

же при $c = 10^{-3}$ изотропное расширение среды может превысить значение $\langle \epsilon_{ii} \rangle = 0,1$. Так как материал всегда содержит некоторое количество пор, то отсюда следует, что абсолютно изотропно нерастяжимых материалов не существует. Тогда возникает вопрос о правомочности использования потенциала Муни в области больших изотропных растяжений. Кроме того, параметры различных упругих потенциалов изотропно деформируемых материалов определяют, как правило, при гидростатическом сжатии [10]. Вследствие проведенного анализа использование найденных параметров в области большого гидростатического растяжения представляется некорректным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буряченко В. А., Липанов А. М. Уравнения механики газонасыщенных пористых сред // ПМТФ.— 1986.— № 4.
2. Буряченко В. А., Липанов А. М. Концентрация напряжений на эллипсоидальных включениях и эффективные термоупругие свойства композитных материалов // ПМ.— 1986.— Т. 22, № 11.
3. Буряченко В. А. Корреляционная функция полей напряжений в матричных композитах // Изв. АН СССР. МТТ.— 1987.— № 3.
4. Грин А., Адкинс Д. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды.— М.: Мир, 1965.
5. Маслов Б. П. Эффективные постоянные в теории геометрически нелинейных твердых тел // ПМ.— 1981.— Т. 17, № 5.
6. Hashin Z. Large isotropic deformation of composites and porous media // Intern. J. Solids and Structure.— 1985.— V. 21, N 7.
7. Кристенсен Р. Введение в механику композитов.— М.: Мир, 1982.
8. Хорошун Л. П. К теории насыщенных пористых сред // ПМ.— 1976.— Т. 12, № 12.
9. Green A. E., Zerna W. Theoretical elasticity.— Oxford: Clarendon Press, 1954.
10. Черных К. Ф., Шубина И. М. Об учете сжимаемости резины // Механика эластомеров.— Краснодар: Кубан. ун-т, 1978.— Вып. 263.

Поступила 24/III 1987 г.

УДК 539.378

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л. А. Сараев

(Куйбышев)

Прогнозирование неупругих свойств материалов со случайными неоднородностями — одно из актуальных направлений современной механики деформируемого твердого тела. Моделирование макроскопических определяющих соотношений и вычисление эффективных характеристик таких сред помогают во многих случаях достаточно точно оценивать деформационные свойства, предельное состояние и несущую способность элементов конструкций, изготовленных из композиционных, порошковых и других конструкционных материалов. Макроскопическое поведение многокомпонентных жесткопластических и упругопластических композитов в рамках теории течения исследовано в [1, 2].

В настоящей работе рассматривается применение метода обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей для описания малых упругопластических деформаций композиционных материалов с произвольным числом составляющих компонентов. В корреляционном приближении аналогичная задача решена в [3, 4].

Пусть микroneоднородная среда, заполняющая объем V , ограниченный поверхностью S , образована n различными упругопластическими компонентами, соединенными между собой с идеальной адгезией. Определяющие соотношения для материала каждого ее компонента задаются уравнениями

$$(1) \quad s_{ij} = 2\mu_s(\epsilon_{kl})e_{ij}, \quad \sigma_{pp} = 3K_s\epsilon_{pp} \quad (s = 1, 2, \dots, n).$$

Здесь $s_{ij} = \sigma_{ij} - (1/3)\delta_{ij}\sigma_{pp}$; $e_{ij} = \epsilon_{ij} - (1/3)\delta_{ij}\epsilon_{pp}$; σ_{ij} , ϵ_{ij} — компоненты тензоров напряжений и деформаций; $\mu_s(\epsilon_{kl})$ — модуль пластичности сдвига; K_s — объемный модуль s -го компонента ($K_s = \text{const}$).

