
Р а з д е л III

ПАЙКА. АДГЕЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ. АДГЕЗИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

УДК 539.23:620.18:661.66:621 79

**Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк, Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова,
С. В. Дукаров, В. Ю. Куликовский, А. А. Оноприенко***

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПЛЕНОК, НАНЕСЕННЫХ НА ОКСИДНЫЕ И КАРБИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИХ СВАРКИ И ПАЙКИ, НА СТРУКТУРНЫЕ И КАПИЛЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК И НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Исследованы структура и морфология металлических нанопленок толщиной 30—100 нм из Ti, Nb, Cr, Ni, нанесенных на высокоглиноземистую керамику и карбид кремния, с использованием сканирующего микроскопа JSM-840 и электронографа EMP-100. Определена смачиваемость этих пленок различной толщины серебром и медью. Получены и испытаны на сдвиг твердофазные соединения Al_2O_3 и SiC, покрытые нанопленками Ti, Nb, Cr и Ni различной толщины через серебряную и медную прокладку, а также паяные соединения никелированных образцов из Al_2O_3 алюминиевым припоем.

Введение

Получение прочных и надежных паяных и сварных соединений неметаллических материалов между собой и с металлами связано с рядом затруднений, вызванных тем, что стекло, керамика, лейкосапфир и другие неметаллы плохо смачиваются большинством металлических припоев, применяемых для получения этих соединений. С целью улучшения смачива-

* Ю. В. Найдич — академик НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; И. И. Габ — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, там же; Б. Д. Костюк — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, там же; Т. В. Стецюк — научный сотрудник, там же; Д. И. Куркова — научный сотрудник, там же; В. Ю. Куликовский — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, там же; А. А. Оноприенко — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, там же; С. В. Дукаров — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Харьковский национальный университет им. В. И. Каразина, г. Харьков.

емости неметаллов припоями используют различные методы, среди которых так называемая “металлизация” поверхности неметаллических материалов. Тонкие однородные пленки металлов на неметаллах, позволяющие формировать особо малые паяльные зазоры, можно получать различными методами: химическим осаждением из растворов, электронно-лучевым и магнетронным напылением. Использование паяльных зазоров малой ширины весьма перспективно, поскольку предполагается, что при малых зазорах между соединяемыми материалами прочность паяного соединения должна быть более высокой.

Так, например, в ряде исследований [1—3] найдено увеличение прочности паяного соединения металлических материалов с уменьшением ширины паяльного зазора. В работах [4, 5] при пайке нитридокремневой керамики использовали паяльные зазоры шириной около 10 мкм. Установлено, что прочность соединений с такими зазорами намного больше, чем у соединений с паяльными зазорами шириной 50—100 мкм.

Следует также отметить, что при соединении, например, керамических материалов между собой через металлическую прослойку нужно учитывать разницу теплового расширения металла прослойки и соединяемых материалов. Разница коэффициентов теплового расширения материалов обуславливает (при изменении температуры вследствие технологических или эксплуатационных факторов) величину напряжений в поверхностных слоях материалов и может привести к снижению прочности соединения или даже к его разрушению. С этой точки зрения преимущество имеет металлическая прослойка меньшей толщины [6].

Смачиваемость припойными сплавами неметаллической поверхности с нанесенной металлической пленкой тугоплавкого металла зависит от толщины пленки [7, 8]. Изучение такой зависимости представляет как теоретический, так и непосредственно практический интерес.

Цель данной работы — исследование структурных и капиллярных (смачиваемость) характеристик нанопленок Ti, Nb, Cr, Ni толщиной 30—100 нм и определение влияния толщины этих пленок на прочностные характеристики покрытых ими Al_2O_3 и SiC, соединенных посредством сварки давлением через серебряную и медную прокладки, а также пайки никелированных образцов Al_2O_3 и SiC алюминиевым припоем.

Материалы и методика эксперимента

В данной работе использовали химический [9, 10], электронно-лучевой [11] методы нанесения металлических пленок, а также метод магнетронного распыления металлов на поверхности неметаллических подложек [12]. Тонкие металлические пленки (30—100 нм) хрома, титана и ниобия наносили на поверхности подложек, изготовленных из алюмооксидной керамики и поликристаллического самосвязанного карбида кремния. При нанесении металлических покрытий на неметаллическую поверхность большую роль играет чистота обработки последней. Обычно при исследовании явлений смачивания и межфазных процессов твердые поверхности материалов обрабатывают до величины шероховатости в пределах 0,01—0,02 мкм. Для выполнения настоящих исследований шероховатость поверхности неметаллических образцов составляла 3—5 нм.

