

01;11

Адгезионно-диффузионное формирование многослойной стенки жидкометаллического проточного тракта blankets термоядерного реактора

© И.В. Витковский,¹ Л.Ю. Фроленкова,² В.С. Шоркин²

¹ Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vitkoviv@sintez.niiefa.spb.su

² Государственный университет, учебно-научно-производственный комплекс, 302020 Орел, Россия
e-mail: vshorkin@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 19 октября 2011 г.)

Приведена методика расчета адгезионно-диффузионного процесса формирования многослойной металло-керамической структуры. Актуальность обоснована требованиями к стенке проточного тракта жидкометаллического blankets термоядерного реактора. Связаны параметры адгезионно-диффузионного процесса: давление, температура, время выдержки, физические свойства материалов, а также характеристики прочности получаемого композита — степень неполноты адгезионного контакта, энергия адгезии, энергия и сила когезии. Результаты проиллюстрированы примером расчета параметров формирования многослойной металло-керамической структуры и ее прочности применительно к жидкометаллическому blankets термоядерного реактора.

Введение

Адгезионно-диффузионные процессы лежат в основе формирования многослойных металлокерамических структур, применение которых в качестве стенки проточной части жидкометаллического blankets термоядерного реактора (ТЯР) представляется наиболее вероятным путем решения проблемы уменьшения магнитогидродинамических (МГД) потерь [1–4].

В многослойном канале между теплоносителем (литием или литий-свинцом) и основным конструкционным материалом (соответственно) из сплава типа ванадий-хром-титан (V–Cr–Ti) или EUROFER 97 (EF97) располагается электроизоляционный барьер. Он включает в себя нитрид или окись алюминия (AlN, Al₂O₃) и предохраняющий его от воздействия теплоносителя тонкий защитный слой из сплава V–Cr–Ti, в случае литиевого или молибдена (Mo) (возможно, ниобия (Nb)), для литий-свинцового теплоносителя, а также слои, например из хрома (Cr), улучшающие адгезию между ними.

Такая структура выполняется в следующем порядке. На неконтактирующую с теплоносителем поверхность защитного слоя вакуумно-дуговым осаждением последовательно наносятся: слои хрома (Cr) и изолятора из AlN или Al₂O₃, далее следует слой Cr, сформированный по той же технологии, и основной конструкционный материал blankets. При этом улучшающие адгезию слои должны одновременно обеспечивать целостность структуры и не нарушать ее электроизоляционных свойств, а защитный слой должен иметь толщину, одновременно

обеспечивающую требуемый ресурс работы blankets и максимально возможное сопротивление токам, индуцированным в жидком металле и замыкающимся через этот слой.

Вполне понятно, что отсутствие теоретического обоснования технологических параметров и режимов процессов формирования металлокерамической структуры сдерживает прогресс в создании макетов, моделей и конструкции blankets в целом.

Заметим, что на настоящий момент весьма остро стоит проблема определения параметров адгезионно-диффузионного процесса (диффузионной сварки) при формировании цельной структуры.

Известно, что процесс диффузионной сварки заключается в одновременном сжатии соединяемых элементов давлением p_c при температуре T_c в течение времени τ_c . Ниже приведены теоретические соотношения, устанавливающие связь между этими параметрами с учетом физических характеристик материалов и ограничений, обусловленных особенностями конструкции стенки жидкометаллического blankets ТЯР.

Вопросы адгезии применительно к конструкции жидкометаллического blankets достаточно полно разработаны и представлены в работах [2–4]. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать их конспективно.

Что касается диффузионного процесса, то здесь следует иметь в виду требования к цельности и ресурсу конструкции при сохранении функциональных свойств электроизоляционного барьера. Это может быть обеспечено только правильностью выбора толщины слоев и параметров диффузионной сварки.

1. Основные положения и допущения расчетной модели адгезионно-диффузионного процесса для идеальных материалов, базирующейся на результатах работ [5–23]

1.1. Каждое из контактирующих тел $B_{(j)}$ выделено из тела $\Omega_{(j)}$, значительно превосходящего $B_{(j)}$ по размерам (бесконечная среда), $j = 1, 2$ — номер тела.

