

06.2; 06.3; 07

© 1992

ТЕРМОСТОЙКИЕ СВЕТОВОДЫ В ГЕРМЕТИЧНОМ
АЛЮМИНИЕВОМ ПОКРЫТИИВ.А. Б о г а т ы р е в, Е.М. Д и а н о в,
Ч. К е д ж е н, С.Д. Р у м я н ц е в

Металлические герметичные оболочки, предохраняя поверхность кварцевого стекла от разупрочняющего воздействия влаги, позволяют создавать световоды со сверхвысокой механической прочностью [1]. Кроме того, металлопокрытые световоды перспективны с точки зрения их использования при высоких температурах. Это обусловлено тем, что одним из основных факторов, ограничивающих область высокотемпературных применений световодов, является термостойкость защитных покрытий, а рабочие температуры существующих полимерных оболочек не превышают 350 °С. Большой интерес представляет применение в качестве материала защитного покрытия алюминия, температура плавления которого составляет 660 °С.

Однако известно, что при высоких температурах происходит реакция двуокиси кремния с Al [2-6]:



в результате которой на поверхности кварцевого стекла образуется слой веществ с сильно различающимися термомеханическими характеристиками. Такой дефектный слой должен значительно снижать прочность световодов, покрытых алюминием.

Наиболее подробно кинетика реакции (1) была описана в работах [5-6]. Авторы [5] исследовали взаимодействие Al с SiO_2 , помещая стержни из кварцевого стекла в расплавленный алюминий при температурах 685-800 °С. В работе [6] рассматриваемая реакция изучалась на композиционном материале с волокнами из кварцевого стекла диаметром ≈ 50 мкм в матрице из алюминия при температурах 500, 575 и 600 °С. Глубина прореагировавшего слоя составляла 2-20 мкм. Результаты упомянутых работ трудно непосредственно использовать для оценки механических характеристик световодов, так как их прочность контролируется дефектами с размерами, близкими к атомным.

В данной работе исследовались световоды диаметром 125 мкм. Алюминиевое покрытие толщиной около 20 мкм наносилось непосредственно в процессе вытяжки „намораживанием” [2, 7]. Прочность световодов измерялась методом двухточечного изгиба. Исследуемый световод имел высокую однородную исходную прочность ≈ 12.8 ГПа при обычных лабораторных условиях (см. рис. 1).

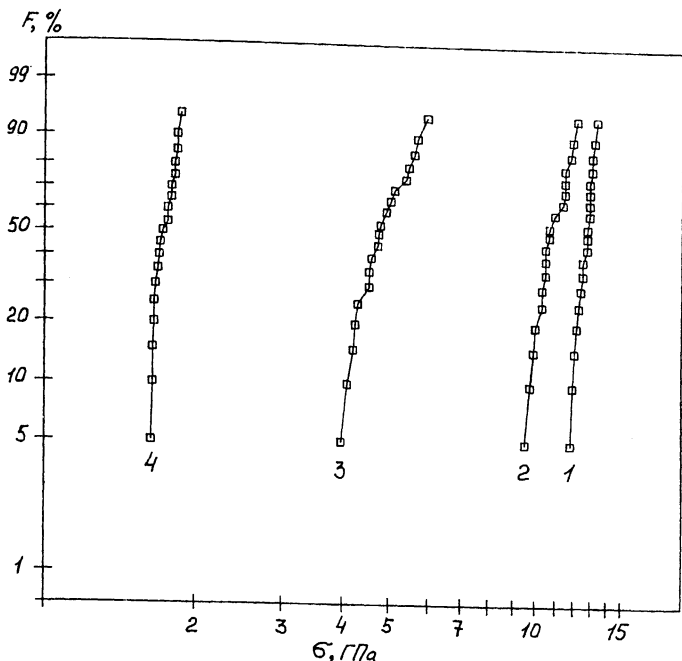


Рис. 1. Графики Вейбулла функции распределения прочности световода на изгиб при лабораторных условиях ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

1 – до нагрева; 2 – после прогрева при $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 14 минут; 3 – после прогрева при $485\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 500 минут; 4 – после прогрева при $585\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут.

Отрезки световода прогревались в воздушной атмосфере таким образом, что исключался контакт центральных участков, прочность которых измерялась впоследствии, с посторонними предметами. Зона, в которой находились образцы, термостабилизировалась. Температура волокон (T_H) фиксировалась в течение всего времени прогрева (t_H). Точность поддержания T_H составляла $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Время установления заданной температуры не превышало 5 минут.

