

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Реутов А.И.¹, Реутов Ю.А.² Email: Reutov629@scientifictext.ru

¹Реутов Анатолий Ильич – кандидат технических наук, доцент;

²Реутов Юрий Анатольевич – инженер,

кафедра механики и графики,

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

г. Томск

Аннотация: в работе рассмотрены двумерная и трехмерная модели представительного объема, включающего в себя эпоксиполимерную матрицу с различным количеством и взаиморасположением включений наполнителя - пылевидного кварцевого песка (ПКП). На основе информации о деформационно-прочностных характеристиках эпоксиполимерной матрицы и включений ПКП получены эффективные характеристики наполненных композиций – эффективный модуль упругости и предел прочности. Проведено сравнение прогнозируемых эффективных деформационно-прочностных характеристик с экспериментальными данными.

Ключевые слова: дисперсно-наполненные эпоксиполимерные композиции, эффективные характеристики, метод конечных элементов.

PREDICTION OF THE EFFECTIVE STRESS-STRAIN PROPERTIES OF FILLED POLYMERIC COMPOSITIONS

Reutov A. I.¹, Reutov Y.A.²

¹Reutov Anatoly Ilich – PhD in Engineering, Associate Professor;

²Reutov Yury Anatolevich – Engineer,

MECHANICS AND GRAPHICS DEPARTMENT,

TOMSK STATE UNIVERSITY OF CONTROL SYSTEMS AND RADIOELECTRONICS,

TOMSK

Abstract: work is devoted to the examination of two-dimensional and three-dimensional models of representative volume which include epoxy polymeric matrix with different quantity and collocation of filler (powder quartz sand). Effective characteristics (Young's modulus and tensile strength) of filled composition are obtained based on the information about the stress-strain properties of epoxy polymeric matrix and powder quartz sand inclusions. Predicted effective stress-strain properties are compared with experimental data.

Keywords: filled epoxy polymer compositions, effective characteristics, finite element method.

УДК 004.9:620.22

Для физической модификации полимеров в них вводятся наполнители. В зависимости от характеристик наполнителей: дисперсности, формы, твердости, химического состава и других показателей, а также концентрации наполнителя, можно получить различные свойства материала.

Проведено моделирование и компьютерное конструирование наполненных полимерных композиций [1, 2].

В качестве теоретически и экспериментально исследуемых дисперсно-наполненных композиций рассматривались термореактопласты на основе эпоксидных смол, включающих в себя смолу, отвердитель и наполнитель. Исследовались два состава матриц: ЭД20 + ГМДА, где ЭД-20 – смола эпоксидно-диановая, ГОСТ 10587-93, ГДМА – отвердитель гексаметилендиамин; ЭД16 + Диамет X, где ЭД16 – смола эпоксидно-диановая, ГОСТ 10587-93, Диамет X – отвердитель (3,3 дихлор, 4,4 диаминодифенилметан), ТУ 6-14-22-30-72. В качестве наполнителя в обоих случаях служил пылевидный кварцевый песок (ПКП), ГОСТ 9077-82.

Двумерная модель представляла собой квадрат с 9 включениями. Трехмерная модель представляла собой куб с 27 включениями сферической формы, упорядоченно расположенными в 3 ряда по 9 включений в каждом. Еще 8 включений меньшего размера расположены в промежутках между большими включениями.

В моделях были заданы граничные условия, имитирующие процесс растяжения образца материала. Одна сторона (грань) была закреплена по направлению нормали, при этом касательными напряжениями можно пренебречь, а к противоположной приложены растягивающие перемещения.

В ходе расчета НДС находилось среднее значение эквивалентных напряжений в представительном объеме. Далее по закону Гука вычислялся эффективный модуль упругости. Проверка моделей на

внутреннюю сходимость осуществлялась сопоставлением результатов, полученных при различном разбиении расчетной области конечно-элементной сеткой.

Расчеты проведены методом конечных элементов, реализованном в программного комплекса ANSYS Workbench Mechanical, а также в разработанной в лаборатории механики полимерных композиционных материалов ИФПМ СО РАН оригинальной программе.

Из деформационно-прочностных характеристик эпоксиполимерных композиции исследовались модуль упругости и предел прочности.

Характеристики исходных материалов показаны в таблице 1. В числителе указано среднее значение, в знаменателе – среднее квадратическое отклонение.

