

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ ПОДОБНЫХ МОДЕЛЕЙ**

*Одинцев И.Н. (ИМАШ РАН), Осипчик В.С. (РГХТУ), Смотровая С.А. (ЦАГИ)*

Создание авиационно-космической техники на настоящем этапе развития уже практически невозможно без применения новых конструкционных материалов. Одним из перспективных направлений развития науки и технологии, как в России, так и за рубежом, на сегодня является «индустрия наносистем и материалов». В авиационной отрасли существует много задач, имеющих первоочередное значение, например, снижение общей массы натуральных (и модельных) конструкций, уменьшение расхода топлива и повышение экономичности воздушных судов, увеличение их прочности, долговечности, безопасности, календарного и рабочего ресурсов эксплуатации. В связи с этим передовые разработки и достижения в области наноматериалов и нанотехнологий должны активно и своевременно внедряться в новейшие образцы авиационных конструкций.

Вместе с тем, перспективные материалы необходимы и для создания на современном уровне моделей авиационной техники и инженерных конструкций, подлежащих специальным испытаниям на стадии разработок. Ведь для того, чтобы создать модель, соответствующую натурному объекту и точно передающую все необходимые характеристики, нужны материалы, обладающие комплексом упругих свойств, превосходящих свойства материалов самой натурной конструкции. Поэтому моделирование летательных аппаратов (ЛА) – эта та область теоретических и экспериментальных исследований, которая должна быть одной из первых потребителей новых разрабатываемых полимерных композиционных и других конструкционных материалов.

Одними из основных требований, предъявляемых к материалам для изготовления динамически подобных моделей (ДПМ) ЛА, в частности, являются высокие жесткостные свойства, низкое демпфирование и

минимальный вес. Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) с добавками наноструктурного углерода и иного рода наночастиц при создании ДПМ ЛА для исследования явлений аэроупругости может привести к получению более высоких механических свойств конструктивных элементов, так как на сегодняшний день известно, что добавка наночастиц в ПКМ является эффективным способом повышения прочности и модуля упругости материалов такого рода [1-6]. Это может явиться одним из основных способов решения проблем, возникающих при моделировании таких конструкций.

При решении задач аэроупругости очень часто приходится сталкиваться с перетяжелением ДПМ относительно натурального объекта. Коэффициент перетяжеления обычно составляет от 1,3 до 3. Это означает, что масса модели может быть превышена на 30÷200%. Неточность при моделировании свойств натурального объекта будет отрицательно сказываться на достоверности результатов, получаемых при проведении экспериментов в аэродинамических трубах (АДТ). Один из путей преодоления этого нежелательного явления состоит в применении материалов с более высоким удельным модулем упругости. Эту роль в ближайшем будущем могут сыграть углеродные наноконпозиты или композиты с добавками других наночастиц. Такие материалы можно будет использовать не только на стадии создания отдельных агрегатов, их силовых элементов (например, лонжеронов) и внешних оболочек трансзвуковых ДПМ, но и на этапе доработки моделей до необходимых характеристик, например, в тех случаях, когда нужно повысить жесткостные свойства конструктивных элементов или агрегатов. Таким образом, применение наноконпозитов представляется эффективным как в целях снижения массы конструкции с сохранением требуемых жесткостных характеристик, так и для увеличения жесткости при обеспечении на необходимом уровне массовых характеристик объекта [7].

Однако в процессе создания таких композитов возникает ряд трудностей, и неизбежно решение следующих вопросов:

1. Создание достаточно прочных химических и физических связей между наночастицами и матрицей.
  2. Достижение определенной силы адгезии.
  3. Пропорциональное соотношение наполнитель-матрица.
  4. Необходимость контроля за состоянием межфазного слоя.
  5. Разработка методов ориентации нанонаполнителя.
  6. Разработка методов увеличения длины углеродных нанотрубок и т.д. [3-4]
- Успешное решение этих задач и применение созданных материалов будет способствовать повышению точности моделирования и получению более качественных результатов экспериментальных исследований ДПМ в аэродинамических трубах.

