

**ВАХ без каких либо дополнительных исследований. Использование при обработке ВАХ нескольких модификаций безмодельной методики определения параметров глубоких центров позволило повысить достоверность полученных результатов.**

#### **SUMMARY**

*As a result of the comparative analysis and the generalization from the basic principles of the modern theoretical and experimental works on the injection-contact phenomena in semiconductors, the high-informative and express method of injection spectroscopy of the deep centers in the semisolating thin films has been developed. By using the experimental current voltage characteristic this method allows to identify unambiguously the mechanism of charge transfer in structure and also to reconstruct on an unmodel base the energy distribution of traps in the sample in the case of realizing the regime of an unlimited monopolar injection from the contact.*

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. М.Ламперт, П.Марк. Инжекционные точки в твердых телах. М.: Мир, 1973, -416 с.
2. К.Као, В. Хуанг. Перенос электронов в твердых телах. М.: Мир, 1984, Т.1-2, -352 с.
3. M.A. Lampert. Simplified Theory of Space-Charge-Limited Current in an Insulator with Traps. - Phys Rev., 1956, V.103, p.1648-1655.
4. A.Rose. Space-Charge-Limited Currents in Solids.-Phys Rev, 1955, V.97, p.1538-1544.
5. P.Mark., W. Helfrich. Spase-Charge-Limited Current in Organic Crystais. - J.Appl.Phys., 1962, V.33, N1, p.205-215.
6. J.Sworakovski, K.Pigon. Trap Distribution and Spase-Charge-Limited Current in Organic Crystals Anthracene - J.Phys.Chem.Solids, 1969, V. 30, N 3, p. 419-496.
7. A.Nespurek, P.Semejtek. Spase-Charge-Limited Currents in Insulators with the Gaussian Distribution of Traps.-Czech. J.Phys, 1972, V.B22, p.160-175.
8. J.S.Bonham. SCLC Theory for a Gaussian Trap Distribution. - Aust. J. Chem. 1973, V.26, p.927-939.
9. Зюганов А.И., Свечников С.В. Инжекционно-контактные явления в полупроводниках. - Киев: Нукова: думка, 1981. - 256 с.
10. J.C.Pfister. Note on the Interpretation of Space-Charge Limited Currents with Traps. - Phys. Stat. Sol.(a), 1974, V.24, N1, p. K15-K17.
11. C.Manfredotti, C.De Blasi, S.Galassini at al. Analysis of SCLC Curves by a New Direct Method. - Phys. State. Sol(a), 1976, V.36, N2, p.569-577.
12. S.Nespurek, J.Sworakowski. A Differential Method of Analysis of Steady State Space-Charge-Limited Current-Voltage Characteristics.-Phys. Stat. Sol(a), 1977, V.41, N2, p.619-627.
13. Ch.Schnittler. A Simplified Approach to the SCLC Characteristic of Homogeneous Solids with Traps Distributed in Energy.-Phys. Stat. Sol(a), 1978, V.48, N2, p. 357-368.
14. F.Stockmann. An Exact Evalution of Steady-State Space-Charge-Limited Currents for Arbitrary Trap Distributions. - Phys. Stat. Sol(a), 1981, V.64, N2, p. 475-483.
15. Бойко Б.Т., Копац Г.И., Опанасюк А.С.и др. Кристаллическая и эвергетическая структура пленок CdTe для фотоэлектрических преобразователей.Болгарский физический журнал, 1984, Т.11, N 2, с. 200-208.

*Поступила в редколлегию 8 февраля 1994 г.*

## **ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОЦЕНКА ИХ НАДЕЖНОСТИ**

**Шаловалов С.П.**

Повышенный спрос на композитные материалы (КМ) со стороны авиационной, строительной, автомобильной и других отраслей промышленности стимулирует разработки новых материалов, обеспечивающих надежность конструкций и изделий в процессе эксплуатации. В связи с одновременным, в большинстве случаев, созданием изделия и самого КМ, основным объектом исследований является композитный материал. При проектировании новых КМ возникает следующая задача: путем выбора состава и структуры

материала (взаимного размещения компонентов) получить изделие, обладающее заданными (необходимыми для надежной эксплуатации) свойствами. В наиболее общем виде задача записывается следующим образом: оптимизировать целевую функцию  $f = f(\vec{D})$ , для вектора проектных переменных  $\vec{D} = (D_1, D_2, \dots)$  при ограничивающих условиях, т.е. установить экстремальное значение этой функции и определить проектные переменные. В качестве проектных переменных чаще всего выступают объемные содержания компонентов в КМ, ограничивающими условиями служат макроскопические свойства КМ, под оптимальным состоянием понимают минимальный вес, минимальную стоимость и т.п.

