через сульфатний мостиковий ліганд. Стійкість комплексів такого типу підтверджується відсутністю негативних частот в розрахованому коливальному спектрі. Отримані дані можуть бути використані для трактовки механізму каталітичного окиснення Cr (III) озоном у присутності солей мангану.

Список літератури: 1. *Тюпало Н.Ф.* Реакции гетаренов с озоном (синтезы в ряду азинов и азолов, влияние растворителей и катализ): дис. … доктора хим. наук: 05.17.05. / Тюпало Николай Федорович. – Рубежное, 1987. – 360 с. **2**. Химия и технология редких и рассеянных элементов: сб. докладов Всесоюзного совещания / Ереванский университет. – Ереван: ЕУ, 1981. – С. 446 – 452. **3**. *Тюпало Н.Ф., Якоби В.А., Бернашевский Н.В., Верховец Г.Н.* О механизме каталитического окисления соединений трехвалентного хрома озоном // Укр. хим. журн. – 1977. – Т. 42. – № 6. – С. 628 – 632. **4**. *Бончев П.* Комплексообразование и каталитическая активность / Бончев П. – М.: Мир, 1975. – 272 с. **5**. *Becke A.D.* Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior // Phys. Rev. – 1988. – A. 38. – P. 3098 – 3100. **6**. *Lee C., Yang W., Parr R.G.* Development of the Colle-Salvetti carrelation-energy formula into a function of the electron density // Phys. Rev. – 1988. – B. 37. – P. 785 – 789. **7**. *Becke A. D.* Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange // J. Chem. Phys. – 1993. – Vol. 98. – P. 5648 – 5652. **8**. *Hay P.J., Wadt W.R.* Ab initio effective core potential for molecular calculations // J. Chem. Phys. – 1985. – Vol. 82. – P. 270 – 310. **9**. *Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al.* Gaussian 92/DFT, Revision G.2 / Gaussian Inc. – Pittsburgh: PA, 1993. **10**. Компьютерная технология квантово-химических расчетов с помощью программного пакета “GAUSSIAN”: [метод. Пособие] / ред. проф. Кузнецов А.М]. – Казань: Казан. гос. технол. ун-т., 2003. – 88 с.

Надійшла до редколегії 03.05.08

УДК 666.6.

С.В. ЛИТОВЧЕНКО, канд. техн. наук, ХНУ ім. В.Н. Каразіна, м. Харків

ПАРАМЕТРИ УТВОРЕННЯ ФАЗ У ДИФУЗІЙНИХ СИЛІЦИДНИХ ПОКРИТТЯХ. ЗАДАЧА ТА КРАЙОВІ УМОВИ.

Сформульовано узагальнену задачу про формування багатошарових дифузійних силіцидних покриттів. Наведені рівняння для розрахунку таких параметрів утворення та перерозподілу фаз, як координати міжфазних границь та швидкості переміщення цих границь. Отримані крайові умови для цих рівнянь.

A generalised task on making multilayer diffusion silicide coatings is formulated. The equations to calculate parameters of phase formation and redistribution are given, e.g. co-ordinates of interphase boundaries and speed of these boundaries’ dislocation. The boundary conditions for these equations are found.

Дослідження структурно-фазових перетворень в багатофазових системах, що утворені тугоплавкими металами та їхніми сполуками, зокрема з кремнієм, досі актуальні через поширення сфер використання таких матеріалів та необхідності надання їм оптимальних властивостей [1 – 5]. Дифузійні силіцидні покриття є надійним засобом захисту багатьох металів від високотемпературного окислення. Більш широке вживання таких покриттів стримує складність процесу оптимізації їхнього структурно-фазового стану, що не дозволяє досягти необхідних експлуатаційних показників. Відомі теоретичні та експериментальні роботи здебільшого присвячені окремим питанням формування чи експлуатації покриттів і не вміщують загальних рекомендацій чи висновків [6 – 9].

Досить узагальнена постановка задачі про формування багатошарових покриттів може бути сформульована так. У початковий момент часу на напівнескінченній підкладинці з металу X наявне покриття складу $X_{¥}A_{¢}$ (елемент A – це кремній), що граничить з атмосферою газу $B_{£}$ (в нашій задачі – повітряний кисень). Процес, що відбувається при сталих значеннях тиску та температури P, T і в ході якого вступають у реакцію метал X і газ $B_{£}$, приводить до утворення ряду шарів (рис. 1).