Цель настоящего исследования заключалась в проведении комплекса экспериментальных работ по созданию эпоксидной композиции с добавками наночастиц для применения ее в качестве связующего при изготовлении агрегатов ДПМ ЛА. Образцы эпоксидных композиций были разработаны на кафедре «Технологии переработки пластических масс» Российского государственного химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева (РГХТУ). Эти композиции холодного отверждения содержали эпоксидиановую смолу, активный разбавитель-пластификатор и добавки различных типов наночастиц: волластонит, органобентонит (чистый и в виде пасты в индустриальном масле), а также углеродные нанотрубки. Кроме того, композиции содержали в некоторых случаях еще и каучук. В качестве отвердителя использовался ароматический аминный отвердитель. Добавки вводились в различных сочетаниях друг с другом. Было исследовано в общей сложности 9 составов, из них: 6 составов содержали различного вида добавки, 3 состава – не содержали каких-либо добавок и использовались для сравнения. Образцы этих композиций были изготовлены в специальных формах. Готовые образцы представляли собой балки постоянного сечения с размерами рабочей части 8×14×80 мм.

Экспериментальные работы по исследованию механических свойств разработанных составов были проведены в ЦАГИ и в ИМАШ РАН.

Для определения статического модуля упругости при изгибе использовалась методика, разработанная в ИМАШ РАН (Отделение прочности, живучести и безопасности машин), основанная на применении высокоточного бесконтактного метода компенсационной спекл-интерферометрии для регистрации деформационного отклика образца при нагружении [8]. В качестве иллюстрации на рисунке 1-а демонстрируется типичная спекл-интерферограмма чистого изгиба балки-образца, на которой интерференционные полосы представляют собой изолинии перемещений (прогибов). Цена полосы составляет 0,316 мкм. На рисунке 1-б показана картина полос, наблюдаемая после оптической компенсации продольной кривизны образца в схеме специализированного интерферометра. Величина модуля упругости рассчитывается по измеренному значению кривизны и известному изгибающему моменту. В ходе эксперимента был отмечен рост деформации образцов с течением времени при постоянной нагрузке. В стандартном пересчете на модуль упругости данное явление характеризуется, очевидно, монотонным снижением его расчетной, эффективной величины.

Основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований, представлены в таблице и на графиках (рисунок 2). На графиках представлены зависимости эффективного модуля упругости образцов ( $E$ , МПа) от времени выдержки под нагрузкой ( $t$ , с). В целях дальнейшего численного сопоставления упругих свойств за величину приведенного модуля упругости материала принималось значение  $E^*$  на полученных распределениях в точке  $t = 10^3$  с от момента приложения нагрузки к образцу, то есть в области, где процесс вязкого деформирования существенно замедлялся.

Анализ результатов экспериментов, полученных в данной работе, показал следующее.

1. Сравнение свойств исходных композиций без добавок между собой и с теоретическими данными.

При сравнении модулей упругости композиций было установлено, что наибольшим модулем обладают композиции, состоящие только из смолы и отвердителя, без добавок разбавителя-пластификатора и каучука, а минимальное значение модуля было отмечено у композиции, содержащей пластификатор и каучук одновременно. Полученный результат объясняется, по-видимому, тем, что указанные добавки вносят в цепочку химических связей гибкие звенья, снижают частоту сетки химических связей, а также изменяют надмолекулярную структуру полимерной композиции. Однако, добавки необходимы для снижения вязкости эпоксидной смолы, уменьшения хрупкости отвержденных эпоксидных композиций и перераспределения напряжений в ПКМ, изготовленном с их использованием. Отметим, что полученные значения собственного модуля упругости данной эпоксидной композиции холодного отверждения без каких-либо добавок хорошо коррелируют с теоретическими данными [9].

2. Сравнение свойств композиций с добавками наночастиц между собой.

2.1. Если сравнивать составы исключительно с добавками наночастиц силикатного типа (без добавок углеродных нанотрубок – УТ), то наибольшим модулем упругости обладают композиции с включением чистого органобентонита и волластонита. Несколько ниже свойства у образцов с добавкой пасты органобентонита в индустриальном масле и волластонита. Наименьший модуль  $E^*$  отмечен у композиции с добавкой исключительно волластонита, при этом композиция содержит в своем составе каучук.

2.2. При сравнении составов с добавками наночастиц силикатной природы и одновременно углеродных нанотрубок оказалось, что наилучшими упругими свойствами обладают образцы с добавками УТ и волластонита. Они обладают наибольшим модулем упругости среди всех исследованных образцов с добавками УТ и других наночастиц. Намного ниже модуль упругости у образцов с добавками УТ, чистого органобентонита и

волластонита. Самым низким значением  $E^*$  среди образцов с добавками УТ и каких-либо других наночастиц обладают образцы с включением УТ, пасты органобентонита в индустриальном масле и волластонитом. Однако здесь следует заметить, что эта композиция содержит в своем составе еще и каучук.