Толщину покрытий определяли оптическим методом с помощью микроинтерферометра МИИ-4 и профилографа “Калибр”. С помощью последнего измеряли высоту ступеньки, образованной поверхностью пленки и непокрытой металлом поверхности подложки. Для улучшения сцепления металлической пленки с неметаллической поверхностью часть покрытий подвергали последующему отжигу. Все пленки отжигали в вакууме $2 \cdot 10^{-3}$ Па при 700 и 950 °С в течение 30 мин, а титановую и ниобиевые пленки, кроме того, отжигали в таком же вакууме при температуре 1200 °С в течение 30 мин.

Методами твердофазного соединения в вакууме через пластичную прокладку из меди и серебра между металлизированными поверхностями неметаллов с приложением давления были приготовлены образцы для испытаний прочности сварных соединений. Образцы представляли собой таблетки $\varnothing$ 8 мм и высотой 4—5 мм, соединенные попарно. Образцы испытывали на сдвиг на гидравлическом прессе в специальном приспособлении.

Результаты эксперимента и их обсуждение

При исследовании структуры нанесенных на керамику и карбид кремния тонких металлических пленок Ti, Nb, Ni и Cr методом дифракции на отражение (электронограф ЭМР-100) было установлено, что пленки всех нанесенных металлов не содержат посторонних фаз (в частности, оксидов) и являются мелкокристаллическими.

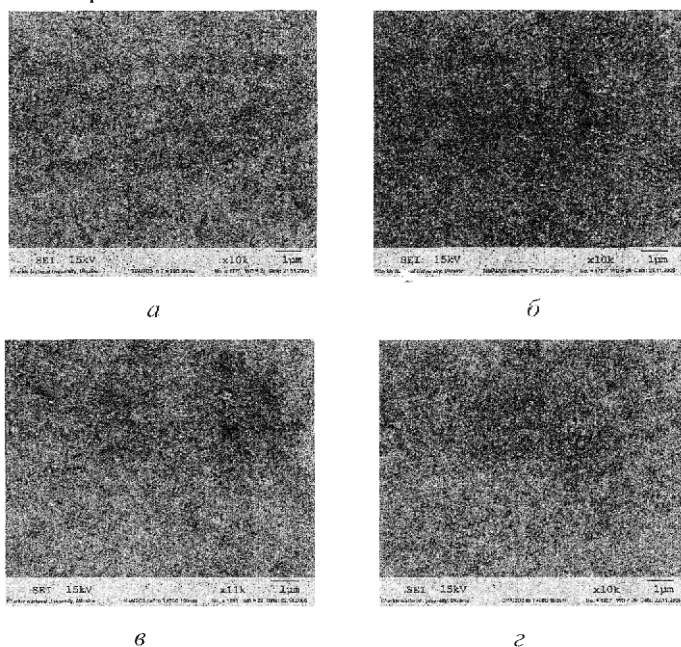


Рис. 1 Фотографии ($\times 10\,000$) поверхностей свеженанесенных металлических нанопленок на алюмооксидную керамику: *а* — пленка титана толщиной 30 нм; *б* — ниобия (75 нм); *в* — никеля (100 нм); *г* — хрома (100 нм)

Fig. 1 Photos ($\times 10\,000$) of fresh metallic nanofilms surfaces deposited on Al_2O_3 ceramics: *a* — titanium film 30 nm thick; *б* — niobium (75 nm); *в* — nickel (100 nm); *г* — chromium (100 nm)

Морфологию полученных пленок (поверхность) изучали с помощью сканирующего микроскопа JSM-840 при различных увеличениях (от 1000 до 10 000). При этом обнаружено, что свеженанесенные пленки всех упомянутых металлов независимо от их толщины в интервале 30—100 нм являются сплошными и достаточно гладкими (рис. 1).