Речовина X_A , що виникає з боку металу, більше збагачена металом X в порівнянні з фазою $X_{¥}A_{¢}$, тобто ~¢ – ¥ > 0. Нумерація шарів (фази 1 – 4) та границь розподілу фаз (0 – 4) приведена на рис. 1.

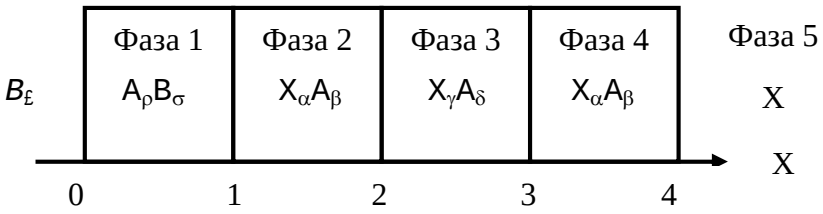

Рис. 1. Схема розташування фаз в багатошаровому покритті

В умовах, коли тверді речовини є компактними, а температура – досить високою, на структурно-фазові перетворення в системі суттєво впливає тільки об’ємна дифузія точковими дефектами кристалічних ґраток [10]. Дифузією прискореними шляхами (границями зерен, порами, дислокаціями) можна знехтувати. Оскільки точний механізм масоперенесення невідомий, будемо дотримуватися моделі, що має досить гарне фізичне обґрунтування і доречна з погляду на вузьку область гомогенності розглянутих сполук, а саме вважатимемо, що в областях фаз 1 – 5 своїми підґратками дифундують вакансії A,

B, X. Крім того, у метал *X* проникають атоми *A*, утворюючи твердий розчин. Легко внести корективи у формулювання і розв'язок задачі, що пов'язані з розчиненням по типу заміщення. На нульовій границі атоми сорту *A* не випаровуються. Шари формуються при досить високих температурах, тому відбувається повна релаксація пружних напружень.

В подальшому розгляді застосовано наступні позначення величин. Хімічні потенціали твердих речовин позначені μ_i. Індекс внизу означає номер відповідного шару. Під записом $X_{\sim}A^{J}$ – розуміємо комірку з відсутнім атомом *A*, тобто комірку з вакансією *A*. Концентрація точкових дефектів – це відношення числа дефектів даного сорту до повного числа комірок речовини (як «правильних», тобто «ідеальних», так і «дефектних») в одиниці об'єму. Концентрація вакансій *A, B, X* позначена як *C*, $\tilde{C}$, C^*, а їхні коефіцієнти дифузії через *Д*, $\tilde{Д}$, $Д^*$ відповідно; концентрація проникших у метал *X* атомів *A* – відповідно $\hat{C}$, а їхній коефіцієнт дифузії – $\hat{Д}$. Повна кількість комірок $i^{-ї}$ речовини в одиниці об'єму N_i *(*$N_2=N_4=N$*)*; а $\mu_i=1/N_{ii}$ *(*$\mu_2=\mu_4=\mu$*)* – об'єм, що припадає на одну комірку. Вважаємо, що концентрації всіх фаз значно менші за одиницю ($C_i<<1$). Для хімічних потенціалів точкових ефектів користуємось відомою формулою з теорії слабких розчинів: $кTlnC + \psi$, « $_{£}$ записується як хімічний потенціал ідеального газу: $кTlnP + X$. Будемо вважати, що в системах відліку, пов'язаних з відповідними шарами, справедливі звичайні рівняння дифузії, тобто $\frac{\partial C_1}{\partial t} = Д_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2}$ у першій області. На границях розподілу речовин можливо протікання таких хімічних реакцій:

Номер границі	Реакція	
0	$¢B_{£} + £(° - 1)A_{◦} B_{¢} \leftrightarrow °£A_{◦}^{-} B¢$	(1)
	$B_{£} + £A_{◦} B_{¢}^{-} \leftrightarrow £A_{◦} B_{¢}$	(2)
1	$A_{◦}^{-} B_{¢} + X_{\sim} B \leftrightarrow A_{◦} B_{¢} + X_{\sim} A^{-}$	(3)
	$(° + ¢ - 1)A_{◦} B_{¢} \leftrightarrow °A_{◦}^{-} B_{¢} + ¢A_{◦} B_{¢}^{-}$	(4)

$$(\sim + \quad -1)X_{\sim}A \ \leftrightarrow \sim X_{\sim}^{-}A \ + X_{\sim}A^{-} \tag{5}$$

