

УДК 678.067.9:539.42

Буря А. И., Еремина Е. А.

Днепродзержинский государственный технический университет. Украина, г. Днепродзержинск

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРОВ ПРИ СЖАТИИ

В статье рассматривается влияние мелкодисперсных металлических наполнителей на процесс разрушения ароматического полиамида фенилон. Описывается характер кривых напряжение-деформация и форма образцов, которую они получают в процессе сжатия. Показано, что под влиянием напряжения глобулярная структура разработанных металлополимеров перестраивается в фибриллярную. Раскрыта картина влияния металлических наполнителей на основные характеристики процесса разрушения: пределы пропорциональности и текучести, модуль Юнга, работу разрушения.

Ключевые слова: ароматический полиамид фенилон; дисперсные частички металлов; металлополимеры; испытание на сжатие.

1. Введение

Перспективы использования и области применения материалов определяются в первую очередь комплексом присущих им свойств. Обширный диапазон ценных свойств ароматических полиамидов — фенилонов позволяет создавать изделия для работы при больших статических и динамических нагрузках в широком температурном интервале.

Ароматические полиамиды являются полярными соединениями с сильным межмолекулярным взаимодействием, реализуемым за счет водородных связей. Эти особенности макромолекул обуславливают особенности эксплуатационных свойств материалов на основе данных полимеров. Фенилоны негорючие и химически устойчивые к действию топливных масел, обладают большой жесткостью, твердостью, способностью к пластическим деформациям, их работоспособность сохраняется от 153

до 553 К [1]. Тем не менее, для улучшения основных характеристик, весьма целесообразным является введение в состав полиамидных связующих различного рода наполнителей.

В настоящее время существенный практический интерес представляет применение в качестве наполнителей дисперсных порошков металлов.

2. Объекты и методы исследования

В качестве полимерной матрицы для изготовления металлополимеров (МП) использовали ароматический полиамид фенилон С-1 (ТУ 6-05-221-101-71), а как наполнитель — мелкодисперсные порошки карбонильного никеля (ПНК-2К10, ГОСТ 9722-97), меди (ПМС-1, ГОСТ 4960-2009), алюминия (ПА-1, ГОСТ 6058-73), титана (ПТК-1(2), ТУ 14-22-57-92) и бронзы (Бр О5Ц5С5, ГОСТ 613-79), основные свойства приведены в табл.1.

Таблица 1

Основные свойства пресспорошков

Символ	Цвет пресс-порошка	Плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Температура плавления, К	Размер частиц, мкм
С-1	розовый	1350	200–300	543*	35–50
Ni	серый	8900	1200 и больше	1726	12–21
Cu	красный	8960	1250–2000	1356	33–57
Al	серебристо-белый	2699	960	934	129–172
Ti	серебристо-белый	4505	2850	1933	158–284
Br	золотистый	8800	3700–4700	1203–1373	43–90

* Температура размягчения по Вика

Пресскомпозиции состава: фенилон С-1 + 5–20 мас. % мелкодисперсного металлического наполнителя готовили путем смешения компонентов во вращающемся электромагнитном поле в присутствии ферромагнитных частиц. Приготовленные таким образом смеси таблетировали на гидравлическом прессе при комнатной температуре и давлении — 4 МПа, после чего оттаблетированные образцы сушили в термощкафу при температуре 473–523 К, т.к. переработка невысушенного фенилона ухудшает его прочностные характеристики и приводит к поверхностным дефектам. Высушенные и оттаблетированные заготовки перерабатывали в изделия методом компрессионного прессования при температуре 593 К и давлении — 4 МПа, выдержка при этой температуре составляла 5 минут.

Испытания на сжатие проводили на испытательной машине с механическим нагружением образца и механическим силоизмерением ИМ-4Р. Образцы диаметром 10 мм испытывали согласно ГОСТ 4651-2014, по которому находили пределы пропорциональности ($\sigma_{\text{п}}$) и текучести ($\sigma_{\text{ск}}$), модуль Юнга (E), коэффициент Пуассона (μ), работу разрушения (A).

3. Изложение основного материала исследований

Согласно Херцбергу [2] полученные в ходе испытания кривые напряжение-деформация для металлополимеров на основе ароматического полиамида фенилон (см. рис. 1) соответствуют V типу, характерному для полимеров. Форму кривых V типа рассматривают как результат конкурентного развития двух процессов. Вначале, пластическое течение происходит с разрушением исходной структуры полимера, результатом чего является падение нагрузки. Если при дальнейшем нагружении разрушения не происходит, то накопление деформации приводит к перестройке разрушенной структуры в новую, характеризуемую высокой степенью ориентированности и более прочную. По мере того, как все большее количество участков полимера приобретают новую структуру, возрастает сопротивление материала деформации — наступает стадия деформационного упрочнения — кривая σ – ϵ вновь начинает подниматься.