После отжига пленок этих металлов в вакууме при температуре 700 °С в течение 30 мин пленки ниобия и титана на подложках из алюмооксидной керамики не претерпели практически никаких изменений (рис. 2). На пленках хрома и никеля после отжига при 700 °С отмечено изменение их поверхности вызванное, по-видимому, началом процесса их коагуляции (рис. 3). При увеличении температуры отжига до 950 °С пленки титана и ниобия толщиной 50—100 нм на керамике остались без изменений (рис. 4). Никелевая и хромовая пленки на керамике полностью распались на островки (рис. 5), причем на фотографиях видны как собравшиеся в капельки фрагменты пленки, так и участки керамики, полностью освободившиеся от покрытия. Температура отжига большинства пленок была умышленно ограничена 950 °С, поскольку последующую сварку и пайку образцов проводили при температурах, близких к этой. Пленки титана и ниобия на Al_2O_3 подвергали отжигу при температуре 1200 °С. При этом титановая пленка не только распадалась на отдельные участки, но в этих фрагментах пленки произошла рекристаллизация (рис. 6). У более тугоплавкой ниобиевой пленки наблюдались гораздо меньшие изменения, очевидно, ввиду ее лучшей адгезии к Al_2O_3 . Насколько влияют на прочность соединений керамики изменения в поверхности титановой и ниобиевой пленок, происходящие после отжига их при столь высокой температуре, можно будет определить лишь при пайке металлизированной этими металлами керамики высокотемпературными припоями, что выходит за рамки настоящей работы.

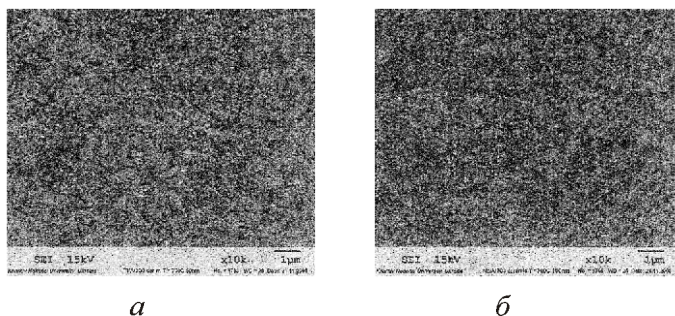


Рис. 2. Фотографии ($\times 10\,000$) поверхностей пленок титана (а) и ниобия (б) толщиной 100 нм на алюмооксидной керамике после отжига в вакууме при температуре 700 °С в течение 30 мин

Fig. 2. Photos ($\times 10\,000$) of titanium (a) and niobium (b) films 100 nm thick surfaces deposited on Al_2O_3 ceramics after annealing in vacuum at 700 °С during 30 min

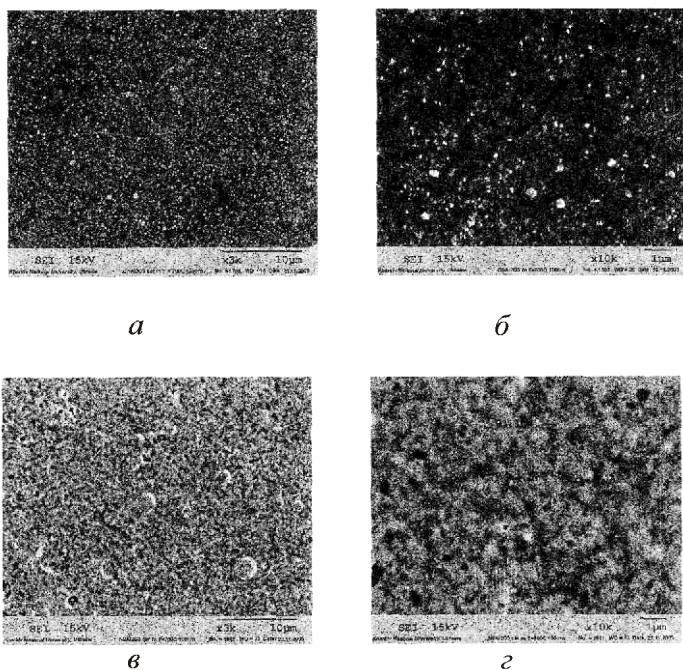


Рис. 3 Фотографии поверхностей пленок хрома (*а, б*) и никеля (*в, г*) толщиной 100 нм на алюмооксидной керамике после отжига в вакууме при температуре 700 °С в течение 30 мин: *а, в* — $\times 3000$; *б, г* $\times 10\,000$

Fig. 3 Photos of chromium (*a, б*) and nickel (*в, г*) films 100 nm thick surfaces deposited on Al_2O_3 ceramics after annealing in vacuum at 700 °C during 30 min: *a, б* — $\times 3000$; *в, г* $\times 10\,000$