1.2. Материал $\Omega_{(j)}$ является сплошным, однородным, изотропным, упругим, недеформированным с известными физическими свойствами. Имеет место парное и тройное взаимодействие частиц $dB_{(j)}$, $dB_{(j)1}$, $dB_{(j)2}$ с объемами $dV_{(j)}$, $dV_{(j)1}$, $dV_{(j)2}$ как тела $\Omega_{(j)}$, так и тела $B_{(j)}$, характеризующиеся соответственно потенциалами $\Psi_{(j)}^{(2)}(\mathbf{r}_{(j)}, \mathbf{l}_{(j)1})$ и $\Psi_{(j)}^{(3)}(\mathbf{r}_{(j)}, \mathbf{l}_{(j)1}, \mathbf{l}_{(j)2})$, где $\mathbf{r}_{(j)}$, $\mathbf{r}_{(j)1}$ и $\mathbf{r}_{(j)2}$ — радиусы-векторы взаимодействующих частиц, $l_{(j)1} = |\mathbf{l}_{(j)1}| = |\mathbf{r}_{(j)1} - \mathbf{r}_{(j)}|$ и $l_{(j)2} = |\mathbf{l}_{(j)2}| = |\mathbf{r}_{(j)2} - \mathbf{r}_{(j)}|$ — расстояния между ними.

1.3. Свободная поверхность $A_{(j)}$, ограничивающая объемом $V_{(j)}$, занимаемый телом $B_{(j)}$, образуется мгновенно в изотермическом, обратимом процессе.

1.4. Контактующие тела полубесконечны и в отсеченном состоянии занимают области, описываемые в прямоугольной декартовой системе координат (x_1, x_2, x_3) неравенствами:

$$V_{(1)}: \quad 0 < x \equiv x_1 < +\infty, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty;$$

$$V_{(2)}: \quad -\infty < x \equiv x_1 < 0, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty,$$

а поверхностью их контакта без учета шероховатости A_a является плоскость

$$A_a: \quad x \equiv x_1 = 0, \quad -\infty < x_2, x_3 < +\infty.$$

1.5. Затраченная на формирование поверхности $A_{(j)}$ работа $G_{(j)}$ преобразуется в суммарную поверхностную энергию тела $B_{(j)}$ и отделенной от него части $C_{(j)} = \Omega_{(j)} - B_{(j)}$, таким образом, что приращение свободной энергии $\Delta E_{(j)}$ тела $B_{(j)}$:

$$\Delta F_{(j)} = G_{(j)}/2 = \int_{A_{(j)}} W_{p(j)} dA_{(j)}, \quad (1)$$

где $W_{p(j)}$ — поверхностная энергия тела $B_{(j)}$.

Учитывая, что при мгновенном выделении $B_{(j)}$ из $\Omega_{(j)}$ у частиц $dB_{(j)}$ тела $B_{(j)}$ изменяется только множество соседей, потенциально взаимодействующих с ними, опуская на данном этапе индексы (j) , (1), можно запи-

сать в виде

$$\int_A W_p dA = \int_V \left[\int_{\Omega} \Psi^{(2)}(\mathbf{r}, l_1) dV_1 - \int_V \Psi^{(2)}(\mathbf{r}, l_1) dV_1 \right] dV + \int_V \left[\int_{\Omega} dV_1 \int_{\Omega} \Psi^{(3)}(\mathbf{r}, l_1, l_2) dV_2 - \int_V dV_1 \int_V \Psi^{(3)}(\mathbf{r}, l_1, l_2) dV_2 \right].$$

Здесь

$$\Psi^{(2)}(\mathbf{r}, l_1) = P(\mathbf{r}) [\exp(-2\beta(\mathbf{r})l_1) - 2 \exp(-\beta(\mathbf{r})l_1)]$$

— потенциал взаимодействия частицы dB с частицей dB_1 ;

$$\Psi^{(3)}(\mathbf{r}, l_1, l_2) = H(\mathbf{r}) [\exp(-2\beta(\mathbf{r})l_1) - 2 \exp(-\beta(\mathbf{r})l_1)] \times [\exp(-2\beta(\mathbf{r})l_2) - 2 \exp(-\beta(\mathbf{r})l_2)]$$