Структура такого композита может быть описана набором индикаторных случайных функций координат $\kappa_1(\mathbf{r}), \kappa_2(\mathbf{r}), \dots, \kappa_n(\mathbf{r})$, причем каждая функция $\kappa_s(\mathbf{r})$ равна единице на множестве точек s -го компонента и равна нулю вне множества. С помощью этих функций локальные определяющие уравнения (1) можно записать в виде

$$(2) \quad s_{ij}(\mathbf{r}) = 2 \sum_{s=1}^n \mu_s(\varepsilon_{kl}(\mathbf{r})) \kappa_s(\mathbf{r}) e_{ij}(\mathbf{r}), \quad \sigma_{pp}(\mathbf{r}) = 3 \sum_{s=1}^n K_s \kappa_s(\mathbf{r}) \varepsilon_{pp}(\mathbf{r}).$$

Все функции $\kappa_s(\mathbf{r})$, напряжения и деформации предполагаются статистически однородными и эргодическими случайными полями, и их математические ожидания заменяются средними значениями по объемам компонентов V_s и по полному объему композита $\bar{V} = \sum_{s=1}^n \bar{V}_s$: $\langle f \rangle_s = \frac{1}{\bar{V}_s} \int_{\bar{V}_s} f(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$,

$$\langle f \rangle = \frac{1}{\bar{V}} \int_V f(\mathbf{r}) d\mathbf{r}.$$

Установление макроскопических определяющих уравнений и эффективных констант рассматриваемого композиционного материала означает определение зависимости между макронапряжениями $\langle \sigma_{ij} \rangle$ и макродеформациями $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$. Общий вид этой зависимости выражается в данном случае формулой

$$(3) \quad \langle \sigma_{ij} \rangle = E_{ijkl}^* (\langle \varepsilon_{mn} \rangle) \langle \varepsilon_{kl} \rangle$$

($E_{ijkl}^* (\langle \varepsilon_{mn} \rangle)$ — компоненты тензора четвертого ранга модулей пластичности). Здесь и в дальнейшем звездочкой обозначаются эффективные значения величин.

Для вывода соотношений (3) необходимо статистически осреднить систему уравнений деформирования неоднородной среды, состоящую из (2), уравнений равновесия

$$(4) \quad \sigma_{ip,p}(\mathbf{r}) = 0$$

и формул Коши

$$(5) \quad 2\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = u_{i,j}(\mathbf{r}) + u_{j,i}(\mathbf{r}),$$

связывающих компоненты тензора малых упругопластических деформаций с компонентами вектора перемещений $u_i(\mathbf{r})$. Граничными условиями для системы (2), (4), (5) являются условия отсутствия флуктуаций величин на поверхности S объема V : $f(\mathbf{r}) = \langle f \rangle$, $\mathbf{r} \in S$. Система (2), (4), (5) стохастически нелинейная, и, чтобы воспользоваться методами теории упругости установления макроскопических определяющих соотношений, первое из уравнений (2) необходимо линеаризовать, сделав определенные допущения. С этой целью будем пренебрегать в пределах каждого компонента флуктуациями деформаций, стоящих под знаком модуля пластичности, и примем приближенное равенство $\mu_s(\varepsilon_{kl}) = \mu_s(\langle \varepsilon_{kl} \rangle_s)$, с учетом которого соотношения (2) имеют вид

$$(6) \quad s_{ij} = 2 \sum_{s=1}^n \mu_s(\langle \varepsilon_{kl} \rangle_s) \kappa_s e_{ij}, \quad \sigma_{pp} = 3 \sum_{s=1}^n K_s \kappa_s \varepsilon_{pp}.$$

Следуя методу обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей, введем тензор Грина $G_{ik}(\mathbf{r}) = \frac{1}{8r\mu} \left(\delta_{ik} r_{,pp} - \frac{3K+5\mu}{3K+8\mu} r_{,ih} \right)$, $r = |\mathbf{r}|$, содержащий неопределенные величины μ , K , удовлетворяющие неравенствам

$$\min_s \{ \mu_s(\langle \varepsilon_{kl} \rangle_s) \} \leq \mu \leq \max_s \{ \mu_s(\langle \varepsilon_{kl} \rangle_s) \},$$

$$\min_s \{ K_s \} \leq K \leq \max_s \{ K_s \}.$$

Здесь в отличие от константы K значение μ в общем случае может зависеть от деформаций $\langle \varepsilon_{kl} \rangle_s$. Систему (4)–(6) можно заменить системой интегральных уравнений равновесия, ядрами которых служат вторые производные тензора Грина

$$(7) \quad \varepsilon'_{ij}(\mathbf{r}) = \int_V G_{ik,lj}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \tau'_{kl}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1;$$

$$(8) \quad \tau_{kl} = - \sum_{s=1}^n (2 [\mu_s] e_{ij} + \delta_{ij} [\bar{K}_s] \varepsilon_{pp}) \kappa_s, \quad [f_s] = f_s - f$$

(штрихами обозначены флуктуации величин в объеме V).

