

---

**УДК 541.678.686.01**

*П.А. Билым, канд. хим. наук, доцент кафедры, УГЗУ,  
А.П. Михайлюк, канд. хим. наук, доц., профессор кафедры УГЗУ,  
К.А. Афанасенко, адъюнкт УГЗУ*

## **ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ НАГРЕВЕ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ СТАНДАРТНОГО ПОЖАРА**

(представлено д-ром физ.-мат. наук Созником А.П.)

По данным огневых испытаний установлено, что стеклопластики сохраняют определенный запас работоспособности на протяжении начальной стадии развития пожара и могут использоваться в качестве конструкционных материалов с допустимым уровнем прогресса при экстремальных условиях. Более высоким пределом огнестойкости по признаку сохранения несущей способности обладает композит на основе эпоксидированного динатфтола, а его разрушение характеризуется сильно развитым прогибом.

**Ключевые слова:** стеклопластик, испытания, изгиб, деформирование.

**Постановка проблемы.** Изучение поведения полимерных композиционных материалов в различных условиях нагрева представляет большой практический интерес. Этому способствует расширение областей применения композитов в современных машинах, аппаратах, а также конструкциях специального назначения, отдельные элементы которых подвергаются интенсивному тепловому воздействию. В особенности это касается тех случаев, когда конструкция, находящаяся под механической нагрузкой, нагревается до температуры, выше нормальной (эксплуатационной), а ее прочность снижается и может наступить разрушение. Такого рода экстремальные ситуации чаще всего возникают на пожаре, и конструкции, если она выполнена из полимерного композита, свойственно перед актом разрушения пройти стадию упруго-пластической деформации. Поэтому для решения проблемы повышения несущей способности полимерных композиционных материалов необходимо располагать сведениями как о характере их деформирования, включая достигаемые значения деформаций, так и о величинах текущей прочности материала на пожаре.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Сведения о комплексном исследовании показателей прочности и деформирования в периодической литературе представлены в ряде публикаций и касаются изучения традиционных строительных материалов

– металлов, цементного камня, а также древесины [1-3]. Что касается полимерных композитов (стеклопластиков), то в основном они представлены в виде результатов испытаний при одностороннем нагреве материала и затрагивают вопросы, в большей степени, относящиеся к аблирующим системам [4,5]. По результатам исследований авторы делают выводы о том, что стеклотекстолиты в условиях нестационарного теплового воздействия, при повышении интенсивности нагрева характеризуются прогрессирующим нарастанием деформации, приводящим к разрушению образца, а при температурах нагреваемой поверхности близких к  $1000^{\circ}\text{C}$ , несмотря на возгорание, сохраняют определенный запас работоспособности и могут использоваться в качестве конструкционного материала в условиях одностороннего нагрева.

**Постановка задачи и ее решение.** В данной работе приводятся результаты исследования процесса разрушения и разупрочнения стеклоармированных композиционных материалов при нарастании температуры по стандартному режиму развития пожара. Испытывались стеклопластики с применением стеклоткани марки Т-10 и двух видов полимерных связующих эпоксифенольного типа: на основе смесевой системы олигомеров, содержащей бромированный компонент и связующего на основе эпоксидированного ди-нафтола. Применение последнего позволяет получать стеклопластик с повышенной теплостойкостью и термостабильностью прочностных характеристик [6].

