

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦАМИ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ

А.Н. Блазнов, Д.Е. Зимин, Е.С. Алемаева, Ю.И. Ладыгин, В.Ф. Савин

*Предложена модель модификации полимерного эпоксидного связующего наночастицами. Даны рекомендации по повышению свойств связующего путем оптимизации распределения частиц в матрице с помощью концентрации наночастиц. Проведена экспериментальная проверка модели и показана ее адекватность. Важную роль в улучшении свойств матрицы играет равномерное распределение частиц в связующем, что физически сложно обеспечить из-за склонности наночастиц детонационных алмазов к агрегации.*

*Ключевые слова: модель микромодификации, наночастицы, связующее, эпоксидная матрица, стеклопластики, детонационные наноалмазы.*

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным методом модификации терморезистивных матриц является введение углеродных наночастиц. В последние десятилетия исследования по данному научному направлению развиваются очень активно. Необходимо также отметить, что большинство исследований посвящено изучению таких упорядоченных форм углерода, как фуллерены, астралены и нанотрубки. В то же время «простым» наночастицам углерода не уделяется столько внимания. Главное их отличие от фуллеренов и нанотрубок состоит в том, что они представляют собой не замкнутую, а открытую по краям π-электронную систему. Данный факт позволяет ожидать от углеродных наночастиц высокой активности и необычных свойств.

Поэтому изучение вопроса модификации полимерных матриц наночастицами алмаза и алмазографита представляет собой весьма актуальную проблему.

### МОДЕЛЬ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

В работе рассматриваются полимерные связующие, имеющие сетчатую пачечную структуру. Свойства пачки определяют свойства полимера в целом. Пачка рассматривается как совокупность линейных макромолекул, взаимодействующих друг с другом через химические и межмолекулярные поперечные связи. Характер взаимодействия макромолекул определяет свойства пачки.

Основные характеристики линейной макромолекулы таковы:  $L_{\text{цепи}}$  – длина цепи между двумя поперечными связями (химическими),  $L_{\text{сегм}}$  – длина свободно сочлененного

сегмента, на которые разбита цепь, (участок углеродного скелета макромолекулы).

Принимается, что между участками ( $L_{\text{цепи}}$ ) двух соседних макромолекул образуется одна межмолекулярная связь. Тогда  $L_{\text{цепи}}$  – это основной участок, который определяет температуру стеклования. Его тепловая энергия будет определяться формулой

$$E_{\text{теп}} = iRT / 2, \quad (1)$$

где  $i$  – количество степеней свободы;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура, К.

Один сегмент имеет одну степень свободы относительно концов  $L_{\text{цепи}}$ . Соответственно, при количестве сегментов, равном 3,  $E_{\text{теп}} = 3RT/2$ .

Узлы сети, образованные химическими поперечными связями, практически не колеблются в сравнении с сегментом.

В момент стеклования макромолекулы находятся на расстоянии  $H$ , равном удвоенной амплитуде колебаний сегмента. Принимается, что отклонение  $H$  от растянутого положения определено конформационными изменениями. Предельная высокоэластическая деформация  $\epsilon_{\text{эл}}$  будет рассчитываться как изменение сегмента из формы треугольника с углом  $B$  в растянутое положение.

$$\epsilon_{\text{эл}} = (L_{\text{цепи}} - L_{\text{цепи}} \cdot \cos B) / L_{\text{цепи}} \cdot \cos B = (1 - \cos B) / \cos B. \quad (2)$$

Рассмотрим узел связи, образованной межмолекулярными силами. Вначале выясним, как ведут себя участки, отклоненные на угол  $A$  относительно вытянутого положения (рисунок 1).