Затем проводились испытания прочности 19–24 образцов при лабораторных условиях и строились графики Вейбулла функции распределения прочности (см. рис. 1), вид которых свидетельствует о равномерном распределении дефектов вдоль световода. Прогрев проводился при пяти различных температурах: 585, 530, 515, 480 и $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты измерений прочности в зависимости от времени прогрева при различных температурах представлены на рис. 2. На рисунке показаны медианные значения прочности световода. Там же приведена взятая из работы [8] зависимость прочности „голых“ кварцевых волокон от времени прогрева при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

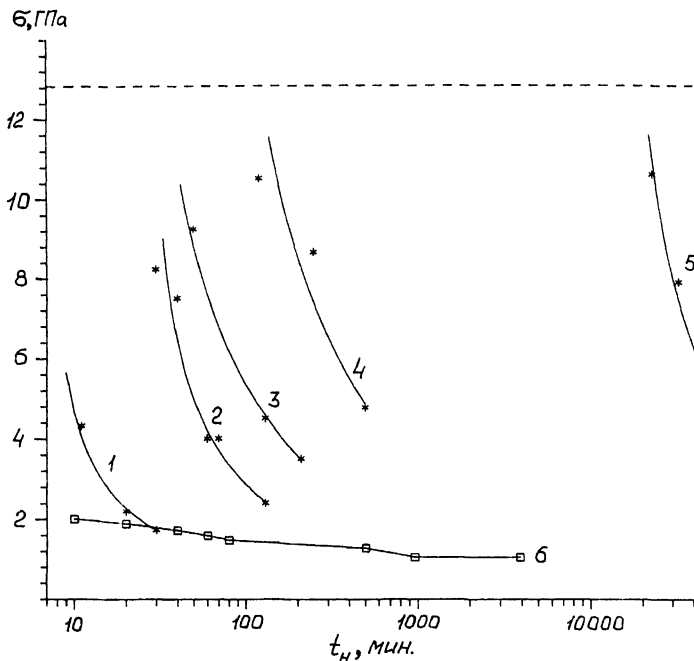


Рис. 2. Прочность световода в герметичном алюминиевом покрытии при лабораторных условиях в зависимости от температуры и времени прогрева.

1 - $T_H = 585^\circ\text{C}$; 2 - $T_H = 530^\circ\text{C}$; 3 - $T_H = 515^\circ\text{C}$; 4 - $T_H = 480^\circ\text{C}$; 5 - $T_H = 400^\circ\text{C}$; 6 - $T_H = 500^\circ\text{C}$, „голые“ волокна (данные из работы [8]). Пунктиром показан уровень исходной прочности световода.

Глубину дефектов на поверхности стекла (a), вызывающих снижение прочности световодов, можно оценить, пользуясь известным соотношением:

$$\sigma = K_{IC} \cdot Y^{-1} \cdot a^{-0.5}. \quad (2)$$

Здесь σ - напряжение, при котором произошло разрушение световода, K_{IC} - константа материала (для кварцевого стекла $K_{IC} = 0.789 \text{ МН/м}^{3/2}$), Y - коэффициент, зависящий от геометрии микродефекта (для полукруглой трещины $Y = 1.24$).

В работах [5, 6] было показано, что в диапазоне температур $500\text{--}800^\circ\text{C}$ скорость роста толщины прореагировавшего слоя на границе раздела Al-SiO_2 при фиксированной температуре постоянна. Поэтому, предположив, что в нашем случае глубина микротрещин на поверхности кварцевого стекла соответствует толщине прореагировавшего слоя, зависимости увеличения дефек-

