



**АСТАХОВ**

**Михаил Владимирович**  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой



**СОРОКИНА**

**Ирина Игоревна**  
старший преподаватель  
кафедры  
«Теоретическая механика»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
Калужский филиал)

## Исследование влияния наночастиц оксидов алюминия на механические свойства полимерных композиционных материалов

**М.В. Астахов, И.И. Сорокина**

*Исследовано влияние наполнителя на механические свойства полимерных композиционных материалов, даны рекомендации по применению полученных материалов.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, механические свойства, обработка результатов испытаний.

*The influence of a filler on mechanical properties of polymeric composite materials (PCM) has been investigated, the recommendations regarding application of the obtained materials have been made.*

**Keywords:** polymeric composite materials, mechanical properties, analysis of experiment results.

За последние годы достигнуты большие успехи в применении полимерных композиционных материалов (ПКМ) для силовых конструкций, в первую очередь, в высокотехнологичных производствах наукоемких отраслей, таких как аэрокосмическая техника, оборонная промышленность и судостроение. Однако, для сельскохозяйственного машиностроения, легкой и пищевой промышленности, даже автомобилестроения, использование ПКМ для изготовления силовых элементов тормозится из-за некоторого недоверия инженеров-проектировщиков к новым материалам. Именно поэтому исследование механических характеристик образцов из ПКМ с различными наполнителями и добавками представляет актуальную задачу.

В случае применения деталей из ПКМ в качестве силовых тонкостенных элементов, испытывающих воздействие не только внешних нагрузок, но и абразивных сред, как один из вариантов, можно рассмотреть введение в матрицу составов, повышающих поверхностную твердость, в частности порошков, состоящих из наночастиц  $Al(OH)_3$  и  $Al_2O_3$ . Выбор добавок основан на результатах экспериментальной оценки применения нанокристаллических оксидов и гидроксидов алюминия, а также на анализе изготовления высококачественного ламината. В самых качественных марках ламината для повышения износостойкости в смолу добавляют частицы корунда.

Для изучения влияния указанных нанопорошков на механические свойства ПКМ проведены испытания образцов на растяжение, трехточечный изгиб, износостойкость и микротвердость, а также статистическая обработка полученных результатов.

Для испытаний на растяжение были изготовлены «мокрым» способом образцы на основе стеклоткани ЭЗ-200-Р(100) ТУ 5952-003-42294599—2004 и эпоксидной смолы ЭД-20 по ГОСТ 10587—84, которые отличались друг от друга нанодобавками в виде наполнителя из ультрадисперсных порошков бемита  $Al(OOH)$  и корунда  $Al_2O_3$ , количеством слоев, пропитанных с добавлением этих порошков, и взаимной ориентацией волокон слоев композита.

В связи со сказанным выше, в обозначения образцов каждой партии кроме группы введена подгруппа:

1/1 — образцы 1-й группы (без добавок), расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ$ ;

1/2 — образцы 1-й группы, расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 45^\circ \times 0^\circ \times -45^\circ \times 0^\circ$ .

Поскольку в образцах групп 2 и 3 учитывались не только расположение слоев стеклоткани, но и степень присутствия нанодобавки в образце, то и подгрупп введено 4:

2/1 — образцы 2-й группы (с добавлением в смолу бемита), расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ$ , все слои пропитываются смолой с добавлением бемита;

2/2 — образцы 2-й группы, расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ$ , с добавлением бемита выполняется только покрытие образца;

2/3 — образцы 2-й группы, расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 45^\circ \times 0^\circ \times -45^\circ \times 0^\circ$ , все слои пропитываются смолой с добавлением бемита;

2/4 — образцы 2-й группы, расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 45^\circ \times 0^\circ \times -45^\circ \times 0^\circ$ , с добавлением бемита выполняется только покрытие образца;

3/1 — образцы 3-й группы (с добавлением в смолу корунда), расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ$ , все слои пропитываются смолой с добавлением корунда;

3/2 — образцы 3-й группы, расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ \times 0^\circ$ , с добавлением корунда выполняется только покрытие образца;

3/3 — образцы 3-й группы, расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 45^\circ \times 0^\circ \times -45^\circ \times 0^\circ$ , все

слои пропитываются смолой с добавлением корунда;

3/4 — образцы 3-й группы, расположение слоев стеклоткани  $0^\circ \times 45^\circ \times 0^\circ \times -45^\circ \times 0^\circ$ , с добавлением корунда выполняется только покрытие образца.