Для получения макроскопических определяющих уравнений рассматриваемого композита следует осреднить по полному объему соотношения (6):

$$(9) \quad \langle s_{ij} \rangle = 2 \sum_{s=1}^n c_s \mu_s \langle \varepsilon_{kl} \rangle_s \langle e_{ij} \rangle_s; \quad \langle \sigma_{pp} \rangle = 3 \sum_{s=1}^n c_s K_s \langle \varepsilon_{pp} \rangle_s$$

($c_s = V_s V^{-1}$ — объемные содержания компонентов). Из (9) видно, что установление эффективных определяющих соотношений требует выразить средние по объемам компонентов деформации $\langle \varepsilon_{ij} \rangle_s$ через макродеформации $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$. Эти величины связаны зависимостью [1, 2]

$$(10) \quad \langle \varepsilon_{ij} \rangle_s = \langle \varepsilon_{ij} \rangle + c_s^{-1} \langle \kappa'_s \varepsilon'_{ij} \rangle.$$

Замена, согласно гипотезе сингулярного приближения, в уравнениях (7), (8) вторых производных тензора Грина их сингулярной частью и подстановка в соотношение (10) приводят к уравнениям относительно компонентов тензора $\langle \varepsilon_{ij} \rangle_s$

$$(11) \quad \langle e_{ij} \rangle_s = \frac{2\mu(1-\alpha)\langle \varepsilon_{ij} \rangle + \alpha \langle s_{ij} \rangle}{2\mu + 2[\mu_s]\alpha},$$

$$\langle \varepsilon_{pp} \rangle_s = \frac{3K(1-\gamma)\langle \varepsilon_{pp} \rangle + \gamma \langle \sigma_{pp} \rangle}{3K + 3[K_s]\gamma},$$

$$\alpha = \frac{2}{15} \frac{4-5\nu}{1-\nu}, \quad \gamma = \frac{1}{3} \frac{1+\nu}{1-\nu}, \quad \nu = \frac{3K-2\mu}{6K+2\mu}.$$

Преобразование соотношений (9) с помощью формул (11) дает возможность записать для рассматриваемого композита макроскопические уравнения упругопластического деформирования (3) с изотропным тензором эффективных модулей пластичности $E_{ijkl}^* = \mu^* \bar{I}_{ijkl} + \left(K^* - \frac{2}{3}\mu^*\right) \delta_{ij} \delta_{kl}$:

$$(12) \quad \langle s_{ij} \rangle = 2\mu^* \langle \varepsilon_{kl} \rangle_s \langle e_{ij} \rangle, \quad \langle \sigma_{pp} \rangle = 3K^* \langle \varepsilon_{kl} \rangle_s \langle \varepsilon_{pp} \rangle;$$

$$(13) \quad \mu^* = \mu \frac{(1-\alpha)\xi}{1-\alpha\xi}, \quad \xi = \frac{\sum_{s=1}^n c_s \mu_s \langle \varepsilon_{kl} \rangle_s}{\mu(1-\alpha) + \alpha \sum_{s=1}^n \mu_s \langle \varepsilon_{kl} \rangle_s},$$

$$K^* = K \frac{(1-\gamma)\eta}{1-\gamma\eta}, \quad \eta = \frac{\sum_{s=1}^n c_s K_s}{K(1-\gamma) + \gamma \sum_{s=1}^n K_s},$$

$$\langle e_{ij} \rangle_s = \frac{(1-\alpha)\mu + \alpha\mu^*}{\mu + \alpha[\mu_s]} \langle e_{ij} \rangle, \quad \langle \varepsilon_{pp} \rangle_s = \frac{(1-\gamma)K + \gamma K^*}{K + \gamma[K_s]} \langle \varepsilon_{pp} \rangle.$$