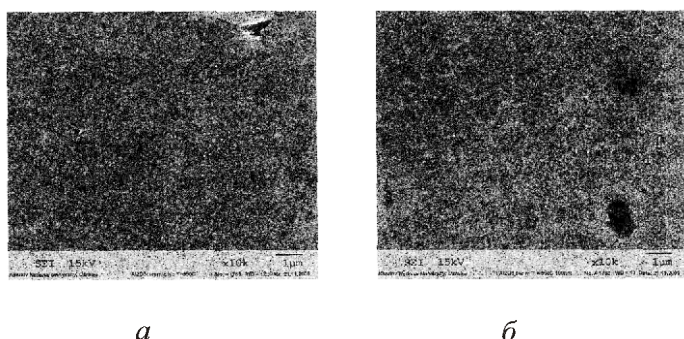
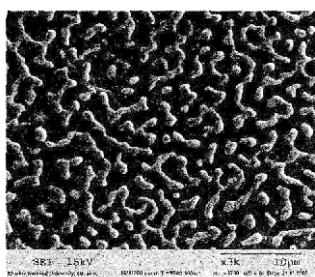
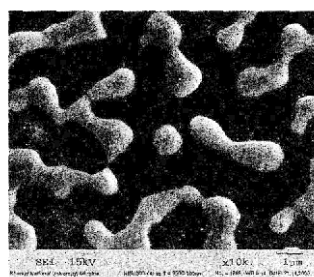


Рис. 4. Фотографии ($\times 10\,000$) поверхностей пленок ниобия (*а*) и титана (*б*) толщиной 100 нм на алюмооксидной керамике после отжига в вакууме при температуре 950 °С в течение 30 мин

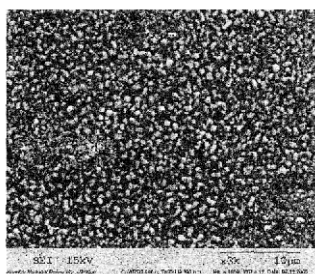
Fig. 4. Photos ($\times 10\,000$) of niobium (*a*) and titanium (*б*) films 100 nm thick surfaces deposited on Al_2O_3 ceramics after annealing in vacuum at 950 °C during 30 min



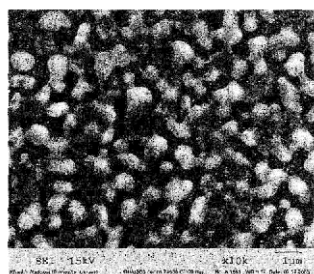
a



б



в



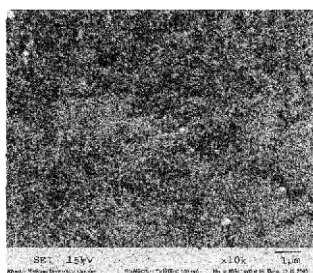
г

Рис. 5. Фотографии поверхностей пленок никеля (*а, б*) и хрома (*в, г*) толщиной 100 нм на керамике после отжига в вакууме при температуре 950 °С в течение 30 мин: *а, в* $\times 3000$; *б, г* $\times 10\,000$

Fig. 5. Photos of nickel (*a, б*) and chromium (*в, г*) films 100 nm thick surfaces deposited on Al_2O_3 ceramics after annealing in vacuum at 950 °C during 30 min: *a, в* $\times 3000$; *б, г* $\times 10\,000$



a



б

Рис. 6. Фотографии ($\times 10\,000$) поверхностей пленок титана (*а*) и ниобия (*б*) толщиной 100 нм на Al_2O_3 после отжига в вакууме при температуре 1200 °С в течение 30 мин

Fig. 6. Photos ($\times 10\,000$) of titanium (*a*) and niobium (*б*) films 100 nm thick surfaces deposited on Al_2O_3 after annealing in vacuum at 1200 °C during 30 min

Объяснить различное поведение металлических нанопленок Ni, Cr, Ti, Nb после отжига можно следующим образом.

Состояние, когда сплошная металлическая пленка равномерно покрывает поверхность неметаллического (в частности, оксидного) материала, может быть либо термодинамически стабильным, либо неравновесным.

С точки зрения практики соединения (пайка, сварка) материалов преимущество имеют сплошные покрытия с высокой адгезией к основе. Но под действием высокого поверхностного натяжения металла покрытия исходная сплошная пленка (после напыления или осаждения из раствора) становится нестабильной при толщинах 5—100 нм в процессе отжига при температурах, когда подвижность атомов металла достаточно высокая, и превращается в островковую, то есть лишь часть поверхности неметаллической основы занята металлом пленки. При этом имеет место приближение системы к равновесному состоянию.