В целях повышения идентичности изготовления и улучшения контроля факторов, влияющих на результаты испытания (форма, абсолютные размеры, наличие концентраторов напряжений и состояние поверхности), образцам придавалась прямоугольная форма (длина —  $l$ , ширина —  $b$ , толщина —  $h$ ). Для исключения подреза волокон стеклоткани, согласно ГОСТ 25.601—80, выбраны плоские образцы без головок:  $h \geq 1$  мм,  $b \geq (20 \pm 1)$  мм,  $l = 200$  мм (рис. 1, а). При их изготовлении для придания текучести смеси использовался растворитель — ацетон ГОСТ 2768—84, который при взаимодействии со смолой начинал действовать как ускоритель. В смоле происходил процесс быстрой полимеризации, поэтому толщина образцов с добавлением порошков несколько увеличена по сравнению с обычными образцами. Испытания проводились на базе ОАО «Калужский турбинный завод» РФ. Для проведения испытаний была использована электромеханическая испытательная машина серии LFM 20...100 кН — LFM-100.

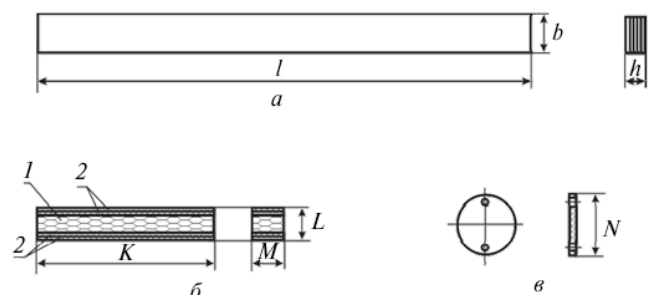


Рис. 1. Образцы для испытаний

Испытания на растяжение проводились при фиксированной скорости перемещения захватов испытательной машины 5 мм/мин (согласно ГОСТ 25.601—80) с регистрацией разрушающей нагрузки и построением диаграммы деформирования. Выборочные результаты испытаний приведены в табл. 1. На основании полученных экспериментальных данных определялась деформация разрушения и, с учетом

Результаты испытаний на растяжение

Партия	Номер образца	$V$ , мм/мин	$t$ , с	$b$ , мм	$h$ , мм	$A$ , мм <sup>2</sup>	$F_{max}$ , Н	$\sigma_B$ , МПа
1/1	2	5	37	22,20	1,25	27,750	1998	72
	8	5	37	21,3	1,30	27,690	1774	64
1/2	3	5	37	21,10	1,20	25,320	1671	66
	6	5	37	21,30	1,20	25,560	2019	79
2/1	1	5	35	20,30	2,00	40,600	1665	41
	6	5	35	20,40	2,00	40,800	1477	36
2/2	1	5	35	19,30	2,25	43,425	2215	51
	5	5	35	19,30	2,20	42,460	2083	49
2/3	3	5	35	19,50	1,30	25,350	1141	45
	5	5	35	19,50	1,40	27,300	1246	46
2/4	6	5	35	19,70	1,30	25,610	1184	46
	8	5	35	19,20	1,65	31,680	1489	47
3/1	1	5	35	19,20	1,50	28,800	1267	44
	5	5	35	19,40	1,53	29,682	1427	48
3/2	1	5	35	19,70	1,55	30,535	1435	47
	6	5	35	19,60	1,40	27,440	1327	48
3/3	2	5	35	19,50	1,30	25,350	1141	45
	5	5	35	19,70	1,30	25,610	1184	46
3/4	5	5	35	19,80	1,37	27,126	1843	68
	6	5	35	19,70	1,28	25,216	1597	63

заданной скорости перемещения захватов, вычислялось время до разрушения. Определенные в процессе испытаний величины пределов прочности исследуемых ПКМ проверялись и статистически обрабатывались в программе MiniTab.