В замкнутую систему уравнений упругопластического деформирования композиционного материала (12), (13) наряду с макронапряжениями $\langle \sigma_{ij} \rangle$ и макродеформациями $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ входят компоненты тензоров $\langle \varepsilon_{ij} \rangle_s$. Для их исключения из системы (12), (13) необходимо задать вид функций модулей пластичности каждого компонента $\mu_s(\varepsilon_{kl})$ и выбрать соответствующим образом μ и K . Вид функций $\mu_s(\varepsilon_{kl})$ задается согласно деформационным свойствам материалов компонентов композита на основе экспериментальных данных. В частном случае, когда все $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ являются константами, формулы (12), (13) совпадают с известными результа-

тами обобщенного сингулярного приближения в теории линейной упругости микронеоднородных сред [5].

От выбора неопределенных μ и K зависит способ участия составляющих компонентов в деформировании композиционного материала. Задавая соответствующим образом значения μ и K , можно получать различные модели многокомпонентных композитов с любой степенью связности составляющих компонентов. Например, если в общих формулах (13) положить $\mu = \mu_1(\varepsilon_{kl})$, $K = K_1$, то получится модель композита, в котором первый компонент играет роль связующей матрицы, а остальные — роль отдельных включений. Выражения для эффективных величин принимают вид

$$(14) \quad \mu^* = \mu_1 \frac{(1 - \alpha_1) \xi_1}{1 - \alpha_1 \xi_1}, \quad \xi_1 = \sum_{s=1}^n \frac{c_s \mu_s}{\mu_1 (1 - \alpha_1) + \alpha_1 \mu_s},$$

$$K^* = K_1 \frac{(1 - \gamma_1) \eta_1}{1 - \gamma_1 \eta_1}, \quad \eta_1 = \sum_{s=1}^n \frac{c_s K_s}{K_1 (1 - \gamma_1) + \gamma_1 K_s},$$

$$\langle e_{ij} \rangle_s = \frac{(1 - \alpha_1) \mu_1 + \alpha_1 \mu^*}{(1 - \alpha_1) \mu_1 + \alpha_1 \mu_s} \langle e_{ij} \rangle, \quad \langle e_{pp} \rangle_s = \frac{(1 - \gamma_1) K_1 + \gamma_1 K^*}{(1 - \gamma_1) K_1 + \gamma_1 K_s} \langle e_{pp} \rangle.$$

В теории упругости подобные формулы для эффективных модулей изотропных композитов типа матрица — включения показывают хорошее соответствие экспериментальным данным как для упругих и жестких включений, так и для пор [6, 7].

Другим типом связности фаз обладает неоднородная среда, у которой матрица образована не одним, а несколькими взаимопроникающими компонентами. Определяющие уравнения для такого композиционного материала получаются из общих формул (12), (13), если в них положить [1]

$$\mu = \{\mu\} = \sum_{s=1}^m c_s \mu_s, \quad K = \{K\} = \sum_{s=1}^m c_s K_s, \quad m \leq n.$$

В этом случае выражения для эффективных величин (13) принимают вид

$$(15) \quad \mu^* = \{\mu\} \frac{(1 - A) X}{1 - AX}, \quad X = \sum_{s=1}^n \frac{c_s \mu_s}{\{\mu\} (1 - A) + A \mu_s},$$

$$K^* = \{K\} \frac{(1 - \Gamma) H}{1 - \Gamma H}, \quad H = \sum_{s=1}^n \frac{c_s K_s}{\{K\} (1 - \Gamma) + \Gamma K_s},$$

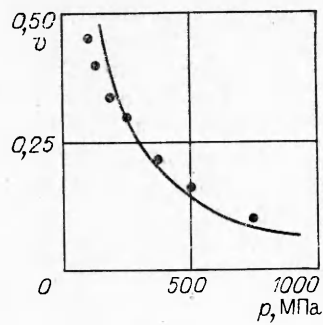
$$\langle e_{ij} \rangle_s = \frac{(1 - A) \{\mu\} + A \mu^*}{(1 - A) \{\mu\} + A \mu_s} \langle e_{ij} \rangle, \quad \langle e_{pp} \rangle_s = \frac{(1 - \Gamma) \{K\} + \Gamma K^*}{(1 - \Gamma) \{K\} + \Gamma K_s} \langle e_{pp} \rangle,$$

$$A = \frac{2}{15} \frac{4 - 5N}{1 - N}, \quad \Gamma = \frac{1}{3} \frac{1 + N}{1 - N}, \quad N = \frac{3}{6} \frac{\{K\} - 2\{\mu\}}{\{K\} + 2\{\mu\}}.$$

