

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОДОБАВОК НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕЖСЛОЙНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Покровский А.М.* , Чермошенцева А.С.**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия*

** e-mail: ampokr@mail.ru*

*** e-mail: asch-13@ya.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования влияния степени наполнения смолы ЭД-22 наноразмерным порошком диоксида кремния («Таркосил» Т-20) с разной концентрацией на механические свойства гетерогенного материала. Приведено краткое описание процесса технологии изготовления образцов из эпоксидной смолы и нанодисперсного порошка. Разработана методика проведения эксперимента, проведена серия испытаний. Данные исследования использованы для решения задачи упрочнения межслойных дефектов в слоистых композиционных материалах (КМ), являющихся следствием несовершенства технологии производства деталей авиационной техники и воздействия эксплуатационных нагрузок летательных аппаратов, за счет добавления наночастиц в связующее. Найдены оптимальные степени наполнения КМ наноразмерным порошком диоксида кремния в зависимости от массовой концентрации. Представлены результаты испытания образцов из КМ с заложенными межслойными дефектами с добавлением в связующее нанодисперсных добавок различной объемной концентрацией от 0,1 до 0,5%.

Ключевые слова: композиционный материал, наноразмерный порошок, дефект, эксперимент, прочность.

Введение

Необходимость предотвращения усталостного разрушения изделий и элементов конструкций авиационной техники продиктована требованиями безопасности эксплуатации воздушных судов [1]. Многослойным композиционным материалам присущи специфические свойства, такие, как анизотропия механических характеристик и возможность присутствия скрытых дефектов в виде нарушения сплошности материала по поверхностям раздела отдельных слоев [2–4]. Дефекты могут возникнуть при производстве конструкций летательных аппаратов (ЛА). Это, например, пористость, поверхностная пористость, расслоение от удара, расслоение при формировании, отслоение клеевого соединения обшивки, отслоение сотового заполнителя от обшивки, отслоение сотового заполнителя от каркаса, непропитка, переменная толщина, дефект заполнителя, непроклей. Существуют также дефекты, возникающие при эксплуатации ЛА: расслоение обшивок от удара, расслоение жесткости от удара [5], отслоение клеевого соединения обшивки от каркаса, отслоение сотового заполнителя от обшив-

ки, отслоение сотового заполнителя от каркаса, попадание и накопление влаги в сотовых конструкциях.

В работе рассматриваются межслойные дефекты типа расслоение, учет которых при проектировании слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) хуже всего прогнозируется на сегодняшний день.

Задача устойчивости элементов конструкций из КМ с дефектами с последующим разрушением рассмотрена в [6–8].

С развитием nanoиндустрии появилась возможность упрочнения слоистых композиционных материалов на основе эпоксидных смол за счет введения в матрицу различных видов наноматериалов, таких как, нанотрубки, наночастицы, нановолокна, что позволяет повысить на 20–30% их физико-механические свойства [9]. Дисперсные наполнители — наиболее распространенный вид наполнителей ПКМ. Наночастицы придают материалам новые свойства. В настоящее время исследование изменения характеристик ПКМ при введении в них дисперсной фазы далеки от своего завершения.

Анализ выбора наноразмерного порошка

Одним из способов упрочнения композиционных материалов является введение, в процессе формирования, в матрицу мелкодисперсных частиц субмикронного размера. В таких дисперсно-упрочненных материалах прочность самих частиц не используется, частицы служат барьером на пути движения трещины в матрице и таким образом упрочняют исходную фазу. Существует теория упрочнения дисперсными частицами Орована, суть которой в следующем: если частицы представляют собой непреодолимое препятствие, то в процессе пластической деформации линия трещины изгибается. Схематически механизм Орована изображен на рис. 1.

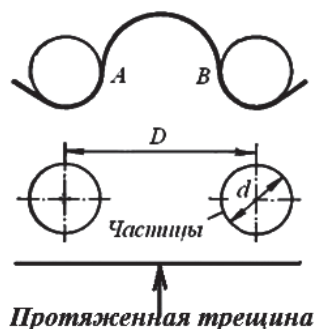


Рис. 1. Механизм Орована

Протяженная трещина, движущаяся в плоскости скольжения под действием внешних сил, изгибается на частицах и в итоге, преодолевая их, оставляет вокруг каждой частицы петлю, как показано на рис. 2. Эти петли заметно уменьшают расстояния между частицами и являются существенным

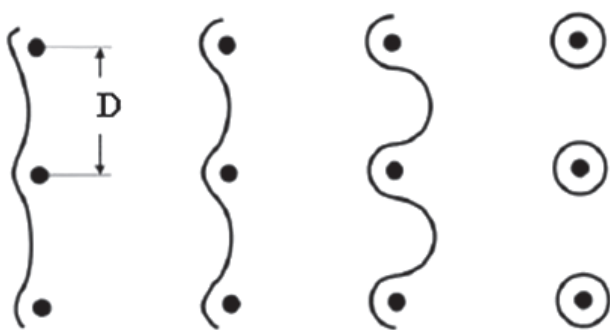


Рис. 2. Стадии выгибания протяженной трещины между частицами

препятствием для прохождения следующих трещин. Таким образом создается эффект деформационного упрочнения.

В пограничном слое на свойства могут влиять присутствующие на поверхности наночастиц активные центры, например, изменять стехиометрию реакции вследствие различной плотности реагентов.

При отверждении могут создаваться дополнительные связи смолы с порошком либо может изменяться структура формирующейся матрицы жестких связей, что повлияет на полноту отверждения и ее механические свойства [9]. При разнообразии факторов и механизмов влияния необходимо их раздельное изучение.

В качестве наномодифицирующей добавки в работе использовался нанодисперсный порошок диоксида кремния «Таркосил» (Т-20) с разной площадью удельной поверхности, со средним размером частиц 20–25 нм, полученный в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН (ИТПМ СО РАН) и Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (ИЯФ СО РАН) на ускорителе электронов (рис. 3). Процесс основан на испарении вещества под воздействием электронного пучка, создаваемого электронным ускорителем [10, 11].