Применение основных понятий теории надежности [1,2] к КМ связано с серьезными затруднениями, хотя в принципе эти понятия универсальны и применимы к объектам самой различной природы и структуры. Композитный материал представляет собой случайную структуру из компонентов, имеющих границу раздела и взаимодействующих через нее сложным образом между собой, а также с внешними телами. Все параметры и функции состояния, описывающие его поведение (например, напряжения  $\sigma_{ij}$ , деформации  $e_{ij}$ , упругие константы  $c_{ijkl}$  и др.), имеют случайный характер, законы распределения которых неизвестны в связи с недостаточностью статистической информации. Один из путей преодоления трудностей состоит в описании процесса взаимодействия объекта с окружающей средой, переход КМ в неработоспособное состояние как физический процесс. Это приводит к введению некоторых гипотез и рассмотрению при определении надежности КМ процесса его деформирования при внешних нагрузениях и условий появления отказа. Отказ трактуется в теории надежности как случайное событие [2], а вероятность безотказной работы объекта, т.е. вероятность того, что на заданном отрезке времени отказ не возникает, служит одним из показателей при расчетах надежности. В нашем случае отказ (выброс) интерпретируется как выход реализации случайной функции за пределы некоторой допустимой области [3]. Вероятность безотказной работы изделия или конструкции оцениваем вероятностью пребывания этой случайной функции в допустимой области, решая задачу теории выбросов случайного процесса [3].

Рассматриваем матричный композитный материал, в котором имеется непрерывная компонента, называемая матрицей или связующим, в которой случайным образом распределены дискретные включения. Включения, служащие с одной стороны упрочняющей фазой, в то же время вызывают при нагружении КМ в матрице неоднородность напряженно-деформированных полей. Вводим предположение, что нарушение сплошности матрицы является основной причиной отказа изделий из КМ. Тогда вероятность отказа оценивается вероятностью выхода деформаций в матрице за пределы допустимых значений. В качестве другого важного предположения принимаем гипотезу о распределении случайных деформаций в связующем  $e_{ij}^M$  согласно закону Гаука (нормальный закон распределения). Этому способствует предельная теорема об аппроксимации нормальным распределением совокупности случайных величин [4]. Следовательно ([5]),

$$f(e_{ij}^M) = \exp \left[ -\frac{(e_{ij}^M - \langle e_{ij} \rangle_M)^2 / (2 \langle e_{ij}' e_{ij}' \rangle_M)}{\sqrt{2\pi \langle e_{ij}' e_{ij}' \rangle_M}} \right], \quad (1)$$

где  $\langle e_{ij} \rangle_M$ ,  $\langle e'_{ij} e'_{ij} \rangle_M$  - математическое ожидание и дисперсия случайной величины  $e_{ij}^M$ ; угловые скобки - процедура осреднения;

$$P_0 = 1 - P(e_{смп}^M < e_{ij}^M < e_{сх}^M), \quad (2)$$

где  $e_{смп}^M$  и  $e_{сх}^M$  - предельные деформации матрицы на сжатие (берется со знаком " - ") и растяжение.

Ставим следующую задачу - рассчитать структуру матричного КМ, обладающего заданными макросвойствами (пусть это будут упругие модули композита  $C_{ijkl}^*$ ) и имеющего минимальную объемную плотность при заданном уровне надежности. Считаем свойства компонентов КМ известными:  $C_{ijkl}^M$  - тензор упругих модулей матрицы,  $\rho_M$  - ее плотность;

$C_{ijkl}^*, \rho_A (i = \overline{1, n})$  - аналогичные величины, относящиеся к включениям.

Кроме того, заданы геометрические характеристики включений, например, как это принято в механике композитов, посредством параметра  $\alpha_i = a_i/b_i$ , где  $a, b$  - полуоси эллипсоидов (наиболее встречающиеся формы включений сферическая и волокнистая соответствуют значениям  $\alpha = 1, \alpha \rightarrow \infty$ ). Взаимное размещение включений в матрице принимаем статистически однородным. Объемные содержания компонентов обозначаем  $\zeta_M, \zeta_A, \zeta_M = V_M/V, \zeta_i = V_i/V, i = \overline{1, n}$ . Так как  $\zeta_M + \sum_{i=1}^n \zeta_i = 1$ , то в качестве независимых варьируемых характеристик

имеем  $\zeta_i$ . Тогда записываем задачу оптимального проектирования (иначе, задачу выбора состава КМ) в общем виде: найти  $\min \rho^* = \Phi(\zeta_i, \rho_M, \rho_i)$  при ограничениях

$$C_{ijkl}^* \leq \Psi(\zeta_i, \alpha_i, C_{ijkl}^M, C_{ijkl}^A), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

Здесь функция цели является линейной, ограничения нелинейны.

