

## ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ

### II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ И ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЯХ

*А. Т. Санжаровский, Г. И. Енигманов*

В сообщении [1] были изложены методы расчета внутренних напряжений в полимерных и лакокрасочных покрытиях, нанесенных на твердую подложку. Проведенные расчеты позволили разработать экспериментальные методы количественного изучения внутренних напряжений в покрытиях.

В данной работе рассматриваются два таких метода: а) метод, основанный на измерении отклонения свободного конца консольно закрепленной подложки — консольный метод, б) метод, основанный на измерении напряжений на стороне подложки, свободной от пленки, — тензометрический метод.

**Консольный метод измерения внутренних напряжений в покрытиях.** Принципиальная схема метода. На рис. 1, а, б показана принципиальная схема консольного метода. Подложка А в форме прямоугольной пластины, имеющей длину  $l$ , ширину  $a$  и толщину  $t$ , концом В закрепляется в неподвижной стойке С (рис. 1, а). На одну сторону

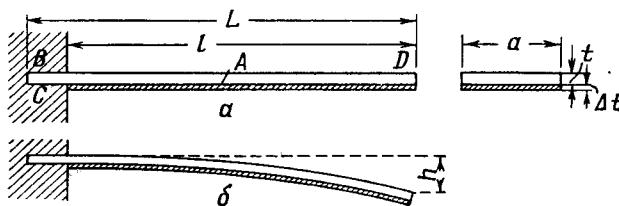


Рис. 1, а, б. Принципиальная схема консольного метода изучения внутренних напряжений в полимерных и лакокрасочных покрытиях.

пластины А по всей длине  $l$  наносится покрытие II. При формировании пленки (высыхании, полимеризации) в ней возникают растягивающие внутренние напряжения  $\sigma$ . При наличии достаточной адгезионной связи покрытия с подложкой эти напряжения изгибают подложку, заставляя свободный конец ее D отклоняться от своего первоначального положения на расстояние  $h$  (рис. 1, б). Между отклонением  $h$  и величиной внутренних напряжений в покрытии  $\sigma$  существует следующая связь [1]:

$$\sigma = \frac{hE_1 t^3}{3l^2(t + \Delta t)\Delta t} + \frac{hE_2(t + \Delta t)}{l^2}. \quad (1)$$

Первый член формулы (1) выражает напряжения, которые остаются в покрытии после изгиба подложки, второй член — напряжения, снятые в результате изгиба подложки.  $\sigma$  представляет собой напряжения, которые существовали бы в покрытии, если бы оно было нанесено на жесткую, негнущуюся подложку (реальную деталь).  $E_1$  и  $E_2$  в формуле (1) — модули нормальной упругости подложки и покрытия.

Из формулы (1) видно, что количественное определение внутренних напряжений в покрытии, нанесенных на данную подложку, сводится к измерению отклонения свободного конца консольно закрепленной подложки.

Приципиальная схема прибора. На рис. 2, а показана принципиальная схема прибора, основанного на консольном методе