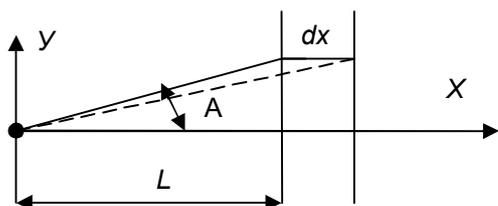


Рисунок 1 – Схема к расчету напряжений

Пусть внешняя нагрузка действует вдоль оси X. Отрезок  $L$  с модулем упругости  $E$  удлинится на  $dx$ . Возникающее в нем напряжение  $N = E \cdot dx/L$ . Наклоненный участок имеет длину  $L/\cos A$ . Он удлинится на  $dx \cdot \cos A$ . Напряжение  $N_1$  на нем, будет равно  $N_1 = (E \cdot dx \cdot \cos A) \cos A/L$ . Составляющая напряжения вдоль оси X  $N_{1x}$ , равна  $N_1 \cdot \cos A$ . В итоге получим напряжение вдоль оси X:

$$N_{1x} = N \cdot \cos^3 A. \quad (3)$$

Вдоль оси Y:

$$N_{1y} = N \cdot \cos^2 A \cdot \sin A. \quad (4)$$

Фактически мы будем наблюдать уменьшение модуля упругости у наклоненного участка, по сравнению с выпрямленным, например вдоль оси X, в  $\cos^3 A$  раз. При этом предельная деформация у наклоненного участка  $\epsilon_{\text{накл}}$  будет определяться через предельную деформацию материала выражением:

$$\epsilon_{\text{накл}} = \epsilon_{\text{пред}} / \cos^2 A, \quad (5)$$

что приводит к увеличению его деформативности.

По отношению к рассматриваемому узлу, расположены два участка слева с углами  $A_l$ ,  $C_l$  и два участка справа с углами  $A_p$ ,  $C_p$ . Напряжения на этих участках будут определяться в соответствии с (3). Разность между правым напряжением и левым, для одного и того же сегмента, дает величину касательного напряжения, которое определяется выражением

$$N_k = N \cdot (\cos^3 A_p - \cos^3 A_l + \cos^3 C_p - \cos^3 C_l) / 2. \quad (6)$$

Узел будет испытывать нормальное воздействие  $N_n$ , которое в случае растяжения будет разрывать узел, а в случае сжатия сжимать:

$$N_n = N \cdot (\cos^2 A_p \cdot \sin A_p + \cos^2 A_l \cdot \sin A_l + \cos^2 C_p \cdot \sin C_p + \cos^2 C_l \cdot \sin C_l) / 4. \quad (7)$$

Энергия разрушения узла связи  $E_{\text{св}}$  равна произведению длины участка контакта, на котором происходит взаимодействие двух сегментов, на плотность энергии межмолекулярного взаимодействия, которое приходится на единицу длины. Во время разрушения связи  $E_{\text{св}}$  складывается из работы касательных сил  $N_k$ , нормальных сил  $N_n$  и удвоенной энергии  $E_{\text{теп}}$ .

Из сравнения выражений (6) и (7) следует, что в случае растяжения узел быстрее

разрушится, чем в случае сжатия. Этим, возможно, объясняется, почему обычно прочность полимерных стекол при сжатии в 2 раза больше, чем при растяжении [4]. Также становится понятным, почему при определении температуры стеклования разными способами, получают разные значения, между которыми невозможно найти никакой зависимости [5]. Все зависит от вида нагружения на узел. Из выражения (2) видно, что с увеличением длины  $L_{\text{цепи}}$  (для одного и того же компаунда) будет увеличиваться предельная деформация, но при этом будет возрастать число степеней свободы, что приводит к повышению энергии  $E_{\text{теп}}$ , а значит, будет уменьшаться температура стеклования. Если вместо текущих межмолекулярных сил ввести частицы, увеличивающие энергию поперечной связи, проблема падения температуры стеклования при повышении деформативности была бы решена. Однако практической реализации такого решения препятствуют две причины: первая – расположение частиц в нужных местах, вторая – получение частиц однородных заданных размеров.

