



Напряженное состояние в окрестности точки контакта пленки и подложки.

Таблица 1

Материал	$E$ , Мпа	$\nu$	$\alpha \cdot 10^5$ , $K^{-1}$	$\sigma_{пр} \cdot 10^{-7}$ , Па
Полистирол	2700	0.3	6-7	3-5
Медь	$11 \cdot 10^4$	0.35	1.62	40-50

где  $[\sigma_{пр}]$  — предел прочности,  $\sigma_{адг}$  — адгезионная прочность. В нашей работе для изучения влияния напряженного состояния пленок на адгезию величину  $\sigma_{адг}$  определяли экспериментально. В качестве модельной конструкции была принята подложка из полистирола диаметром 22 и толщиной 2 мм с медной пленкой толщиной 0.5 мкм, нанесенной методом магнетронного напыления. Параметры материалов приведены в табл. 1.

Результаты расчета деформаций и напряжений в пленке и подложке по формулам (1-3) приведены в табл. 2. Из табл. 2 следует, что в пленке возникают сжимающие напряжения, а в подложке — растягивающие.

Конструкция пленка-подложка была подвергнута испытаниям на адгезию методом нормального отрыва. Площадь поверхности отрыва определяли с помощью микроскопа. При силе отрыва  $F_{отр}$  абсолютная величина  $\sigma_{отр}^* = F_{отр}/S_f$  характеризует адгезию пленки к подложке. Фактически с

Таблица 2

$\Delta T$	$\varepsilon_f \cdot 10^5$	$\varepsilon_s \cdot 10^5$	$\sigma_f \cdot 10^7$ , Па	$\sigma_s \cdot 10^6$ , Па
10	-16.2	-65.0	-0.826	0.014
20	-32.4	-130.0	-1.625	0.029
30	-48.6	-195.0	-2.478	0.043
40	-64.8	-260.0	-3.303	0.058
50	-81.0	-325.0	-4.129	0.072
60	-97.2	-390.0	-4.955	0.086

Таблица 3

№ образца	$F_{отр}$ , кг	$S_a$ , см <sup>2</sup>	$\sigma_{отр}^*$ , кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{отр} \cdot 10^{-6}$ , Па
1	14.80	0.108	137.04	17.8
2	15.78	0.084	187.86	19.0
3	15.70	0.103	152.43	18.9
4	15.00	0.108	138.89	18.0
5	12.65	0.092	137.5	15.2

учетом концентрации напряжений отрыв пленки происходит при напряжении отрыва  $\sigma_{отр} = \alpha F_{отр}/S$ , где  $S$  — площадь контакта стержня с пленкой,  $\alpha = 2.4$  — коэффициент концентрации напряжений. Отдельные результаты для образцов, полученных при разных технологических режимах напыления пленки, представлены в табл. 3.

Во всех экспериментах наблюдался адгезионно-когезионный тип отрыва. Процесс его начинался с разрушения подложки, поскольку  $\sigma_{пр_s} < \sigma_{пр_f}$  (см. табл. 1). В связи с этим можно утверждать, что адгезионная прочность пленки в изготовленных образцах не меньше предела прочности полистирола  $\sigma_{адг} \geq (3 - 5) \cdot 10^7$  Па. Однако, как следует из табл. 3, для всех образцов  $\sigma_{отр} < \sigma_s$ . Таким образом можно утверждать, что причиной отрыва пленки была не только внешняя сила, но и термические напряжения. Теоретическая оценка температуры поверхности подложки при нанесении привела к величине  $\Delta T = 32$  К. При этом условия формулы (1-3) дают следующий результат:  $\sigma_f = -2.64 \cdot 10^7$ ,  $\sigma_s = 0.046 \cdot 10^7$  Па. Тогда из неравенства (4) получаем  $[\sigma_{пр_f}] \geq 4.54 \cdot 10^7$  и  $[\sigma_{пр_s}] \geq 1.85 \cdot 10^7$  Па. Во всех экспериментах для обоих элементов конструкции нормальные напряжения совместно с термическими не превышали пределов прочности применяемых материалов. Следовательно, можно допустить, что в конструкции действу-

ют структурные напряжения, которые могут быть порядка  $(1.15 - 3.15) \cdot 10^7$  Па.

Таким образом, в результате выполненной работы:

1. Создана методика определения адгезионной прочности пленок, напыленных на полимерные подложки.

2. При выбранных технологиях очистки поверхности подложки и напыления на нее пленки адгезионная прочность пленки не превышает прочности полимерной подложки.

3. Оценка прочности композиции по IV теории прочности показало, что разрушение происходит при нормальных напряжениях — меньших, чем предел прочности, составляющих композицию материалов.

4. Выявлена необходимость анализа напряженного состояния самой подложки и разработки методик снятия остаточных напряжений.

#### Список литературы

- [1] Углов А.А., Анищенко Л.М., Кузнецов С.Е. Адгезионная способность пленок. М., 1987. 104 с.
- [2] Захаров Н.П., Багдасарян А.В. Механические явления в интегральных структурах. М., 1992. 144 с.
- [3] Гастев В.А. Краткий курс сопротивления материалов. М., 1977. 456 с.

Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический  
университет

Поступило в Редакцию  
2 апреля 1994 г.

---