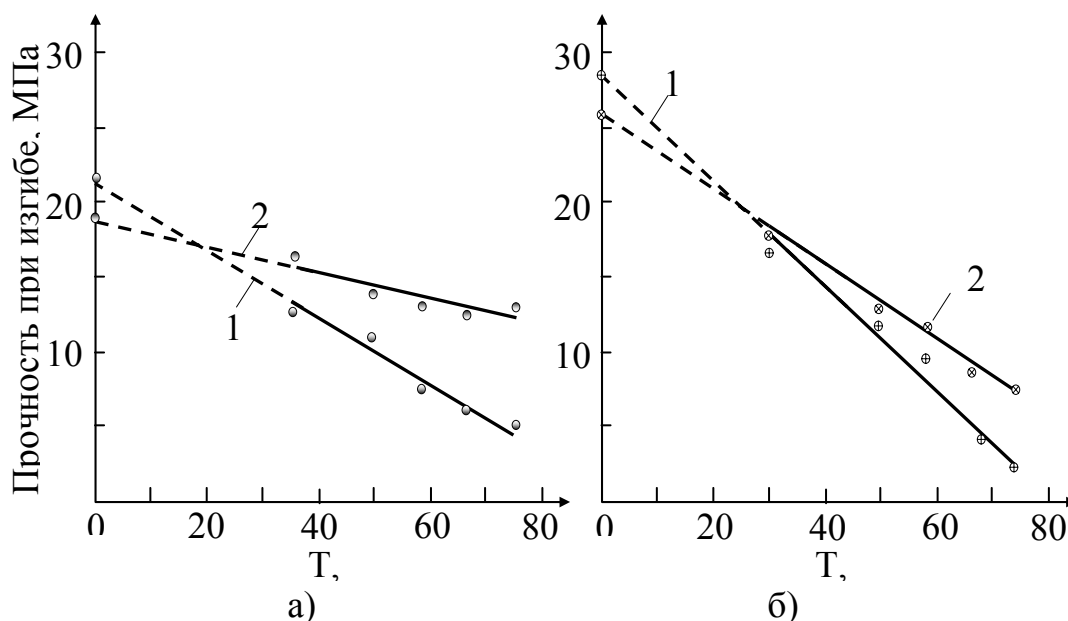
Тепловое воздействие на стержневой образец проводили в испытательной печи по методике, описанной в [7]. Образцы стеклопластиков подвергались изгибу под действием постоянной начальной нагрузки за 30 секунд до начала нагрева. Исходная нагрузка при  $20^{\circ}\text{C}$ , действующая на рабочую часть образца, соответствовала расчетному значению – 0,85 от предела кратковременной прочности при контрольных статических испытаниях.

На рис.1 представлена зависимость долговечности образцов стеклопластика (стеклотекстолита) толщиной 5 и 10 мм от начального постоянного напряжения при изгибе в условиях нарастания температуры в режиме стандартного пожара.

При сравнении зависимостей а и б (рис.1) видно, что при испытании на изгиб в условиях нарастания температуры при стандартном пожаре увеличение толщины образца вызывает некоторое снижение их долговечности. Такого рода зависимости определяются повышением доли микродефектов в композите с увеличением его толщины [8].

Известно, что при испытаниях полимерных и металлических материалов на длительную прочность при растяжении и изгибе в

стационарных тепловых условиях наблюдалась линейная зависимость между начальным напряжением и логарифмом долговечности образцов [9]. При этом на каждом уровне напряжения распределение логарифма долговечности следовало нормальному закону.



**Рис. 1 – Зависимость длительной прочности стеклопластиков от начального напряжения при изгибе в условиях нарастания температуры в режиме стандартного пожара. Толщина образца: а – 5 мм; б – 10 мм. Образец на основе связующего: 1, 1' – бромсодержащего; 2, 2' – нафталенсодержащего**

Для поведения образцов в наших опытах характерна линейная зависимость между начальным напряжением и долговечностью в простых координатах.

Статистическая обработка данных по корреляционной методике для малого числа испытаний образцов [10] в пределах 1,5-15 мин. (350-750°C) позволила определить вид корреляционных уравнений зависимости длительной прочности образцов от начального изгибающего напряжения. Результаты обработки сведены в таблицу 1, из которой видно, что все корреляционные уравнения имеют вид прямой  $\tau = A - B\sigma_n$ . Абсолютное значение отношения постоянных коэффициентов  $A/B$  примерно равно значению предела прочности  $\sigma_n$  образцов в условиях статического изгиба при 293 К.

Одним из возможных объяснений полученной линейной зависимости является то, что нагрузка по вышеуказанной схеме воспринимается в основном слоями стеклотканного наполнителя, одинаково работающем на растяжение и сжатие. Роль связующего при этом сводится к подкрепляющему действию. Сдвиговые усилия в объеме неравномерно прогретого композита усредняются, что и не позволяет в условиях эксперимента найти характерные области (перегибы) структурных изменений матричного связующего.

**Таблица 1** Статистическая обработка данных испытаний стеклопластиков при испытаниях на изгиб

№	Функция прямой
$\sigma_1$	$\sigma_1 = -0,22 \cdot T + 209,1$
$\sigma_2$	$\sigma_2 = -0,096 \cdot T + 191,47$
$\sigma'_1$	$\sigma'_1 = -0,3530 \cdot T + 292,09$
$\sigma'_2$	$\sigma'_2 = -0,2723 \cdot T + 264,75$

Более показательными для данного вида испытаний являются полученные значения деформации слоистых пластиков. Результаты испытаний, сведенные в таблицу 2, свидетельствуют о некоторых закономерностях.