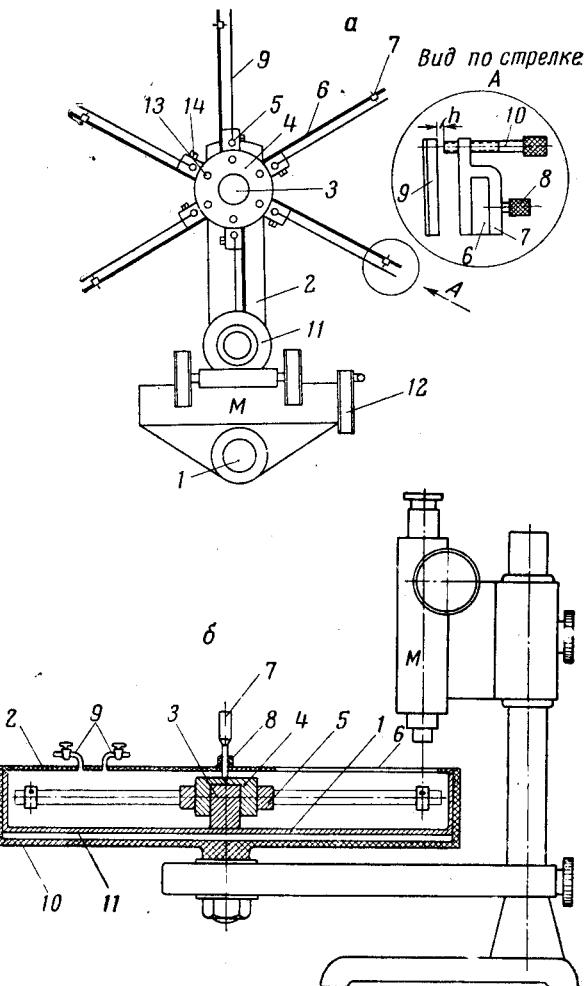


Рис. 2, а, б. Принципиальная схема прибора, основанного на консольном методе измерения внутренних напряжений, предназначенного для работы в нормальных условиях (а); в специальных условиях (повышенной температуре, влажности и т. д.) (б).

определения внутренних напряжений в полимерных и лакокрасочных покрытиях. Прибор смонтирован на базе обычного отсчетного (измерительного) микроскопа.

На стойке 1 микроскопа  $M$  укреплен кронштейн 2, в прорези которого закреплен шип 3. На шип надета втулка 4 с шестью держателями 5, которая может свободно вращаться на шипе 3. Держатели 5 имеют узкие прорези для крепления подложек 9. Подложки изготавливаются в форме прямоугольных пластин длиной 120 мм, шириной 10—20 мм и толщиной 0,2—1,5 мм. К каждому держателю прикреплена также пластина 6, по которой может свободно передвигаться и в любом месте закрепляться хомутик 7 с винтом 10.

Опыт производится следующим образом. На одну сторону подложки 9 наносится исследуемое покрытие. После «застудневания» покрытия подложка вставляется в прорезь держателя кондом, свободным от пленки, и закрепляется винтом 14. Хомутик 7 перемещается вдоль пластины 6 и закрепляется так, чтобы винт 10 находился в середине поля зрения микроскопа М. Между концом винта 10 и подложкой 9 устанавливается небольшой зазор, определяющий нулевое положение подложки. По мере высыхания или отвердевания покрытия в нем нарастают внутренние напряжения, подложка прогибается и зазор между свободным ее кондом и винтом 10 увеличивается. Отклонение конца подложки от нулевого положения измеряется при помощи микрометрического винта 12 отсчетного микроскопа М.

Прибор позволяет вести одновременно шесть (а при необходимости и более) опытов, укрепив в держателе 5 подложки и установив все хомутики на одном и том же расстоянии от оси вращения, чтобы при повороте втулки они попадали в поле зрения микроскопа.

Для проведения опытов в специальных условиях (при повышенных температурах, повышенной влажности, в вакууме и в разнообразных средах) нами разработан вариант прибора, схематически показанного на рис. 2, б. Основная часть прибора — втулка 4 с держателями 5 помещена в металлическую коробку 1, имеющую в центре тип 3. Сверху коробка герметически закрывается крышкой 2, имеющей стеклянное окно 6, через которое производится измерение отклонения конца подложки. Вращение втулки 4 производится ручкой 7, уплотненной сальником 8. Откачка камеры и наполнение газовой средой производится через краны 9. Коробка окружена теплоизолирующим кожухом 10, на дне которого смонтирован нагревательный элемент 11. В настоящее время производится испытание этого варианта прибора.