#### МОДЕЛЬ СВЯЗУЮЩЕГО, СОДЕРЖАЩЕГО НАНОЧАСТИЦЫ

Рассмотрим возможные процессы структурирования макромолекул связующего на границе наночастиц в зависимости от их размеров. Для того чтобы макромолекула формировалась свободно на поверхности наночастицы, соседние макромолекулы должны отстоять от неё на расстоянии  $2 \cdot L_{\text{цепи}}$ . На рисунке 2а показаны колебания сегмента  $A_1$  относительно центра  $O_1$  и сегмента  $A_2$  относительно центра  $O_2$ . Чтобы сегменты не соударялись, приблизительно расстояние от  $O_1$  до  $O_2$  должно равняться  $2 \cdot L_{\text{цепи}}$ . Примем, что центры  $O_1$  и  $O_2$  являются первичными местами, откуда начинается рост макромолекул. Теперь предположим, что в среде смолы стала формироваться пачка макромолекул  $C$ , которая заставляет отклоняться сегменты на поверхности наночастицы в сторону от перпендикуляра (рисунок 2б). Чем больше сегментов заключено в угле  $A$ , тем большую энергию необходимо затратить, чтобы изменить радиальную форму расположения сегментов на поверхности частицы.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦАМИ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ

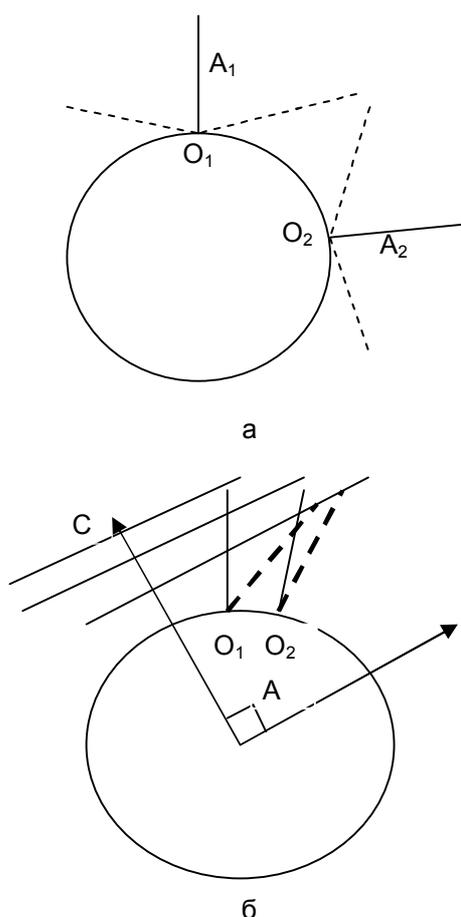


Рисунок 2 – Рост макромолекул на поверхности частицы в перпендикулярном направлении (а) и с отклонением от перпендикуляра (б)

Примем, что формирование шести начальных сегментов на угол в  $90^\circ$  достаточно для образования радиальной структуры на поверхности частицы, в противном случае структура будет совпадать со структурой наружной пачки макромолекул.

Тогда можно определить диаметр частицы  $D$ , на которой будет формироваться радиальная структура, из выражения:

$$D = 48 \cdot L_{\text{цепи}} / 3,14 \quad (8)$$

Сразу отметим, что при радиальной структуре не ожидается повышение температуры стеклования, так как макромолекулы не сшиваются друг с другом, а только крепятся концами к частицам. В области перехода радиальной структуры в область пачки ожидаются дефекты и неравномерное нагружение соседних макромолекул, что приводит к уменьшению прочности и деформативности. К плюсам следует отнести, что крупные частицы задерживают распространение трещин [3].

Расположение частиц, когда они влияют друг на друга, показано на рисунке 3. Приведенное положение частиц обеспечивает однородный контур для формирования макромолекул. Другие положения не имеют таких однородных контуров. Необходимо учитывать, что образование макромолекул и сшивка их поперечными связями может идти одновременно, и их скорость изменяться от окружающих условий. Поэтому, вероятность того, что для более изломанных контуров, макромолекулы смогут сформироваться без разрывов, будет уменьшаться.

Изображенные на рисунке 3 макромолекулы формируются в условиях сжатия и различного наклона по отношению к оси  $X$ .