Технология изготовления образцов из эпоксидной смолы и нанопорошка

Для экспериментальных исследований были изготовлены образцы в соответствии с ГОСТ 11262-80 (для пластмасс) в форме двухсторонней лопатки прямоугольного сечения в рабочей части (рис. 4) из эпоксидной смолы ЭД-22 с добавлением различного количества нанодисперсного диоксида кремния.

Для получения образцов в виде гетерогенной смеси, состоящей из эпоксидной смолы и нанопорошка, использовали следующую технологию:

1. Были изготовлены отливки (пресс-форма) из двухкомпонентного полимера (пентеласт), имеющего низкую усадку по форме образца.

2. Так как форма должна обладать малой адгезией к эпоксидной смоле, для уменьшения адгезии между поверхностью формы и эпоксидной смолой формы смазывали силиконовой смазкой.

3. С целью уменьшения вязкости эпоксидной смолы ЭД-22 использовалась «водяная баня». В нагретую до 50°C воду помещали емкость с эпоксидной смолой на 20 мин.

4. На электронных весах с точностью до 0,005 г отдельно взвешивали необходимые компоненты. Рассчитывали массовую концентрацию:

$$C_{\text{нап}} = \frac{C_{\text{нап}}}{C_{\text{нап}} + C_{\text{см}} + C_{\text{отв}}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

5. Равномерно перемешивали нанопорошок с отвердителем — полиэтиленполиамин (ПЭПА), после чего в полученную смесь добавляли разогретую смолу (1 часть отвердителя на 6 частей смолы).

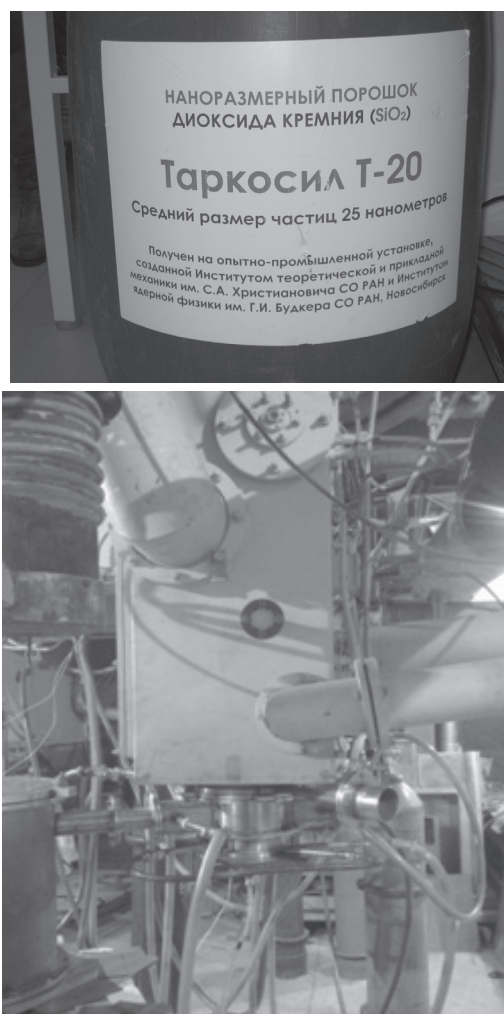


Рис. 3. Опытно-промышленная установка для получения наноразмерного порошка «Таркосил» Т-20

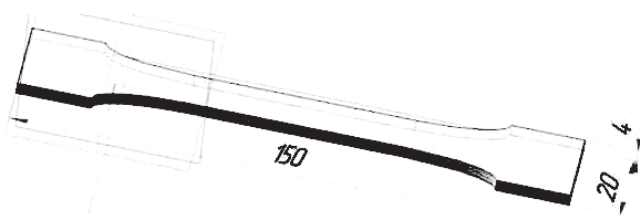


Рис. 4. Форма образца (ГОСТ 11262-80)

При перемешивании смолы, отвердителя и порошка в смеси возникали пузырьки воздуха.

6. Для разбивания агломератов и более равномерного распределения в смоле частиц наполнителя использовали ультразвуковой диспергатор УЗГ 13-0,1/22.

7. После смешивания смесь заливали в формы и оставляли на 24 часа при н.у. Через 24 часа образцы извлекались из форм, и отверждение производилось в печи при температуре $T = 383 \pm 10$ К.

8. После извлечения происходило охлаждение и отвердевание при нормальных условиях ($T = 273$ К, $p = 1$ атм).

9. Для сохранения постоянной площади сечения в соответствии с ГОСТ 11262-80 (для пластмасс) все полученные образцы обрабатывались в размер на фрезерном станке.

10. Перед испытанием проводилось измерение поперечного сечения образцов в рабочей части. С использованием микрометра и электронного штангенциркуля измерены ширина и толщина в разных сечениях образца; выбрано минимальное значение. Отклонения по ширине составили $\pm 0,5$ мм, по толщине $\pm 0,3$ мм. Погрешность измерений прибора $\pm 0,01$ мм.

Таким образом, было изготовлено 60 образцов (рис. 5) из эпоксидной смолы с нанодисперсными частицами диоксида кремния с различной массовой концентрацией: $C_{\text{нап}} = 0,3\%$; $0,6\%$; $0,9\%$; $1,2\%$; $1,5\%$; $1,8\%$. Удельная площадь поверхности частиц составляет $S = 53$ м²/г. Для выбора наиболее эффективного нанопорошка было изготовлено 30 образцов из эпоксидной смолы с нанодисперсными частицами с разной удельной площадью поверхности: $S = 76$; 96 ; 150 м²/г. Также было изготовлено 10 контрольных образцов из эпоксидной смолы без добавления нанодисперсных добавок [12, 13].