**Таблица 2 – Показатели деформации образцов стеклопластика при нарастании температуры в режиме развития стандартного пожара**

Продолжительность нагрева, мин.	Температура на поверхности образца, °С	Значение прогиба стеклопластика на основе связующего, мм:			
		бромсодержащего		эпоксинафталинового	
		b (толщина), мм		b (толщина), мм	
		5	10	5	10
исходный	20	1,17	0,16	1,02	0,09
1	340-360	4,8	2,1	3,7	1,4
3	490-510	7,7	3,9	4,8	2,1
5	560-580	9,2	6,8	7,1	5,2
10	660-680	образец разрушился	---	---	---
15	730-750	образец разрушился	образец разрушился	---	---
Предельный прогиб (ДСТУ Б.В.1.1-4-98)		5	2,5	5	2,5

Примечание. Измерения проводились при действии изгибающего момента на образец  $M=1,23 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Для всех испытуемых образцов с уменьшением толщины при повышении температуры прогрессирующе усиливается ползучесть. Причем, максимальные значения ползучести были зафиксированы на первой минуте огневых испытаний, после чего значения деформации монотонно убывали до некоторого постоянного значения. Следовательно, начальный этап, при котором температура в образце при нагреве имеет наиболее нестационарное распределение по сечению, ха-

рактируется повышенной скоростью деформирования. После того, как по сечению образца устанавливается постоянный температурный перепад, скорость деформации стабилизируется.

Важнейшими факторами, влияющими на характер разрушения образцов при изгибе, являются толщина и степень прогрева материала, а также соотношения между текущими значениями прочности слоев композита от направления действия нагрузки – зоны сжатия и растяжения. В зависимости от соотношения сопротивления деформации сжатых слоев к прочности растянутых слоев, разрушение образца может либо сопровождаться хрупким разрывом, либо ограничиваться сильно развитыми сдвигами со стороны сжатого слоя. В последнем случае определение момента разрушения связано с определенными экспериментальными трудностями, поскольку образец окончательно не разрушается, а начинает деформироваться с большой скоростью. При хрупком разрыве момент разрушения легко определяется экспериментально с использованием традиционной микрометрической техники измерений.

Согласно экспериментальным данным (табл. 2) композит на основе эпоксифенольного связующего, модифицированного бромсодержащим олигомером, разрушается путем хрупкого разрыва. В тоже время для образцов на основе эпоксидированного динафтола разрушение ограничивается сильно развитыми сдвигами со стороны действия нагрузки, и факт разрушения не фиксируется. Ранее, авторами [11] сообщалось, что стеклопластик при изгибающем усилии со стороны нагревателя проходит две основные стадии разрушения. Первой (подготовительной) стадией является упруго-пластическая деформация нормального сжатия на нагреваемой поверхности. Второй стадией разрушения является потеря устойчивости сжатыми слоями образца, характеризующаяся возникновением сдвиговых складок. Поэтому, в случае, когда прочность растянутых слоев в момент потери устойчивости превосходит сопротивление деформации сжатых слоев, разрушение ограничивается только лишь сильно развитыми сдвигами. Приведенные в работах [12] экспериментальные данные по длительной прочности стеклопластиков при испытаниях на растяжение и сжатие косвенно подтверждают данный механизм разрушения под действием изгибающего усилия. Основным условием, определяющим тот или иной механизм разрушения, является разница между величинами остаточной прочности при растяжении и сжатии испытываемых стеклопластиков в интервале повышенных температур. С повышением температуры от 350 до 700°C разница между остаточными значениями разрушающей прочности на растяжение увеличивается, а при сжатии остается без изменения.

Следует отметить, что согласно представленным экспериментальным данным, предельное состояние по огнестойкости образцов стеклопластиков по признаку достижения предельных деформаций соответствует не продолжительным временным интервалам. Так, в

случае применения стеклопластика на основе эпоксифенольного связующего, модифицированного бромсодержащим олигомером, временной интервал составляет не более одной минуты. При переходе к связующему на основе эпоксидированного динафтола величина прогиба испытываемого образца стеклопластика не превышает предельных значений по истечении 3-х минутного воздействия и достижения температуры на поверхности образца в пределах 490-510°C.

**Выводы.** 1. Стеклопластики при огневых испытаниях сохраняют определенный запас работоспособности на протяжении начальной стадии развития пожара по стандартному режиму и могут использоваться в качестве конструкционных материалов с допустимым уровнем прогрева при экстремальных условиях. Более высоким пределом огнестойкости по признаку сохранения несущей способности обладает стеклопластик на основе эпоксидированного динафтола, а его разрушение характеризуется сильно развитым прогибом.