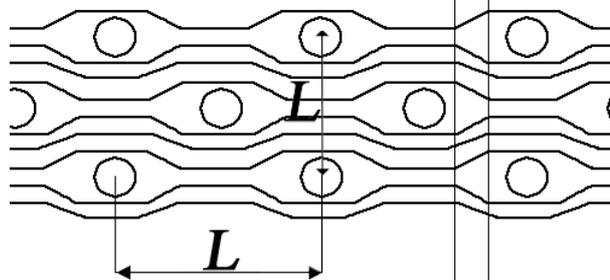


Рисунок 3 – Оптимальное расположение наночастиц в связующем

Рассмотрим, как влияют эти условия на формирование узла поперечной связи межмолекулярных сил. Контакт между двумя поверхностями может осуществляться вплоть до некоторого предельного расстояния  $H$ . В месте контакта поверхности имеют радиус кривизны  $R$ . Длина поверхности контакта  $S$  будет равняться  $S = 2 \cdot R \cdot A$ . При малых углах  $A$   $H$  и  $S$  связывает следующее соотношение:  $H = S \cdot A$ . Отсюда:

$$S^2 = 2R \cdot H. \quad (9)$$

В случае сжатия амплитуда основного колебания будет уменьшаться, при этом будут появляться высокочастотные составляющие с меньшей амплитудой. Радиус кривизны основной будем считать неизменным. Уменьшение расстояния от начала цепи до узла приведет к более симметричному образованию узла. Все углы в (6), (7) будут близки друг другу. Это приведет к снижению касательных напряжений и увеличению начала температуры стеклования.

В случае наклоненного состояния, размер цепи должен удлиниться. Будет происходить распрямление цепи, что приведет к увеличению радиуса кривизны  $R$  и повышению поверхности контакта. Это приведет к обще-

му возрастанию температуры стеклования (начала и конца).

Изменение деформативности связующего рассмотрим на конкретном примере.

#### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, ОТВЕРЖДЕННОЙ ИЗОМТГФА, С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОАЛМАЗОВ

Перечислим некоторые свойства алмазной шихты и наноалмазов, которые получают путем очистки шихты (в том числе химическим травлением). Средний размер наноалмазов 4–5 нм. Средний размер шихты принимался в 1,4 раза больше, что составляет 5,6–7 нм (с другой стороны, несмотря на удаление неалмазного углерода из алмазной шихты травлением, в литературе не сообщается, что имеется радикальное изменение размеров наночастиц после такого травления). Поверхность алмазной шихты и наноалмазов содержит полярные функциональные группы: OH, NH, C=O, C–H, C=N, [2]. Эти группы сохраняются вплоть до разрушения наноалмазов. Процентное содержание групп и вид у наноалмазов зависят от способа очистки алмазной шихты, поэтому у разных производителей поверхностная активность наноалмазов может различаться.

Оценим размер  $L_{\text{цепи}}$  для эпоксидной смолы, отвержденной ангидридом изоМТГФА.

По краям молекулы расположены эпоксигруппы. При отверждении смолы ангидридами реакция происходит в две стадии [1]. Сначала ангидрид реагирует с гидроксильными группами эпоксидного полимера. Затем уже образовавшаяся кислота реагирует с эпоксигруппами.

Количество ангидрида берется из расчета двух молекул на одну молекулу полиэпоксида.

Тогда длина  $L_{\text{цепи}}$  будет равна сумме длин молекул полиэпоксида и ангидрида, что равнозначно примерно 30 связям C–C. Приняв длину связи C–C равной 0,154 нм, получаем  $L_{\text{цепи}} = 4,6$  нм. То есть, средний размер алмазной наночастицы равен размеру  $L_{\text{цепи}}$ . Аналогично, для наночастицы алмазной шихты  $L_{\text{цепи}} = 6,44$  нм.

$L_{\text{сегм}}$  примем равным  $L_{\text{цепи}}/5$ , из расчета один бензольный комплекс на сегмент. Энергия  $L_{\text{цепи}}$  равна:

$$E_{\text{теп}} = 5R \cdot T/2. \quad (10)$$

Оценим расстояние между макромолекулами в отвержденном состоянии. Высокоэластическая деформация составляет примерно одну пятую от упругой деформации,

порядок которой для связующего составляет около 2 %. Тогда в формуле (2) угол  $B = 5^{\circ}14'$ , расстояние между макромолекулами  $H = 4,6$  нм.