Экспериментальное исследование механических свойств материалов на основе эпоксидной смолы и наноразмерного порошка

Экспериментальные работы на прочность с образцами из наноматериалов (эпоксидная смола с нанодисперсными добавками) проводились в лаборатории «Теоретическая и прикладная механика» на базе ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск).

Для экспериментального изучения механических свойств материалов использовалась испытательная установка Zwick Roell Allround Z 005 (рис. 6). Машина состоит из жесткой рамы, тензодатчика, электродвигателя, двух жестких зажимов и компьютера для точной программной настройки нагружения.

Испытательная установка позволяет обрабатывать данные в режиме реального времени с частотой до 500 Гц. Контроль и управление ориентированы на определение события при испытании (например, смена скорости при достижении предела текучести или границы деформации), что позволяло определять модуль упругости во время испытания автоматически. Технические данные испытательной машины: номинальная сила $F_n = 5$ кН, максимальная сила 120% от F_n , предел сил 150% от F_n . Образец был установлен в зажимы, так чтобы лопатки образца полностью зажимались в захватах. Вертикальное отклонение оценивалось с помощью центральных засечек на зажимах.

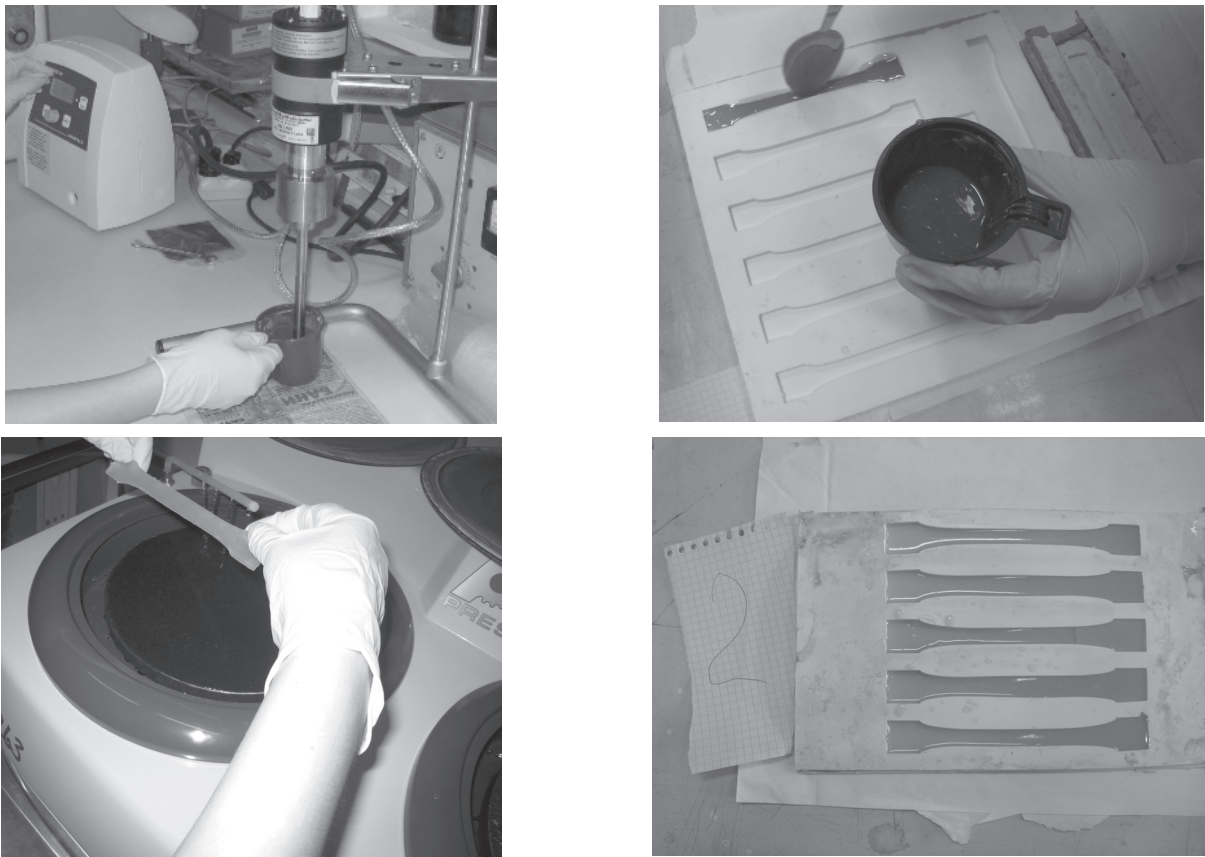
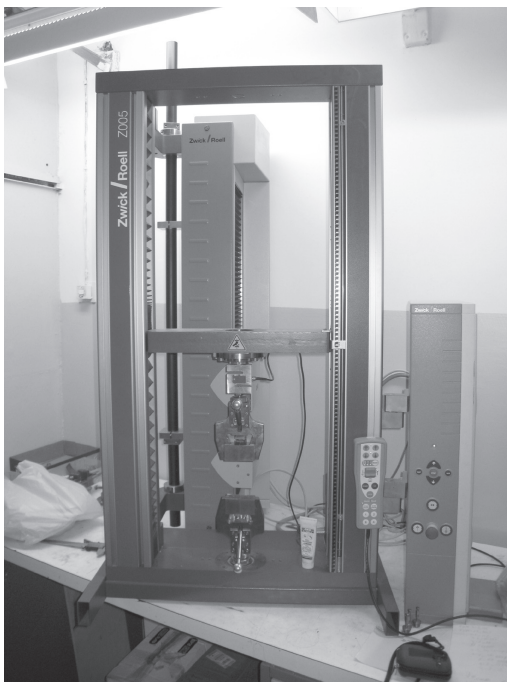