— потенциал взаимодействия частицы dB с частицами dB_1 и dB_2 , где $\beta(\mathbf{r})$, $P(\mathbf{r})$ и $H(\mathbf{r})$ — параметры, выраженные через среднее межатомное расстояние $l_0(\mathbf{r}) = 1/\sqrt[3]{n(\mathbf{r})}$ и определяемые из системы уравнений

$$\left(\frac{12\pi}{5[\beta(\mathbf{r})]^3} \right) P(\mathbf{r}) + \left(\frac{185\pi^2}{[\beta(\mathbf{r})]^6} \right) H(\mathbf{r}) = \lambda(\mathbf{r}),$$

$$\left(\frac{12\pi}{5[\beta(\mathbf{r})]^3} \right) P(\mathbf{r}) + \left(\frac{120\pi^2}{[\beta(\mathbf{r})]^6} \right) H(\mathbf{r}) = \mu(\mathbf{r}),$$

$$\beta(\mathbf{r}) = \frac{45\sqrt{3}}{2l_0(\mathbf{r})}$$

при известных распределениях $n(\mathbf{r})$, $\lambda(\mathbf{r})$, $\mu(\mathbf{r})$. Здесь $n(\mathbf{r})$ — число частиц (атомов, молекул) в единице объема окрестности точки с радиусом-вектором \mathbf{r} , для которой определяются значения этих параметров, и параметры Ламэ $\lambda(\mathbf{r})$, $\mu(\mathbf{r})$.

1.6. Энергия адгезии F_a при полном механическом и адгезионном контактах определяется как

$$F_a = \frac{W_{p(1)}W_{p(2)}(k_{(1)} + k_{(2)})^2}{W_{p(1)}k_{(2)}^2 + W_{p(2)}k_{(1)}^2}, \quad k_{(j)} = \frac{\nu_{(j)}}{1 - \nu_{(j)}}, \quad j = 1, 2.$$

Здесь j — ранее опущенный индекс, $\nu_{(j)}$ — коэффициент Пуассона.

1.7. Величина относительной площади адгезионного контакта η , обусловленная различием свойств материалов, определяется выражением

$$\eta = \left(1 + \frac{2W_{\eta\eta} - W_{\eta(1-\eta)}}{2W_{(1-\eta)(1-\eta)} - W_{\eta(1-\eta)}} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь

$$W_{\eta\eta} = \frac{3(\pi_{0(2)} - \pi_{0(1)})^2}{4(A_{(1)}b_{(1)} + A_{(2)}b_{(2)})},$$

$$W_{\eta(1-\eta)} = -\frac{(\pi_{0(2)} - \pi_{0(1)})^2}{2(A_{(1)}b_{(1)} + A_{(2)}b_{(2)})},$$

$$W_{(1-\eta)(1-\eta)} = \frac{3\pi_{0(1)}^2}{4A_{(1)}b_{(1)}} + \frac{3\pi_{0(2)}^2}{4A_{(2)}b_{(2)}},$$

где

$$A_{(j)} = \frac{E_{(j)}}{2} \frac{1 - \nu_{(j)}}{(1 + \nu_{(j)})(1 - 2\nu_{(j)})}, \quad b_{(j)} = \frac{l_{0(j)}}{2\sqrt{3}},$$

$$\pi_{0(j)} = \frac{2\mu_{(j)}}{\beta_{(j)}},$$

$E_{(j)}$ — модуль Юнга.

Для неполного адгезионного контакта

$$F_a = \eta [\eta W_{\eta\eta} + (1 - \eta)W_{\eta(1-\eta)} - (2 - \eta)W_{(1-\eta)(1-\eta)}]. \quad (3)$$

1.9. На процесс диффузии не влияют градиенты температуры, давления и деформаций.

