

УДК 678: 539.3; 620.17

Канд. техн. наук А. И. Буря, О. А. Набережная

Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск

## ОРГАНОПЛАСТИКИ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Рассматривается получение новых конструкционных материалов на основе ароматического полиамида фенилон, армированного дискретными волокнами сульфон-Т. Проводится оценка физико-механических свойств полученных материалов и возможности их выдерживать большие нагрузки.*

**Ключевые слова:** ароматический полиамид фенилон, органопластики, прочностные характеристики, напряжение, деформация, разрушение.

### Постановка проблемы

Композиты являются многофункциональными материалами, поэтому производство и модернизация технологии их изготовления имеют высокую значимость для развития многих отраслей промышленности. Кроме того, в условиях современного рынка применение инновационных, эффективных конкурентноспособных по цене и качеству материалов является наиболее надежной гарантией продвижения и развития предприятий как потребляющих композиционные материалы (КМ), так и выпускающих их [1].

При этом уместно отметить, что в последние годы несколько изменилась и функция полимерных материалов в любой отрасли. Полимерам стали доверять все более и более ответственные задачи. Из полимеров стали изготавливать все больше относительно мелких, но конструктивно сложных и ответственных деталей машин и механизмов, и, в то же время, все чаще полимеры стали применяться в изготовлении крупногабаритных корпусных деталей, которые несут значительные нагрузки.

### Анализ последних исследований

До недавних пор широкому использованию полимерных материалов в машиностроении препятствовали два, казалось бы, общепризнанных недостатка полимеров: их низкая (по сравнению с марочными сталями) прочность и низкая теплостойкость. Рубеж своих свойств полимерным материалам удалось преодолеть переходом к КМ. Так что теперь выражение «пластмасса крепче стали» звучит вполне обоснованно [2]. Комплекс свойств полимерных КМ определяется свойствами компонентов (матрица, наполнитель), их микро- и макроструктурой, границей раздела фаз, реакцией этих структур на внешние воздействия [3].

В основном пластмассы применяются в изготовлении крупногабаритных наружных частей автомобиля из композиционных материалов, что снижает массу и увеличивает долговечность, благодаря высокой коррозионной стойкости пластмассовых изделий. Также ис-

пользование высокопрочных композиционных пластмасс позволило перейти к изготовлению из них нагруженных силовых деталей (обода, рессоры, валы) [4].

На данный момент, процент использования полимерных материалов в машиностроении растет с каждым днем, мировой объем изготовления пластмасс к 2015 г. составил более 200 млн. тонн. Большинство производств различных отраслей полностью зависит от этого универсального материала. Малейшие сбои в поставке или остановке его производства способны полностью остановить деятельность крупнейших заводов автомобиле- или авиастроения. Все большее применение находят композиты на основе высокопрочных органических волокон. Высокие показатели усталостной прочности, связанные с повышенной трещиностойкостью органопластиков (ОП), способствуют большему ресурсу этих композитов и соответственно обеспечивают возможность закладывать при конструировании меньший запас прочности, по сравнению с расчетным [3].

### Цель работы

В связи с этим, в данной работе изучалась возможность создания хаотически армированного дискретными органическими волокнами (ОВ) полимерных композиционных материалов на основе ароматических полиамидов.

### Объекты и методы исследования

Особенность данных материалов, заключалась в том, что как связующее, фенилон С-1, так и дискретное (2–3 мм) волокно сульфон-Т относятся к термостойким ароматическим полиаидам. Характеристики материалов приведены в табл. 1.