Рис. 5. Подготовка образцов

Рис. 6. Испытательная установка
Zwick Roell Allround Z 005

Оценка результатов испытаний образцов эпоксидной смолы с наночастицами

Учитывая экспериментальные исследования, можем отметить, что максимальная нагрузка образцов с модификацией нанодисперсных частиц боль-

ше критической нагрузки образцов без наночастиц. Эффективным является наполнитель с удельной площадью поверхности $S = 53 \text{ м}^2/\text{г}$ и массовой долей концентрации $C_{\text{нап}} = 0,3\%$, объясняется это тем, что при увеличении концентрации затрудняются равномерное распределение и диспергация частиц наполнителя, соответственно, происходит влияние на однородность материала. При переизбытке наночастиц в смоле уменьшается прочность за счет нарушения матрицы сшивающих связей. В этом отношении дисперсные наполнители негативно влияют на процесс за счет создания крупных локальных дефектов в виде границ раздела со средой. Можно отметить, что введенный отвердитель влияет на образование дополнительных химических связей. Модификация наночастиц молекулами отвердителя увеличивает химическую активность частиц в смоле [9]. Основные результаты испытаний образцов представлены на графиках (рис. 7, 8).

Проведение экспериментальных работ с образцами из КМ с внедренным нанопорошком в связующее

Для экспериментов были изготовлены образцы на основе стекловолкна сатинового плетения с эпоксидным связующим. В качестве наномодифицирующих добавок в ПКМ был выбран нанодисперсный порошок диоксида кремния «Таркосил»

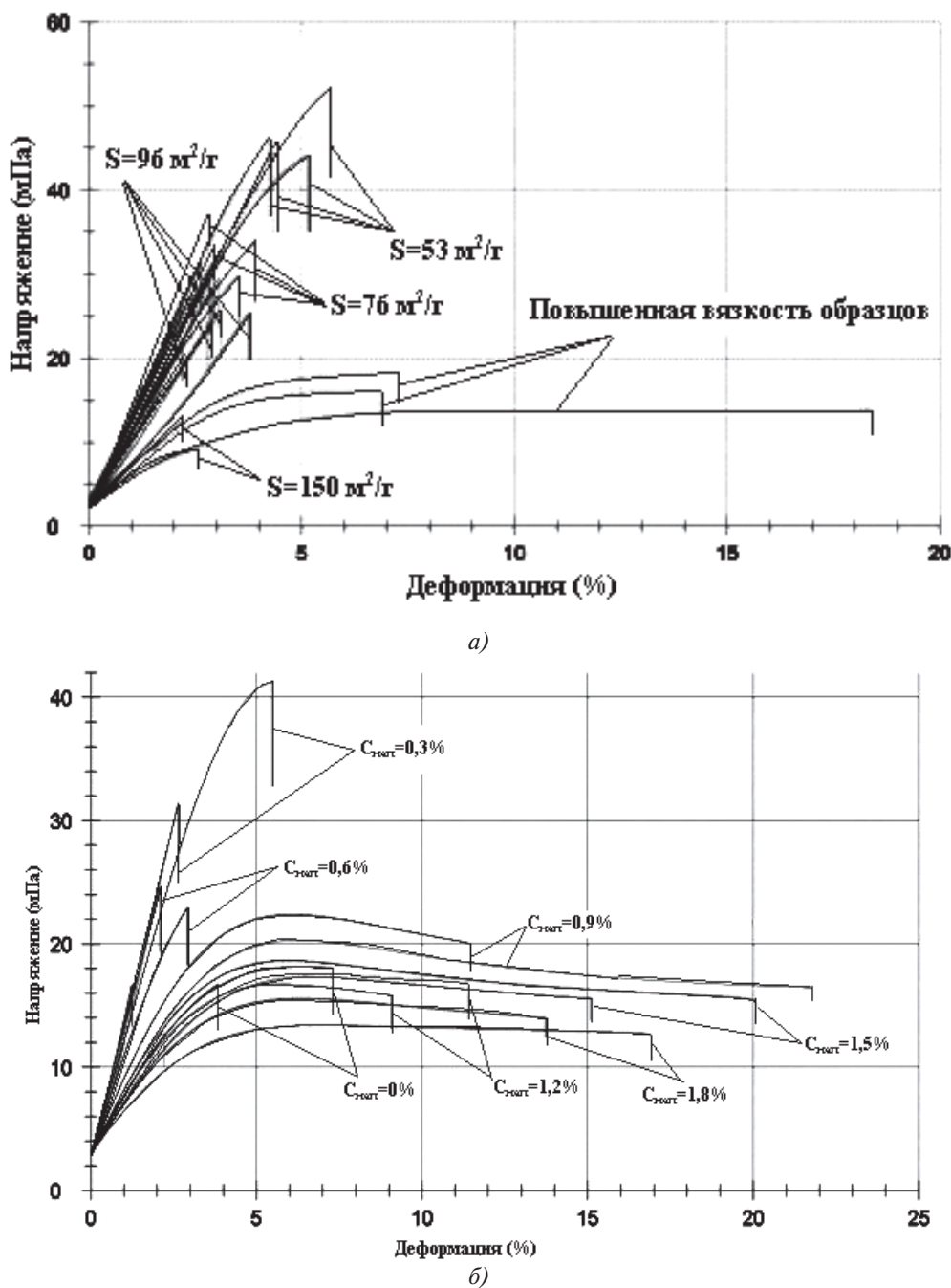


Рис. 7. Кривые растяжения образцов из эпоксидной смолы с нанодобавками: *a* – с разной удельной площадью поверхности ($C_{\text{нан}} = 0,3\%$); *б* – с различной массовой концентрацией (удельная площадь поверхности $S = 53\text{ м}^2/\text{г}$)

(Т-20). Модели дефектов, имитирующие отслоения, изготавливались в образцах путем закладки между слоями с выходом на кромку образца тонкой полоски из фторопластовой пленки толщиной 10–100 мкм, покрытой антиадгезионным слоем.