Фактором, препятствующим коагуляции пленки и собиранию ее в отдельные островки, является адгезия металла покрытия к основе. Нами предложен критерий К.

$$K = \frac{W_{\text{Амет-кер}}}{\sigma_{\text{мет}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{Амет-кер}}$ — работа адгезии металла пленки к основе, МДж/м²; $\sigma_{\text{мет}}$ — поверхностное натяжение металла, МДж/м²

Этот критерий определяет как способность пленки сохраняться сплошной (или коагулировать), так и краевой угол смачивания металлом пленки (в жидком состоянии) поверхности основного неметаллического материала в соответствии с уравнением Юнга.

$$\cos\Theta = \frac{W_{\text{А}}}{\sigma_{\text{ж-г}}} - 1, \quad (2)$$

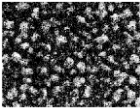
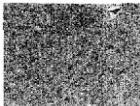
где Θ — краевой угол смачивания, град; $W_{\text{А}}$ — работа адгезии; $\sigma_{\text{ж-г}}$ — поверхностное натяжение на границе жидкость — газ.

Таким образом можно утверждать, что смачивание неметаллической поверхности основы металлом пленки зависит от ее структуры (в данном случае речь идет о так называемом “твердом смачивании”). Обычно в большинстве случаев равновесное значение краевого угла смачивания при распаде пленки на отдельные островки в процессе отжига при температуре ниже температуры плавления металла для реального (практически) времени отжига (десятки минут или 1—2 ч) не достигается. Тем не менее, можно ожидать, что площадь поверхности подложки, занятая островками пленки, при одинаковых условиях коагуляции будет коррелировать с соотношением $W_{\text{Амет-кер}}/\sigma_{\text{мет}}$. Обычно достаточно толстая пленка сохраняет сплошность после отжига и рекристаллизационных явлений. Хотя состояние системы с такой пленкой может остаться неравновесным (по нашим данным для металлооксидных систем толщина такой пленки должна быть больше 200—500 нм).

Экспериментально определены площади островков металла пленки на поверхности оксида алюминия для разных металлов (Ni, Cr, Ti) при одинаковых первоначальных толщинах пленок (100 нм) в условиях отжига (950 °С, 30 мин) и сопоставлены с адгезионно – поверхностными свойствами этих металлов. При этом использовались электронно – микроскопические снимки поверхностей пленок (сканирующая электронная микроскопия) при увеличении в 10 000 раз. По электронно — микроскопическому изображению среднюю площадь островков определяли методом взвешивания, который заключается в точном определении массы вырезанных элементов поверхности (на бумаге достаточной толщины). Существуют разные методы планиметрии, в том числе фотоэлектрические, механические и другие, но метод взвешивания является простым и достаточно надежным и в настоящее время. Результаты измерений приведены в табл. 1

Т а б л и ц а 1 Степень смачивания, критерий К и морфология пленок металлов Ni, Cr, Ti, Nb, которые нанесены на оксид алюминия (после отжига при T=950 °С, 30 мин; толщина пленки 100 нм)

Table 1 Comparison of wetting degree, criterion K and morphology of metals Ni, Cr, Ti, Nb films which covered alumina (after annealing at T=950 °C during 30 min; film thickness is 100 nm)

Металл пленки	Оксид	Краевой угол смачивания Θ , град	Поверхностное натяжение $\sigma_{мет.}$, МДж/м ²	Работа адгезии $W_{Амет-кер.}$, МДж/м ²	$\frac{W_{Амет-кер.}}{\sigma_{мет.}}$	Площадь $S_{мет.}$, %	Электронно-микроскопическое изображение пленки, x10 000
Ni	Al ₂ O ₃ (керамика)	130	1750	600	0,34	36	
Cr	Al ₂ O ₃ (керамика)	65	1600	2200	1,42	68	
Ti	Al ₂ O ₃ (монокристалл)	~0	1500	~3000	2	99-100	
Nb*	Al ₂ O ₃ (монокристалл) [0001]	36**	2100**	3800**	1,8	100	

*Температура отжига 1200 °С.

**Теоретические оценки [13].

Значения краевых углов смачивания взяты из литературных источников для жидкого состояния этих металлов в контакте с оксидом алюминия.