Оценим размер зазора  $B$ . Макромолекулы вдавлены наночастицей на половину размера наночастицы в одну сторону. Примем, что при вдавливании, на одну макромолекулу приходится поворот одной  $L_{\text{цепи}}$ .

Тогда размер  $B = 4,5L_{\text{цепи}}$  для наноалмазов и  $B=7L_{\text{цепи}}$  для алмазной шихты. Для первого оптимального положения, следует, что одна наночастица приходится на размер  $2B$  смолы. Это будет соответствовать объемному содержанию для наноалмазов –  $(1/9)^3$ , что составляет 0,14 %. Для алмазной шихты –  $(1,4/14)^3$ , или 0,1 %.

Для второго оптимального состояния на одну алмазную наночастицу будет приходиться размер  $B + 0,5L_{\text{цепи}}$  для наноалмазов и  $B + L_{\text{цепи}}$  для алмазной шихты. Объемное содержание для наноалмазов – 0,80 %, для алмазной шихты – 0,53 %.

Во втором оптимальном положении фактически зазор  $B$  сквозной, и смола между двумя частицами не сшивается (рисунок 3). Это благоприятно при растяжении. В случае сжатия мы получим дополнительную нагрузку на отрыв смолы от наночастицы. Поэтому для сжатия необходимо увеличить длину молекулы смолы, приходящуюся на одну наночастицу. Для наноалмазов – на 0,5 звена, для шихты на 1,5 звена. Соответственно объемное содержание будет составлять 0,60 и 0,32 %.

Зависимость температуры стеклования от содержания частиц мы рассмотрели выше. Теперь рассмотрим, как ведет себя деформативность смолы от содержания частиц.

Выделим первый фактор – на вертикальных линиях, соединяющих частицы, деформативность в пределах размера частицы, очень мала из-за высокого модуля упругости алмаза. Будем считать, что здесь деформация равна нулю. Тогда в случае первого оптимального положения для наноалмазов из каждых девяти  $L_{\text{цепи}}$  одна не сжимается, для алмазной шихты из каждых десяти  $L_{\text{цепи}}$  одна не сжимается. То есть, относительная деформация для наноалмазов упадет в 8/9 раза, модуль упругости соответственно увеличится в 9/8. Для алмазной шихты эти величины составят соответственно 9/10 и 10/9. Для второго оптимального положения для наноалмазов деформация уменьшится в 4/5, модуль увеличится в 5/4, для алмазной ших-

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦАМИ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ

ты, соответственно деформация – в 4,7/5,7, модуль – в 5,7/4,7.

Второй фактор – это сжатие макромолекул до минимума в соответствии с рисунком 3, и максимума в соответствии с силой притяжения частиц друг к другу. Необходимо применять воздействия для того, чтобы частицы не сбивались в агломераты. Минимальному сжатию будет подвергаться вся область на расстоянии, равном удвоенному расстоянию между частицами на величину, равную размеру частицы.

При сжатии двух макромолекул, отстоящих на расстоянии  $H$ , на величину  $dh$ , длина  $L$  участка, испытывающего упругое растяжение (сжатие) уменьшится до величины  $L_1$ . Поэтому деформативность опять падает, а модуль растет. При  $H = 4,6$  нм и известном расстоянии между частицами можно рассчитать число макромолекул. Минимальное сжатие известно, следовательно, мы определим  $dh$ , а отсюда  $L_1$ . Отношение  $L/L_1$  дает увеличение модуля и, соответственно, уменьшение деформативности: для наноалмазов в первом положении  $L/L_1 = 1,00014$ , во втором положении  $L/L_1 = 1,00024$ . Для алмазной шихты соответственно 1,00024 и 1,0004.

Третий фактор – это необходимость растягивания узлов у наклонных участков. Если узел, ориентированный вдоль оси  $X$ , имеет размер  $L$ , то при повороте на угол  $A$ , он должен иметь размер  $L_1$  (наночастицы, считается, не меняют расстояние между собой). В первом оптимальном положении наклон изменяется от нуля до максимума. Во втором положении все наклонены одинаково.