Для исследований было изготовлено по 10 образцов с различной массовой концентрацией: $C_{\text{нан}} = 0,1\%$; $0,3\%$; $0,5\%$ (всего 30 образцов). Для сравнительного анализа изготовлены контрольные образцы (КО) без нанодобавок с заложенным межслойным дефектом (10 образцов). Данные для образцов приведены в табл. 1.

Для проведения экспериментальных исследований было разработано и изготовлено 40 образцов с заложенными межслойными дефектами, с добавлением различной объемной концентрации от 0,1 до 0,5% нанодисперсных частиц в связующем, а также контрольные образцы с дефектами без добавления наночастиц (рис. 9, 10). Образцы были изготовлены из десятислойного препрега (стекловолокно), промышленная марка стеклоткани – Т-25 (ВМ) ТУ 6-11-380-76.

Однонаправленный материал имеет следующие характеристики: стеклопластик – $E_1 = 5,4 \cdot 10^4$ МПа,

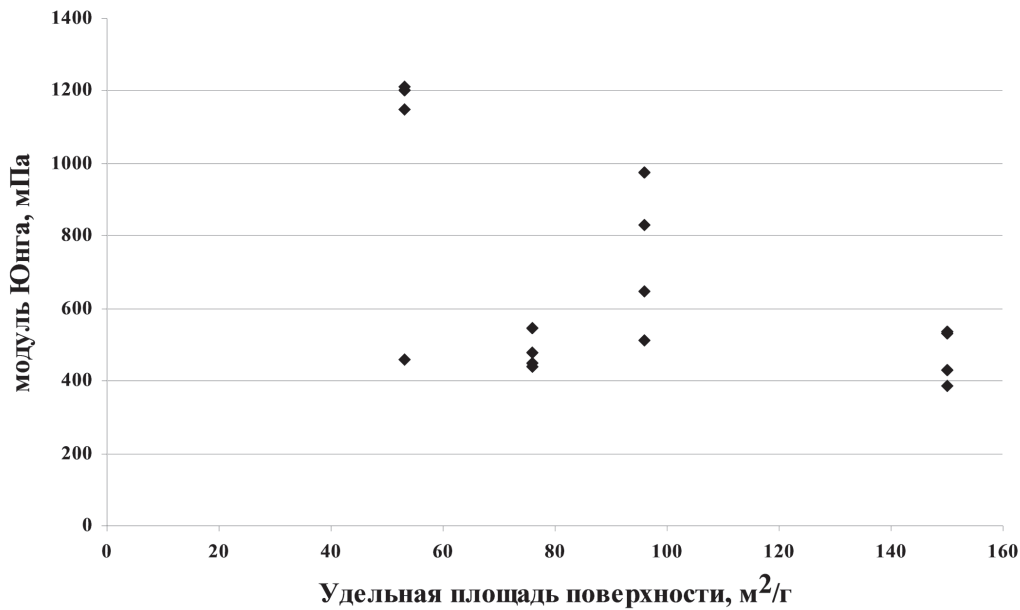


Рис. 8. Эффективный наполнитель с удельной площадью поверхности $S = 53 \text{ м}^2/\text{г}$

$E_2 = 1,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $G_{12} = 0,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $\mu = 0,28$. Образцы изготовлены на ЗАО «Улан-Удэнский лопастной завод».

Испытания проводились в лабораторных условиях на электромеханической испытательной машине Instron 5982 мощностью 100 кН (10 т).

Для испытания образцов на сжатие испытательная машина была модернизирована путем замены деталей захвата на спроектированные и изготовленные зажимы, показанные на рис. 11. Образец закреплялся в верхнем и нижнем зажимах [11].

Во время проведения эксперимента с образцами из КМ, после достижения критической нагрузки возможны три вида потери устойчивости элементов конструкций с межслойными дефектами. Первый вид — глобальное выпучивание всей пластины, т.е. потеря устойчивости композиционной пластины как единого целого, наблюдается при дефектах малой длины. Второй вид потери устойчивости — локальное выпучивание лишь отслоившейся

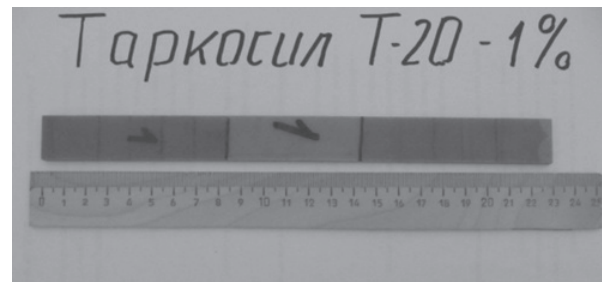


Рис. 9. Образец с концентрацией наночастиц 0,1%

верхней части, когда нижняя и основная части пластины остаются плоскими. Третий вид потери устойчивости называется «смешанным», при котором возможно одновременно локальное и глобальное выпучивание, когда изгибаются верхняя, нижняя и основная части пластины [14—16].

Непрерывное сжатие образца продолжалось до полного отслоения дефектного слоя от остальной части или полного разрушения образца (рис. 12).