Постановка задачи (3) в своей основе должна содержать уже установленные соотношения для вычисления макросвойств КМ (цель - получение функции  $\Psi$ ), а также анализ распределений деформаций в структуре КМ (цель получение для деформаций в матрице КМ математического ожидания и дисперсии). Наличие незначительной управляемой информации: свойств компонентов КМ, их объемного содержания и геометрии недостаточно для точного предсказания свойств создаваемого материала.

Нахождение макромоделей  $C_{ijkl}^*$  связано с установлением зависимости между полем средних деформаций во включениях и макродеформациями. В работах [5-8] искомая зависимость находилась с использованием вариационного принципа. Упругая энергия деформирования, отнесенная к объему  $V$ , представлялась в виде (все компоненты КМ изотропны)

$$\langle W \rangle = \mu_M \langle e_{ij} e_{ij} \rangle + 1/2 \lambda_M \langle e_{ii}^2 \rangle + \sum (\bar{\mu}_n \zeta_n \langle e_{ij} e_{ij} \rangle_n + 1/2 \bar{\lambda}_n \zeta_n \langle e_{ii}^2 \rangle_n), \quad (4)$$

где  $\bar{\mu}_n = \mu_n - \mu_M, \bar{\lambda}_n = \lambda_n - \lambda_M$ .

Вариация этого функционала на поле флуктуаций перемещений при некотором ограничении на поле кинематически возможных деформаций  $\langle (e_{ij} e_{ij})_n \rangle \approx \langle (e_{ij})_n \langle (e_{ij})_n \rangle$  позволила получить искомые соотношения.

Рассматриваем одну из композитных структур - двухфазный КМ с включениями округлой формы. Как показано в [6], формулы для

макромодулей КМ достаточно точно описывают такие структуры (хорошее совпадение с экспериментальными данными). Задача оптимального проектирования такого материала состоит из соотношений

$$\begin{aligned} \mu_M + \frac{\rho_1 \zeta_1}{1 + \alpha(1 - \zeta_1) \rho_1 / \mu_M} &\geq \mu^*, & a &= \frac{2}{3} \left( 1 - \frac{2 \lambda_M + \mu_M}{5 \lambda_M + 2 \mu_M} \right), \\ k_M + \frac{\lambda_1 \zeta_1}{1 + \alpha(1 - \zeta_1) \lambda_1 / \mu_M} &\geq k^*, & b &= 1 - \frac{\lambda_M + \mu_M}{\lambda_M + 2 \mu_M} \end{aligned} \quad (5)$$

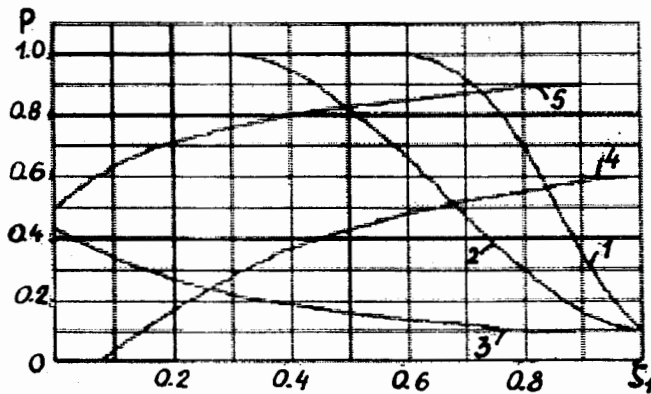
$$\rho^* = \rho_M \zeta_M + \rho_1 \zeta_1 \rightarrow \min.$$

Дисперсия деформаций в матрице  $\langle e'_{ij} e'_{ij} \rangle_M$  связана с дисперсией деформаций КМ  $\langle e'_{ij} e'_{ij} \rangle$  зависимостью [5]

$$\zeta_M \langle e'_{ij} e'_{ij} \rangle_M = \langle e'_{ij} e'_{ij} \rangle - \zeta_1 \zeta_M (\langle e_{ij} \rangle_1 - \langle e_{ij} \rangle_M) (\langle e_{ij} \rangle_1 - \langle e_{ij} \rangle_M), \quad (6)$$

где  $\langle e'_{ij} e'_{ij} \rangle$ ,  $\langle e_{ij} \rangle_M$  также зависят от средних деформаций включений, определяемых напряжением нагружения (формулы в виду громоздкости не приводятся) [5].