2, 3 $$X_{\sim}A^{-} + X_{¥}A_{¢} \leftrightarrow X_{\sim}A \ + X_{¥}A_{¢}^{-} \tag{6}$$

$$X_{\sim}^{-}A \ + X_{¥}A_{¢} \leftrightarrow X_{\sim}A \ + X_{¥}^{-}A_{¢} \tag{7}$$

$$\sim X_{¥}A_{¢} + (\sim ¢ - ¥ \ )X_{\sim}A^{-} \leftrightarrow (¥ + \sim ¢ - ¥ \ )X_{\sim}A \tag{8}$$

$$X_{¥}A_{¢} \leftrightarrow (¥ \ - \sim ¢ + ¢)X_{\sim}A \ + (\sim ¢ - ¥ \ )X_{\sim}^{-}A \tag{9}$$

4 $$X_{\sim}^{-}A \ + X \leftrightarrow X_{\sim}A \ + X^{-} \tag{10}$$

$$\sim X \ + (\quad -1)X_{\sim}A \quad \leftrightarrow \quad X_{\sim}A^{-} \tag{11}$$

$$X \leftrightarrow X - X^{-} \tag{12}$$

$$X_{\sim}A \ \leftrightarrow X_{\sim}A^{-} + A \tag{13}$$

При досить тривалих процесах (тобто при досить товстих зростаючих шарах) хімічні рівноваги на границях встигають підбудовуватися до даних умов, і процес протікання реакцій контролюється дифузією [10]. Це означає, що час установлення квазірівноваги значно менший за час зміни умов на границях. Записуючи для кожної реакції відповідне рівняння з хімічними потенціалами, отримаємо рівноважні крайові умови. Верхнім індексом позначено номер границі, а нижнім індексом – номер шару:

$$C_1^0 = P^{\frac{\pm}{°£}} E^{\frac{1}{KT}\left\{\frac{\pm}{°£}X - \frac{1}{°}«_1 - \cdot_1\right\}}; \widetilde{C}^0 = P^{-\frac{1}{£}} E^{-\frac{1}{KT}\left\{\frac{X}{£} - \cdot^{\sim}\right\}};$$

$$C_2^1 = C_1^1 e^{\frac{1}{KT}\{« - «_1\}} = C_1^1 f; \quad (C_1^1)^{°}(\widetilde{C}^1)^{\pm} = (C_1^0)^{°}(\widetilde{C}^0) = g;$$

$$(C^{*1}{}_2)^{\sim}(C_2^1)^{°} = e^{-\frac{1}{KT}\{« + \sim \cdot^{*} + \ \cdot\}}; C_2^2 = C_4^3 = C = e^{\frac{1}{KT}\left\{\frac{¥« - \sim «}{\sim ¢ - ¥} - \cdot\right\}}; \tag{14}$$

$$C_3^3 = C_3^2 = e^{\frac{1}{KT}\left\{\frac{¥«-~«}{¥~-¥}-\cdot{}^{3}\right\}}; C^{*2}_{\ 2} = C^{*3}_{\ 4} = e^{\frac{1}{KT}\left\{\frac{«_3-¢«}{~¢-¥}-\cdot{}^{*}\right\}};$$

$$C^{*3}_{\ 3} = C^{*2}_{\ 3} = e^{\frac{1}{KT}\left\{\frac{«_3-¢«}{~¢-¥}-\cdot{}^{*}_{3}\right\}}; C_4^4 = E^{\frac{1}{KT}\left\{\frac{~«_c-«}{}-\cdot\right\}};$$

$$C^{*4}_{\ 4} = e^{-\frac{1}{KT}\left\{«_5+\cdot{}^{*}\right\}}; \hat{C}^{\ 4} = e^{-\frac{1}{KT}\left\{\frac{«-~«_5}{}-\cdot{}^{\wedge}\right\}}; C^{*4}_{\ 5} = e^{-\frac{1}{KT}\left\{«_5+\cdot{}^{*}_{5}\right\}};$$

Крім того, задаємо $C_5^* / _{X=\infty} = C_0^*$; та $\hat{C} / _{X=\infty} = 0$

Необхідно ще записати умови, що визначають швидкості руху границь: $\dot{G}_k^I(t)$ – швидкість руху i-ї границі в системі відліку, що пов'язана з К-м шаром, $I_k^I(t)$ – потік точкових дефектів по осі Х на i-й границі в К-му шарі в системі відліку, що пов'язана з К-м шаром.