Расчет растяжения проведем для второго случая. Угол  $A$  для наноалмазов равен  $7^\circ 12'$ , а для алмазной шихты  $6^\circ 48'$ . Длина  $L_y$  узла при вытягивании не изменяет своей длины  $L$ , но в целом размер узла увеличивается. Угол  $B$  для наноалмазов и алмазной шихты составит  $0^\circ$ . Узлы распрямятся. В соответствии с (5) предельная деформация уменьшится в  $(\cos B)^2$ , где  $B = 5^\circ 14'$ . Соответственно модуль возрастет. С другой стороны, сами макромолекулы ориентированы под углом  $A$ . Это приведет к увеличению предельной деформации в  $1/(\cos A)^2$ . В итоге для наноалмазов увеличение предельной деформации составит 1,0075, для шихты 1,0056. В целом, при взаимодействии второго и третьего фактора предельная деформация увеличивается в 1,005 и 1,007 раз для шихты и алмазов соответственно. Однако уменьшение деформации за счет первого фактора в це-

лом составит до 0,81 % для наноалмазов и до 0,83 % для шихты.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментальной проверки основных положений модели были изготовлены образцы модифицированных связующих ЭДИ ТУ 2296-007-20994511-98 (с ангидридным отвердителем) и ЭДП ТУ 2225-027-00203306-97 (с аминным отвердителем), и стеклопластиковых стержней на их основе. Для модификации использовался наноуглерод марки УДАГ-С по ТУ 84.415-115-2000. В состав связующего ЭДИ модификатор вводился с концентрацией 0,00; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25 % по массе. В состав ЭДП модификатор вводился с концентрацией 0,00; 0,75; 1,25 % по массе.

Для термомеханических испытаний использовали образцы связующих в виде цилиндров диаметром 6 мм и длиной 100 мм, полученные заливкой композиций в формы с последующим отверждением при температуре  $160^\circ\text{C}$  в течение 3-х часов и стеклопластиковые однонаправленные стержни диаметром 5,5 мм, изготовленные по принятым на Бийском заводе стеклопластиков технологическим режимам.

На образцах проводили измерение температуры стеклования по методике [6,7].

Результаты испытаний приведены в табл. 1-3.

Таблица 1 – Результаты термомеханических испытаний образцов связующего ЭДИ-НУ

№ п/п	Содержание наночастиц, %	$T_{\text{нп}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\alpha}, ^\circ\text{C}$
1	0,00	80,5	98,4	91,6
2	0,25	89,4	103,7	96,3
3	0,50	93,7	114,9	105,7
4	0,75	95,5	117,3	107,9
5	1,00	98,9	121,1	111,9
6	1,25	101,1	120,9	111,5

Примечание: ЭДИ-НУ – связующее ЭДИ с наночастицами углерода,  $T_{\text{нп}}$  – температура начала перехода;  $T_{\text{ст}}$  – температура стеклования;  $T_{\alpha}$  – температура  $\alpha$ -перехода

Таблица 2 – Результаты термомеханических испытаний образцов связующего ЭДП-НУ

№ п/п	Содержание наночастиц, %	$T_{\text{нп}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\alpha}, ^\circ\text{C}$
1	0,00	121,0	147,8	136,5
2	0,75	129,1	157,8	145,3
3	1,25	133,6	159,6	148,2

Примечание: ЭДП-НУ – связующее ЭДП с наночастицами углерода

Таблица 3 – Результаты термомеханических испытаний стеклопластиков на основе модифицированного связующего ЭДИ

№ п/п	Содержание наночастиц, %	$T_{\text{нп}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\alpha}, ^\circ\text{C}$
1	0,00	85,8	104,9	97,7
2	0,25	86,6	105,8	98,2
3	0,50	87,5	107,3	98,7
4	0,75	88,0	108,1	99,4
5	1,00	88,6	108,5	100,3
6	1,25	91,6	109,5	101,0

Результаты термомеханических испытаний показали, что изменение концентрации наночастиц УДАГ-С в связующем от 0,0 до 1,25 % приводит к увеличению значений температуры стеклования, что соответствует положениям модели.