1.10. Процесс диффузии происходит вдоль нормали к поверхности контакта свариваемых тел и описывается уравнением Фика

$$\frac{\partial \rho_{(ij)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{(ij)} \frac{\partial \rho_{(ij)}}{\partial x} \right). \quad (4)$$

Здесь $D_{(ij)}$ — коэффициент диффузии материала тела $B_{(i)}$ в материал тела $B_{(j)}$; $\rho_{(ij)}$ — плотность материала тела $B_{(i)}$ в материале тела $B_{(j)}$; $i = 1, 2, j = 1, 2$ — условные номера тел;

$$D_{(ij)} = D_{0(ij)} \exp \left(-\frac{U_{(ij)}}{kT} \right),$$

где $D_{0(ij)}$ — коэффициент диффузии при бесконечно большой температуре или равной нулю энергии активации; $U_{(ij)}$ — энергия активации одной диффундировавшей частицы в материале-матрице; $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K (зависимость коэффициента диффузии от давления и концентрации диффундировавшего вещества не учитывается, а значение параметров $D_{0(ij)}$ и $U_{(ij)}$ для однокомпонентных материалов или химических соединений определяются из справочной литературы или на основании опытов).

2. Учет факторов, влияющих на адгезионно-диффузионный процесс в конструкционных материалах

К особенностям конструкционных материалов в зоне диффузионного шва относятся: изменяющееся с течением времени соотношение содержания компонент; наличие микротрещин и пористости материала; начальная шероховатость контактирующих поверхностей.

2.1. Для реальных сред, моделирующих сплав, значения $D_{0(ij)}$, $U_{(ij)}$, модуля Юнга E , сдвига G , предела

текучести σ_y и количество n атомов в единице объема в любой момент времени (параметра R) определяются по соотношению

$$R = \sum_{k=1}^K \gamma_k R_k, \quad (5)$$

где γ_k — объемная доля компоненты в сплаве, k — условный номер компоненты, K — количество компонент, R_k — значение параметра компоненты сплава, зависящие от температуры процесса и пористости материала.

2.2. Шероховатость поверхности свариваемых тел моделируется как множество одинаковых треугольных призм с углом при вершине, равным $\pi/2$, заданной высоты $h_0 = R_z$ и ребром, параллельным плоскости контакта, длиной $L_c = 4h_0$, где R_z — средняя высота неровностей профиля [18–20]. Действие одной поверхности на другую реализуется через гипотетическую жесткую прокладку, поэтому предполагается, что все неровности поверхностей одновременно вступают в контакт.

2.3. Линейная интенсивность M силы, действующей на каждую призму, определяется как

$$M = \frac{p_c^0}{N_c L_c} = 2p_c^0 h_0 = \frac{\pi \sigma_y r_0}{2},$$

где p_c^0 — давление сжатия, при котором начинается процесс пластического течения шероховатостей и вступления слоев в адгезионный контакт; $N_c = \frac{1}{8} h_0^{-2}$ — число микронеровностей на единице площади; L_c — длина микронеровностей; σ_y — предел текучести; $r_0 \approx 10b$ [21–23].

Величины давлений, обеспечивающих полный механический контакт свариваемых тел p_c^0 и их полное пластическое состояние p_c , определяются по выражениям, полученным из условия перехода в пластическое состояние одного из пары диффузионно-свариваемых материалов

$$p_c^0 = \frac{30\pi \sigma_y}{\beta R_z},$$

$$p_c = \frac{\pi}{8} \sigma_y. \quad (6)$$

2.4. Длительность процесса диффузионной сварки определяется требованием к прочности сварного соединения. Максимальное значение прочности характеризуется энергией когезии частей образовавшегося тела [11]

$$\vartheta = 2W_p. \quad (7)$$

Сила когезии \mathbf{f}_k определяется как сумма всех внутренних сил, действующих со стороны частиц тела $B_{(i)}$ на частицы тела $B_{(j)}$. Аналогично [11,12]

$$\mathbf{f}_k = - \int_{V_{(i)}} dV_{(i)} \int_{V_{(j)}} \left[\nabla_1 \Psi^{(2)} + \int_{V_{(j)}} (\nabla_1 \Psi^{(3)} + \nabla_2 \Psi^{(3)}) dV_{(j)2} \right] dV_{(j)1},$$

где $\nabla_m \Psi^{(\alpha)} = d\Psi^{(\alpha)} / dr_m$ — градиент потенциала $\Psi^{(\alpha)}$ при изменении \mathbf{r}_m ; $m = 1, 2$; $\alpha = 2, 3$.