В результате расчета получены зависимости эффективного модуля упругости от степени наполнения ПКП для эпоксиполимерной композиции ЭД20 + ГМДА (рисунок 1). Кривая 1 отображает результаты, полученные при расчете в трехмерной модели, кривая 2 – в двумерной модели. Для степени наполнения 200 массовых частей приведено экспериментальное полученное значение (точка 3) и расчетное значение, полученное в оригинальной программе (точка 4).

Таблица 1. Характеристики исходных материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа
ЭД20+ГМДА	1200	4000 / 720	0.34	-
ЭД16+Диамет X	1200	5300 / 1230	0.34	54.0 / 5.5
Пылевидный кварцевый песок (ПКП)	2650	72000	0.25	-

Значения эффективного модуля упругости эпоксиполимерной композиции ЭД20 + ГМДА, полученные с использованием двумерной и трехмерной модели, расходятся не более чем на 15%. Экспериментальная точка 3 лежит между двумя кривыми.

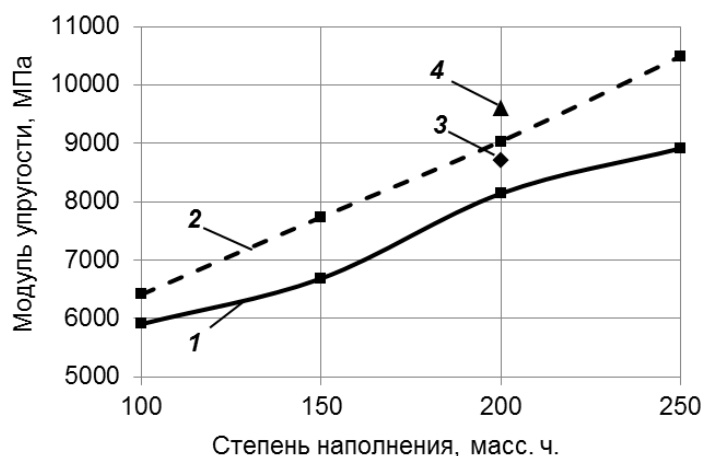


Рис. 1. Зависимость эффективного модуля упругости эпоксиполимерной композиции ЭД20 + ГМДА от степени наполнения ПКП

На основании экспериментальной выборки из 30 значений модуля упругости полимерной матрицы с применением трехмерной модели получены эффективные статистические характеристики для эпоксиполимерной композиции ЭД20 + ГМДА со степенью наполнения ПКП 200 массовых частей.

Различие среднего расчетного и экспериментального значения эффективного модуля упругости для степени наполнения 200 мас. ч. не превышает 7%.

Средние значения эффективного модуля упругости и их средние квадратические отклонения для эпоксиполимерной композиции ЭД20+ГМДА со степенью наполнения ПКП 200 массовых частей, полученные расчетом в трехмерной модели и экспериментально, приведены в таблице 2.

Из таблицы видно, что плотности распределений расчетного и экспериментального модуля упругости совпадают в пределах 7 %.

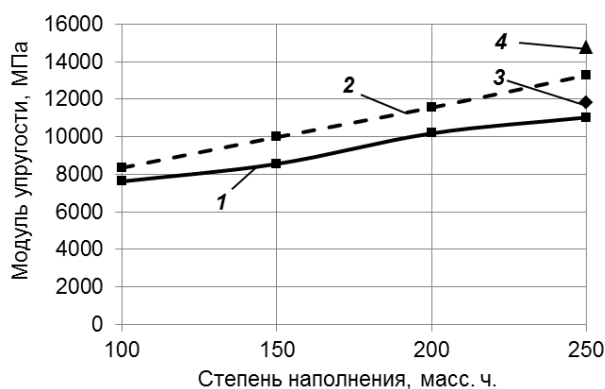
На рисунке 2 показаны расчетные зависимости эффективного модуля упругости и предела прочности эпоксиполимерной композиции ЭД16 + ДиаметрX от степени наполнения ПКП, вычисленные при решении трехмерной (кривая 1) и двумерной задачи (кривая 2) в программном комплексе ANSYS.