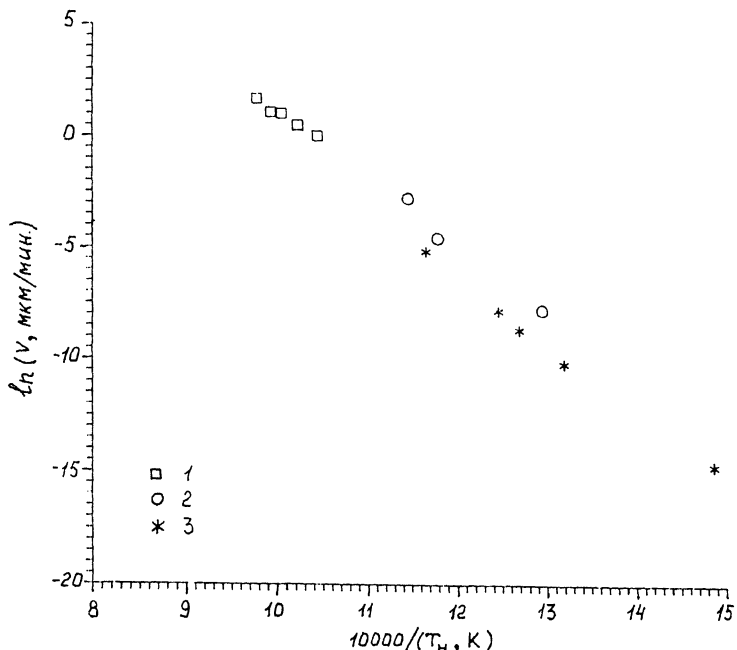


Рис. 3. Зависимости скорости роста дефектов и химической реакции (1) от температуры.

1 - пересчет данных из работы [5]; 2 - пересчет данных из работы [6]; 3 - данные, полученные в настоящей работе.

тов от времени мы аппроксимировали линейными соотношениями:

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0 = c + \nu t, \quad (3)$$

где α_0 - размер дефектов, определяющих исходную прочность световодов, c и ν - константы, зависящие от температуры. В этих обозначениях ν есть скорость роста дефектов, а $-c/\nu = t_{in}$ - инкубационный период, то есть время, по истечении которого начинается рост дефектов.

По экспериментальным данным, представленным на рис. 2, в соответствии с выражениями (2) и (3) были рассчитаны зависимости скорости роста дефектов и инкубационного периода от температуры, описав которые уравнениями Аррениусовского типа:

$$\nu = \nu_0 \exp(-E_\nu \cdot (RT_n)^{-1}), \quad (5)$$

$$t_{in} = t_0 \exp(E_t \cdot (RT_n)^{-1}), \quad (6)$$

где R - универсальная газовая постоянная; T_H - абсолютная температура прогрева; E_U , E_z и ν_0 , t_0 - энергии активации и предэкспоненциальные множители соответствующих процессов, мы нашли численные значения входящих в них параметров: $E_U = 246$ кДж/моль, $\nu_0 = 5.0 \cdot 10^{12}$ мкм/мин; $E_z = 211$ кДж/моль, $t_0 = 5.8 \cdot 10^{-13}$ мин.

Полученная нами величина E_U хорошо совпадает со значениями энергии активации реакции (1): 280 кДж/моль [6], 184 и 256 кДж/моль [5] для γ и θ Al_2O_3 соответственно. (На рис. 3 также представлены результаты пересчета данных из работ [5, 6]). Откуда следует, что в интервале температур, рассматриваемом в настоящей работе, термодеградация прочности световодов в алюминиевом покрытии в значительной мере определяется химической реакцией материала покрытия с кварцевым стеклом. Однако нельзя исключить, что рассматриваемый процесс носит более сложный характер.

Таким образом, применение герметичного алюминиевого покрытия значительно расширяет область высокотемпературного использования волоконных световодов. Полученные значения E_U и ν_0 , E_z и t_0 позволяют прогнозировать прочность рассматриваемых световодов в зависимости от времени эксплуатации при температурах 585-400 °С.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Богатырев В.А., Бубнов М.М., Дьянов Е.М., Прохоров А.М., Румянцев С.Д., Семенов С.Л. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 9. С. 769-773.
- [2] Arridge R.G.C., Baker A.A. and Cratchley D. // J. Sci. Instrum. (GB). 1964. V. 41. N 5. P. 259-261.
- [3] Cratchley D. and Baker A.A. // Metallurgia. 1964. V. 69. N 14. P. 153-159.
- [4] Arridge R.G.C. and Heywood D. // Brit. J. Appl. Phys. 1967. V. 18. P. 447-457.
- [5] Standage A.E. and Gani M.S. // J. Am. Ceram. Soc. 1967. V. 50. N 2. P. 101-105.
- [6] Squirs H.V. and Rayson H.W. // J. Mat. Sci. 1977. V. 12. P. 1010-1018.
- [7] Bogatyryov V.A., Dianov E.M., Rumyantsev S.D., Makarenko A.Y., Semjonov S.L. and Sysoljatin A.A. // Soviet Lightwave Communication. 1991. V.1. N.3. P.227-234.
- [8] Proctor B.A., Whytney J., Johnson J.W. // Proc. Roy. Soc. 1967. V.297A. N.1452. P. 534-557.