В качестве примера рассматриваем случай простого нагружения (напряжение растяжения  $\langle \sigma_{11} \rangle \neq 0$ ) двухфазного КМ с включениями округлой формы. Определяем вероятность безотказной работы  $P=1-P_0$ .



На рис. приведены результаты расчета вероятности безотказной работы изделия из КМ, имеющего матрицу со следующими свойствами:

$$E_M = 25 \text{ ГПа}, \nu_M = 0.17, e_{\sigma\sigma}^M = 0.00012, e_{\sigma\sigma}^M = -0.0014.$$

Кривые 1, 2 представляют результаты в случае армирования включениями:  $E_1/E_M = 400$ ,  $\nu_1 = 0.15$  при уровнях нагружения  $\langle \sigma_{11} \rangle$  соответственно равным 0.003, 0.005 ГПа. Кривые 3, 4, 5 построены для той же матрицы, но ослабленной порами ( $E_1 = \nu_1 = 0$ ) соответствующие нагрузки равны 0.0005, 0.001, 0.003 ГПа.

В заключение отмечаем, что предложенная здесь методика оптимального проектирования композитных материалов позволяет выбирать составы КМ, структуры которых состоят из частиц округлой формы и волокон, скрепленных связующим с одновременной оценкой уровня надежности изделия из такого материала. В работе рассмотрен случай армирования изотропными включениями, расположения которых статистически однородны в матрице. Очевидно, что предложенная методика может быть распространена на композиты более сложного строения.

## SUMMARY

The procedure of optimal design of composite materials of required elastic properties is proposed. The level of reliability of composite material is estimated. An example of calculation of two-phase composite material is given.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений, М.:Стройиздат, 1982, 351 с.
2. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций, М.: Машиностроение, 1984, 312 с.
3. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций, М.: Наука, 1968, 463 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей, М.:Наука, 1969, 576 с.
5. Шаповалов С.П. Вероятность выброса деформаций за допустимый уровень в матрице зернистого композита //Динам. и прочность машин, 1991, вып.52.-С.64-68.
6. Шаповалов С.П. Проектирование трехфазных композитов и исследование напряжений в элементах структуры . Диссертация на соиск. ученой степени к.ф.-м.н., Куйбышев , 1988, 172 с.
7. Дудукаленко В.В., Шаповалов С.П. Прогнозирование свойств трехфазных композитов с нерегулярной структурой //В кн.:Применен. композ. матер. на полимер. и метал. матрицах, Пермь, 1985.-С. 23-24.
8. Дудукаленко В.В., Лысач Н.Н. О пластических свойствах материала, содержащего пластинчатые включения //Изв. АН СССР. Механика тверд. тела, 1980, N 1.-С. 103-109.

Поступила в редколлегию 4 апреля 1994 г.

УДК 628.543+566.4

## ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ СУЛЬФАТ-ІОНОВМІСНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

Звягінцев Г.Л.

Розроблено комплекс технологій, які дозволяють економити природну сірку шляхом очистки, утилізації та регенерації сульфат-іоновмісних ресурсів [1]. Додатково подаємо нові технологічні процеси переробки фосфогіпсу, який одержують у присутності регулятора його кристалізації (ПАР-фосфогіпс) [2,3]. В трубі-сушарці (навантаження за меліорантом - 37,5 т/год) одержуємо меліорант 1 сорту 12,5% вологи. Результати досліджень (див.табл.1) показують його значні техніко-економічні переваги перед продуктом, який одержують із звичайного фосфогіпсу ("Вабкос-BSH").

Таблиця 1

Порівняльні властивості меліоранту із ПАР-фосфогіпсу і звичайного фосфогіпсу.

Показники	Базовий варіант	Дослідний варіант
Навантаження за апатитом, т/г	33,9	40,1
Вміст домішок у фосфогіпсі, %		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (заг.)	2,10	0,82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (вод.)	1,70	0,27
F (заг.)	0,24	0,12
F (вод.)	0,20	0,07
Волога	43,7	34,1
Витрати палива на сушіння, %	100	60
Витрати на транспортування, %	100	40