Анализ данных табл. 1 свидетельствует о следующем. Никель не смачивает поверхность оксида алюминия, имеет высокое поверхностное натяжение и легко коагулирует, создавая островковую структуру пленки. Часть поверхности, покрытая никелем, составляет лишь 36%. Хром смачивает оксид алюминия (краевой угол 65 град) и поверхность оксида алюминия, занятая островками хрома, составляет 68%. Адгезия титана к оксиду алюминия очень высокая, поверхностное натяжение умеренное и пленка титана практически полностью покрывает поверхность оксида алюминия (то есть около 98—100%). Это состояние — состояние сплошной пленки после отжига — является термодинамически равновесным. Некоторое отклонение от 100% объясняется тем, что термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) титана ($\sim 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) не совпадает с ТКЛР оксида алюминия. Для монокристалла Al_2O_3 в разных направлениях кристаллографической плоскости [0001] ТКЛР составляет $\sim (4,5\text{—}5) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, то есть меньше, чем у титана. Это приводит при охлаждении образца (сапфир с титановой пленкой) после отжига к возникновению тангенциальных напряжений, разрывающих пленку, которая прочно адгезирует к подложке. Пленка, как видно на фотографии (табл. 1), покрыта сетью трещин (площадь этих трещин и есть тем самым остатком от 100%). Эффект возникновения трещин еще более ярко выражен в системе титановая пленка — кварцевое стекло (ТКЛР кварцевого стекла очень мал — $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$).

Мы исследовали также ниобиевую пленку, напыленную на оксид алюминия. Она сохраняет сплошность и при более высоких температурах отжига (1200°C , 30 мин). Это состояние остается термодинамически неравновесным согласно критерию $W_{\text{Амет-кер}}/\sigma_{\text{мет}}$ (который равен по теоретической оценке 1,8) и существует благодаря значительно меньшей, чем для Ni, Cr, Ti, диффузионной подвижности атомов. Если ориентироваться на температуру рекристаллизации $T_{\text{рекр}} \sim 0,4 T_{\text{плавл}}$, то для ниобия температура плавления очень высока — 2500°C . Давление паров значительно ниже и температура кипения (около 5000°C) значительно выше, чем у Ni, Cr, Ti. В целом это объясняет стабильность ниобиевой пленки при отжиге.

Таким образом, проведенные исследования позволяют предвидеть и понимать морфологические и структурные особенности тонких пленок металла, нанесенных на неметаллические неорганические материалы, и использовать их при разработке технологий пайки и сварки неметаллических материалов.

Следующим этапом исследования металлических нанопленок было определение величины краевого угла смачивания их серебром и медью, которые были выбраны нами в качестве припойных материалов, а также материалов пластичных деформируемых прокладок при сварке давлением. Измерения краевых углов смачивания проводили по каплям металлов, находящихся на металлизационных пленках разной толщины (30—110 нм). Результаты измерений представлены в табл. 2. Как следует из табл. 2, предпочтительней с точки зрения смачиваемости являются пленки толщиной около 100 нм по сравнению с более тонкими пленками

Т а б л и ц а 2. Краевые углы смачивания расплавленными металлами металлических нанопленок различных толщин, нанесенных на оксидные и карбидные материалы

Table 2. Wetting contact angles of metallic nanofilms of various thickness which covered oxide and carbide materials by the melted metals

Подложка	Пленка	Толщина пленки, нм	Угол смачивания, град	
			Cu	Ag
Al ₂ O ₃	Ti	30	93	117
		100	65	90
	Cr	30	125	92
		100	50	50
	Nb	50	85	120
		100	45	73
	Ni	50	125	145
		100	110	140
SiC	Ti	30	—	41
		110	—	22

толщиной 30—40 нм. Очевидно, это обусловлено частичным испарением и растворением и без того тонких пленок малых толщин.

Завершающим этапом данной работы явилось изготовление и прочностные испытания образцов соединений неметаллических материалов (алюмооксидной керамики и карбида кремния), покрытых нанопленками Cr, Ni, Nb и Ti толщиной 50 и 100 нм. Образцы были изготовлены в основном сваркой давлением через серебряную и медную прокладки, которые имели постоянную исходную толщину около 40 мкм. Часть керамических образцов с никелевым покрытием получали пайкой расплавленным алюминием с небольшим нагружением, используя эффект хорошего смачивания и растекания алюминия по никелю при температуре 800 °С [14].