Розглянемо рух нульової границі в системі відліку, що пов'язана з першим шаром. Число вакансій **А**, що утворяться на одиничній площадці нульової границі за час **dt,** дорівнює $J_1^0 dt + C_1^0 \left| dG_1^0 \right|$.

Кількість комірок фази $A_\circ B_\pm$, що вступили в реакцію за рівнянням (1) дорівнює $\frac{° - 1}{\circ}\left[J_1^{\ 0} dt + C_1^{\ 0} N \left| d\, G_1^{\ 0} \right|\right]$.

Як витікає з рівняння (1), на число °£, що визначає кількість комірок з вакансіями, припадає *(° – 1)*£ «правильних» комірок, які також вступили в реакцію. Просування границі можна записати як:

$$\left| d\, G_1^{\ 0} \right| = (1 - \frac{° - 1}{\circ})\left[J_1^{\ 0} dt + C_1^{\ 0} N_1 \left| d\, G_1^{\ 0} \right|\right] \cdot \mu_1;$$

З цього рівняння випливає, що $J_1^0 \mu_1 = -(° - C_1^0)\dot{G}_1^0$;

Після операції лінеаризації отримуємо граничну умову:

$$D_1 \frac{\partial C_1}{\partial X} = ° G_1^{\ 0}.$$

Очевидно, реакція (2) підстроювання (зростання) шару не дає.

Для першої границі введемо величину $\tilde{j}$, якою позначимо кількість комірок фази $A_{\circ}B_{\pm,}$, що вступають у реакцію за формулою (4) за одиницю часу на одиничній площадці, а також величину j^{*}, що відповідає кількості комірок фази $X_{\sim}A$ у реакції (5). Баланс вакансій B и A відповідно можна записати так:

$$\frac{\pm}{\circ + \pm - 1}\tilde{j}\,dt = \tilde{C}_1^1 N_1 dG_1^1 - \tilde{J}_1^1 dt\,;$$

$$J_1^1 dt + \frac{\circ}{\circ + \pm - 1}\tilde{j}\,dt + \frac{}{\sim + \quad - 1} j^{*} dt = J_2^1 dt + C_1^1 N_1 dG_1^1 + C_2^1 N\left|dG_2^1\right|;$$

Перше рівняння означає, що за час dt по реакції (4) утворилося $\frac{\pm}{\circ + \pm - 1}\tilde{j}\,dt$ вакансій, що залишають першу границю проти осі $X\,(-\tilde{J}_1^1 dt)$, та частково «осідають» у плівці першої речовини, що утворилася та за цей час досягла товщини $dG_1^1(\tilde{C}_1^1 N_1 dG_1^1)$.

Друге рівняння означає, що вакансії **А**, що прийшли на першу границю по осі X ($J_1^1 dt$) и утворилися по реакціях (4) і (5), це відповідно $\frac{\circ}{\circ + \pm - 1}\tilde{j}\,dt$ та $\frac{}{\sim + \quad - 1} j^{*} dt$, переміщуються у другий шар ($J_2^1 dt$) та залишаються в утворених плівках першої та другої речовини $(C_1^1 N_1 dG_1^1 + C_2^1 N\left|dG_1^1\right|)$. Зсув границі в різних системах відліку записуємо як $dG_1^1 = (\frac{\pm}{\circ + \pm - 1} + \frac{\circ}{\circ + \pm - 1} - 1)\tilde{j}\,dt\mu_1 = \frac{\tilde{j}\,dt\mu_1}{\circ + \pm - 1}$ та $\left|dG_2^1\right| = \frac{j^{*}\,dt\,\mu}{\sim + \quad - 1}$.

Відзначимо, що dG_1^1 обумовлено протіканням реакції (4), dG_2^1 – протіканням реакції (5), реакція (3) зберігає кількість комірок обох речовин і не впливає на зростання шарів. Пересування dG_1^1, наприклад, виходить як добуток збільшення кількості комірок фази $A_{\circ}B_2$ за час dt на одиничній площадці першої границі та об’єму, який займає один осередок. Потрібне збільшення можна визначити, якщо знайти кількість комірок фази $A_{\circ}B_2$ з вакансіями A и

B, що утворяться по реакції (4) ($\frac{\circ}{\circ + \pm - 1}\tilde{j}\,dt + \frac{\pm}{\circ + \pm - 1}\tilde{j}\,dt$) без числа «правильних» комірок $\tilde{j}\,dt$, що вступили в реакцію.

