

Таким образом, проведенный комплекс исследований позволил определить рациональные составы древесно-наполненного ПВХ по критериям перерабатываемости и эксплуатационным свойствам.

### Summary

The effect of wood-polymer composition on its rheological and mechanical properties was investigated and data obtained. It is shown that the PVC melt viscosity dependence on wood particles percentage has an extremum. It is established that optimal percentage of wood particles is found in the range of 25%—45%. Plasticizers used allow to increase wood constituent percentage up to 50% without noticeable affecting the rheological and mechanical properties of the composites prepared.

### Литература

1. Бернхард Э. Переработка термопластичных материалов. М., 1965.
2. Молотков А. П. Прогнозирование эксплуатационных свойств полимерных материалов. Минск, 1982.
3. Малкин А. Я., Куличихин С. Г. Реология в процессах образования и превращения полимеров. М., 1985.
4. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М., 1988.

*Институт механики металлополимерных систем  
АН Беларуси*

*Поступила в редакцию  
22.05.92*

УДК 674.815

М. И. КУЛАК

## СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

На фоне достижений современной механики разрушения в понимании физической природы прочности композиционных материалов все заметнее становится отставание в развитии теоретических методов ее описания, позволяющих прогнозировать свойства материалов по свойствам компонентов. Практически только для композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, построены методы описания прочностных свойств, основанные на использовании правила смесей [1], а также алгоритмизированный подход, использующий имитационное моделирование на ЭВМ [2].

Широкое проникновение композиционных материалов, армированных дисперсными наполнителями, в практику машиностроения в определенной мере сдерживается недостаточным уровнем развития методов прогнозирования свойств таких материалов. Эти методы лежат в основе принципов оптимизации конструкций и узлов при проектировании изделий и используются для устойчивого ведения технологических процессов получения материалов.

Теоретические методы описания прочностных свойств композиционных материалов, учитывающие особенности диспергированной древесины как наполнителя, разработаны в значительно меньшей степени, чем аналогичные методы для материалов с иными дисперсными либо волокнистыми наполнителями. В качестве примера такого исследования можно указать работу [3], где предпринята попытка на основе общих представлений механики композиционных материалов и учета анизотропии свойств древесины описать в рамках единого подхода прочностные свойства древесно-стружечных плит и масс древесных прессовочных. Более ранние работы [4, 5] носили в основном экспериментальный характер.

Как свидетельствуют результаты [3], прямое перенесение на древесно-полимерные композиты существующих методов описания прочности, даже если учитывать анизотропию древесины, не является эффективным. Наличие древесины в качестве наполнителя композиционных материалов влечет за собой необходимость учета ряда особенностей при построении описания их свойств.

Метод описания неоднородности структуры древесно-полимерных композитов развит на основе теории фракталов в [6]. В этой же работе отмечалась особенность древесины как наполнителя, заключающаяся в наличии у нее иерархической системы уровней внутренней структурной организации. В [7] показано, что при физических воздействиях структуры разных уровней интенсивно взаимодействуют. В данной работе предлагается подход к описанию прочности древесно-полимерных композитов, учитывающий структуру и взаимодействие компонентов в граничном слое матрица — наполнитель.

После обобщения основного выражения для вычисления прочности композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами [1], оно может быть представлено в следующем виде:

$$\sigma = \sigma_i k \omega (n_i + n_m E_m / E_i), \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  — предел прочности частиц древесного наполнителя при определенном виде нагружения;  $E_i$ ,  $E_m$  — модули упругости древесины и матрицы соответственно;  $n_i$  — объемная доля древесины в композите;  $n_m$  — объемная доля матрицы;  $k$  — степень покрытия матрицей поверхности контакта частиц древесного наполнителя [8];  $\omega$  — степень контактности, равная отношению площади контактов к общей площади поверхности частиц наполнителя [9].

Отметим, что на данном этапе можно не конкретизировать вид нагружения и строить теорию в общем виде. Коэффициенты  $k$  и  $\omega$  в (1) позволяют учесть дискретный характер наполнителя и матрицы в композите.

Принимая во внимание, что микроструктура граничного слоя матрица — наполнитель определяется главным образом микроструктурой древесины, получаем следующее выражение для определения объемной доли древесного наполнителя:

$$n_i = n_{дч} - s_d n_{пс}. \quad (2)$$

Объемная доля граничного слоя при объемной доле древесных частиц в композите  $n_{дч}$

$$n_{пс} = 2a_j n_{дч} (lb + lh + bh) / lbh. \quad (3)$$

При рассмотрении задачи о пересечении древесной клетки случайной плоскостью доля граничного слоя, приходящаяся на древесину, определяется методами геометрических вероятностей [10] и равна:

$$s_d = 4b_j (1 - b_j/a_j) / a_j. \quad (4)$$

В (3), (4) рассматривались древесные частицы длиной  $l$ , шириной  $b$ , высотой  $h$ ;  $a_j$ ,  $b_j$  — размер и толщина стенки древесной клетки.