Для получения композиционных материалов в емкость загружали навески порошкообразного фенилона и измельченного волокна, добавляли ферромагнитные частицы, изготовленных в виде цилиндров, диаметром 2 мм, длиной 15 мм. Емкость помещали во вращательное электромагнитное поле (0,12 Тл). Готовую смесь таблетировали при комнатной температуре и давлении

**Таблица 1** – Характеристики исходных материалов

Полиамид фенилон С-1		Волокно сульфон-Т	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,35	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,45–1,46
Разрушающее напряжение, МПа: при растяжении при статическом изгибе	100 150	Относительная прочность, % : в узле в петле	62–65 70–75
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	20	Прочность гс/текс	35–40
Предел текучести при сжатии, МПа	220	Модуль упругости, МПа	6000
Твердость, МПа	180	Толщина нити, текс	28,4
Температура размягчения по Вика, К	543	Удлинение, %	16–18
Водопоглощение за 24 час., %	0,5	Влагопоглощение (при 65 %-й относительной влажности), %	5,42
Усадка после прессования, %	0,6	Устойчивость к многократным изгибам при напряжении 50 МПа (число циклов до разрыва)	12000

30 МПа. Таблетки загружали в пресс-форму, предварительно нагретую до 523 К, нагревали до 593–598 К и выдерживали при этой температуре 10 мин без давления и 10 мин под давлением 30 МПа. Для фиксации формы изделия охлаждали под давлением до температуры 523 К и дальше выталкивали из пресс-формы. Готовые изделия подвергали механической обработке, которая главным образом заключалась в зачистке изделий – удалении облоя. При необходимости с помощью различных методов обработки можно изменять форму изделий, повышать точность размеров. Сочетание свойств и форм компонентов, совместимое с современными технологиями переработки полимеров, обеспечило создание новых конструкционных материалов. Изучение прочностных характеристик разработанных композиций – прочности, деформации, модуля упругости при сжатии определяли по методике согласно ГОСТ 4651-2014, ударную вязкость определяли согласно ГОСТ 4647-80.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Рассматривалось поведение полученных ОП при испытании на сжатие. То обстоятельство, что в процессе испытаний, можно извлечь важную информацию об упругих свойствах материала и предопределяет широкое использование построения кривых напряжение-деформация при исследовании свойств конструкционных материалов. По результатам исследований, получены кривые напряжение – деформация описывающие поведение базового пластика и самоармированных ОП (рис. 1). Такое поведение кривой характерно для полимеров [5, 6], в нашем случае как фенилона, так и ОП на его основе. Однако стоит заметить, что согласно классификации Херцберга [7], данное поведение именуется упругим гетерогенно-пластическим, и относится к V типу. Участок кривых до 125 МПа, описывающих полностью упругое поведение материалов законом Гука:

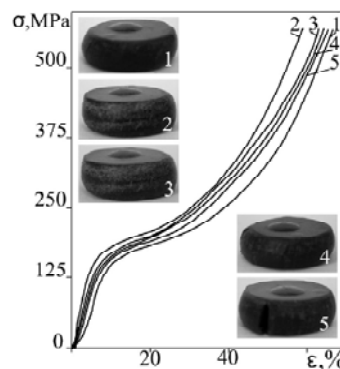
$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение,  $E$  – коэффициент пропорцио-

нальности (модуль упругости),  $\varepsilon$  – деформация.

Такая обратимая природа деформации, разработанных ОП связана с сильными взаимодействиями между соседними элементарными частицами полимера [8].

Параболический участок кривых  $\sigma - \varepsilon$  описывает гомогенно пластическую деформацию, то есть возрастающее сопротивление со стороны материала до значений максимального напряжения ( $\approx$  до 200 МПа). Этот процесс сопровождается конкурентным развитием двух процессов. Сначала, пластическое течение происходит с разрушением исходной глобулярной структуры (рис. 2, а) полимера, затем – образованием шейки, которая описывается параллельным участком оси абсцисс и сопровождается перестройкой исходной структуры в новую, более прочную – фибриллярную (рис. 2, б). Это явление известно как деформационное упрочнение, которое определяется в основном выпрямлением глобулярных полимерных цепочек, ранее находившихся в «свернутом» состоянии, с образованием частично растянутых участков. Иными словами скрученная в клубок цепь распрямляется с небольшим дополнительным удлинением, за счет сложного механизма ковалентных связей. При больших степенях деформации этот механизм и вызывает быстрое и очевидное упрочнение ОП.