Все изготовленные образцы были испытаны на сдвиг, результаты приведены в табл. 3. Как следует из табл. 3, толщина металлических нанопленок, наносимых на соединяемые неметаллические материалы, существенно влияет на механические свойства паяных и сварных соединений при сдвиге. При этом более высокая прочность получена для покрытий толщиной 100 нм по сравнению с покрытиями толщиной 50 нм. Кроме того, были изготовлены сваркой давлением через серебряную прокладку образцы из SiC, покрытые титановыми пленками толщиной 50 и 100 нм. Прочность при сдвиге образцов с пленкой толщиной 50 нм составила 109 МПа, с толщиной 100 нм — 149 МПа.

Очевидно, более тонкие пленки, претерпевая в процессе соединения частичное испарение и растворение в припойном материале, не могут

Т а б л и ц а 3 Прочность при сдвиге оксидных образцов, спаянных и сваренных давлением через металлическую прокладку (фольга) с использованием нанометаллических пленок разных толщин

Table 3 Shift strength of oxide samples which are brazed and diffusion bonded using metallic gasket (foil) and with application of various thickness nanometallic films

Материал пленки	Толщина пленки, нм	Материал прокладки	Прочность, МПа	Вид разрушения
Nb	50	Cu	30	По границе пленка-припой
	100		140	По керамике
	100	Ag	50	По серебряной прокладке
Ti	50	Ag	100	По керамике
	100		164	
	200		169	
Cr	100	Cu	260	По границе пленка-припой
	50	Ag	90	
Ni	100	Ag	150	По керамике
	50		90	
Ni*	100	Ag	119	По границе пленка-припой
			250	
	100	Al	150	По алюминиевому припою

*Пленка нанесена химическим осаждением. На всех остальных образцах пленки нанесены способом магнетронного распыления. Режим соединения алюминием образцов с никелевым покрытием следующий: $T=800^\circ\text{C}$, $\tau=10$ мин, $P=2$ МПа. Все остальные образцы получены сваркой давлением по режиму: $T=950^\circ\text{C}$, $\tau=10$ мин, $P=20$ МПа.

обеспечить достаточной адгезии припойных материалов к неметаллам, в частности, за счет нарушения сплошности покрытия и появления участков керамики и сапфира, свободных от металлического покрытия и имеющих плохую адгезию непосредственно к металлу припоя.

Выводы

Вид поверхностей свеженанесенных нанопленок Cr, Ti, Ni, Nb толщиной 30—100 нм не зависит от толщины пленки, то есть они все являются сплошными.

Поверхность нанопленок металлов хрома и никеля, которые не смачивают (Ni) или умеренно смачивают (Cr) Al_2O_3 , изменяется уже в

процессе отжига при 700 °С, а при 950 °С эти пленки распадаются на отдельные островки.

Поверхности пленок титана и ниобия, которые хорошо смачивают Al_2O_3 , отожженные при температурах до 950 °С, не изменяются, а при дальнейшем отжиге титановая пленка при 1200 °С рекристаллизуется; поверхность ниобиевой пленки после отжига при 1200 °С изменилась незначительно.

При анализе и сопоставлении теоретических и практических данных по смачиванию различными металлами оксида алюминия обнаружена зависимость морфологии нанопленок хрома, никеля, титана и ниобия от степени смачивания этими металлами Al_2O_3 , что определяется предложенным критерием $K = W_A / \sigma_{\text{мет-к-р}}$. При $K < 1$ пленки при отжиге приобретают островковую структуру. Пленка остается сплошной при $K \gg 1$ в процессе отжига даже при температуре 1200 °С и больше.

При соединении образцов давлением существенное влияние на прочность соединения оказывает толщина металлической нанопленки, то есть при ее увеличении от 30 до 100 нм прочность соединения при сдвиге возрастает. Оптимальная толщина металлических нанопленок, нанесенных на неметаллические материалы, составляет около 100 нм, поскольку дальнейшее увеличение ее (на примере Ti — до 200 нм) не дает существенного повышения прочности.

Припойными материалами для сварки давлением и пайки металлизированных нанопленками металлов Cr, Ni, Ti поверхностей керамики на основе Al_2O_3 могут служить серебро и медь, а для ниобиевой пленки можно рекомендовать только медь.