Одна из особенностей, которую необходимо учитывать при рассмотрении свойств древесно-полимерных композитов, связана с тем, что они содержат примерно 0,30—0,35 объемных долей матрицы-полимера. Как следует из приведенной в [11] структурной диаграммы, объемное содержание матрицы порядка 0,2—0,4 уже не является малым в математическом смысле этого понятия, поскольку при объемной доле матрицы 0,32 в системе происходит структурный фазовый переход. Ввиду этого при расчете зависимости прочности композита от содержания матрицы некорректно использовать непосредственно формулу (1), которая справедлива для малых изменений содержания матрицы в систе-

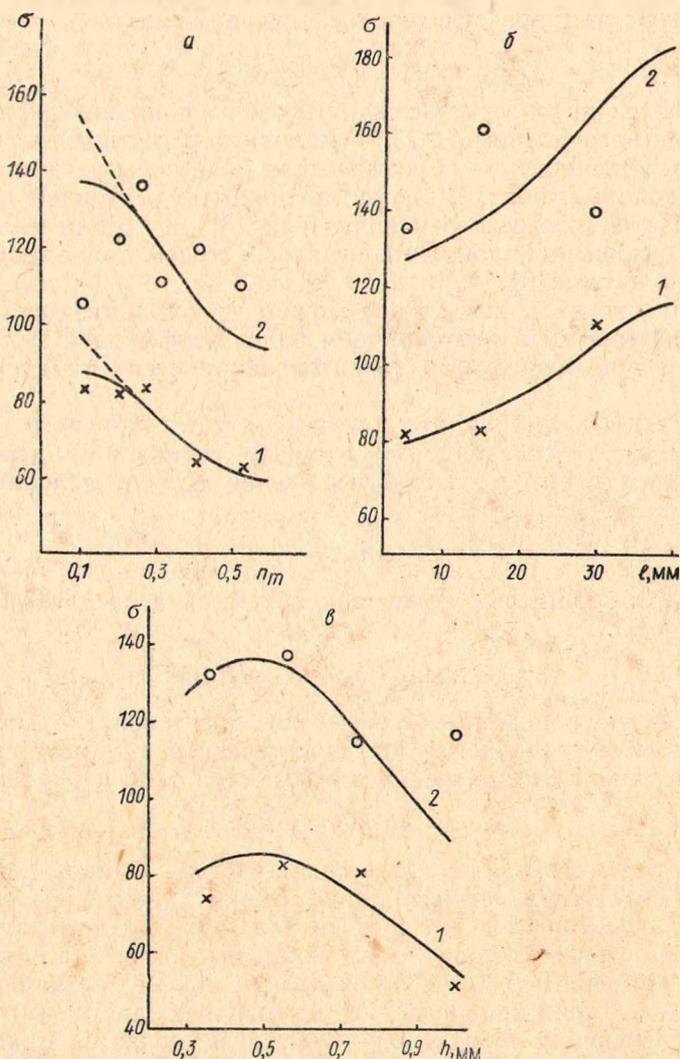
ме. Однако на основе (1) можно построить пошаговую процедуру для расчета прочности при любых значениях объемной доли матрицы в композитах. Процедура строится следующим образом.

Рассмотрим два образца композита с малым ( $< 0,1$ ) различием в объемном содержании матрицы. Один образец с меньшей объемной долей матрицы обозначим индексом 1, другой — соответственно 2. Предположим далее, что эффективная прочность образца 1 известна, тогда прочность образца 2 следующая:

$$\sigma_2 = \sigma_1 [(1 - \Delta n_2) + \Delta n_2 E_m / E_2]. \quad (5)$$

Необходимо иметь в виду, что  $\Delta n_2$  в (5) не равно шагу в изменении объемной доли матрицы. Поскольку рассматриваются эффективные характеристики прочности и упругости композита, то необходимое ее приращение определяем исходя из баланса, который равен:

$$n_1 - \Delta n_2 n_1 + \Delta n_2 = n_2. \quad (6)$$



Зависимости предела прочности композита при изгибе (1) и при сжатии (2) от содержания матрицы (а) и от длины частиц древесного наполнителя (б), влияние толщины частиц наполнителя на предел прочности композита при изгибе (1) и сжатии (2) (в); экспериментальные данные — по [4]