**Чувствительность метода.** Из формулы (1) видно, что чувствительность метода (минимальное напряжение, которое может быть надежно измерено) определяется точностью измерения отклонения  $h$ , соотношением толщи подложки  $t$  и покрытия  $\Delta t$  и длиной рабочей части подложки  $l$ . Отсчетный микроскоп позволяет производить измерение  $h$  с точностью 0,01 м.м (цена деления на барабане микрометрического винта микроскопа). Длина рабочей части подложки равнялась в нашем приборе 100 м.м. Выбор толщины подложки определяется толщиной исследуемых пленок и величиной внутренних напряжений в них. Полимерные и лакокрасочные пленки, используемые на практике, имеют толщины от 30 до 200 м.к. Примененные нами подложки имели минимальную толщину 0,2 м.м, хотя с успехом могут применяться и более тонкие подложки. При этих данных прибора для подложек из стали чувствительность метода равна 0,78 кГ/см<sup>2</sup>, для подложек из меди — 0,39 кГ/см<sup>2</sup>. При желании чувствительность может быть увеличена путем применения более тонких и длинных подложек. Однако в этом нет, пожалуй, необходимости, так как напряжения, лежащие за пределом уже полученной чувствительности, едва ли могут представлять интерес.

**Оценка величины членов формулы (1).** Произведем количественную оценку обоих членов формулы (1). Деля второй член на первый, получим:

$$3 \frac{E_2}{E_1} \frac{(t + \Delta t)^2 \Delta t}{t^3}. \quad (2)$$

Так как  $E_2$ , как правило, значительно меньше  $E_1$  и  $\Delta t$  меньше  $t$ , то это отношение оказывается небольшим. На рис. 3 показана кривая, выражающая соотношение между  $E_1/E_2$  и  $t/\Delta t$ , при котором отношение (2) приблизительно равно 0,01, т. е. при котором второй член формулы (1) составляет примерно 1% от величины первого члена. При таких условиях вторым

членом в формуле (1) можно пренебречь и расчет внутренних напряжений в покрытии проводить по формуле

$$\sigma = \frac{-hE_1 t^3}{3l^2(t + \Delta t) \Delta t} \cdot \quad (3)$$

Преимуществом формулы (3) перед формулой (1) является отсутствие в ней модуля упругости покрытия, определяемого из специальных опытов.

В качестве примера на рис. 4 показаны кривые нарастания внутренних напряжений в пленке и отклонения  $h$  свободного конца подложки с течением времени. Пленка желатины имела толщину 0,12 мм и была нанесена на стальную подложку. Кривые 1 и 2 позволяют проследить за кинетикой роста внутрен-

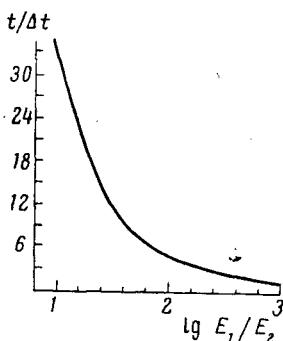


Рис. 3

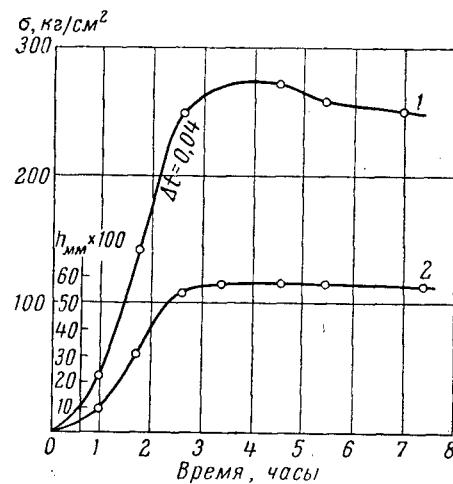


Рис. 4

Рис. 3. Соотношение между  $\lg E_1/E_2$  и  $t/\Delta t$ , при котором напряжения, снятые вследствие прогиба подложки, составляют не более 1% от напряжений, остающихся в пленке:  $E_1$  и  $E_2$  — модули упругости подложки и покрытия;  $t$  и  $\Delta t$  — толщины подложки и покрытия

Рис. 4. Кинетика нарастания отклонения свободного конца консольно закрепленной подложки (1) и внутренних напряжений в покрытии (2) с течением времени\*

них напряжений в покрытии и последующего их поведения со временем в самых разнообразных условиях.