**Рис. 1.** Кривые напряжение-деформация фенилона (1) и органических полимеров содержащих 5(2); 10(3); 15(4); и 20(5) масс. % волокна сульфон-Т

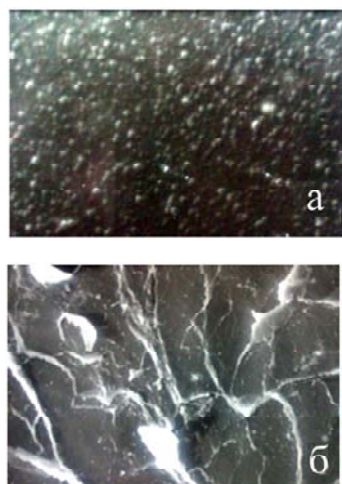


Рис. 2. Микроструктура исходного полимера (а) и органопластика (б)  $\times 8000$

По мере приобретения пластиками новой структуры кривая напряжение – деформация вновь начинает подниматься. Деформационное упрочнение происходит за счет переориентирования молекул вплоть до разрушения. Важным механизмом разрушения для большинства материалов, связанных со структурным видоизменением или химическим составом, является коалесценция микропор [7]. Считается, что вызванное приложенной нагрузкой разрушение хрупких частиц, развитие разрушения по межфазной границе между матрицей и волокном способствует образованию микротрещин или пор в исследуемых образцах. Преимущественно они образуются в связи с переориентированием молекул полимера, и растут в плоскости, нормальной к оси приложения напряжения. При увеличении уровня напряжений поры все больше растут и, наконец, коалесцируют с образованием широкого фронта трещины, которая достигая критических размеров, сопровождается полным разрушением (рис. 1 (4, 5)). Таким образом было установлено, что ОП содержащие 15–20 масс. % волокна сульфон-Т в силу большего количества гра-

ниц раздела при одинаковых нагрузках в сравнении с образцами 1–3 достигают разрушения.

Для оценки полной картины поведения материалов при сжатии были рассчитаны механические свойства согласно формулам [9]:

$$\text{- модуль сдвига или модуль жесткости: } G = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad (2)$$

- модуль объемной упругости или модуль объемного

$$\text{сжатия: } K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; \quad (3)$$

$$\text{- параметр Ламе: } \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad (4)$$

$$\text{- коэффициент Пуассона [10] } \frac{\sigma}{E} = \frac{1-2\nu}{6(1+\nu)}. \quad (5)$$

За счет упрочнения структуры наблюдалось: увеличение модулей Юнга, сдвига, объемной упругости в 1,9; 1,5; 1,4 раза соответственно; повышение коэффициента Пуассона и параметра Ламе на 30 и 130 % соответственно; возрастание предела текучести на 25 единиц; монотонное снижение на 50 МПа пределов пропорциональности и прочности, в сравнении с исходным фенолоном (табл. 2).

Существование перехода от одного типа разрушения к другому позволяет определить относительное количество энергии, поглощаемой в процессе разрушения. Исследовались разработанные ОП однократным ударом на изгиб (рис. 3).

В ходе проведения испытаний было определено, что армирование способствовало повышению поглощаемой энергии при наполнении волокном 5–10 масс.%, после чего наблюдалось монотонное ее снижение. Этот факт также отражен на съемке разрушенных образцов (рис. 4), как переход от относительно гладкой поверхности разрушения, где, по-видимому, преобладают условия плоскодеформированного состояния, до смешанной – связанной с видоизменением структуры.

Таблица 2 – Механические свойства фенолона и органопластиков на его основе

Показатели	0	5	10	15	20
Модуль Юнга ( $E$ ), МПа	2500	2700	3184	3400	3700
Модуль сдвига ( $G$ или $\mu$ ), МПа	1033,1	1115,7	1273,6	1360	1456,7
Модуль объемной упругости ( $K$ ), МПа	1436,8	1551,7	2122,7	2266,7	2681,2
Коэффициент Пуассона ( $\nu$ )	0,21	0,21	0,25	0,25	0,27
Параметр Ламе ( $\lambda$ ), МПа	750	810	1243,3	1392,9	1722,4
Предел текучести при сжатии ( $\sigma_T$ ), МПа	203,8	216,56	216,56	222,8	229,2
Относительное удлинение при сжатии ( $\varepsilon$ ), %	26	22,5	23,8	23,6	23,3
Предел пропорциональности ( $\sigma_{пл}$ ), МПа	146,5	132,5	114,6	101,9	89,2
Предел прочности ( $\sigma_B$ ), МПа	636,9	617,8	611,5	598,2	584,9

