

УДК 667.6:539.5

# СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЯХ

**Н. А. Долгов**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН  
Украины

ул. Тимирязевская, 2, г. Киев, Украина, 01014

Контактный тел.: (044) 286-69-57

E-mail: coating@ipp.kiev.ua

**Н. Н. Букетова**

Аспирантка

Кафедра технической механики, инженерной и  
компьютерной графики

Херсонская государственная морская академия

пр. Ушакова, 20, г. Херсон, Украина, 73000

E-mail: coating@ipp.kiev.ua

**А. В. Бесов**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт проблем материаловедения  
им. И.Н. Францевича НАН Украины

ул. Кржижановского, 3, г. Киев, Украина, 03680

Контактный тел.: (044) 424-00-81

*У роботі досліджено різні підходи до визначення залишкових напружень в полімерних покриттях при консольному згині зразків. На прикладі епоксидних покриттів показано, що розрахунок залишкових напружень без прийняття до уваги релаксації напружень при згині покриття може давати занижені майже в два рази значення залишкових напружень*

*Ключові слова: залишкові напруження, полімерні покриття*

*В работе исследованы различные подходы к определению остаточных напряжений в полимерных покрытиях при консольном изгибе образцов. На примере эпоксидных покрытий показано, что расчет остаточных напряжений без учета релаксации напряжений при изгибе покрытия может давать заниженные почти в два раза значения остаточных напряжений*

*Ключевые слова: остаточные напряжения, полимерные покрытия*

*We investigated different approaches to determining residual stress in polymer coatings by the cantilever bending coated specimens was studied. It was shown in the case of epoxy coatings that the calculation of residual stresses without stress relaxation at bending of the coating can give understated almost twice the residual stresses*

*Keywords: residual stress, synthesis, polymer coatings*

## 1. Введение

Полимерные покрытия широко используются в различных отраслях техники для защиты основного материала от коррозии и износа. Одними из основных факторов, которые влияют на эксплуатационные свойства покрытий, являются остаточные напряжения. Эти напряжения могут как улучшать, так и снижать эксплуатационные характеристики покрытий.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В полимерных покрытиях в процессе формирования возникают остаточные напряжения. Наиболее распространенным методом определения остаточных напряжений в таких покрытиях является консольный метод изгиба образца с покрытием [1,2].

## 3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является сравнение нескольких подходов к расчету остаточных напряжений в

полимерных покрытиях. Для достижения цели исследований необходимо решение следующих задач: обоснование выбора полимерного материала для формирования покрытий, сравнение точности различных расчетных выражений при определении остаточных напряжений в полимерных покрытиях.

## 4. Оборудование и материалы

В качестве модельного материала для исследований выбраны полимерные композиционные материалы (КМ) и полимерные композиционные покрытия на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84). Выбор материала обоснован тем, что эпоксидные покрытия имеют хорошую прочность сцепления с металлом и обладают высокими антикоррозионными свойствами. Частицы наполнителя при создании композиционного материала модифицировали олигомерными компонентами [3]. В качестве модификаторов использовали следующие составляющие олигомерного связующего: эпоксидную смолу ЭД-20, полиэфир ПЭ-220 и ПДЭА-4. Использовали наполнители с различными магнитными свойствами и дисперсностью 63 мкм:

- ферромагнетик коричневый шлам (КШ),
- парамагнетик CuO,
- диамагнетик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Порошковые наполнители в оксидных композиционных материалах имеют практически изотропное распределение частиц. Поэтому эти материалы и покрытия на их основе можно рассматривать как изотропные. Модуль упругости при изгибе определяли по ГОСТ 9550-81 [4]. Остаточные напряжения определяли при консольном изгибе образцов с покрытиями (рис. 1).

Тонкая основа подвергается изгибу, измерение которого позволяет определить остаточные напряжения в покрытиях. Образцы для измерения остаточных напряжений представляли собой пластину из Ст.3 толщиной 0,3 мм, на которую наносили покрытие.