3. Сравнение свойств композиций с добавками наночастиц и без каких-либо добавок.

3.1. При сравнении упругих свойств исходной композиции, содержащей кроме смолы и отвердителя разбавитель-пластификатор, со свойствами композиций с различными добавками можно заметить, что значение  $E^*$  исходной композиции возрастает в 2 раза при одновременном добавлении в состав этой композиции углеродных нанотрубок и волластонита. Несколько меньше (в 1,9 раза) возрастает модуль упругости исходной композиции в случае добавления чистого органобентонита и волластонита (приблизительно та же картина в случае добавления пасты органобентонита и волластонита). В том случае, если к исходной композиции одновременно добавлены углеродные нанотрубки, органобентонит и волластонит, модуль  $E^*$  повышается всего в 1,7 раза.

3.2. В случае сравнения аналогичных свойств композиции, содержащей кроме смолы, отвердителя, разбавителя-пластификатора дополнительно каучук, со свойствами той же композиции, но содержащей различные добавки, отмечено возрастание модуля упругости в 2,5 раза в случае добавления исключительно волластонита, и в 1,9 раза – при добавлении вместе с волластонитом пасты органобентонита и углеродных нанотрубок.

#### Заключение.

Проведенный комплекс исследований разработанных эпоксидных композиций с добавками наночастиц различной природы дает основание сделать вывод о том, что для изготовления агрегатов ДПМ ЛА, используемых для изучения явлений аэроупругости в АДТ, возможно

применение композиции, содержащей в своем составе эпоксидиановую смолу, ароматический аминный отвердитель, активный разбавитель-пластификатор с добавками углеродных нанотрубок и волластонита, что позволит повысить модуль упругости традиционно применяемых для этих целей ПКМ более чем в 2 раза.

#### Литература

1. Zhu R., Pan E., Roy A.K., Pan F. Study of the Stress-strain Behavior of Carbon-nanotube Reinforced Epon 862 Composites Using Molecular Dynamics. – AIAA 2006-1679. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Con. 1-4 May 2006, Newport, Rhode Island.
2. Gary D. Seidel and Dimitris C. Lagoudas, Sarah Jane V. Frankland, Thomas S. Gates. Micromechanics Modeling of Functionally Graded Interphase Regions in Carbon Nanotube-Polymer Composites. – AIAA 2006-1679. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Con. 1-4 May 2006, Newport, Rhode Island.
3. Герасин В.А., Зубова Т.А., Бахов Ф.Н. и др. Структура нанокомполитов полимер/ $\text{Na}^+$ -монтмориллонит, полученных смешением в расплаве. – Российские нанотехнологии. Том 2, №1-2, 2007.
4. Межуев С.В. Разработка технологии и организация производства полимерных композиционных материалов на основе нанонаполнителей с повышенным в 1,5-2 раза сроком эксплуатации. – Российские нанотехнологии. Том 2, №1-2, 2007.
5. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – Москва: Техносфера, 2005.
6. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. – Москва: Техносфера, 2003.
7. Смотровая С.А. О возможности использования наноматериалов и нанотехнологий для изготовления конструкций динамически подобных моделей, применяемых при изучении явлений аэроупругости в

аэродинамических трубах. Труды ЦАГИ. Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений. Выпуск 2675. – Москва: Издательский отдел ЦАГИ, 2007.

8. Одинцев И.Н. Исследование упругих свойств композитных материалов с применением компенсационной спекл-интерферометрии. Труды ЦАГИ. Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений. Выпуск 2675. – Москва: Издательский отдел ЦАГИ, 2007.
9. Бунаков В.А., Головкин Г.С., Машинская Г.П. и др. Армированные пластики. Справочное пособие. Под ред. Головкина Г.С., Семенова В.И. – Москва: Изд-во МАИ, 1997.

Таблица.