В нашем случае, кривые σ – ϵ металлополимеров имеют прямолинейный участок, описывающий упругую деформацию по закону Гука при малых ее значениях. Обратимая природа деформации разработанных МП определяется в основном выпрямлением цепочек полимера в направлении растягивающих напряжений (перпендикулярно подаваемой нагрузке). На ранее находившихся в «свернутом» состоянии цепочках образуются частично растянутые участки. Благодаря такому механизму степень упругой деформации достаточно велика (табл. 2), а

модули упругости характеризуются низкими значениями вследствие малого вклада в механическое распрямление цепей полимера.

При снятии приложенной нагрузки до достижения предела упругости, деформация, полученная образцом, возвращается к нулю, а цепи полимера вновь сворачиваются в клубки, т.к. полимеру термодинамически предпочтительно иметь клубковую структуру.

После прямолинейного участка следует параболический участок кривой, описывающий гомогенную пластическую деформацию. Кривые σ – ϵ поднимаются до значения некоторого максимального напряжения, которое характеризует возрастающее сопротивление со стороны полимера нарастанию пластической деформации, т.е. происходит деформационное упрочнение за счет дальнейшего распрямления цепей полимера.

Участок упрочнения на кривых σ – ϵ уходит практически в бесконечность. Это объясняется тем, что образец цилиндрической формы, сплющиваясь, превращается в диск (см. рис. 1). Площадь поперечного сечения увеличивается и одновременно возрастает сопротивление образца. Причем, разрушение не происходит, поэтому предел прочности пластичных материалов при испытании на сжатие определить невозможно.

Таким образом, поведение кривых σ – ϵ металлополимеров очень близко к упругому гетерогенно-пластическому. Происходит лишь видоизменение кривых σ – ϵ V типа: отсутствует промежуточный участок падения нагрузки. Это говорит о том, что скорость деформации в испытываемых образцах не превышает скорости перемещения траверсы испытательной машины.

В разработанных МП протекает процесс перестройки структуры, как и рассматривается в [2]. Известно [1], что фенилон относится к аморфным полимерам, которые построены из молекул, свернутых в глобулы. Глобулярная структура наделяет такие полимеры невысокими механическими характеристиками в связи с хрупким разрушением по границам глобул [3]. При наполнении аморфных полимеров их структура перестраивается в фибриллярную, поскольку наполнитель выступает в качестве центров кристаллизации.

Фибриллярная структура полимеров определяет специфичность их механических свойств. Возможность конформационных изменений проходных цепей и наличие границ раздела между структурными элементами препятствуют хрупкому разрушению и обуславливают вынужденные высокоэластичные деформации при наложении нагрузки [4].

Таким образом, при увеличении процентного содержания наполнителя повышается доля фибриллярной структуры в разработанных МП, т.к. возрастает относительный объем центров кристал-

