12]
	3,28	10-30	173,23-10,01			
Cr ₃ C ₂ - Сталь	3,68	40-80	105,57-74,65		более 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	

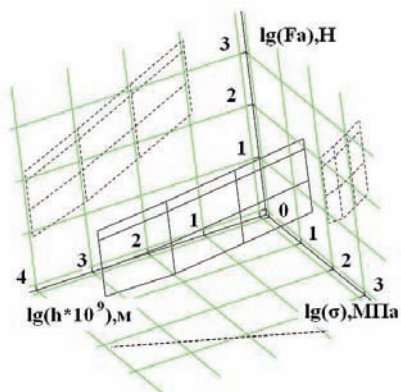


Рис. 1. Зависимость силы адгезии, прочности сцепления от толщины покрытия Al_2O_3 , основного материал – сталь 38ХС

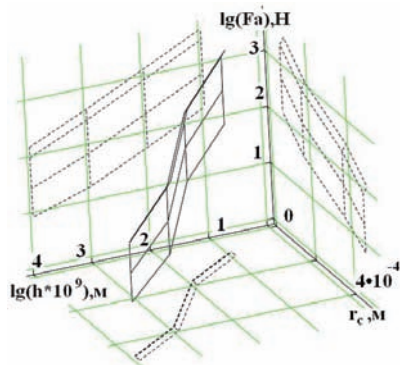


Рис. 2. Зависимость силы адгезии от толщины покрытия и радиуса цапанания для пары материалов Al_2O_3 и стали 38ХС

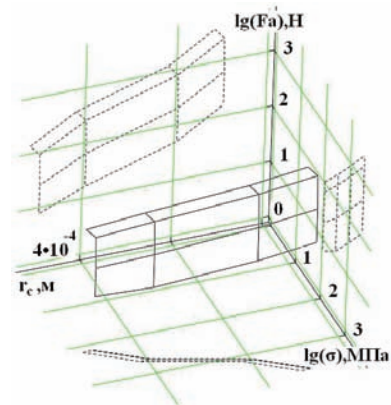


Рис. 3. Зависимость силы адгезии, прочности сцепления от радиуса цапанания для пары материалов Al_2O_3 и стали 38ХС

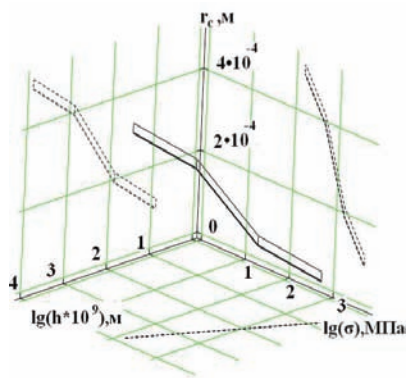


Рис. 4. Зависимость прочности сцепления от радиуса цапанания и от толщины покрытия для пары материалов Al_2O_3 и стали 38ХС

Таблица 5

Значения характеристик адгезии для стали 38ХС и титанового сплава ВТ14

Покрытие	E _a , Дж/м ²	σ, МПа			F, Н						
		Рей тинг	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵	h, м						
					10 ⁻⁸	10 ⁻⁵	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵	
					Γ _{нндл} , МКМ						
300		400		500							
38ХС											
Al ₂ O ₃	3,72	1	5958	188	749	30	2994	107	4677	163	2
HfN	3,91	4	5853	185	735	29	2941	105	4595	160	1
0,8ZrN+ 0,2HfN	4,26	7	7055	223	886	35	3545	126	5539	193	6
ZrN	4,29	8	7304	231	918	37	3670	131	5734	200	7
TaN	4,74	11	9323	295	1171	47	4684	167	7319	255	11
TiN	4,41	10	7780	246	977	39	3909	139	6108	213	10
0,5AlN+ 0,5TiN	4,29	9	7305	231	918	37	3670	131	5735	200	8
AlN	4,15	6	6803	215	855	34	3418	122	5341	186	5
Cr ₃ N ₂	4,08	5	6449	204	810	32	3241	116	5063	176	3
TiC	3,73	2	7374	233	926	37	3705	132	5789	202	9
Cr ₃ C ₂	3,74	3	6724	213	845	34	3379	120	5279	184	4
ВТ14											
Al ₂ O ₃	2,13	3	4510	143	567	23	2266	81	3541	123	1
HfN	2,51	6	4693	148	590	24	2358	84	3684	128	2
0,8ZrN+ 0,2HfN	2,53	9	5442	172	684	27	2734	97	4272	149	7
ZrN	2,51	7	5590	177	702	28	2809	100	4389	153	8
TaN	2,66	11	6986	221	878	35	3510	125	5485	191	11
TiN	2,56	10	5920	187	744	30	2975	106	4648	162	10
0,5AlN+ 0,5TiN	2,51	8	5591	177	702	28	2809	100	4389	153	9
AlN	2,47	4	5243	166	659	26	2634	94	4116	143	5
Cr ₃ N ₂	2,49	5	5035	159	633	25	2530	90	3953	138	4
TiC	2,00	1	5397	171	678	27	2712	97	4237	148	6
Cr ₃ C ₂	2,05	2	4976	157	625	25	2500	89	3907	136	3

Выводы. Исходя из расчетов для стали 38ХС минимальное значение энергии адгезии было получено для оксида алюминия (3,72 Дж/м²), максимальное – для нитридов – 3,91...4,74 Дж/м², среднее значение занимают карбиды с энергией адгезии 3,73...3,74 Дж/м².

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 материала также

были учтены некоторые механические характеристики материалов, толщина покрытия и геометрические параметры индентора.

Как показали расчеты, энергию адгезии можно определить несколькими способами – через некоторые механические характеристики, указанные выше, а также через краевой угол смачивания и поверхностное натяжение. Эти два способа дают приблизительно сходные результаты, но в связи с большей доступностью характеристик первого способа, необходимых для подсчета энергии адгезии, он соответственно более пригоден первый метод. Однако при дальнейшем расчете прочности сцепления первый метод по сравнению с экспериментом дает несколько завышенные результаты, хотя также пригоден для использования.

Список литературы: 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. *Щацуков А.Г.* Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам [Текст] / А.Г. Щацуков // 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> - 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.nbu.gov.ua/portal/natural/Ptsm/2009_37/228-232.pdf - 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.* 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> - 02.2011. 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 - 02.2011.

Поступила в редколлегию 06.07.11