Таблица 1. Результаты расчета разрушающего напряжения σ_{uc} и теоретического предела прочности σ_{tc} некоторых из изготавливаемых промышленностью материалов и известные значения разрушающего напряжения σ_u и теоретического предела прочности σ_t

Материал	$\sigma_t \cdot 10^{10}$, Па	$\sigma_{tc} \cdot 10^{10}$, Па	$\sigma_u \cdot 10^9$, Па	$\sigma_{uc} \cdot 10^9$, Па
Al	0.9012 [14,26]	0.9799	0.050 [14]	0.07
Cr	3.080 [14,26]	4.470	0.410 [14]	0.37
V	3.414 [14,26]	2.825	0.220 [14]	0.17
Ti	3.397 [14,26]	1.554	0.240–0.260 [14]	0.21
Mo	3.913 [14,26]	4.048	0.800–1.200 [14]	0.53

Полагая влияние тройного взаимодействия несущественным, выражение для расчета напряжения сил когезии — теоретического предела прочности в точке с радиусом-вектором \mathbf{r} имеет вид

$$\sigma_{tc}(\mathbf{r}) = \frac{|\mathbf{f}(\mathbf{r})|}{A} = \frac{6\pi P(\mathbf{r})}{4\beta(\mathbf{r})^3},$$

где A — площадь контакта поверхности A_a .

С учетом наличия микротрещин [3,24–26] выражение для определения разрушающего напряжения σ_{uc} вытекает из итерационного решения системы уравнений [3,25]

$$\eta^* = \left(1 + \frac{\sigma_{tc}^2 s}{4W_p E}\right)^{-1},$$

$$4 \frac{\sigma_{uc}^2}{2E} s^3 = 4s^2(1 - \eta^*)^2 W_p + 4\eta^* \frac{\sigma_{tc}^2}{2E} s^3,$$

где η^* — относительная площадь когезионного контакта свариваемых материалов в конце процесса сварки; $2s$ — расстояние между параллельными слоями микротрещин, возникающих при растяжении материала напряжением σ_{uc} ; $2\eta^* s \approx 2b = l_0/\sqrt{3}$ — соизмеримый с межатомным расстоянием параметр l_0 [21–23,27].

В табл. 1 приведены для сопоставления результаты расчетов разрушающего напряжения и теоретического предела прочности и их известные величины для выпускаемых промышленностью материалов.

3. Пример расчета параметров диффузионной сварки

Рассмотрим кандидатные для многослойной стенки бланкета пары материалов: Mo–Cr; Nb–Cr; V4Cr4Ti–Cr; EF97–Cr; AlN–Cr; Al₂O₃–Cr.

Температура процесса — 950°C (максимально возможное значение в условиях эксперимента).

Предел текучести при 950°C с пористостью 10% для:

Mo — $\sigma_{T(\text{Mo})} = 70 \cdot 10^6$ Па; Cr — $\sigma_{T(\text{Cr})} = 117 \cdot 10^6$ Па;

V4Cr4Ti (индекс (VCT)) — $\sigma_{T(\text{VCT})} = 123 \cdot 10^6$ Па;

EF97 — $\sigma_{T(\text{EF97})} = 84 \cdot 10^6$ Па;

Nb — $\sigma_{T(\text{Nb})} = 78 \cdot 10^6$ Па [14–17, 28].

