

**Механические характеристики WC-покрытия до и после воздействия лазерного излучения**

Материал с покрытием	Нагрузка на индектор $P$ , Н	Длина диагонали трещины в переходной зоне, мм	Прочность сцепления $\sigma$ , МПа	Микротвердость $H_{\mu}$ , МПа
КХН15+WC (исходный)	0,5	$112,5 \cdot 10^{-3}$	79	19305
КХН15+WC (обработанный лазером)	0,5	$74,5 \cdot 10^{-3}$	180	24500

склонность к схватыванию, заеданию, выкрашиванию трущихся поверхностей. Практически отсутствует период приработки и в ряде случаев уменьшается коэффициент трения.

Таким образом, лазерная обработка газофазных покрытий позволяет значительно улучшить прочность сцепления и в сочетании с высокоскоростным охлаждением дает возможность регулировать структурообразование, диспергирование, фазообразование, а следовательно, и свойства формирующихся покрытий. Лазерная обработка может быть перспективным процессом для улучшения эксплуатационных свойств покрытий на локальных ответственных участках поверхности.

### Summary

Some physical and mechanical characteristics and the structure of a PVD coating of tungsten carbide after laser radiation have been investigated. It is shown that laser thermal treatment has a positive effect on the carbide coating structure, microhardness, bond strength and tribotechnical properties.

### Литература

1. Ионкина Е. М., Белько И. А., Миронович Г. А. // Порошковая металлургия. Минск, 1984. Вып. 8. С. 42—44.
2. Ташков Т. // Икон. и организ. 1983. № 7. С. 79—80.
3. Роман О. В., Кирилюк Л. М., Черноусова С. А. // Высокоэнергетические процессы получения композиционных и порошковых материалов, изделий и покрытий. Минск, 1987. С. 23—27.
4. Роман О. В., Кирилюк Л. М., Черноусова С. А. и др. // Материалы на основе карбидов. Киев, 1987. С. 66—70.
5. А. с. 642629 (СССР) // Бюл. изобрет. 1979. № 2.

*Белорусское республиканское НПО  
порошковой металлургии*

*Поступило в редакцию  
29.06.90*

УДК 674.815

М. И. КУЛАК

## СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ФРАКТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Анализ взаимосвязи структуры и свойств древесно-полимерных композитов открывает перспективы для теоретических исследований в области технологии изготовления, последующей механической обработки, прогнозирования их физико-механических свойств [1—3]. Однако сложность проблемы, требующей нетривиальных подходов как в экспериментальном, так и теоретическом аспекте, а также недостаточное развитие до недавнего времени методов описания нерегулярных структур приводят к тому, что теоретическая интерпретация результатов и методы математического моделирования структур [2—4] опираются главным образом на довольно простые построения регулярного характера. Вместе с тем очевидно, что при этом производится идеализация материала в

очень высокой степени, поскольку по природе своей древесина имеет ярко выраженную неоднородность свойств. Необходимо также учитывать флуктуации технологических факторов при изготовлении композитов. Для адекватного описания таких материалов теория должна быть статистической и соответствовать существующему в настоящее время уровню развития физики нерегулярных структур.

Основой описания структуры неупорядоченных сред и протекающих в них процессов является теория фракталов — самоподобных множеств дробной размерности [5]. Возникнув первоначально в виде абстрактного математического представления о пространствах дробной размерности, идея фракталов проникла затем в статистическую физику, гидродинамику, кинетику и породила лавинообразный поток работ, получивший специфическое название «фрактальный бум». Представляет интерес и является актуальным использование методов теории фракталов для решения проблем материаловедения.

Композиционные материалы с дисперсными наполнителями являются характерным примером неупорядоченных сред, однако необходимо доказать, что они принадлежат к классу фракталов. Доказательства такого рода строятся на основе определения и анализа фрактальной размерности структуры материала. Необходимо отметить, что определение фрактальной размерности структур, особенно в реальных материалах, представляет собой самостоятельную и довольно непростую задачу. Однако ее решение фактически открывает вход в теорию, поскольку фрактальная размерность является одним из основных параметров теории фракталов. Данная работа посвящена анализу фрактальных свойств древесно-полимерных композитов и описанию (с целью раскрытия возможностей теории фракталов) механических (упругих и деформационных) свойств композитов.