При нанесении покрытия металлические пластины находились в горизонтальном положении. В процессе полимеризации формировались покрытия толщиной 0,4 мм.

### 5. Сравнительный анализ выражений для расчета остаточных напряжений

Остаточные напряжения определяли при консольном изгибе образцов (рис. 1) по формуле [1]:

$$\sigma_R = \frac{E_s \cdot H^3 \cdot z}{3L^2(H+h)h}, \quad (1)$$

где  $z$  - отклонение образца;  $E_s$  - модуль упругости основы;  $H$  - толщина основы;  $L$  - длина консоли с покрытием;  $h$  - толщина полимерного покрытия.

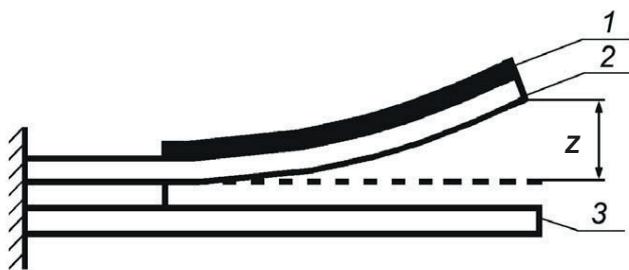


Рис. 1. Схема метода определения остаточных напряжений в покрытиях (1 - покрытие; 2 - основа; 3 - основание для измерения отклонения консоли)

Все геометрические характеристики образца, которые необходимы для расчета, достаточно просто измерить. Модуль упругости основы  $E_s$  определяется после испытаний или берется из соответствующей справочной литературы.

Следует отметить, что характеристики упругости покрытия не используются при расчете остаточных напряжений по формуле (1). Это является основным достоинством использования этой достаточно простой формулы при расчете остаточных напряжений в полимерных покрытиях.

В работе [5] рассмотрен более точный подход к определению остаточных напряжений в полимерных

покрытиях, который принимает во внимание влияние изгиба на напряжения в покрытиях.

Выражение для расчета остаточных напряжений при консольном изгибе образцов (рис. 1) имеет следующий вид:

$$\sigma_R = \frac{zE_s H^3}{3hL^2(H+h)(1-\mu_s)} + \frac{zE_c(H+h)}{L^2(1-\mu_c)} \quad (2)$$

где  $E_c$  - модуль упругости покрытия;  $\mu_s, \mu_c$  - коэффициенты Пуассона основы и покрытия соответственно.

Второе слагаемое в выражении (2) учитывает уменьшение напряжений, которое происходит при изгибе образца.

Погрешность в определении остаточных напряжений вследствие не учета второго слагаемого увеличивается при увеличении отношений толщин  $h/H$  и модулей упругости  $E_c/E_s$  [5].

Более полный и комплексный анализ напряженно-го состояния в образце с покрытием приведен в работе [6]. После некоторых алгебраических преобразований было получено выражение определения остаточных напряжений [7]:

$$\sigma_R = \frac{zC_s H^3}{3hL^2(H+h)} \left[ \left( 1 + \frac{C_c h}{C_s H} \right) \cdot \left( 1 + \frac{C_c h^3}{C_s H^3} \right) \right] + \frac{zE_c(H+h)}{L^2}, \quad (3)$$

где  $C_s = \frac{E_s}{1-\mu_s^2}, C_c = \frac{E_c}{1-\mu_c^2}.$

Формула (3) идентична формуле (2), кроме корректирующего коэффициента

$$\left[ \left( 1 + \frac{C_c h}{C_s H} \right) \cdot \left( 1 + \frac{C_c h^3}{C_s H^3} \right) \right].$$

Несмотря на то, что консольный метод широко используется и имеет много достоинств, необходимо отметить его недостатки. Градиент остаточных напряжений по толщине покрытия этим методом не может быть измерен.

Остаточные напряжения, измеряемые этим методом, являются средними. Краевые эффекты и неравномерность толщины покрытия также уменьшает достоверность результатов при определении остаточных напряжений.