Полученные нами экспериментальные значения коэффициентов диффузии

Cr в: Mo, Nb, V4Cr4Ti, EF97, AlN, Al₂O₃

и Mo, Nb в Cr: $D_{(\text{Cr-Mo})} = 3.64 \cdot 10^{-19}$ м²/с,

$$D_{(\text{Cr-Nb})} = 8.78 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_{(\text{Cr-VCT})} = 7.617 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_{(\text{Cr-EF97})} = 7.02 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_{(\text{Cr-AlN})} = 7.424 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_{(\text{Cr-Al}_2\text{O}_3)} = 6.95 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_{(\text{Mo-Cr})} = 3.15 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_{(\text{Nb-Cr})} = 3.03 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Энергия когезии свариваемых материалов $\vartheta(7)$ —

Mo: $\vartheta_{(\text{Mo})} = 4.40$ Дж/м²; Cr: $\vartheta_{(\text{Cr})} = 4.60$ Дж/м²;

V4Cr4Ti: $\vartheta_{(\text{VCT})} = 5.41$ Дж/м²;

AlN: $\vartheta_{(\text{AlN})} = 4.92$ Дж/м²; EF97: $\vartheta_{(\text{EF97})} = 2.56$ Дж/м²;

Al₂O₃: $\vartheta_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} = 4.83$ Дж/м²; Nb: $\vartheta_{(\text{Nb})} = 2.12$ Дж/м².

Начальным для адгезионно-диффузионного процесса принят момент времени, когда температура равна 950°C, давление равно p_c , взаимной диффузии материалов нет.

Начальное значение относительной площади адгезионного контакта $\eta(2)$ —

Mo с Cr: $\eta_{(\text{Mo-Cr})} = 0.93$;

V4Cr4Ti с Cr: $\eta_{(\text{VCT-Cr})} = 0.72$;

Al с Cr: $\eta_{(\text{Al-AlN})} = 0.96$;

EF97 с Cr: $\eta_{(\text{Cr-EF97})} = 0.70$;

Al₂O₃ с Cr: $\eta_{(\text{Cr-Al}_2\text{O}_3)} = 0.99$;

Nb с Cr: $\eta_{(\text{Cr-Nb})} = 0.77$.

Начальное значение энергии адгезии для случая неполного контакта (3):

Mo с Cr: $F_{a(\text{Cr-Mo})} = 4.47$ Дж/м²;

Таблица 2. Расчетное значение силы когезии (разрушающего напряжения) после завершения адгезионно-диффузионного процесса

Сочетание материалов	Cr–Al ₂ O ₃	Cr–Mo	Cr–Nb	Cr–EF97	Cr–VCT	Cr–AlN
$\sigma_{uc} \cdot 10^9, \text{Pa}$	0.44	0.41	0.31	0.35	0.26	0.47

V4Cr4Ti с Cr: $F_{a(\text{Cr-VCT})} = 2.85 \text{ J/m}^2$;

AlN с Cr: $F_{a(\text{Cr-AlN})} = 4.50 \text{ J/m}^2$;

EF97 с Cr: $F_{a(\text{Cr-EF97})} = 2.72 \text{ J/m}^2$;

Al₂O₃ с Cr: $F_{a(\text{Cr-Al}_2\text{O}_3)} = 4.52 \text{ J/m}^2$;

Nb с Cr: $F_{a(\text{Cr-Nb})} = 3.57 \text{ J/m}^2$.

Величина давления p_c (6) диффузионного процесса для пар материалов —

Cr–VCTi: $p_{c(\text{Cr-VCT})} = 47 \cdot 10^6 \text{ Pa}$;

Cr–AlN: $p_{c(\text{Cr-AlN})} = 47 \cdot 10^6 \text{ Pa}$;

Cr–EF97: $p_{c(\text{Cr-EF97})} = 33 \cdot 10^6 \text{ Pa}$;

Cr–Al₂O₃: $p_{c(\text{Cr-Al}_2\text{O}_3)} = 47 \cdot 10^6 \text{ Pa}$;

Cr–EF97: $p_{c(\text{Cr-EF97})} = 33 \cdot 10^6 \text{ Pa}$;

Cr–Nb: $p_{c(\text{Cr-Nb})} = 31 \cdot 10^6 \text{ Pa}$.

Задавая временной интервал с принятым шагом (в нашем случае $\tau_i = 0.5 \text{ h}$) по выражению (5), определяем состав свариваемых материалов в каждой временной точке и по выражениям (2)–(5) определяем соответственно F_a , η , R и ϑ .