Искомое значение приращения объемной доли матрицы

$$\Delta n_2 = (n_2 - n_1)/(1 - n_1). \quad (7)$$

Для некоторого произвольного шага  $j$

$$\sigma_j = \sigma_{j-1} [(1 - \Delta n_j) + \Delta n_j E_m / E_j], \quad (8)$$

$$\Delta n_j = (n_j - n_{j-1}) / (1 - n_{j-1}). \quad (9)$$

Результаты вычисления зависимостей предела прочности при изгибе (кривая 1) и предела прочности при сжатии (кривая 2) композиционного древесного пластика от объемной доли матрицы приведены на рисунке, а. Модули упругости композита вычислялись по методу, изложенному в [11]. Характеристики древесины (измельченный березовый шпон) и матрицы (фенолформальдегидная смола) использовались по данным [3]. При вычислении предела прочности при сжатии, во-первых, учтено, что разрушение образца происходит от растягивающего напряжения, возникающего в направлении, перпендикулярном направлению сжатия [12]. Во-вторых, упрочнение частиц шпона при уплотнении композиционного материала, по данным [13], разрушающее напряжение для березового шпона, возрастает до 175 МПа. Для сравнения на рисунке, а приведены экспериментальные значения, полученные в [4]. При изменении объемной доли матрицы от 0,1 до 0,6 имеет место хорошее качественное и количественное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Необходимо отметить различие зависимости пределов прочности от содержания матрицы для пластиков и древесно-стружечных плит. У них при увеличении содержания связующего предел прочности растет с затуханием, так как прочность материала возрастает до уровня материала прочности древесины. У пластиков объемная доля полимера больше и он образует самостоятельную фазу, а поскольку предел прочности на изгиб у полимерной матрицы меньше, то при увеличении ее содержания предел прочности материала уменьшается.

При объемной доле матрицы, большей 0,2, произведение коэффициентов в (1)  $k \omega \sim 1$ . Если его зафиксировать и уменьшать содержание матрицы в композите, то прочность последнего будет стремиться к прочности натуральной древесины. Об этом свидетельствуют результаты расчетов, представленные на рисунке, а штриховой линией. Экспериментальные данные находятся ниже этой линии. Такое поведение предела прочности реальных композитов является следствием дискретного характера наполнителя.

На рисунке, в представлены результаты расчета зависимости предела прочности композиционного древесного пластика при изгибе (кривая 1) и при сжатии (кривая 2) от толщины древесных частиц, а на рисунке, б приведены аналогичные зависимости от длины частиц. Можно отметить удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными [4] как по характеру изменения пределов прочности, так и количественно.

Таким образом, использование теории фракталов для описания структуры древесно-полимерных композиционных материалов позволило разработать достаточно общий метод прогнозирования разрушающих напряжений при различных видах нагружения.

## Summary

Based on fractal theory has been carried out the method of describing strength of wood-polymer composites taking into consideration influence of wood filler's microstructure on properties of boundary layer matrix—filler. The method is used for studying both matrix content and particles dimension influence on strength properties of composit.

## Литература

1. Композиционные материалы. Разрушение и усталость / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М., 1978. Т. 5.
2. Овчинский А. С. Процессы разрушения композиционных материалов: имитация микро- и макро механизмов на ЭВМ. М., 1988.
3. Поздняков А. А. Прочность и упругость композиционных древесных материалов. М., 1988.
4. Нысенко Н. Т. Древесные пластмассы. М., 1964.
5. Белый В. А., Врублевская В. И., Купчинов Б. И. Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия. Минск, 1980.
6. Кулак М. И. // Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1991. № 2. С. 18—22.
7. Кулак М. И. // Химия древесины. 1991. № 6. С. 15—23.
8. Векслер А. К. Исследование процесса проклеивания древесных стружек распыленным связующим. М., 1969.
9. Соснин М. И., Климова М. И. Физические основы прессования древесностружечных плит. Новосибирск, 1981.
10. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. М., 1975.
11. Кулак М. И. // Докл. АН БССР. 1990. Т. 34, № 9. С. 819—822.
12. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М., 1972.
13. Кириллов А. Н. Конструкционная фанера. М., 1981.

Белорусский технологический институт  
им. С. М. Кирова

Поступила в редакцию  
05.12.91

УДК 621.91

*П. И. ЯЩЕРИЦЫН, Е. Э. ФЕЛЬДШТЕЙН, В. М. КУЦЕР,  
У. ДИАЛЛО, А. Х. ШАРАФ*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНОЧНОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Знание основных законов, которым подчиняются распределение тепловых потоков и характер температурных полей в инструменте, изделии и стружке, позволяет правильно сформулировать основы теории изнашивания поверхностей инструмента, прогнозировать характер разрушения режущих кромок и степень его интенсивности в различных условиях работы; наиболее целесообразно выбирать материал режущего инструмента, исходя из условий его работы; формулировать требования к свойствам новых инструментальных материалов, которые позволят обеспечить наиболее производительные режимы резания; оценивать роль СОЖ, а также разрабатывать более приемлемые способы их применения в металлообработке; использовать результаты всестороннего изучения тепловых явлений при резании металлов таким образом, чтобы обеспечить требуемое температурное воздействие на обрабатываемый материал, в первую очередь на его поверхностные слои.

Тепловые процессы в технологических системах исследуются как теоретически, так и экспериментально. Экспериментальные методы позволяют оценить температуру на площадках контакта, на поверхностях и в теле инструмента и детали, однако в случае необходимости исследования тепловых полей оказываются чрезвычайно сложными и трудоемкими. Используемые в настоящее время расчетные методы, например метод мгновенных источников теплоты [1], предполагают знание некоторых физических констант процесса резания (например, угла сдвига, особенностей распространения теплоты в исследуемом объеме) и в случае нестационарного процесса оказываются трудноразрешимыми.

Более перспективным в этом плане оказывается метод конечных элементов (МКЭ). Он позволяет легко смоделировать сложные тела произвольной формы, учесть зависимость свойств материала от температуры и нелинейность граничных условий. Разрешающие уравнения