Крайові умови при $X = G_2^1(t)$ такі:

$$D^{*}\,\frac{\partial C_2^{*}}{\partial x} = \sim \dot{G}_2^1$$

$$N_1\left\{-D_1\frac{\partial C_1}{\partial x} + \frac{\circ}{\pm}\tilde{D}\frac{\partial \tilde{C}}{\partial x}\right\} = N\left\{-D\frac{\partial C_2}{\partial x} + \quad G_2^1\right\} \tag{15}$$

Позначимо через $V_{ik}(t)$ швидкість руху $i^{\text{-го}}$ шару як цілого в системі відліку, що пов’язана з К$^{\text{-м}}$ шаром. Тоді:

$$V_{1,2} = \dot{G}_2^0 - \dot{G}_1^0 = \dot{G}_2^1 - \dot{G}_1^1 = \dot{G}_2^1 - \frac{1}{\pm}\tilde{D}\frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \tag{16}$$

Переходячи в систему відліку, пов’язану з другим шаром, маємо таку крайову умову на нульовій границі:

$$\frac{1}{\circ}D_1\frac{\partial C_1}{\partial x} - \dot{G}_2^0\Big|_{x=G_2^0(t)} = \frac{1}{\circ}\tilde{D}\frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} - \frac{1}{\sim}D^{*}\frac{\partial C_2^{*}}{\partial x}\Big|_{x=G_2^1(t)} \tag{17}$$

Зазначу, що була врахована незалежність результату диференціювання від того, по координаті якої системи відліку береться похідна.

Розглянемо рух другої границі. Позначимо через **j** число вакансій **A**, що зникають на одиничній площадці другої границі в одиницю часу за реакцією (8), а через **j*** – кількість вакансій **X**, що народжуються по реакції (9). Рівняння балансу вакансій **A** та **X** відповідно можна записати так:

$$J_2^2 dt + C_3^2 N_3 dG_3^2 = jdt + J_3^2 dt + C_2^2 N dG_2^2$$

$$-J^{*2}_3 dt + j^{*}dt + C^{*2}_3 N_3 dG_3^2 = -J^{*2}_2 dt + C^{*2}_2 N dG_2^2$$

Просування границі в двох системах відліку становить:

$$\frac{1}{\sim ¢\ -¥}(\sim j + \ \ j^{*})\mu_{3} dt \ = dG_{3}^{2}$$

$$\left[(\frac{¥ + \sim ¢\ -¥}{\sim ¢\ -¥} - 1)\, j + (\frac{¥\ \ -\sim ¢\ + ¢}{\sim ¢\ -¥} + 1)\, j^{*}\right]\mu dt = dG_{2}^{2}$$

Крайова умова при $x = G_{2}^{2}(t)$ виглядає так:

$$¥\left(\frac{N_3}{N} D_3 \frac{\partial C_3}{\partial x} - D\frac{\partial C_2}{\partial x}\right) + ¢\left(D^{*}\frac{\partial C_2^{*}}{\partial x} - \frac{N_3}{N} D_3^{*}\frac{\partial C_3^{*}}{\partial x}\right) = (\sim ¢ - ¥\ \ )\dot{G}_2^2 \qquad (18)$$

$$V_{1,2} = \dot{G}_2^2 - \dot{G}_3^2 = \dot{G}_2^2 + \frac{1}{\sim ¢ - ¥}\left\{\sim\left(\frac{N}{N_3} D\frac{\partial C_2}{\partial x} - D_3\frac{\partial C_3}{\partial x}\right) + \ \left(D_3^{*}\frac{\partial C_3^{*}}{\partial x} - \frac{N}{N_3} D^{*}\frac{\partial C_2^{*}}{\partial x}\right)\right\} \qquad (19)$$

Для інших границь легко отримати аналогічні результати:

- для $x = G_4^3(t)$:

$$¥\left(\frac{N_3}{N} D_3 \frac{\partial C_3}{\partial x} - D\frac{\partial C_4}{\partial x}\right) + ¢\left(D^{*}\frac{\partial C_4^{*}}{\partial x} - \frac{N_3}{N} D_3^{*}\frac{\partial C_3^{*}}{\partial x}\right) = (\sim ¢\ -¥\ \ )\dot{G}_4^3 \qquad (20)$$

$$V_{3,4} = \dot{G}_4^3 + \frac{1}{\sim ¢\ -¥}\left[\sim\left(\frac{N}{N_3} D\frac{\partial C_4}{\partial x} - D_3\frac{\partial C_3}{\partial x}\right) + \ \left(D_3^{*}\frac{\partial C_3^{*}}{\partial x} - \frac{N}{N_3} D^{*}\frac{\partial C_4^{*}}{\partial x}\right)\right] \qquad (21)$$

- для $x = G_4^4(t)$:

$$D\frac{\partial C_4}{\partial x} + \frac{N_5}{N}\hat{D}\frac{\partial \hat{C}}{\partial x} = \ \ \dot{G}_4^4 \qquad (22)$$

$$V_{5,4} = \dot{G}_4^4 \left(1 - \sim \frac{N}{N_5} \right) + D^* \frac{\partial C_4^*}{\partial x} - D_5^* \frac{\partial C_5^*}{\partial x} \qquad (23)$$

Відзначу, що на кожній границі можна взяти за основу таке ж число інших хімічних реакцій, що виходять з попередніх шляхом лінійних комбінацій, але це зовсім не змінює крайових умов і швидкостей, що розраховані за формулами (14) – (23). Аналогічні висновки можна зробити про напрямки протікання реакцій, знаки потоків та зсуви границь.

Список літератури: **1.** *Tatemoto, K.; Ono, Y.; Suzuki, R. O.* Silicide coating on refractory metals in molten salt. // Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2005. – V. 66. – Iss. 2 – 4. – P. 526 – 529. **2.** *J. J. Petrovic.* Toughening Strategies for MoSi2-Based High Temperature Structural Silicides. // Intermetallics, 2000. – V. 8. – P. 1175 – 1182. **3.** *Нечипоренко Е.П., Петриченко А.П., Павленко Ю.Б.* Защита металлов от коррозии. – Харків: «Вища школа», 1985. – 112 с. **4.** High Temperature Structural Silicides. // Pros. of the First Hihg Temperature Structural Silicides Workshop, USA, 1991 – Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 1992. – 278 p. **5.** *Гершинский А.Е., Ржанов А.В., Черенков Е.И.* Тонкопленочные силициды в микроэлектронике. // Микроэлектроника, 1982. – Т. 2. – Вып. 2. – С. 83 – 94. **6.** *Змий В.И., Руденький С.Г., Ковтун Н.В., Карцев Н.Ф.* Активированная вакуумная химико-термическая обработка как способ получения многоцелевых защитных покрытий на металлических и углеродных материалах. // Порошковая металлургия, 2003. – № 5/6. – С. 120 – 126. **7.** *В.И. Змий, С.Г. Руденький*. Особенности вакуумного активированного диффузионного насыщения металлов: термодинамика, механизм и кинетика. // Металлофизика и новейшие технологии, 1998. – Т. 20. – № 10. – С. 69 – 75. **8.** *J.K. Yoon, K.H. Lee, G.H. Kim, J.K. Lee, J.M. Doh, K.T. Hong*. Growth Kinetics of $MoSi_2$ Coating Formed by a Pack Siliconizing Process. // Electrochem. Soc., 2004. – V. 151. – Iss. 6. – P. B309 – B318. **9.** *J. H. Weaver, V. L. Moruzzi, F. A. Schmidt*. Experimental and theoretical band-structure studies of refractory metal silicides. // Phys. Rev., 1981. – B. 23. – Iss. 6. – P. 2916 – 2922. **10.** *Слезов В.В., Танатаров Л.В.* О диффузионной кинетике роста слоев интерметаллических соединений. // Препринт ХФТИ, 1969. – № 69 – 11.

Надійшла до редколегії 12.05.08

УДК 666.762.11:666.762.8

Л.А. АНГОЛЕНКО, канд. техн. наук,
Г.Д. СЕМЧЕНКО, докт. техн. наук, ***С.В. ТИЩЕНКО***,
Е.Е. СТАРОЛАТ, ***В.А. ДЕНИСЕНКО***, НТУ «ХПИ»

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕТОЧНЫХ МАСС КОМПОЗИЦИИ Al_2O_3 – SiC – C НА АЛЮМОХРОМФОСФАТНОЙ СВЯЗКЕ