**Тензометрический метод измерения внутренних напряжений в покрытиях.** П р и н ц и п м е т о д а. При тензометрическом методе измерения внутренних напряжений в покрытиях на подложку  $A$  (рис. 5, а), изготовленную в форме прямоугольной пластины, наносится испытуемое покры-

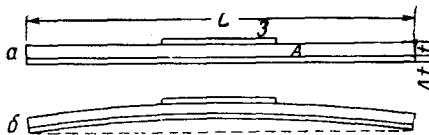


Рис. 5. Принципиальная схема тензометрического метода измерения внутренних напряжений в полимерных и лакокрасочных покрытиях

тие в виде слоя толщиной  $\Delta t$ . При отвердевании покрытия в нем развиваются внутренние растягивающие напряжения, прогибающие подложку (рис. 5, б). На стороне подложки, свободной от пленки, возникают растягивающие напряжения  $\sigma_{1\text{сум}}$ , которые связаны с напряжениями в пленке следующим соотношением (1):

$$\sigma = \frac{\sigma_{1\text{сум}} t^2}{(2t + 3\Delta t) \Delta t} \cdot \quad (4)$$

Напряжение  $\sigma$  вызывает удлинение свободной стороны подложки  $\epsilon$ . Это удлинение можно определить по изменению электрического сопротивления проволочного датчика 3, наклеенного на эту сторону.

С этой целью собирают мостовую схему из четырех одинаковых датчиков: рабочего датчика 3, наклеенного на подложку 6 (рис. 6), датчи-

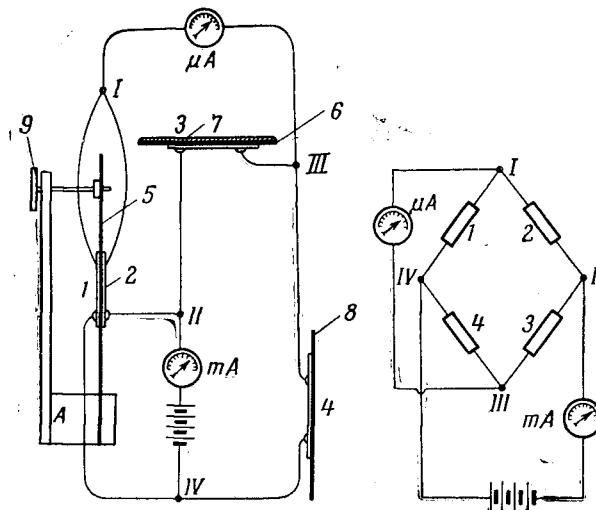


Рис. 6. Электрическая схема тензометрического метода

ков 1 и 2, наклененных на балансировочную балочку 5, и датчика 4, наклеенного на пластину 8, изготовленную из материала подложки 6. Датчик 4 является температурным компенсатором. Мост питается от источника постоянного тока  $A$  напряжением 6—12 в. Ток питания измеряется миллиамперметром  $mA$ , ток в диагонали моста — гальванометром  $I$  или шлейфовым осциллографом. Настройка моста на нуль производится с помощью балочки 5 и винта 9: вращением этого винта мы изгибаем балочку 5 и меняем сопротивление датчиков 1 и 2 до тех пор, пока гальванометр  $I$  не установится в нулевое положение.

При изгибе подложки сопротивление рабочего датчика увеличивается, равновесие моста нарушается и в диагонали возникает ток  $I_r$ , измеряемый гальванометром  $I$ . Расчет показывает [2], что относительное удлинение  $\epsilon$  той стороны подложки, на которой наклеен датчик, определяется следующим соотношением:

$$\epsilon = \frac{4I_r(R_r + R)}{kIR}, \quad (5)$$

где  $I$  — ток питания,  $I_r$  — ток в диагонали моста;  $R$  — сопротивление датчика (одинаковое для всех четырех);  $k$  — коэффициент тензочувствительности датчиков. Зная  $\epsilon$ , легко определить напряжение  $\sigma_{1\text{сум}}$ :

$$\sigma_{1\text{сум}} = \epsilon E_1 = \frac{4E_1 t^2 I_r (R_r + R)}{kIR(2t + 3\Delta t)\Delta t} \quad (6)$$

( $E$  — модуль упругости подложки). Подставляя (6) в (4), получим:

$$\sigma = \frac{4E_1 t^2 I_r (R_r + R)}{kIR(2t + 3\Delta t)\Delta t}. \quad (7)$$

Измерение внутренних напряжений в покрытии сводится, таким образом, к измерению тока в диагонали моста  $I_r$  и рабочего тока  $I$ , питающего схему.