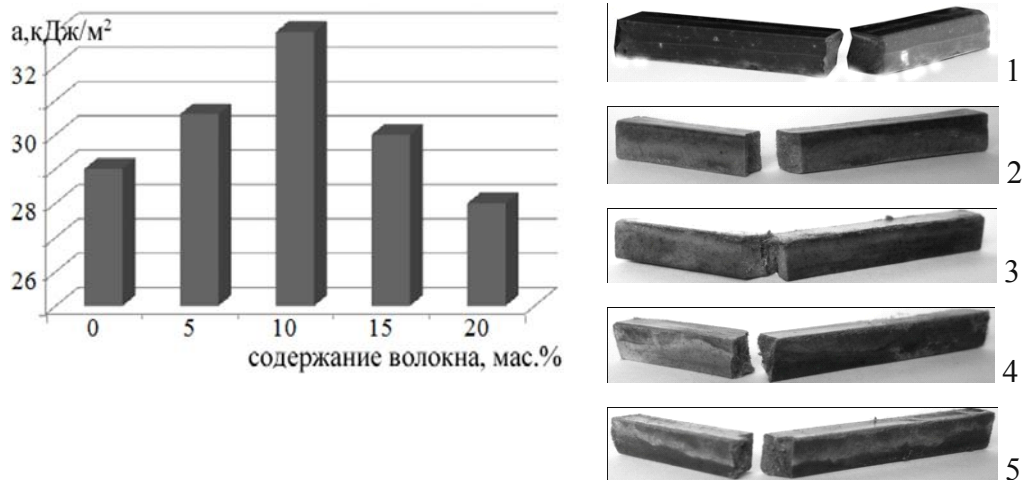


Рис. 3. Влияние содержания 0(1); 5(2); 10(3); 15(4); 20(5) масс.% волокна сульфон-Г на ударную вязкость органопластиков на основе фенилона

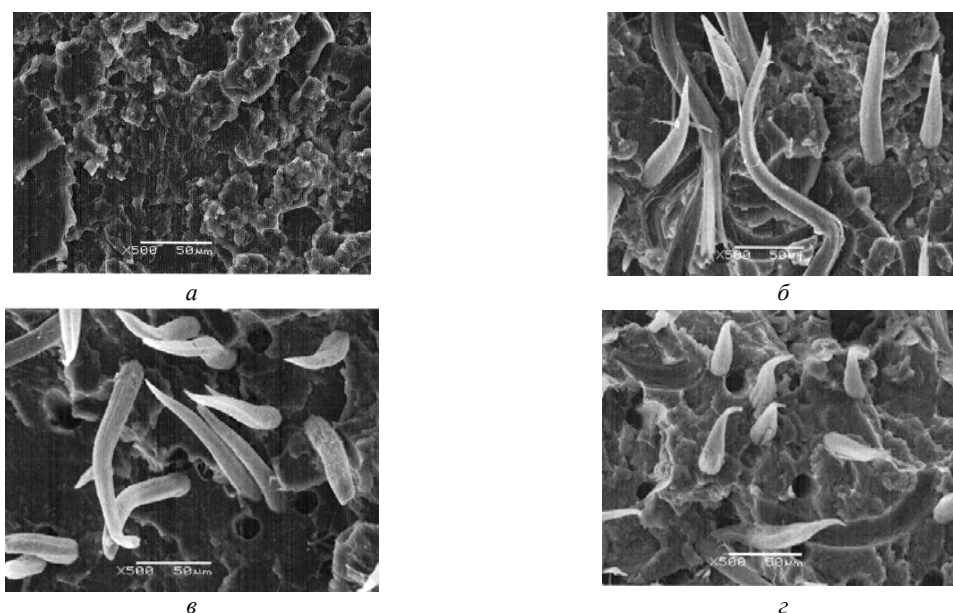


Рис. 4. Электронные микрофотографии исходного полимера (а) и органопластиков на его основе, содержащих 5(б); 10(в); 15(г) масс. % волокна