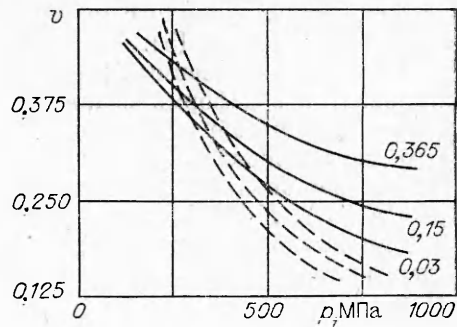
Матрица композиционного материала, эффективные характеристики которого находятся по формулам (15), образована его первыми m взаимопроникающими компонентами. Остальные $n - m$ компонентов представляют собой отдельные включения. В теории упругости формулы, подобные (15), хорошо описывают соответствие модулей упругости композитов, образованных взаимопроникающими каркасами, экспериментальным данным [5, 8].

Применим формулы (14), (15) для расчета упругопластических свойств некоторых микронеоднородных материалов, при этом участки диаграмм растяжения (сжатия) материалов компонентов будем аппроксимировать экспоненциальной зависимостью

$$(16) \quad \sigma = \tau(1 - \exp(-E\varepsilon/\tau))_s$$



Р и с. 1



Р и с. 2

где E — модуль Юнга; τ — предельное значение напряжения на данном участке диаграммы (предел текучести); σ , ϵ — напряжение и деформация растяжения (сжатия).

Вычислим по (14) упругопластические характеристики пористых сред, материал основы которых образован одним или двумя компонентами, при различных способах нагружения. Для однокомпонентной пористой среды ($n = 2$, $\mu_2 = K_2 = 0$, $c_2 = v$) из (14) следует $\xi_1 = \eta_1 = 1 - v$. Для двухкомпонентной пористой среды ($n = 3$, $\mu_3 = K_3 = 0$, $c_3 = v$) формулы (14) дают $\xi_1 = c_1 + \frac{c_2 \mu_2}{(1 - \alpha_1) \mu_1 + \alpha_1 \mu_2}$, $\eta_1 = c_1 + \frac{c_2 K_2}{(1 - \gamma_1) K_1 + \gamma_1 K_2}$, $c_1 + c_2 = 1 - v$ (v — объемное содержание пор).

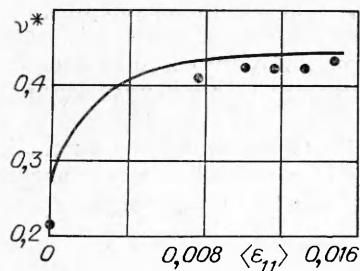
Сравним полученные результаты с экспериментальными данными прессования пористых материалов в осесимметричной пресс-форме. Связь осевого давления $p = \langle \sigma_{11} \rangle$ и пористости v вытекает из соотношений (12), в которых необходимо положить $i = j = 1$. Учитывая, что макродеформации среды в пресс-форме связаны с объемным содержанием пор соотношениями $\langle \epsilon_{11} \rangle = \ln [(1 - v_0)/(1 - v)]$, $\langle \epsilon_{22} \rangle = \langle \epsilon_{33} \rangle = 0$, получаем уравнение прессования

$$(17) \quad p = \left(K^* + \frac{4}{3} \mu^* \right) \ln \frac{1 - v_0}{1 - v}$$

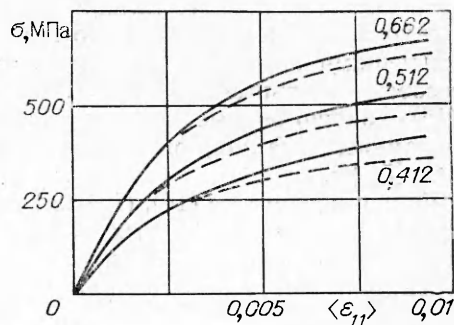
(v_0 — начальная пористость материала). При расчете кривых уплотнения пористых сред (17) решалось численно совместно с соотношениями (14) методом последовательных приближений.