Для исключения промахов на основании полученных экспериментальных данных записывался вариационный ряд; производилась предварительная проверка выборки по критериям Груббса и Романовского; при удовлетворительных результатах выполнялась дополнительная проверка доверительным интервалом. Результаты представлялись в виде вариационного ряда. Проводилась проверка наиболее часто используемых моделей закона распределения параметра: нормальной, Вейбулла, экспоненциальной и Гамма-распределения. Наилучшие показатели для всех подгрупп образцов были получены для нормального распределения и распределения Вейбулла. Основываясь на практическом опыте, для дальнейшего анализа

принята модель Вейбулла. Результаты обработки полученных экспериментальных данных приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты статистической обработки экспериментальных данных

Партия	Математическое ожидание $m[\tilde{\sigma}_e]$ , МПа	Выборочное среднее $\sigma_B$ , МПа	Погрешность $\delta$ , %
1/1	69,56	69,40	0,233
1/2	70,72	70,83	0,158
2/1	40,69	40,27	1,032
2/2	49,78	49,78	0,001
2/3	46,12	46,12	0,003
2/4	62,79	62,65	0,229
3/1	45,44	45,44	0,003
3/2	47,04	47,05	0,011
3/3	50,52	50,75	0,454
3/4	63,95	64,10	0,226

Таблица 3

Результаты испытаний на изгиб

Номер образца	Толщина $L$ , мм	Ширина $M$ , мм	Предельная нагрузка $F$ , Н	Сдвиговые напряжения $T$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b$
1	6,2	6,2	225	4,4	104
12	6,6	6,2	338	6,2	135
27	6,3	6,2	503	9,7	221

Кроме того, проведена серия полных факторных экспериментов типа  $2^n$ , где  $n = 4$  — количество изучаемых факторов (ориентация слоев стеклоткани; наличие в связующей матрице нанодобавок в виде ультрадисперсных порошков; вид нанодобавки; степень присутствия нанодобавки в композите), на основании которой получена модель в виде уравнения регрессионного анализа. Расчеты выполнялись по стандартной методике [1]. Для более объективной оценки влияния факторов и их взаимодействия на отклик, регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента был дополнен дисперсионным анализом, который более чувствителен к влиянию того или иного фактора и позволяет определить вклад факторов и их взаимодействия в дисперсию отклика. Обработка результатов эксперимента показала, что наиболее ощутимое влияние на предел прочности оказывает наличие в связующей матрице нанодобавок в виде ультрадисперсных порошков, причем влияние этого фактора в 14 раз сильнее влияния ориентации слоев стеклоткани в композите. Однако, при наличии нанодобавок, ориентация слоев стеклоткани и степень присутствия нанодобавки в ПКМ (наличие покрытия) оказывают значительное влияние на предел прочности.

Образцы для испытания на трехточечный изгиб изготавливались с использованием войлочного наполнителя (рис. 1, б). В этом случае на цулагу сначала укладывались два слоя стеклоткани, затем — два слоя войлока технического из химических волокон СВМ ТУ 8161-001-11521794-96 и сверху еще два слоя стеклоткани. Из полученной заготовки были вырезаны 30 образцов длиной 45 мм. При этом получалась так называемая трехслойная пластина — сэндвич, где внутренний слой войлока СВМ служил для увеличения момента инерции поперечного сечения образца. Следует отметить, что длина образцов выбрана в направлении несущих слоев. Эксперимент проводился на испытательной машине «2255 Р-5», которая имитировала изгиб балки, опертой на двух опорах и нагруженной поперечной силой [2, 3]. Выборочные результаты испытаний приведены в табл. 3.

Микротвердость составляющих покрытие фаз оценивалась на приборе ПМТ-3. При проведении лабораторного тестирования записы-

вались диагонали отпечатка по трем точкам, и в соответствии с таблицей находилось значение микротвердости данного образца. Измерения выполнялись выборочно для четырех образцов из каждой группы. В условиях проводимого тестирования не имеет значение степень пропитки образца эпоксидной смолой (ЭС) с наполнителем, важно только есть он или нет, кроме того, никакого влияния на взаимное расположение слоев стеклоткани не оказывает.

Тестирование проводилось при нагрузке — 200 гс. Индентор — четырехгранная алмазная пирамида, основание — квадрат. Результаты эксперимента сведены в табл. 4. В партии 3/1 и 3/3 из-за белого цвета образцов с корундом отпечаток был не виден. Измерения провести не удалось.