Таблица 2. Статистические расчетные и экспериментальные результаты для композиции ЭД20+ГМДА и ПКП

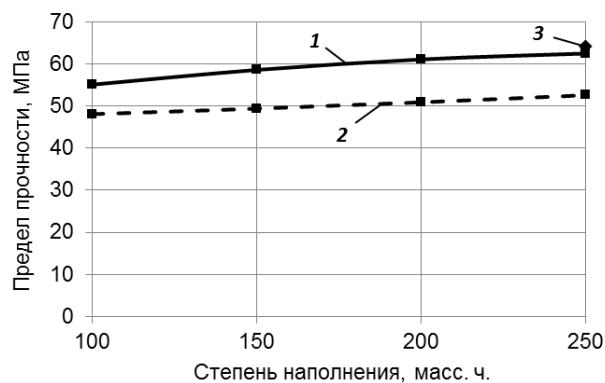
Материал	Модуль упругости, МПа / Среднее квадратическое отклонение, МПа
ЭД20+ГМДА	4000 / 720
ЭД16+Диамет X	5300 / 1230
Пылевидный кварцевый песок (ПКП)	72000

ЭД20+ГМДА + 200 масс.ч. ПКП (эксперимент)	8700 / 1650
ЭД20+ГМДА + 200 масс.ч. ПКП (расчет в ANSYS)	8138 / 1525

Для степени наполнения 250 массовых частей приведено экспериментально полученное значение (точка 3) и расчетное значение, полученное в оригинальной программе (точка 4).



2а



2б

Рис. 2. Зависимость эффективного модуля упругости (а) и предела прочности (б) эпоксиполимерной композиции ЭД16 + ДиаметХ от степени наполнения ПКП

В таблице 3 приведены средние значения эффективного модуля упругости и их средние квадратические отклонения для эпоксиполимерной композиции ЭД16+Диамет Х со степенью наполнения ПКП 250 массовых частей, полученные расчетом в трехмерной модели и экспериментально.

Видно, что для модуля упругости плотности распределений расчетного и экспериментального значения совпадают в пределах 8 %, а для предела прочности – в пределах 3 %.

Различие результатов расчета, полученных с использованием двумерной и трехмерной модели, составляет не более 20%. Значение экспериментальной точки находится между двумя кривыми. Расхождение значений предела прочности, рассчитанного по двум моделям, составляет не более 16%. Экспериментальное значение находится ближе к результатам расчета в трехмерной модели. На основании экспериментальной выборки из 30 значений модуля упругости полимерной матрицы с применением трехмерной модели получены эффективные статистические характеристики для эпоксиполимерной композиции ЭД16 + Диамет Х со степенью наполнения 250 массовых частей.

Таблица 3. Статистические расчетные и экспериментальные результаты для композиции ЭД16+Диамет Х и ПКП

Материал	Модуль упругости, МПа / Среднее квадратическое отклонение, МПа	Предел прочности МПа / Среднее квадратическое отклонение, МПа
ЭД16+ДиаметХ + 250 масс.ч. ПКП	11041 / 3143	62.5 / 6.3

(расчет в ANSYS)		
ЭД16+ДиаметХ + 250 мас.ч. ПКП (эксперимент)	11800 / 3400	64.2 / 6.5

Расчетное и экспериментальное средние значения модуля упругости совпадают в пределах 8%, а предела прочности – в пределах 3%.

Таким образом, расчет эффективных свойств дисперсно-наполненных композиций с учетом случайных факторов на основе модели структурно неоднородной среды с использованием двумерных и трехмерных моделей на основе метода конечных элементов позволило выполнить оценку влияния степени наполнения композита на эффективные деформационно-прочностные характеристики композиции. Результаты конечно-элементного расчета в ANSYS были проверены сравнением с результатами расчета в оригинальной программе, а также экспериментальными данными.

Разработанный подход позволяет проектировать дисперсно-наполненные материалы с заданными деформационно-прочностными характеристиками в зависимости от условий применения.

Список литературы / References

1. *Бочкарева С.А.* Прогнозирование эффективных характеристик морозостойких полимерных композиций и оценка надежности изготовленных из них изделий / С.А. Бочкарева, Б.А. Люкшин, А.И. Реутов, Ю.А. Реутов // *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сборник материалов всероссийской научной конференции. Москва, 15–17 декабря 2015 г. М., 2015. С. 497–500.*
2. *Люкшин Б.А.* Мультимасштабное моделирование и компьютерное конструирование наполненных полимерных композиций / Б.А. Люкшин, С.В. Панин, С.А. Бочкарева, П.А. Люкшин, Ю.А. Реутов // *XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : сборник докладов. Казань, 20–24 августа 2015 г. Казань, 2015. С. 1071–1073.*