Полученная большая прочность (до 260 МПа) образцов Al_2O_3 , металлизированных нанопленками (100 нм) Ti и Ni, свидетельствуют о перспективности использования металлических нанопленок при соединении неметаллических материалов и дальнейшей разработки технологии получения таких соединений для изготовления сварных и паяных неметаллометаллических изделий и узлов с высокой прочностью.

РЕЗЮМЕ. Досліджено структуру та морфологію металевих наноплівків Ti, Nb, Cr, Ni товщиною 30—100 нм, нанесених на високоглиноземісту кераміку та карбід кремнію, з використанням скануючого мікроскопу JSM-840 та електронографа EMP-100. Визначено змочуваність цих плівок різної товщини сріблом та міддю. Отримані та випробувані на зсув твердофазні з'єднання Al_2O_3 і SiC, на які нанесені наноплівки Ti, Nb, Cr та Ni різної товщини через срібну та мідну прокладки, а також паяні з'єднання нікельованих зразків із Al_2O_3 алюмінієвим припоєм.

- 1 Colbus J., Keel C. C., Blanc D. M. Notes on the strength of brazed joints Welding J — 1962. — 41, No. 9 — P 413
2. Moffatt W. G., Wulff J. Strength of silver brazed joints in mild steel (Transaction AIME) J Metals. — 1957 — 9, No. 4. — P 442—445
- 3 Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1967 — 368 с.

4. *Prokopenko A., Zhuravlev V., Naidich Y* Brazing of Si_3N_4 ceramics by active Cu—Ga—Ti filler alloys J Mater Sci. Lett. — 1998. — No. 17 — P 683—685
5. *Naidich Y* High strength ceramics brazed joints Scientific and Technolog. Bases; Industrial Ceramics. — 2000. — 19, No. 3 — P 162—167
6. *Найдич Ю. В.* Про зв'язок досліджень поверхневих властивостей конденсованих фаз з вивченням наноструктурних систем у матеріалознавстві, зокрема при з'єднанні матеріалів Адгезія расплавов и пайка материалов. — 2004. — № 37 — С. 7—16.
7. *Найдич Ю. В., Костюк Б. Д., Колесниченко Г. А. и др.* Смачиваемость в системе металлический расплав — тонкая металлическая пленка — неметаллическая подложка Физическая химия конденсированных фаз, сверхтвердых материалов и их границ раздела. — Киев: Наук. думка, 1975 — С. 15—27
8. *Найдич Ю. В., Колесниченко Г. А., Костюк Б. Д.* Смачивание тонких пленок молибдена, нанесенных на графит, расплавами меди Физика и химия обработки материалов. — 1975 — № 2. — С. 91—94.
9. *Хоперия Т. Н.* Химическое никелирование неметаллических материалов. — М.. Металлургия, 1982. — 144 с.
10. *Латанцев В. И., Ганий Г. Н., Денцов А. Д.* Современная технология нанесения металлических покрытий химическим способом. — Барнаул: Алтайское книжное изд-во, 1965 — 198 с.
11. *Метфессель С.* Тонкие пленки, их изготовление и измерение. — М.—Л. Госэнергоиздат, 1963 — 206 с.
12. *Данилин Б. С.* Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. — М.. Энергоатомиздат, 1989 — 328 с.
13. *Batirev I. C., Alavi A., Finnis M., Deuter T* First principles calculation of ideal cleavage energy Phys. Rev Lett. — 1999 — 82, No. 7 — P 1510—1514.
14. *Красовский В. П., Костюк Б. Д., Чувашов Ю. Н.* Смачивание базальтового материала расплавом алюминия Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1997 — № 33 — С. 31—34.

Поступила 05 12.05

**Naidich Y. V., Gab I. I., Kostyuk B. D., Stetsyuk T. V., Kurkova D. I.,
Dukarov S. V., Kulikovsky V. Y., Onoprienko A. A.**

Influence of thickness metal nanofilms deosited on oxide and carbide materials for their subsequent welding and soldering on structural and capillary properties of films on strength of welded and brazing joints

The structure and morphology of metal nanofilm of thickness 30—100 nm consisted from Ti, Nb, Cr, Ni which cowered Al_2O_3 ceramics and silicon carbide was investigated with use of scanning microscopy JSM-840 and electronograph EMR-100. Wettability of these films by various thickness by silver and copper was determined. The joints of Al_2O_3 and SiC covered of nanofilms Ti, Nb, Cr and Ni various thickness were obtained by brazing of Al and by diffusion bonding with use of silver and copper gaskets. These joints have been tested for shift.