Таблица 4

Микротвердость образцов

Партия	Номер образца	$H_{200}$			
		1	2	3	среднее
1/1	3	19,20	17,60	16,70	17,83
«	7	17,40	21,00	20,10	19,50
1/2	4	30,10	30,10	35,70	31,97
«	6	19,80	19,50	18,90	19,40
2/1	2	19,50	42,00	21,30	27,60
2/2	2	22,30	24,50	23,40	23,40
2/3	3	25,80	18,90	25,30	23,33
2/4	2	19,80	21,30	18,90	20,00
3/1	—	—	—	—	—
3/2	1	18,90	17,60	16,70	17,73
3/3	—	—	—	—	—
3/4	3	29,00	31,20	29,60	29,93

В результате измерений микротвердости представленных образцов были получены вы-

борки из  $n = 12$  повторных измерений, обработка которых проводилась в программе MiniTab, по критерию согласия Андерсона—Дарлингга. Для всех трех подгрупп образцов из 15 проведенных законов распределения подходил двухпараметрический экспоненциальный закон (частный случай закона Вейбулла — Гнеденко). Результаты обработки полученных экспериментальных данных сведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты обработки экспериментальных данных по определению микротвердости образцов

Партия	Математическое ожидание $m [H_{200}]$	Среднее выборочное $H_{200}$	Погрешность $\delta, \%$
1	22,17497	22,1750	0,00014
2	23,58332	23,5833	0,00008
3	23,83330	23,8333	0,00000

Кроме того на специальном стенде были проведены сравнительные испытания дисков (рис. 1, в), выполненных из одного листа стеклоткани, пропитанного ЭС в двух вариантах: 1) без покрытия гелькоутом с  $Al_2O_3$  и 2) с односторонним покрытием гелькоутом с включением ультрадисперсного порошка корунда. Диски поочередно устанавливались в металлический стакан на специальные штыри, вставляемые в отверстия, и подвергались воздействию стального шарика, который, вращаясь в специальной оправке, перемещался по поверхности диска с усилием  $F$ . При механическом воздействии шарика гелькоут деформировался, и частицы корунда выдавливались из матрицы. В случае удаления корунда воздушной струей или потоком жидкости износостойкость образца, покрытого гелькоутом с корундом, была выше, чем у образцов без покрытия. В противном случае износостойкость покрытого образца резко уменьшалась по сравнению с износостойкостью образца без покрытия, что объяснялось абразивным воздействием выдавленных частиц  $Al_2O_3$  [3].

## Выводы

1. При изготовлении ПКМ на основе ЭС с нанодобавками в виде ультрадисперсных порошков бемита  $Al(OOH)$  и корунда  $Al_2O_3$  пре-

дел прочности падает. Однако, если ультрадисперсные порошки добавлять только в покрытие ПКМ и изготавливать ПКМ с ориентацией слоев стеклоткани минимум в трех направлениях, то снижение предела прочности не столь значительно, примерно на 10...11%. Полученные данные можно объяснить следующим образом: частицы наполнителя являются концентраторами напряжений, кроме того, при их введении уменьшается доля поперечного сечения матрицы, испытывающей нагрузку [4]. Вероятно, именно эти факторы объясняют уменьшение прочности для композитов, наполненных порошками.

2. При добавлении в покрытие ПКМ ультрадисперсных порошков бемита  $Al(OOH)$  и корунда  $Al_2O_3$  микротвердость повышается на 5...7%.

3. Вид добавляемого порошка не оказывает значительного влияния, как на предел прочности, так и на микротвердость, в связи с чем можно сделать вывод об экономически более выгодном использовании порошка бемита, так как по сравнению с порошком корунда его себестоимость примерно на 14% ниже (по данным изготовителя).

4. С использованием специальной технологии еще большего измельчения зерен оксидов следует ожидать значительного увеличения прочности и твердости ПКМ.

Можно рекомендовать использовать покрытия с добавлением ультрадисперсного порошка бемита или корунда только в тех тонкостенных конструкциях, и только тех их частей, которые подвергаются действию подвижных абразивных сред, а снижение предела прочности учитывать увеличением коэффициента запаса при проектировочных расчетах.

## Литература

1. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях / Отв. ред. А.Г. Гавриш. Киев: Наукова думка, 1990. 184 с.
2. Астахов М.В., Таганцев Т.В. Композиционные материалы в сельхозмашиностроении // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 9. С. 42—44.
3. Астахов М.В., Мазалов Ю.А., Таганцев Т.В. Исследование некоторых механических характеристик композиционных материалов // Труды МГТУ «Математическое моделирование сложных технических систем». № 588. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. С. 34—40.
4. Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Сулов М.А. Влияние формы частиц наполнителя на прочность полимерного композита // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 6. С. 135—138.

Статья поступила в редакцию 13.10.2011 г.