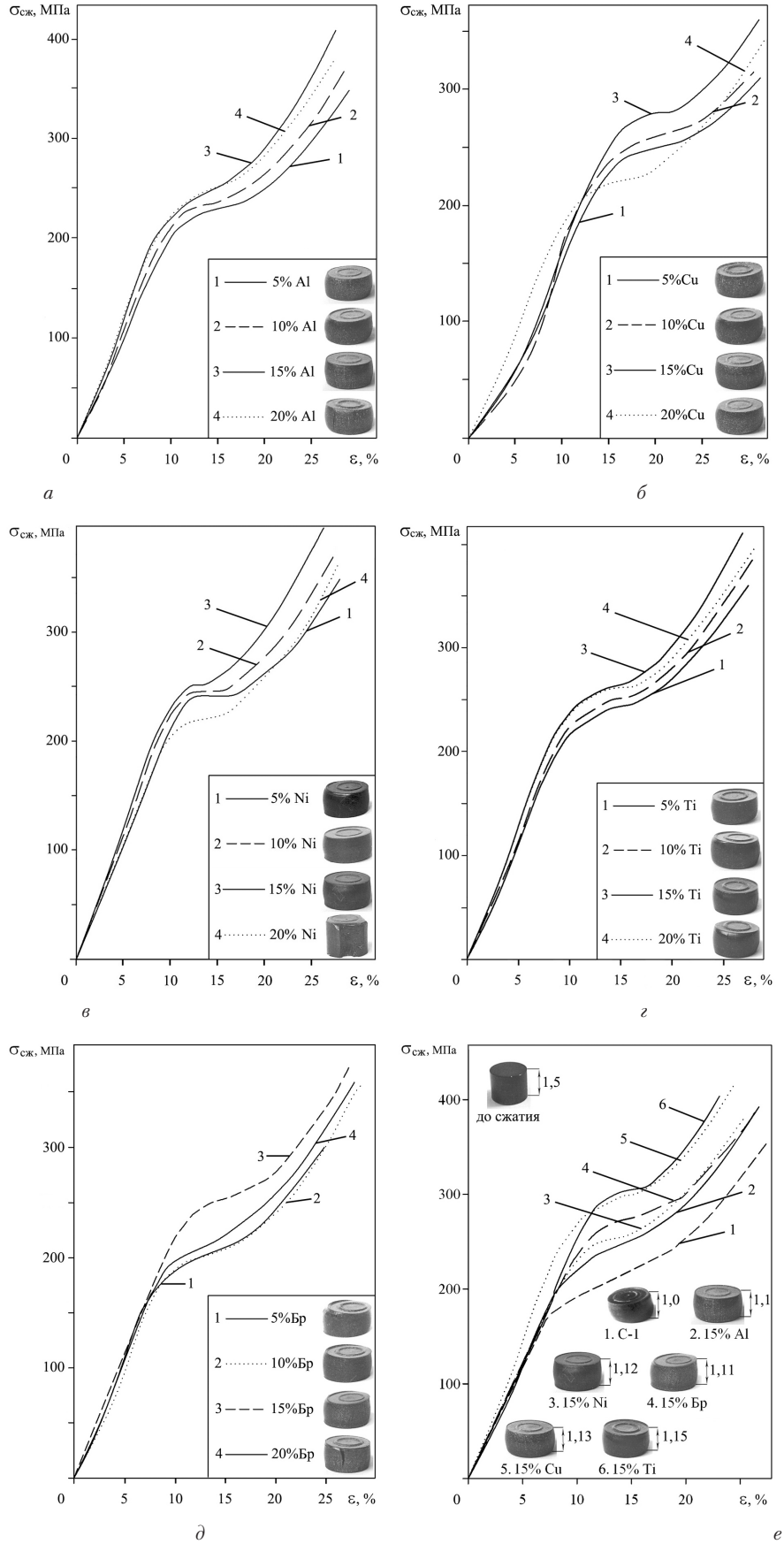


Рис. 1. Кривые напряжение-деформация разработанных металлополимеров в зависимости от процентного содержания металла (*a-д*) и от природы металлов (*e*)

Таблица 2

Основные характеристики описания процесса разрушения

Свойства	Кол-во наполнителя, масс.%	$\sigma_{п}$, МПа	E , ГПа	μ	A , кДж
Фенилон	0	152,6	2,75	0,468	36,90
Бронза	5	153,9	2,82	0,388	29,71
	10	161,7	2,85	0,381	36,92
	15	200,8	3,06	0,372	39,73
	20	169,5	2,84	0,363	37,66
Медь	5	167,4	2,82	0,449	38,61
	10	177,8	2,88	0,442	41,30
	15	210,0	2,99	0,438	42,53
	20	183,3	2,78	0,429	41,31
Титан	5	169,5	3,14	0,456	38,26
	10	178,2	3,19	0,451	40,82
	15	203,0	3,35	0,447	43,01
	20	194,8	3,31	0,436	41,43
Алюминий	5	160,4	2,91	0,418	38,93
	10	172,9	3,05	0,402	39,77
	15	187,5	3,31	0,398	41,18
	20	175,6	3,21	0,389	39,77
Никель	5	199,0	2,86	0,392	39,69
	10	202,9	2,94	0,382	40,51
	15	212,8	3,10	0,377	41,59
	20	193,1	2,94	0,153	38,47

лизации в материале, за счет чего увеличиваются основные характеристики процесса разрушения: $\sigma_{п}$, $\sigma_{сж}$, E и A .

Основные характеристики процесса разрушения (табл. 2, рис. 2) для полученных металлополимеров носят симбатный характер вне зависимости от природы дисперсно-упрочняющего наполнителя. Они возрастают вплоть до степени наполнения 15 масс.%, после — снижаются.

Частицы металлов в процессе сжатия выступают в качестве концентраторов напряжения, о чем свидетельствует снижение коэффициента Пуассона (см. табл. 2). Чем выше концентрация напряжений в материале, тем легче разрушить образец за счет накопления необратимых повреждений. Однако, для металлополимеров содержащих 5–15 масс.% наполнителя концентрация напряжений не приводит к увеличению локального напряжения до опасно высокого уровня. Хоть под действием нагрузки и возникают микротрещины на границе раздела полимер — наполнитель, повышение напряжения до уровня при котором возможно разрушение материала исключается, в результате протекания процессов пластической деформации полимера в высоконапряженной области вершины микротрещины. В результате величина локального напряжения