Глубина проникновения $\Delta_{(\xi-\xi)}$ диффундирующего материала ξ в материал ζ определяется из условия

$$\rho_{(\xi-\xi)}(\Delta_{(\xi-\xi)}) = \varepsilon_{(\xi-\xi)},$$

где $\rho_{(\xi-\xi)}(\Delta_{(\xi-\xi)})$ — концентрация материала в материале ζ на глубине $\Delta_{(\xi-\xi)}$; $\varepsilon < 1$ (в наших расчетах принято 0.02) — минимально допустимое относительное содержание диффундирующего материала в матрице основного материала (индексы диффундирующего и основного материалов для простоты опущены).

Расчеты ведутся до выполнения условия

$$F_a \geq \vartheta,$$

на основании которого определяется время диффузионного процесса.

На рис. 1, 2 приведены расчетные относительной площади адгезионного контакта η , энергии адгезии F_a (рис. 1) и глубин проникновения Δ диффундирующего материала в материал, в котором происходит диффузия (рис. 2), в зависимости от времени диффузионной сварки τ .

В табл. 2 представлены расчетные значения силы когезии, полученные по окончании адгезионно-диффузионного процесса соединений материалов.

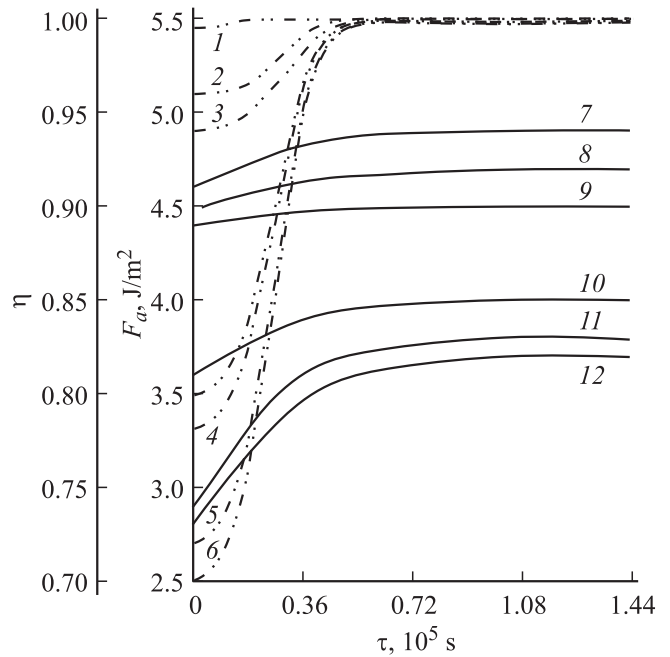


Рис. 1. Параметры адгезии: ($1-6$) и F_a ($7-12$) для соединений Cr с Al₂O₃, AlN, Mo, Nb, V–4Cr–4Ti, EF97 соответственно.

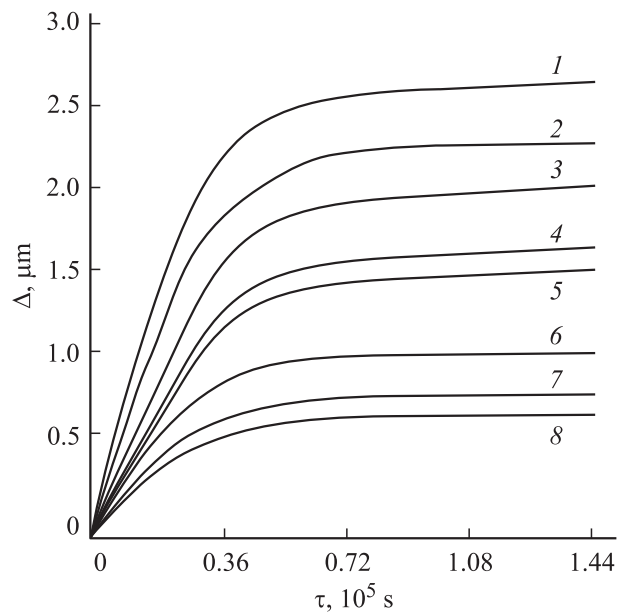


Рис. 2. Глубина проникновения Cr в Nb, V–4Cr–4Ti, AlN, EF97, Al₂O₃, Mo, ($1-6$ соответственно), а также Mo и Nb в Cr (7 и 8 соответственно).