При изготовлении образцов связующего и стеклопластиков было отмечено, что наночастицы имеют склонность к агломерации, поэтому проблемой является равномерное распределение наночастиц в объеме связующего [8,9]. В работах [10,11] проблему распределения частиц решали с помощью применения ультразвука при диспергировании. Полученные в работах [10,11] экспериментальные данные по повышению механических свойств и модуля упругости связующих и композитов с добавками наночастиц, косвенно подтверждают положения приведенной модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Предложенная модель микромодификации эпоксидных матриц наночастицами углерода позволяет определить оптимальную концентрацию для повышения свойств связующего и композита на его основе.

2 Получено качественное соответствие экспериментальных и рассчитанных по модели результатов, согласование с литературными данными.

3 Отклонения экспериментальных данных от предсказанных моделью и наличие малого эффекта от модификации объясняются необходимостью тщательного равномерного распределения в связующем наночастиц, склонных к агломерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Андреевская, Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики / Г.Д. Андреевская. – М.: Наука, 1966. – 76 с.

2 Долматов, В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза / В.Ю. Долматов. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2003, – 343 с.

3 Бартенев, Г.М., Зеленев Ю.М. Курс физики полимеров / Г.М. Бартенев, Ю.М. Зеленев; под ред. проф. С.Я. Френкеля. – Л.: Химия, 1976. – 288 с.

4 Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М.: Высш. школа, 1972, – 320 с.

5 Браун, Д. Практическое руководство по синтезу и исследованию свойств полимеров / Д. Браун, Г. Шедрон, В. Керн. – М.: Химия, 1976, – 436 с.

6 Савин, В.Ф. Методика определения термомеханических характеристик полимерных композиционных материалов / В.Ф. Савин, А.Н. Луговой, Ю.П. Волков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69. – № 6. – С. 40-43.

7 Блазнов, А.Н. Методы механических испытаний композиционных стержней: монография / А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, Ю.П. Волков и др.; под ред. А.Н. Блазнова, В.Ф. Савина. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – 314 с.

8 Ананьева Е. С. Дефектность и особенность разрушения полимерного материала модифицированного ультрадисперсными углеродными частицами / Ананьева Е.С., Маркин В.Б., Федорова Е.Н., Окаб Д. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 4. С. 52-57.

9 Ананьева Е.С. Применение фрактально-кластерного подхода для анализа структуры и прогнозирования свойств полимерных нанокомпозитов / Ананьева Е.С., Новиковский Е.А., Ананьев М.И., Маркин В.Б., Ишков А.В. // Ползуновский вестник. 2012. № 1-1. С. 10-14.

10 Хвостов, С.А. Принципы модификации углеродными наночастицами эпоксидных связующих и технология получения композитов на их основе: дисс. канд. техн. наук: 05.02.01 / Хвостов Станислав Александрович. – Барнаул, 2007. – 120 с.

11 Васильева, А.А. Повышение прочностных характеристик однонаправленных базальтопластиков модификацией эпоксидного связующего силикатными наночастицами: дисс. канд. техн. наук: 05.17.06 / Васильева Алина Анатольевна – Барнаул, 2013. – 136 с.

**Блазнов А.Н.** – д.т.н., доцент, заведующий лабораторией *Материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН)*, 8(3854) 30-58-82, blaznov74@mail.ru

**Зимин Д.Е.** – к.т.н., научный сотрудник лаборатории *Материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦАМИ  
ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ

Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), 8-(3854) 30-59-06, [labmineral@mail.ru](mailto:labmineral@mail.ru)

**Алемаева Е.С.** – аспирант кафедры Машины и аппараты химических и пищевых производств Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), 8-(3854)435299, [mahipp@bti.secna.ru](mailto:mahipp@bti.secna.ru).

**Ладыгин Ю.И.** – к.т.н., начальник управления инновационного развития ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет» (АлтГУ), 8-(385-2)291-291, [lad57@mail.ru](mailto:lad57@mail.ru).

**Савин В.Ф.** – к.т.н., начальник лаборатории общества с ограниченной ответственностью «Бийский завод стеклопластиков» (ООО БЗС), 8-(3854)442658, [vladimir.savin@bzs.ru](mailto:vladimir.savin@bzs.ru).