**Чувствительность метода.** Из формулы (7) видно, что чувствительность тензометрического метода зависит от чувствительности гальванометра  $\Gamma$ , толщины подложки  $t$  и покрытия  $\Delta t$  и от модуля упругости  $E$  подложки. Нами применялись датчики сопротивлением  $R = 200 \text{ ом}$ , которые можно было нагружать током силой 10 мА. При толщине подложки  $t = 0,2 \text{ мм}$ , пленки — 30  $\mu$  и чувствительности гальванометра  $10^{-9} \text{ А/деление}$  при  $R_g = 500 \text{ ом}$ , чувствительность метода равна для стальной подложки  $3,8 \text{ кГ/см}^2$ , для медной подложки  $1,9 \text{ кГ/см}^2$ . Чувствительность может быть значительно повышена при применении более тонких подложек и более чувствительного гальванометра или осциллографа.

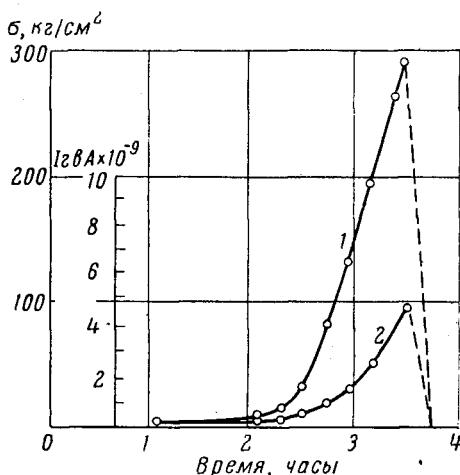


Рис. 7. Кинетика нарастания силы тока в диагонали моста (1) и внутренних напряжений в покрытии (2) с течением времени

На рис. 7 показаны типичные кривые изменения величины тока в диагонали моста и внутренних напряжений в покрытии по мере формирования полимерной пленки, снятые тензометрическим методом. Они имеют такой же характер, как и кривые рис. 4, полученные консольным методом.

#### Выводы

1. Разработаны экспериментальные методы изучения внутренних напряжений в полимерных и лакокрасочных покрытиях: а) консольный метод, основанный на измерении отклонения свободного конца консольно закрепленной подложки и обладающий чувствительностью  $0,4 \text{ кГ/см}^2$ ; б) тензометрический метод, основанный на измерении внутренних напряжений в подложке со стороны, свободной от пленки, и обладающий чувствительностью  $2,0 \text{ кГ/см}^2$ .

2. Разработанные методы могут быть использованы для количественного изучения внутренних напряжений в полимерных и лакокрасочных покрытиях в разнообразных физико-химических условиях.

Институт физической химии  
АН СССР

Поступила в редакцию  
11 V 1960

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Т. Санжаровский, Высокомолек. соед., 2, 1698, 1960.
2. Г. К. Потапов, А. Т. Санжаровский, Ж. физ. химии, 32, 1416, 1958.

#### INTERNAL STRESSES IN COATINGS. II. EXPERIMENTAL METHODS OF INVESTIGATING THE INTERNAL STRESSES OF POLYMER AND PAINT AND LACQUER COATINGS

A. T. Sanzharovskii, G. I. Epifanov

S u m m a r y

Experimental methods have been developed for investigating the internal stresses of polymers and paint and lacquer coatings. These are: a) a cantilever method, based on measurement of the free end of a cantilevered substratum, the sensitivity being  $0.4 \text{ kg/cm}^2$ , b) a strain gauge, based on measurement of the internal stresses in the substratum on the film-free side, the sensitivity being  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ . The methods may be used for the quantitative determination of internal stresses in polymer and paint and lacquer coatings under varying physicochemical conditions.