2. Установлено, что в течение процесса нарастания температуры в режиме стандартного пожара связующее в объеме стеклопластика претерпевает структурные превращения, переходя в высокоэластическое состояние, и механическое разрушение композита можно рассматривать с позиций ухудшения адгезионного контакта между стекловолокном и размягченной полимерной матрицей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Пожнаука, 2001. – 383 с.

2. Бетехтин В.И., Ройтман В.М., Слуцкер А.И. Кадомцев А.Г. Кинетика разрушения нагруженных материалов при переменной температуре // Журнал технической физики. – 1998, № 1. С. 76 – 81.

3. Глебовский П.А., Петров Ю.В. Кинетическая трактовка структурно-временного критерия разрушения // Физика твердого тела. – 2004, т. 46, № 6. – С. 1021 – 1024.

4. Исаханов Г.В. Прочность неметаллических материалов при неравномерном нагреве. – К.: Наук. думка, 1971. – 176 с.

5. Борисенко В.А., Грачева Л.И., Мишкин А.Н. Прочность и тепловое деформирование углеродных композиционных материалов при высоких температурах. Сообщ. 2. Характер деформирования и разупрочнения материалов при нагреве от 290 до 3300 К // Пробл. прочности. – 1995. - №10. – С. 100 – 109.

6. Патент U 200803048, МПК (2006) C08J 5/00. Стеклопластик: 200803048, МПК (2006) C08J 5/00 (Украина), Билым П.А., Афанасенко К.А., Михайлюк А.П., Олейник В.В. УГЗУ. – Заявка. 11.03.2008. Опубл. 15.08.08.

7. Билым П.А., Михайлюк А.П., Афанасенко К.А. К вопросу оценки предела огнестойкости полимерных композиционных материалов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков: УГЗУ, 2008. – Вып. 25. – С. 20 – 23

8. Билым П.А., Михайлюк А.П., Нехаев В.С., Афанасенко К.А. Изменение состояния эпоксифенольного связующего в композиционном материале под действием контактной поляризации // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005, Вып. 14. – С. 155 – 159.

9. Ройтман В.М., Бетехтин В.И., Парфеньева Н.А. и др. О возможности оценки огнестойкости строительных материалов и конструкций на основе кинетического подхода // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1983, № 11. – С. 61 – 65.

10. Регель В.Р., Савицкий А.В., Санфиорова Т.П. К вопросу о температурно-силовой зависимости долговечности композиционных материалов // Механика полимеров. – 1976, № 6. – С. 1002 – 1009.

11. Вишне夫斯基 Г.Е., Лозинский М.Г. Долговечность образцов стеклотекстолитов ВТФ-С КАСТ-В при испытании на изгиб в условиях одностороннего нагрева // Пластмассы. – 1964, № 3. – С. 37 – 43.

12. Билым П.А., Михайлюк А.П., Афанасенко К.А. Закономерности разупрочнения конструкционных стеклопластиков в условиях нарастания температуры в режиме стандартного пожара // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков: УГЗУ, 2009. – Вып. 25. – С. 24 – 29.

nuczu.edu.ua

Билым П.А., Михайлюк А.П., Афанасенко К.А.

**Зміна міцності та деформування конструкційних склопластиків при нагріві в умовах розвитку стандартної пожежі.**

За даними вогневих випробувань встановлено, що склопластики зберігають визначений запас працездатності протягом початкової стадії розвитку пожежі та можуть бути використані в якості конструкційних матеріалів з припустимим рівнем прогріву при екстремальних умовах. Більш високу межу вогнестійкості за ознакою несучої спроможності має композит на основі епоксидованого дінафтолу, а його руйнування характеризується розвиненим прогином.

**Ключові слова:** склопластик, випробування, деформація.

P.A. Bilym, A.P. Mikhailyuk, K.A. Afanasenko

**Durability changing and deformation of constructional fibreglasses at heating in the conditions of the standard fire mode.**

According to fire tests it is established that fibreglasses keep a certain stock of working capacity throughout an initial stage of fire development and can be used as constructional materials with admissible level of warming up under extreme conditions. The composite on a basis of epoxy dinafthol possesses a higher limit of fire resistance by sign preservation of bearing ability, and its destruction is characterized by strongly developed deflection.

**Key terms:** fibreglass, tests, a bend, deformation.