Основное определяющее соотношение для фрактального кластера связывает его радиус  $R$  с количеством частиц  $N$  и имеет вид [5]

$$N = (R/a)^D, \quad (1)$$

где  $a$  — размер (радиус) частицы;  $D$  — фрактальная размерность кластера. Дробное значение  $D$  является указанием на фрактальный характер структуры. При всей простоте выражения (1) использование его непосредственно для определения фрактальной размерности сопряжено с необходимостью проведения кропотливых и прецизионных измерений методами микроскопии. Методика измерений при этом состоит в последовательном выделении частей объема кластеров и подсчете количества содержащихся в них частиц. Поскольку кластер обладает самоподобием, то (1) справедливо для любой доли его объема. Практическая трудность состоит в подсчете частиц для трехмерных объектов, так как они не обладают оптической прозрачностью. Для того чтобы обойти эти сложности, используются различные косвенные методы измерения, однако они неизбежно приводят к потере некоторой информации, поскольку для интерпретации результатов приходится привлекать модельные представления о структуре материала.

Более точный способ прямого определения фрактальной размерности основывается на измерении законов распределения плотности в композициях. В настоящее время для некоторых видов древесно-полимерных композитов имеются экспериментальные данные по таким законам [4, 6, 7].

Используя выражение (1) и определение плотности тела, можно получить закон распределения плотности  $\rho(r)$  во фрактальном кластере

$$\rho(r) = \rho_0 (a/r)^{D-d}, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — плотность частиц кластера;  $d$  — размерность физического пространства.

В дальнейшем используется подход, предполагающий образование в древесно-полимерном композите связанной структуры (скелета) из древес-

ных частиц. Он применяется для древесно-полимерных композитов различных типов [2, 3] и является в достаточной степени обоснованным и работоспособным. Необходимо также иметь в виду, что при экспериментальном определении распределения плотности в материале измеряется фактически эффективная плотность и учитываются как древесный, так и полимерный компоненты. Композиции, в которых концентрация наполнителя недостаточна для образования скелета, подробно рассмотрены в [8].

Фрактальная размерность древесно-полимерных композитов

Условия изготовления образцов и характеристики процесса прессования	Интегральная плотность композита, кг.м <sup>3</sup>	Показатель степени, $\alpha$	Фрактальная размерность, $D$	Ссылка на экспериментальные данные
Промышленные	658	0,17	2,83	[4]
Лабораторные:				
$v=30$ кг/(см <sup>2</sup> ·мин)	570	0,16	2,84	[6]
$v=4$ кг/(см <sup>2</sup> ·мин)	570	0,22	2,78	[6]
Лабораторные	700	0,26	2,74	[8]
То же	700	0,21	2,79	[8]
»	700	0,24	2,76	[8]
»	700	0,20	2,80	[8]

Перестроив в логарифмическом масштабе законы распределения плотности, полученные в работах [4, 6, 7], можно заключить, что для описания скелета древесно-полимерных композитов пригоден степенной закон распределения плотности, следовательно, и числа структурных элементов

$$\rho(r) \sim r^{-\alpha}. \quad (3)$$

Степенной закон (3) подтверждает, что на масштабах порядка размера древесных частиц структура материала характеризуется фрактальной геометрией. Приравнявая правые части (2) и (3), получаем формулу для определения фрактальной размерности по экспериментальным данным:

$$D = d - \alpha. \quad (4)$$

Результаты вычисления фрактальной размерности, представленные в таблице, свидетельствуют, что ее значения изменяются в довольно узком диапазоне, хотя композиты изготавливались различными исследователями как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Таким образом, величина  $D$  может быть использована в качестве универсальной постоянной, характеризующей структуру композита. Среднее значение  $D=2,80$  занимает промежуточное положение между известными в теории фракталов структурами, получаемыми методами математического моделирования на ЭВМ — диффузионно-лимитированной агрегации типа частица—кластер: с броуновским движением частиц  $D=2,51$ ; с линейными траекториями  $D=2,97$ . Естественно, что структура реальных объектов может отличаться от модельных структур: так, фрактальная размерность одного из компонентов древесины (лигнина) равна 2,68. Полученные значения фрактальной размерности для композитов свидетельствуют, что при их изготовлении имеет место наложение и взаимодействие процессов агрегации частиц обоих типов.