Вес покрытия также вносит погрешности в измерение отклонения образца и должен учитываться при расчете остаточных напряжений.

### 6. Результаты испытаний и обсуждение

Измеренные остаточные напряжения приведены в табл. 1. В таблице также приведены значения модулей упругости  $E_c$ , используемые для расчета остаточных напряжений.

Изгиб металлических образцов после полимеризации оксидного покрытия показан на рис. 2.

Таблица 1

## Механические характеристики полимерных покрытий

Наполнители	Модификатор наполнителя	Модуль упругости при изгибе $E_c$ , ГПа	Остаточные напряжения $\sigma_R$ , МПа		
			Формула (1)	Формула (2)	Формула (3)
–	–	3,0	2,9	5,6	4,1
Оксид меди	ПДЭА-4	2,7	0,7	1,4	1,0
	ПЭ-220	2,9	0,9	1,7	1,3
	ЭД-20	4,6	3,5	7,9	5,6
	–	3,7	2,9	5,9	4,3
КШ	ПДЭА-4	2,4	1,3	2,4	1,7
	ПЭ-220	2,5	1,1	2,0	1,5
	ЭД-20	4,8	1,7	3,9	2,8
	–	3,1	2,0	3,9	2,9
Оксид алюминия	ПДЭА-4	3,0	0,6	1,1	0,8
	ПЭ-220	2,5	1,2	2,2	1,6
	ЭД-20	4,7	2,3	5,3	3,7
	–	3,4	1,9	3,7	2,7

Примечание  
Концентрация наполнителя – 80 мас. ч на 100 мас. ч связующего

Анализ результатов измерения остаточных напряжений показывает, что формула (1) дает заниженные значения напряжений. Эту формулу целесообразно использовать при  $h < H$ . Формулы (2) и (3) дают более точные результаты, так как они учитывают релаксацию напряжений в полимерном покрытии после изгиба. Однако при небольших толщинах покрытия и  $E_c \ll E_s$  они дают результаты подобные формуле (1).



Рис. 2. Изгиб образцов с полимерными покрытиями при различных модификаторах наполнителя  $Al_2O_3$  (верхний образец – ПДЭА-4, средний образец – ПЭ-220, нижний образец – ЭД-20)

## 7. Выводы

В работе исследованы различные подходы к определению остаточных напряжений в эпоксидных покрытиях. Показано, что при толщинах полимерных покрытий меньших, чем толщина металлической основы достаточно точные результаты получаются при использовании простой формулы (1). При больших толщинах полимерных покрытий необходимо учитывать формулы, полученные из более точного анализа напряженного состояния в покрытии. На примере эпоксидных покрытий показано, что расчет без учета дополнительных составляющих в выражении (1) может давать заниженные почти в два раза значения остаточных напряжений.

## Литература

1. Санжаровский А.Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий / А.Т. Санжаровский. – М. : Химия, 1978. – 184 с.
2. Стухляк П.Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов. – Тернопіль : Збруч, 2009. – 237 с.
3. Дослідження епоксикомпозитів, що містять модифіковані олігомерами наповнювачі / А. Букетов, П. Стухляк, В. Левицький, М. Долгов // Вісник ТДТУ. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 52 – 59.
4. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе: ГОСТ 9550-81. Введ. 01.07.82. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
5. Corcoran E.M. Determining stresses in organic coatings using plate beam deflection / E.M. Corcoran // Journal of Paint Technology. – 1969. – V. 41, No 538. – P. 635 – 640.
6. Chow T.S. Strains induced upon drying thin films solvent-cast on flexible substrates / T.S. Chow, C.A. Liu, R.C. Penwell // Journal of Polymer Science : Polymer Physics Edition. – 1976. – V. 14, No 7. – P. 1311 – 1316.
7. Croll S.G. Internal stress in a solvent-cast thermoplastic coating / S.G. Croll // Journal of Coatings Technology. – 1978. – V.50, No 638. – P. 33 – 38.