Исследования микроструктуры излома показали, что использование для армирования органических волокон оказывает существенное влияние на формирование надмолекулярной структуры фенилона. Отчетливо видно, что при введении в исходный полимер ОВ (рис. 4), излом композиции становится трансглобулярным. Волокна в процессе разрушения растягиваются, а не выдергиваются. На рис. 4 в, г видно только несколько отверстий от выдернутых волокон, остальные были разрушены при растяжении, т. е. при разрушении образца образуется трещина по полимерной матрице и в дальнейшем обломки образца держатся на микроволокнах. Также наблюдается образование шейки течения на волокне (рис. 4, б, в, г).

### Выводы

Таким образом, были разработаны и исследованы новые ОП на основе ароматического полиамида фенилон. В ходе исследований их прочностных характеристик было установлено, что армирование базового пластика значительно повышает способность материала выдерживать большие нагрузки. Также были определены показатели, которые полностью описывают упругие свойства армированных пластиков. Все полученные данные свидетельствуют о том, что новые ОП – это конструкционные материалы с большим потенциалом возможности.

**Список литературы**

1. Исследование влияния органического волокна на трибологические свойства самоармированных органопластиков на основе ароматического полиамида / [А. И. Буря, О. А. Набережная, В. И. Колесников, Н. А. Мясникова] // Сборник трудов XIII Российско-Китайского Симпозиума «Новые материалы и технологии» / Под общей редакцией академика РАН К. А. Солнцева. В 2-х томах. – М. : Интерконтакт Наука, 2015. – С. 468–470.
2. Полимеры и их значение [Электронный ресурс] URL: <http://www.otkroveniya86.ru/>
3. Набережная О. А. Органопластики – перспективные материалы будущего / О. А. Набережная, А. И. Буря // Композитные материалы : междунар. науч.-техн. сб. – Д. : [б. в.], 2016. – Т. 9, № 2. – С. 3–33.
4. Федорцов Д. Р. Применение полимеров в машиностроении / Федорцов Д. Р. // Современная техника и технологии. 2014. – № 7. [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/07/4191>
5. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен. – М. : Химия, 1978. – 423 с.
6. Бабович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы: учеб. пособие. – М.: МГИУ. – 2009. – 383 с.
7. Херцберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг : пер. с англ. // Под ред. М. Л. Бернштейна. – М. : Металлургия. – 1989. – 560 с.
8. ИК-спектральный анализ органопластиков на основе фенолона / А. И. Буря, О. А. Набережная, С.П. Сучилина-Соколенко и др. // Научный альманах – 2016. – № 1.– 1(15). – С. 385–392.
9. Физическая энциклопедия : в 5 т. / [гл. редактор Прохоров А. М.]. – М. : Советская энциклопедия. – Т. 2. – 1988. – 704 с.
10. Долбин И. В. Кинетика кристаллизации полимерной матрицы углепластиков: фрактальная трактовка / И. В. Долбин, А. И. Буря, Г. В. Козлов // Композитные материалы: междунар. науч.-техн. сб. – Д. : [б. в.], 2008. – Т. 2, № 1. – С. 3–8.

Одержано 05.12.2015

**Буря О.І., Набережна О.О. Органопластики – перспективні конструкційні матеріали**

*Розглядається отримання нових конструкційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду фенолон, армованого дискретними волокнами сульфон-Т. Проводиться оцінка фізико-механічних властивостей отриманих матеріалів і можливість витримувати великі навантаження.*

**Ключові слова:** ароматичний поліамід фенолон, органопластики, міцність, навантаження, деформація, руйнування.

**Buria A., Naberezhnaya O. Organoplastics - advanced construction materials**

*Development of new construction materials based on aromatic polyamide phenylone reinforced with discrete fibers sulfone-T is discussed. An evaluation of the physical and mechanical properties of the materials and the possibility of withstanding heavy loads is given.*

**Key words:** aromatic polyamide phenylone, organoplastics, strength characteristics, stress, deformation, destruction.