Показательно также и то, что фрактальная размерность чувствительна к изменениям технологических параметров. Так, при изменении скорости прессования ( $v$ ) от 4 до 30 кг/(см<sup>2</sup>·мин) [6], фрактальная размерность возрастает от 2,78 до 2,84, т. е. структура становится более плотноупакованной, чему способствуют инерционные эффекты, разрушение промежуточных структур и более плотная упаковка их фрагментов. Для материалов, полученных в лабораторных условиях, величина  $D$ ,

это правило, меньше по сравнению с промышленными: условия прессования ближе к изостатическим и определенный вклад в процесс структурообразования может внести агрегация типа кластер—кластер, способствующая образованию более ажурных структур.

Теория фракталов позволяет количественно описать свойства структур. С этой целью рассмотрим механические свойства древесно-полимерных композитов. Как видно из таблицы, они могут иметь одинаковую интегральную плотность, но различаться по структуре, о чем свидетельствуют значения фрактальной размерности. Представляет интерес проследить, как неоднородности структуры отражаются на механических свойствах. Для этого построим распределение модулей упругости в материале.

Предположим, что композит обладает цилиндрической симметрией в направлении действия давления прессования. Главным образом это справедливо для плоских способов прессования, в данном случае задача является плоской. Области, в которых существенно влияние границ материала, не рассматриваются. Частицы наполнителя помещены в точки  $\{R_\beta\}$ ;  $\beta = 1, \dots, N$ , где  $N$  — число частиц в системе. Сконструируем гамильтониан системы частиц, расположенных в пределах первой координационной сферы, по отношению к частице, находящейся в центре кластера, в предположении, что деформация производится в направлении оси симметрии

$$H_1 = \frac{1}{2} \sum_{\beta}^{z=1} g \cos^2 \varphi_{\beta} (\delta R_{\beta})^2. \quad (5)$$

Здесь  $g$  — модуль упругости материала частиц наполнителя;  $\delta R_{\beta}$  — смещение точек  $R_{\beta}$ ;  $\varphi_{\beta}$  — угол между  $R_{\beta}$  и направлением смещения;  $\sum_{z=1}^{z=1}$  — суммирование производится по частицам, расположенным в первой координационной сфере.

Учитывая (2), суммирование в (5) можно заменить интегрированием по  $r$  (в дальнейшем  $r$  будем измерять в единицах  $a$ ). Модуль упругости части кластера, заключенной в первой координационной сфере радиусом  $r_1$ , тогда будет такой:

$$G_1 = g \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi \int_0^r \rho_0/m_0 r^{-\alpha} r dr = g/1 - \alpha r_1^{1-\alpha}. \quad (6)$$

При интегрировании в (6) учтено, что  $\rho_0/m_0 = 1/\pi a^2$ , где  $m_0$  — масса частиц.

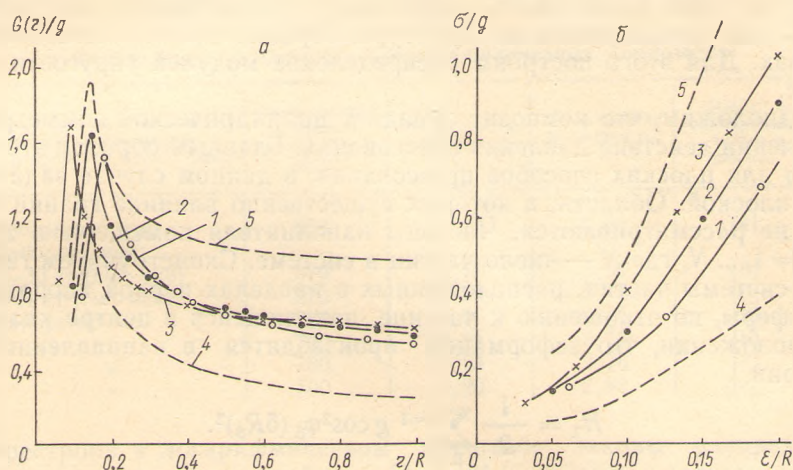
Модуль упругости части кластера радиусом  $r_z$  следующий:

$$G(r_z) = g \left[ 1 / \sum_{i=1}^{z-1} g/G_i + (r_z^{1-\alpha} - r_{z-1}^{1-\alpha}) / 1 - \alpha \right]. \quad (7)$$

Результаты вычисления распределения модулей упругости представлены на рисунке, а. Они свидетельствуют, что модули упругости композитов значительно меняются по их толщине. Изменение модулей в 2,5—3 раза получено и в результате испытаний реальных материалов в работе [9], аналогичен также характер зависимости модулей от толщины.

Неоднородность в распределении модулей приводит к нелинейному поведению композита при деформировании. Зависимости деформаций от напряжений представлены на рисунке, б. Видно, что при малых напряжениях проявляется нелинейность в деформациях. Линейная упругость начинается при относительных деформациях 0,075—0,125. Такое поведение материалов известно под названием «эффект аномально высокой тензочувствительности упругих свойств» [10]. Эффект является следствием неоднородности структуры и может привести к нелинейной реакции материала на малые внешние воздействия, нестабильности его механических свойств.

Таким образом, древесно-полимерные композиты по своей структуре принадлежат к классу фрактальных материалов, что позволяет использовать методы теории фракталов для построения описания тонких нелинейных особенностей их механических свойств. Необходимо также отметить, что теория фракталов позволяет решить задачу описания с единых позиций структуры не только древесно-полимерных композитов, но и такого сложного биокомпозита, каким является древесина [11]. При этом фрактальный характер структур прослеживается, начиная с макро-



Распределение модулей упругости в композитах (1, 2, 3) и фрактальных кластерах (4, 5) (а) и зависимость деформаций  $\epsilon$  от напряжений  $\sigma$  для композитов (1, 2, 3) и фрактальных кластеров (4, 5) (б) с разными фрактальными размерностями: 1 — 2,74, 2 — 2,80, 3 — 2,84, 4 — 2,51, 5 — 2,97

и надмолекулярного уровня (конформация макромолекул целлюлозы и надмолекулярная структура лигнина), далее имеет место на ультра- и микроструктурном уровнях (внутренняя структура макрофибрилл целлюлозы и их распределение в клеточной стенке), а также на макроуровне — распределение плотности в пределах годовичного слоя древесины. Это позволяет заключить, что фрактальный характер структур является универсальным свойством как древесины, так и древесно-полимерных композитов.

### Summary

The paper presents the results of investigating the fractal properties of the structure of wood-polymer composites. The distribution law of elasticity modulus in such composites is obtained.

### Литература

1. Белый В. А., Врублевская В. И., Купчинов Б. И. Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия. Минск, 1980.
2. Мельников С. Ф. // Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1989. № 4. С. 36—39.
3. Поташев О. Е., Лапшин Ю. Г. Механика древесных плит. М., 1982.
4. Купне G., Niernz P. // Holztechnologie. 1980. Vol. 21, N 3. P. 139—144.
5. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco, 1982.
6. Садо Т. // Кёто дайгаку Когакубу энсюрин хококу. 1975. № 47. С. 159—169.
7. Лычагин А. В., Карасев Е. И., Залесов Л. В. // Сб. науч. трудов МЛТИ. М., 1989. Вып. 215. С. 65—70.
8. Кулак М. И. // Докл. АН БССР. 1990. Т. 34, № 9. С. 817—820.
9. Тулузаков Д. В. // Сб. науч. трудов МЛТИ. М., 1989. Вып. 215. С. 36—42.
10. Челидзе Т. Л. Методы теории протекания в механике геоматериалов. М., 1987.
11. Кулак М. И. Модификация древесины: Материалы Всесоюз. конф. Минск, 1990. С. 28.