Таблица 1

Данные для образцов — пластина со сквозным дефектом

№	Наименование наночастиц	Концентрация наночастиц в масс. %	Длина образца L , мм	Толщина образца H , мм	Длина дефекта L , мм	Толщина дефекта H , мм	Количество слоев образца	Количество слоев в дефектной части	Угол укладки волокон
1	Т-20	0,1	230	2	60	0,4	10	2	$(45, -45)_5$
2	Т-20	0,3	230	2	60	0,4	10	2	$(45, -45)_5$
3	Т-20	0,5	230	2	60	0,4	10	2	$(45, -45)_5$
4	КО	-	230	2	60	0,4	10	2	$(45, -45)_5$

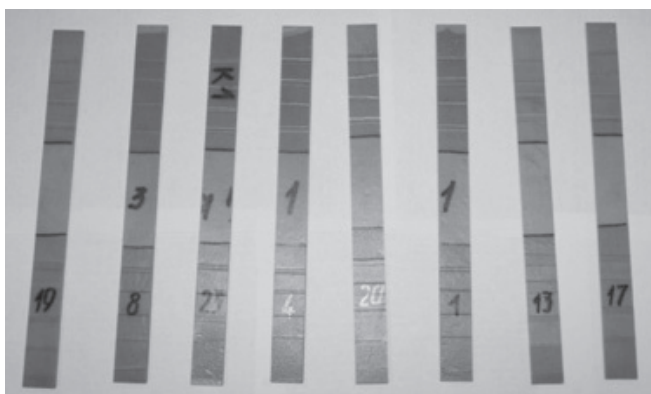


Рис. 10. Испытательные образцы

Оценка результатов испытаний с образцами из КМ с внедренным нанопорошком в связующее

Проведены испытания изготовленных образцов эпоксидной смолы с нанодисперсными добавками диоксида кремния, разработана методика проведения эксперимента. Эффективным является наполнитель с удельной площадью поверхности $S = 53 \text{ м}^2/\text{г}$ и массовой долей концентрации $C_{\text{нап}} = 0,3\%$. Результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными при испытании образцов из эпоксидной смолы с нанодисперсными добавками.

Выборочные результаты экспериментов представлены в табл. 2: критическая нагрузка дефект-

ного участка $P_{\text{кр. дефекта}}$, критическая нагрузка пластины с дефектом $P_{\text{кр. пластины}}$ и нагрузка при разрушении пластины $P_{\text{макс. разрушения}}$.

На рис. 13 получены графические зависимости нагружения от перемещений для образцов.

Выводы

Разработана методика проведения эксперимента, проведена серия испытаний. Результаты экспериментальных работ представлены в виде графиков и таблиц. Освоены современные технические установки для изготовления, испытания и изучения механических характеристик полимерных дисперсно-упрочненных материалов: ультразвуковой диспергатор УЗГ 13-0,1/22; испытательная установка Zwick Roell Allround Z005; электромеханическая испытательная машина Instron 5982.

Анализ полученных данных показал, что введение порошка «Таркосил» Т-20 в КМ с дефектами приводит к изменению прочности смеси на их основе. Наилучший результат критической нагрузки $P_{\text{кр}}$ пластины по сравнению с контрольными образцами был выявлен у образцов с наноматериалами «Таркосил» Т-20 при концентрации 0,3%. Образцы с добавлением в связующее нанодисперсных частиц концентрации 0,3% прочнее на 10–20% образцов

Таблица 2

Сравнительная таблица результатов эксперимента

Тип образца	$P_{\text{кр. пластины}}$, Н	$P_{\text{кр. дефекта}}$, Н	$P_{\text{макс. разрушения}}$, Н	$T_{\text{ср}}$, мин	$\Delta l_{\text{ср}}$, мм
КО	486,7	458,3	140	3:06	18,3
КМ с добавкой Т-20 в масс. % 0,3	601,7	535,25	268	3:18	14,8
КМ с добавкой Т-20 в масс. % 0,5	576,5	569,25	283,3	2:4	12,8
КМ с добавкой Т-20 в масс. % 0,1	486,9	391	240	t ср. (мин)	11,7

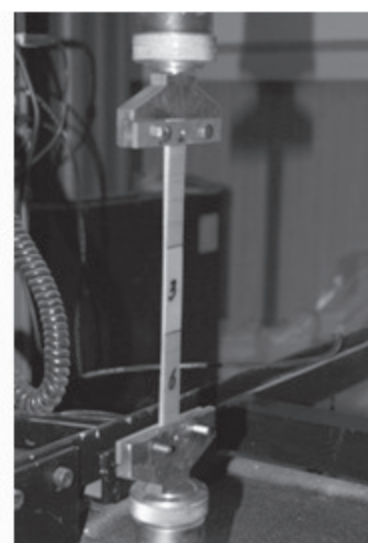
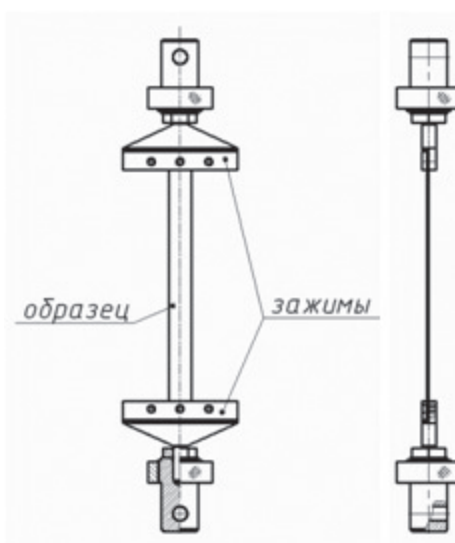