На рис. 1 представлена теоретическая кривая уплотнения порошка электролитического никеля в симметричной пресс-форме, построенная по формулам (14), (17) для однокомпонентного пористого материала. Точками отмечены экспериментальные значения, полученные без снятия деформационного наклепа, приведенные в [9], $v_0 = 0,53$.

На рис. 2 показано сравнение теоретических кривых уплотнения двухкомпонентных пористых сред, рассчитанных по (14), (17) (штриховые линии), с экспериментальными кривыми прессования смеси порошков



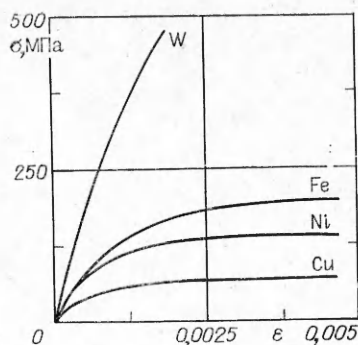
Р и с. 3



Р и с. 4

Материалы компонентов	E, МПа	ν	τ , МПа
Никель	204 000	0,28	140
Медь	123 480	0,33	69
Железо	205 926	0,28	200
Вольфрам	404 740	0,28	750
Стекло	78 000	0,25	—

Р и с. 5



железа и стекла (сплошные), полученными в [10], цифры у кривых — объемные содержания стекла, $\nu_0 = 0,55$.

Рассмотрим упругопластическое поведение однокомпонентной пористой среды в условиях одноосного растяжения. Уравнения (12) в этом случае принимают вид

$$(18) \quad \langle \sigma_{11} \rangle = 9 \frac{K^* \mu^*}{3K^* + \mu^*} \langle \epsilon_{11} \rangle, \quad \langle \epsilon_{22} \rangle = \langle \epsilon_{33} \rangle, \quad \langle \epsilon_{22} \rangle = -\nu^* \langle \epsilon_{11} \rangle,$$

где $\nu^* = \nu^*(\langle \epsilon_{kl} \rangle_s)$ — упругопластический коэффициент Пуассона пористого материала. По численным расчетам формул (14), (16), (18) получена теоретическая зависимость изменения упругопластического коэффициента Пуассона от осевой деформации.

На рис. 3 приведено сравнение этой зависимости (сплошная линия) с экспериментальными значениями из [11] (точки) измерения коэффициента Пуассона пористого восстановленного железа, спеченного при 1200 °С в водороде в течение двух часов.

Воспользуемся формулами (15) для расчета упругопластического поведения композита, образованного двумя взаимопроникающими каркасами. Эффективные характеристики этой среды получаются из них при $m = n = 2$:

$$(19) \quad \{\mu\} = \langle \mu \rangle = c_1 \mu_1 + c_2 \mu_2, \quad \{K\} = \langle K \rangle = c_1 K_1 + c_2 K_2, \\ N = \langle \nu \rangle = c_1 \nu_1 + c_2 \nu_2.$$

Для построения теоретической диаграммы одноосного растяжения композита уравнения (15), (16), (18), (19) решались численно методом последовательных приближений.

На рис. 4 сравниваются теоретические (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные) диаграммы растяжения образцов, изготовленных пропиткой медным расплавом спеченного каркаса из вольфрамового порошка, цифры у кривых — объемное содержание вольфрама [8].

Значения механических констант для металлов, используемые в расчетах, представлены в таблице по данным [8—12].

На рис. 5 приведены аппроксимации участков диаграмм деформирования металлов, применяемые в численных расчетах.

Если в соотношениях (13) принять $\mu = \mu^*$, $K = K^*$, то относительно эффективных величин имеем уравнения

$$\sum_{s=1}^n \frac{c_s \mu_s}{\mu^* + \alpha^* (\mu_s - \mu^*)} = 1, \quad \sum_{s=1}^n \frac{c_s K_s}{K^* + \gamma^* (K_s - K^*)} = 1, \\ \langle \epsilon_{ij} \rangle_s = \frac{\mu^*}{\mu^* + \alpha^* (\mu_s - \mu^*)} \langle \epsilon_{ij} \rangle, \quad \langle \epsilon_{pp} \rangle_s = \frac{K^* \langle \epsilon_{pp} \rangle}{K^* + \gamma^* (K_s - K^*)}$$

которые в теории упругости микroneоднородных сред соответствуют методу самосогласованного поля [5].