Заключение

Разработана методика расчета адгезионно-диффузионного процесса формирования многослойной металлокерамической структуры, базирующаяся на взаимосвязях параметров процесса, включая: давление, температуру, длительность, физические свойства материалов, а также характеристики прочности получаемого композита.

Результаты расчетов демонстрируют зависимость глубины проникновения диффундирующих материалов, относительной площади адгезионного контакта, энергии адгезии от длительности диффузионного процесса для сочетаний некоторых материалов, кандидатных для blankets ТЯР.

Список литературы

- [1] Kirillov I.R., Kraev N.D., Ostapenko V.P., Rusanov A.E., Vitkovsky I.V. // Proc. of the First International Workshop on Liquid Metal Blanket Experimental Activities. Paris, France, 1997. P. 158–161.
- [2] Vitkovsky I.V., Konev F.N., Shorkin V.S., Kzaev N.D., Rusanov A.E., Khoroshikh V.M., Leonov S.L. // Plasma Devices Oper. 2003. Vol. 11. N 2. P. 81–87.
- [3] Витковский И.В., Конев А.Н., Шоркин В.С., Якушина С.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 6. С. 28–33.
- [4] Витковский И.В., Конев А.Н., Шоркин В.С., Якушина С.И. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 2. С. 11–16.
- [5] Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Азаров А.С. // Материаловедение. 2011. № 2. С. 2–8.
- [6] Ландау Л.Д., Лифшиц В.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1976. 477 с.
- [7] Азаров А.С., Шоркин В.С. // Известие ТулГУ. Сер. Естественные науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. Вып. 1. С. 28–40.
- [8] Азаров А.С., Шоркин В.С. // Сб. тр. 47-й Междунар. конф. „Актуальные проблемы прочности“. Н.-Новгород, 2008. С. 163–165.
- [9] Подстригач Я.С. // Вопросы механики реального твердого тела. 1964. Вып. 2. С. 77–99.
- [10] Князева А.Г. // Тр. Междунар. конф. RDAMM–2001. Спец. выпуск. 2001. Т. 6. Ч. 2. С. 191–196.
- [11] Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М.: Наука, 1965. 405 с.
- [12] Groot C. de, Mazur P. Неравновесная термодинамика / Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 456 с.
- [13] Шермергар Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
- [14] Свойства элементов. Физические свойства. Справочник / Под ред. Е.Б. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 600 с.
- [15] Loomis B.A., Niwiczki L.J., Smith D.L. // Fusion Materials Semiannual Progress Report for Period Ending March 31, 1995. DOE/ER-0313/18. P. 265–272.
- [16] Гарсон А.Л. // Теоретические основы инженерных расчетов. 1975. № 1. С. 1–16.
- [17] Tvergarden V. // Int. J. Struct. 1989. Vol. 25. N 10. P. 1143.
- [18] Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
- [19] Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
- [20] ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения.
- [21] Шоркин В.С. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. 1996. Вып. 54. С. 222–227.
- [22] Деренговский А.Г. Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Машиностроение, 2006. Вып. 12. С. 54–56.
- [23] Reha Artan // Turk. J. Engin. Environ Sci. 2001. Vol. 25. P. 391–403.
- [24] Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. М.: Наука, 1987. 80 с.
- [25] Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 3 (287). С. 3–7.
- [26] Петч Н. Рарушение / Под ред. Г. Либовиц. М.: Мир, 1973. Т. 1. С. 376–420.
- [27] Микаэлян К.Н., Гуткин М.Ю., Айфантис Е.С. // ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 9. С. 1613–1620.
- [28] Pint B.A., Moser Y.L., Tortorelli P.F. // J. Nucl. Mater. 2007. Vol. 367–370. P. 1150–1154.