Рис. 11. Зажимы для образцов

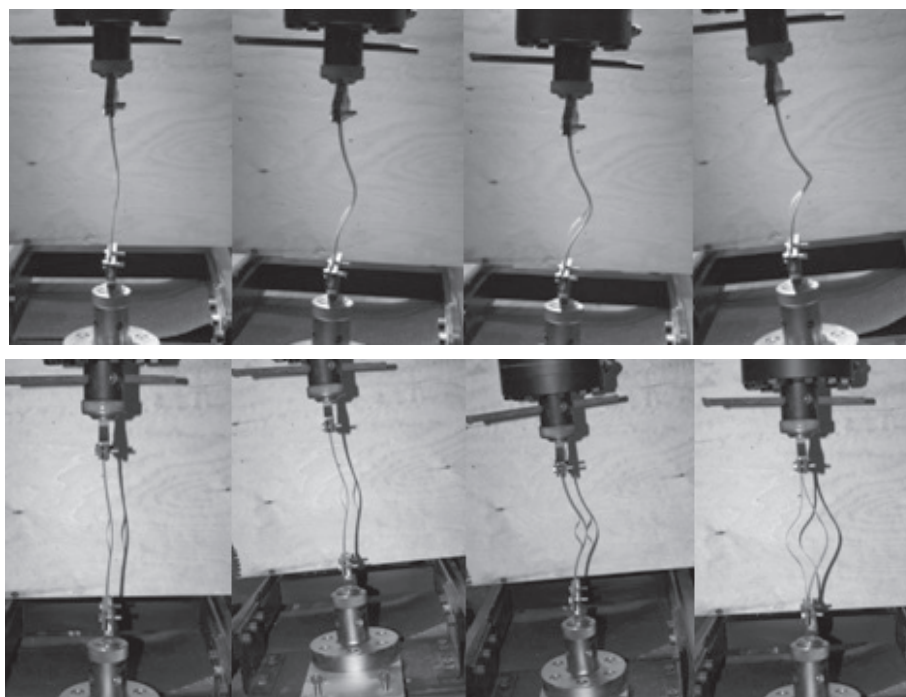


Рис. 12. Проведение эксперимента

Образцы с 1 по 4

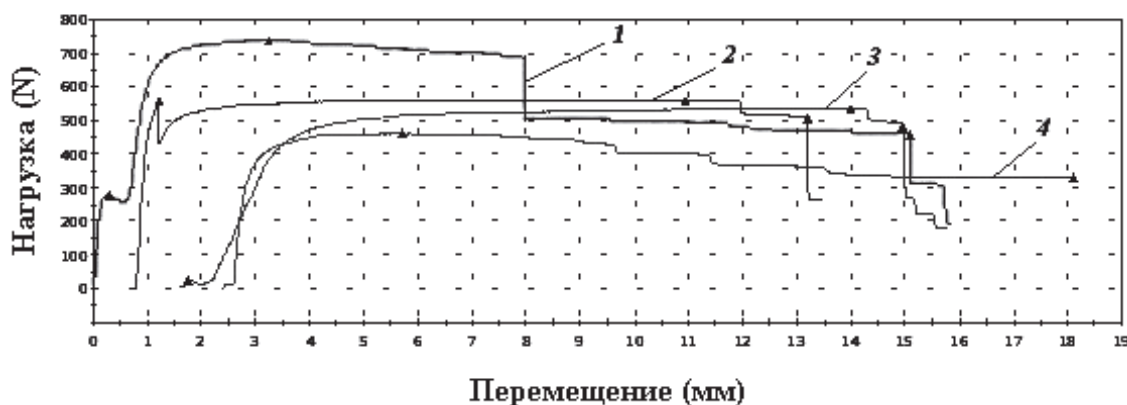


Рис. 13. Графические зависимости нагружения от перемещений при «смешанной» форме потери устойчивости: 1 — КМ с нанодобавкой в масс. % 0,3; 2 — КМ с нанодобавкой в масс. % 0,5; 3 — КМ с нанодобавкой в масс. % 0,1; 4 — контрольный образец без нанодобавок

с концентрацией 0,1% и 0,5% и контрольных образцов с межслойными дефектами без добавления нанодисперсных частиц в связующее. Данные результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными при испытании образцов из эпоксидной смолы с нанодисперсными добавками. При смешивании порошка с отвердителем получены результаты выше, чем при его смешивании со смолой или готовой смесью. Можно отметить, что введенный отвердитель влияет на образование дополнительных химических связей с наночастицами. Модификация наночастиц молекулами отвердителя увеличивает химическую активность частиц в смоле. При переизбытке наночастиц в смоле умень-

шается прочность за счет нарушения матрицы сшивающих связей. В этом отношении дисперсные наполнители наименее эффективны или даже негативно влияют на процесс за счет создания крупных локальных дефектов в виде границ раздела со средой [9].

Полученные результаты имеют большое значение для требований безопасности эксплуатации воздушных судов [17], поскольку делают возможным прогноз ресурса (срока безопасной эксплуатации), что позволяет предотвратить возникновение во время полетов аварийных ситуаций.

Библиографический список

1. *Образцов И.Ф.* Строительная механика летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1986. — 536 с.
2. *Бохоева Л.А.* Исследование устойчивости пластин с дефектами в нелинейной постановке // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2008. № 2. С. 22-28.
3. *Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Рогов В.Е.* Прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 87-92.
4. *Бохоева Л.А., Пнев А.Г., Чермошенцева А.С.* Испытание на прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами // Вестник Бурятского государственного университета. 2011. № 9. С. 230-236.
5. *Небелов Е.В., Потоцкий М.В., Родионов А.В., Горский А.Н.* Механизм развития повреждений лопастей воздушного винта из композиционных материалов при воздействии поражающих элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 26-31.
6. *Алфутов Н.А.* Основы расчета на устойчивость упругих систем. — М.: Машиностроение, 1991. — 311 с.
7. *Гузь А.Н., Гузь И.А.* К теории устойчивости слоистых композитов // Прикладная механика. 1999. Т. 35. № 4. С. 3-10.
8. *Парцевский В.В.* Об устойчивости расслоений в композитах // Механика композитных материалов. 1983. № 5. С. 794-798.
9. *Брусенцева Т., Зобов К., Филиппов А., Базарова Д., Лхасаранов С., Чермошенцева А., Сызранцев В.* Введение нанопорошков и механические свойства материалов на основе эпоксидных смол // Наноиндустрия. 2013. № 3(41). С. 24-31.
10. *Лысенко В., Бардаханов С.* Влияние наноразмерного диоксида кремния на прочность эпоксидных композитов // Наноиндустрия. 2013. № 2(40). С. 36-37.
11. *Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.В.* Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 320-323.
12. *Покровский А.М., Чермошенцева А.С.* Экспериментальное исследование механических свойств материалов на основе эпоксидных смол // VI Международная конференция «Проблемы механики современных машин» (29 июня — 4 июля): Сборник тезисов докладов. — Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2015. С. 311-315.
13. *Чермошенцева А.С., Покровский А.М.* Экспериментальное исследование механических свойств инновационных композиционных материалов, имеющих в составе нанопорошки // XXI Международная научная конференция «Современные техника и технологии» (5-9 октября): Сборник тезисов докладов. — Томск: НИ ТПУ, 2015. С. 455-457.
14. *Бохоева Л.А.* Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами. — Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2007. — 191 с.
15. *Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Чермошенцева А.С.* Определение критических нагрузок с помощью энергетического критерия устойчивости для локального круглого дефекта // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 32-37.
16. *Бохоева Л.А., Филиппова К.А., Рогов В.Е.* Экспериментальное исследование, численное моделирование элементов каркаса остекления фонаря кабины вертолета из композиционных материалов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9. № 4. С. 669-674.
17. *Бохоева Л.А., Курохтин В.Ю., Перевалов А.В., Рогов В.Е., Покровский А.М., Чермошенцева А.С.* Испытания элементов конструкций и узлов вертолета на усталостную прочность // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 7-16.