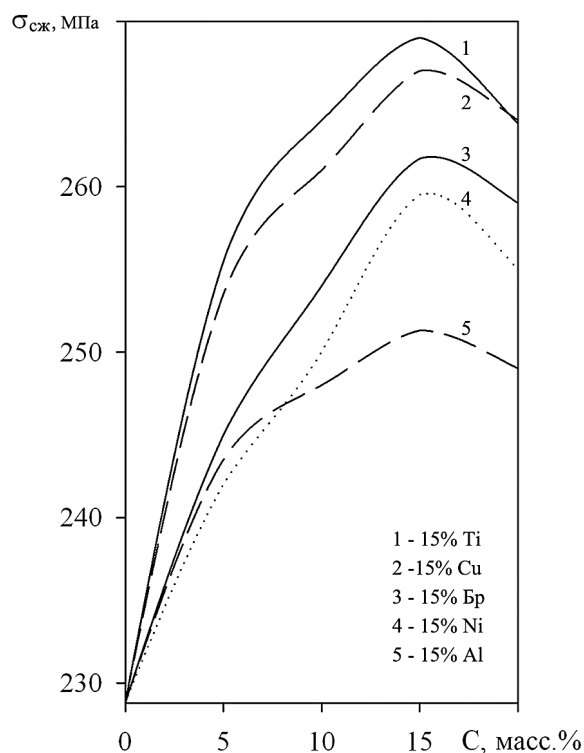


Рис. 2. Зависимость предела текучести от процентного содержания наполнителя

ненамного превышает предел текучести, и по мере притупления трещины, в результате микропластической деформации, уменьшается интенсивность концентраций напряжений. Как следствие, в материале увеличиваются плотность дислокаций и деформационное упрочнение.

При содержании наполнителя 20 масс.% концентрация напряжений приводит к увеличению локального напряжения до опасно высокого уровня, т.к. снижается пластичность полимера. Микротрещины на границе раздела матрица-наполнитель, не встречая сопротивления со стороны полимера, наращивают удельный объем в материале и ведут к хрупкому разрушению образца (см. рис. 1).

Что касается влияния природы металлов на прочностные характеристики МП, то наибольшее влияние оказывают порошки титана и меди. При введении титана (меди) предел текучести фенилона увеличивается на 78 (73), предел пропорциональности — на 33 (37), а модуль Юнга — 29 (12) % соответственно.

5. Выводы

В ходе проведения испытаний разработанных металлополимеров на сжатие было установлено, что при наполнении фенилон приобретает фибрил-

лярную структуру, которая улучшает основные характеристики описывающие процесс разрушения. Наибольшее влияние на данные характеристики оказывают медь и титан, увеличивая модуль упругости на 73–78, предел пропорциональности — 33–37, а модуль Юнга — 12–29 %.

Литература

- [1] Бабович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы: учеб. пособие. — М.: МГИУ. — 2009. — 383 с.
- [2] 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.
- [3] Фетисов Г. П. Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г. П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин [и др.]. — Москва: Высшая школа, 2001. — 640 с.
- [4] Шеберстов В.И. Основы технологии светочувствительных фотоматериалов / В.И. Шеберстов, В.Л. Зелик. Ман и др.; под общ. ред. проф. В. И. Шеберстова. — М., «Химия», 1977. — 504 с.

Burya A.I., Yeriomina Ye.A.

Dneprodzerzhinsk State Technical University. Ukraine, Dneprodzerzhinsk

CHARACTERISTICS OF FRACTURE OF METALLOPOLYMERS UNDER COMPRESSION

The article examines the impact of dispersed metallic fillers on the process of destruction of aromatic polyamide phenylone. It describes the nature of the stress-strain curve and the shape of the samples they receive during the compression process. It is shown that the structure of the developed materials, under the influence of voltage, is rebuilt in the fibrillar, which is uncharacteristic to amorphous polymers. Disclosed picture of the impact of metallic fillers on the main characteristics of the process of destruction: the proportional limit, yield strength, Young's modulus, the work of destruction.

Keywords: aromatic polyamide phenylone; dispersed particles of metals; metallopolymers; compression test.

References

- [1] Babovich B.B. Nemetallicheskie konstruktsionnyie materialyi: ucheb. posobie. — М.: МГИУ. — 2009. — 383 p.
- [2] Hertsberg R.V. Defformatsiya i mehanika razrusheniya konstruktsionnyih materialov / R.V. Hertsberg. Per. s angl. // Pod. red. M.L. Bernshteyna. — М.: Metallurgiya. — 1989. — 560 p.
- [3] Fetisov G.P. Materialovedenie i tehnologiya metallov: uchebnik dlya vuzov / G.P. Fetisov, M.G. Karpman, V.M. Matyunin [i dr.]. — Moskva: Vysshaya shkola, 2001. — 640 p.
- [4] Sheberstov V.I. Osnovy tehnologii svetochuvstvitelnyih fotomaterialov / V.I. Sheberstov, V.L. Zelik. Man i dr.; pod obsch. red. prof. V.I. Sheberstova. — М., «Химия», 1977. — 504 p.