№ п/п	Состав композиции	$E^*$ , МПа
исходные композиции		
1.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М + СКТН	1180
2.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М	1650
3.	ЭД-20 + Этал-45М	2000
композиции с добавками наночастиц		
4.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М + СКТН + волластонит	3000
5.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М+ волластонит + паста органобентонита в индустриальном масле	3100
6.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М + СКТН + волластонит + паста органобентонита в индустриальном масле + углеродные нанотрубки	2280
7.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М + волластонит + органобентонит	3170
8.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М + волластонит + углеродные нанотрубки	3350
9.	ЭД-20 + ТГМ-3 + Этал-45М + волластонит + органобентонит + углеродные нанотрубки	2800

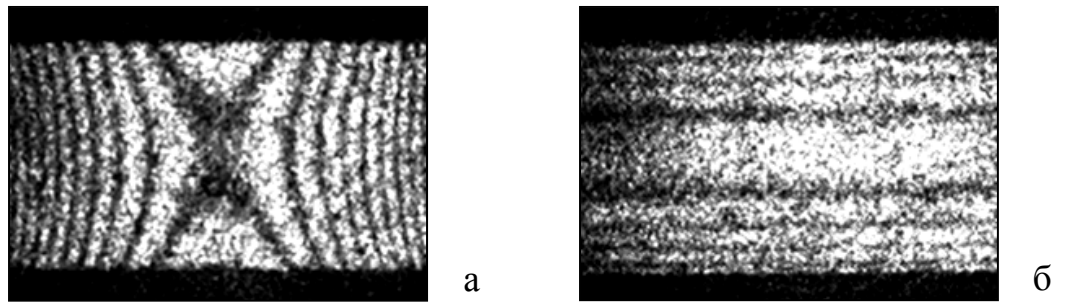


Рисунок 1. Типичная интерферограмма чистого изгиба образца (а) и картина полос, наблюдаемая в момент оптической компенсации продольной кривизны деформированной поверхности (б).

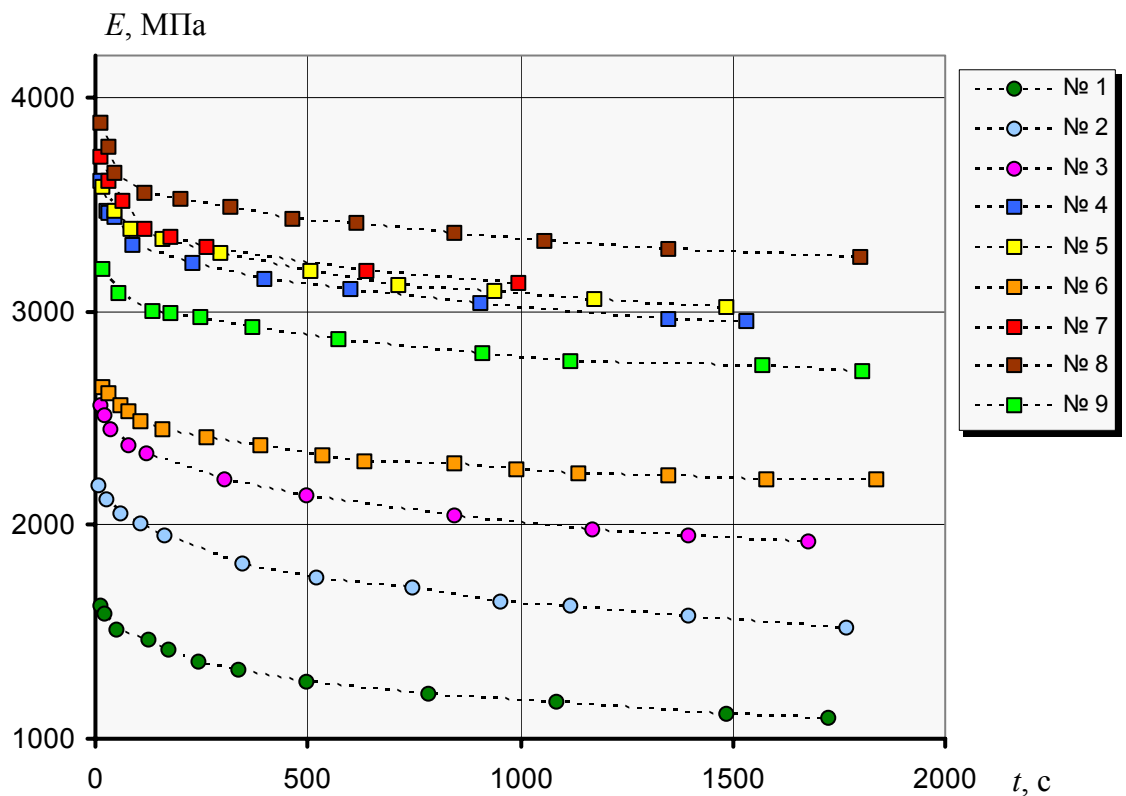


Рисунок 2. Графики зависимостей эффективных модулей упругости исследованных композиций от времени.