EXPERIMENTAL STUDY OF NANO-ADDITIVES EFFECT ON PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS WITH INTERLAYER DEFECTS

Pokrovskii A.M.* , Chermoshentseva A.S.**

*Bauman Moscow state technical university,
5/1, 2nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia*

* e-mail: ampokr@mail.ru

** e-mail: asch-13@ya.ru

Abstract

The subject of research in the presented paper are interlayer defects in composite materials (CM), prevention of the rate of their occurrence by strengthening the composites with nano-sized powder.

It contributes to safety increase while aircraft operation and allows prevent emergency situations during flights.

The goal of the studies consists in developing methods for manufacturing technology of samples made of epoxy resin and nano-dispersed powder,

reinforcement of laminated CMs with interlayer defects by adding nano-particles to the binder, and obtain maximum degrees of CM filling with nano-sized powder.

In the process of performing this work the experimental samples were produced, and the series of tests were conducted. It is noted that occurrence of interlayer defects contributes to lifespan reduction of a product made of composite materials. The analysis was performed, thereby, on determining the character of a delamination type defects growth.

The properties such as mechanical characteristics anisotropy and the possibility of hidden defects presence in the form of material discontinuity over the separation surface are intrinsic specific properties of composite materials. The paper presents the experimental results of the study how degree of filling of the ED-22 resin by nano-sized silicon dioxide powder ("Taroksil" T-20) of various concentration affects the mechanical properties of a heterogeneous material. A brief description of production process technology of samples, made of epoxy resin and nano-dispersed powder, is presented. The above said studies are used for solving the problem of interlayer defects hardening in laminated composite materials, which occurrence is a consequence of the aircraft parts production technology imperfection and effect of operational loads of aircraft, by adding the nanoparticles to the binder. The optimal degrees of CMs' filling by nano-sized dioxide silicon powder in dependence of mass concentration were found. The testing results of the samples made of CM with embedded interlayer defects with adding nano-dispersed additives with various volume concentration from 0.1% to 0.5% to the binder are presented.

These tests results' data would be offered for implementation by the enterprises of Holding JSC "Helicopters of Russia". The work is prospective for further consideration and implementation in the future research activities.

Keywords: composite material, nano-size powder, defect, experiment, strength.

References

1. Obratsov I.F. *Stroitel'naya mekhanika letatel'nykh apparatov* (Structural mechanics of aircrafts), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 536 p.
2. Bokhoeva L.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2008, no. 2, pp. 22-28.
3. Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Rogov V.E. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 87-92.
4. Bokhoeva L.A., Pnev A.G., Chermoshentseva A.S. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 9, pp. 230-236.
5. Nebelov E.V., Pototskii M.V., Rodionov A.V., Gorskii A.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 26-31.
6. Alfutov N.A. *Osnovy rascheta na ustoichivost' uprugikh sistem* (Bases of calculation on stability of elastic systems), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 311 p.
7. Guz' A.N., Guz' I.A. *Prikladnaya mekhanika*, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 3-10.
8. Partsevskii V.V. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1983, no. 5, pp. 794-798.
9. Brusentseva T., Zobov K., Filipov A., Bazarova D., Lkhasaranov S., Chermoshentseva A., Syzrantsev V. *Nanoindustry*, 2013, no. 3(41), pp. 24-26.
10. Lysenko V., Bardakhanov S. *Nanoindustry*, 2013, no. 2(40), pp. 36-37.
11. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavrukhin A.V., Salimov R.A., Fadeev S.N., Sherepkov V.V. *Doklady Akademii Nauk*, 2006, vol. 409, no. 3, pp. 320-323.
12. Pokrovskii A.M., Chermoshentseva A.S. *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy mekhaniki sovremennykh mashin"*, Ulan-Ude, 2015, pp. 311-315.
13. Chermoshentseva A.S., Pokrovskii A.M. *Materialy XXI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Sovremennye tekhnika i tekhnologii"*, Tomsk, 2015, pp. 455-457.
14. Bokhoeva L.A. *Osobennosti rascheta na prochnost' elementov konstruktsii iz izotropnykh i kompozitsionnykh materialov s dopustimymi defektami* (Features based on the strength of the structural elements of isotropic and composite materials with acceptable defect), Ulan-Ude, VSGTU, 2007, 191 p.
15. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 4(24), pp. 32-37.
16. Bokhoeva L.A., Filippova K.A., Rogov V.E. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya*, 2012, vol. 9, no. 4, pp. 669-674.
17. Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Perevalov A.V., Rogov V.E., Pokrovskii A.M., Chermoshentseva A.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 7-16.