Интересно отметить, что, несмотря на то что K_s — константы, эффективные значения K^* во всех моделях проявляют некоторую зависимость от деформированного состояния композиционного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сараев Л. А. К теории идеальной пластичности многокомпонентных смесей // ПМТФ.— 1984.— № 6.
2. Сараев Л. А. Эффективные свойства многокомпонентных упругопластических композиционных материалов // ПММ.— 1986.— Т. 50, вып. 4.
3. Толоконников Л. А., Архипов И. К. Корреляционная теория малых упругопластических деформаций композиционных материалов // Прикладные проблемы прочности и пластичности.— Горький, 1979.— Вып. 11.
4. Архипов И. К., Толоконников Л. А. Эффективные соотношения между напряжениями и деформациями в корреляционной теории упругопластических деформаций // Изв. АН СССР. МТТ.— 1984.— № 2.
5. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред.— М.: Наука, 1977.
6. Кристенсен Р. Введение в механику композитов.— М.: Мир, 1982.
7. Хорошун Л. П. К теории насыщенных пористых сред // ПМ.— 1976.— Т. 12, № 4.
8. Крок Р. Неорганические порошковые композиции // Современные композиционные материалы.— М.: Мир, 1970.
9. Мартынова И. Ф., Скороход В. В. Уплотнение пористого металла при объемном пластическом деформировании в отсутствие деформационного упрочнения // Порошковая металлургия.— 1976.— № 5.
10. Радомысльский И. Д., Титаренко С. В., Щербань И. И. Влияние второго компонента на прессуемость металлических смесей // Теория и практика прессования порошков.— Киев: Ин-т проблем материаловедения АН УССР, 1975.
11. Писаренко Г. С., Троценко В. Т., Красовский А. Я. Исследование механических свойств пористого железа при растяжении и кручении // Порошковая металлургия.— 1965.— № 7.
12. Свойства элементов: Справочник. Ч. 1. Физические свойства/Под ред. Г. В. Самсонова.— М.: Металлургия, 1976.

Поступила 27/IV 1987 г.

УДК 539.375 : 621.01

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И ПЛЕНОК

А. Г. Черепанов, Г. П. Черепанов

(Москва)

Введение. Тонкий поверхностный слой всех материалов обладает специфическими свойствами, объясняющимися как химическим либо тепловым, так и непосредственным физико-механическим взаимодействием материала с окружающей средой. Как правило, именно в поверхностном слое материалов и конструкций зарождается начальная усталостная трещина, развитие которой приводит к исчерпанию ресурса конструкции или ее элемента. Естественно поэтому, что состояние поверхностного слоя (и управление его свойствами) — одна из основных проблем, которой занимаются технологи и инженеры [1, 2]. Материалоемкость промышленности существенно зависит от решения этой проблемы.

Комбинация поверхностный слой — объем материала может рассматриваться как композит, одним из компонентов которого является поверхностный слой [3]. Важнейшие характеристики этого слоя — особые защитные свойства, зависящие от его химсостава и микроструктуры, адгезионная прочность и трещиностойкость самого слоя и его контакта с подложкой. На свойства поверхностного слоя влияют водород и коррозия в газовой среде и водных растворах, износ, катализ, сварка и пайка, эрозия, пассивация, адгезия, спекание и абляция, влияние ингибиторов.

Для управления механическими, химическими, магнитными, электрическими и другими свойствами поверхностного слоя применяются разнообразные методы, которые можно классифицировать следующим образом.

Механические методы (дробеструйный наклеп, проковка, ударное упрочнение) приводят к возникновению высоких сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое и торможению в нем зародышей трещин.

Лакокрасочные покрытия и окисные пленки служат для химической защиты материала от окружающей среды.

Методы осаждения позволяют получать новые поверхностные слои с составом и микроструктурой, отличными от состава и микроструктуры материала подложки (плазменное напыление, ионное нанесение, химическое и физическое осаждение из паров, электролитическое осаждение).