



Л.И. Огородов, В.А. Шапкина
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
 Вологодский государственный университет

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛОПОЛНЕННОГО ПОЛИАМИДА, ИСПОЛЪЗУЕМОГО В ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Представлены экспериментальные данные испытаний стеклонаполненного полиамида и полиамида с различным содержанием технологических отходов при осевом растяжении, изгибе, сжатии. Дано сравнение механических характеристик. Дана оценка усталостной циклической прочности стеклонаполненного полиамида и полиамида с различным содержанием технологических отходов.

Механические характеристики, стеклонаполненный полиамид, полиамид с различным содержанием технологических отходов, противофильтрационные конструкции.

Введение и постановка задачи. В настоящее время в различных видах строительства – дорожном и гидротехническом, промышленном и гражданском – актуальной является проблема создания противофильтрационных конструкций для защиты конструкций от грунтовых и поверхностных вод, а также для защиты грунта и грунтовых сооружений от экологически опасных утечек агрессивных веществ. Полимерные материалы достаточно давно используются в качестве противофильтрационных экранов гидротехнических сооружений и полигонов захоронения отходов производства и потребления, однако практики отмечают «отсутствие единого научно обоснованного подхода к выбору надежной конструкции» [1, с.69]. Вопросы надежности основаны, прежде всего, на исследовании механических характеристик материалов, используемых в противофильтрационных конструкциях, их долговечности. Поэтому была начата работа по исследованию механических характеристик современных полимерных и полимерных композиционных материалов – полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и ПЭНП, стабилизированного 2% содержанием сажи, с точки зрения изменчивости их свойств во времени [5]. Длительное использование полимерных и полимерных композиционных материалов на практике выявило необходимость прогноза их долговечности (ресурса), основанного на экспериментальных данных по длительной прочности противофильтрационных материалов. В ходе работы были представлены расчетные зависимости ресурса противофильтрационных элементов, учитывающих длительную прочность материалов [3]. Далее были исследованы механические характеристики полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и композиционного материала на основе полиэтиленов высокой и низкой плотности, а также определены механические характеристики листового поливинилхлорида, изготовленного на основе отходов производства. Анализ результатов экспериментов показал перспективность применения данных полимерных композиционных материалов в противофильтрационных конструкциях [4].

Значительный интерес представляют геосинтетические материалы, при изготовлении которых приме-

няются технологические отходы, так как при таком подходе решаются сразу две проблемы – утилизация отходов и изготовление материалов, соответствующих требованиям противофильтрационных конструкций. Одним из таких материалов является стеклонаполненный полиамид, содержащий технологические отходы.

Данная статья посвящена исследованию механических свойств стеклонаполненного полиамида с содержанием технологических отходов для крепежных элементов противофильтрационных конструкций. Крепежные элементы противофильтрационных конструкций обеспечивают надежность сооружений, и оценка их свойств и долговечности крайне важна и актуальна.

Задачи в рамках данного исследования были сформулированы следующие: при испытании при испытании на различные виды нагружений определить механические характеристики полиамидов, содержащих разное количество оборотных (технологических) отходов, провести анализ, в том числе в сравнении с соответствующими испытаниями на растяжение [2], дать оценку испытаний длительной прочности.

Проведение испытаний. Для механических испытаний использовались две партии первичного стеклонаполненного полиамида ПА6 – 21ОКС (ОСТ 6-11-498-79), полиамида, содержащего 20–75% оборотных технологических отходов, а также вторичного полиамида, содержащего 100% оборотных отходов. Для изготовления образцов вторичного полиамида смесь первичного полиамида ПА6 – 21ОКС (в гранулированном виде) и оборотных отходов (литники, бракованные изделия) после дробления на дробилке роторного типа просушивалась до влажности 0,2% в сушильном шкафу с циркуляцией воздуха при температуре 70–80°C в течение 24–48 часов. Образцы для испытаний на одноосное растяжение, изгиб, ударный изгиб изготавливались литьем под давлением на термопластавтомате ДЕ 3327–1. Основной режим литья происходил при давлении 1100–1300 кгс/см², температуре в первой зоне цилиндра 240–250°C, во второй 250–260, в третьей 260–270°C. Время цикла составляло 20–60 секунд и включало: смыкание прогретой до температуры 70–80°C пресс-формы, впрыск материала, выдержка под

давлением, выдержка при охлаждении, размыкание пресс-формы, извлечение изделия. Далее производился контроль внешнего вида в целях обнаружения дефектов и фиксация размеров образцов.

Испытания образцов на изгиб осуществлялись по трехточечной схеме нагружения ($L=60$ мм).

Образцы для испытания на одноосное сжатие изготавливались путем механической обработки образцов второй партии, используемых при испытаниях на растяжение. Они имели форму параллелепипеда размерами $4 \times 4 \times 10$ мм, и закладывались в захваты установок без смазок.

Скорость смещения захватов машин составляла $V=5$ мм/мин.

Результаты испытаний. Механические характеристики по данным испытаний на одноосное растяжение исследуемых полиамидов ($\sigma_{ит}$ – предел прочности, $\varepsilon_{ит}$ – относительная продольная деформация, ему соответствующая, E_p – модуль упругости) приведены в табл. 1.

При испытании на изгиб определялись следующие характеристики: предел прочности при изгибе $\sigma_{ви}$, максимальный прогиб $\Delta \omega$, модуль упругости $E_{и}$, а также коэффициенты вариации средних значений $\sigma_{ви}$ и $E_{и}$ ($\vartheta\sigma$ и ϑE соответственно).

Испытания на однократный ударный изгиб позволили определить значения ударной вязкости a_n и показатели хрупкости σ_z .

По испытаниям трёх-пяти образцов двух партий (I и II) полиамида рассчитывались средние значения механических характеристик. Они представлены в табл. 1–3.

Анализ результатов данных табл. 1–3 позволяют сделать следующие выводы. Механические характеристики образцов первой партии полиамида по большинству исследованных параметров более высокие по сравнению со второй партией. Это можно объяснить некоторыми отличиями в технологии изготовления.

Таблица 1

Механические характеристики полиамида ПА6 - 21ОКС при растяжении в зависимости от количества в нём оборотных отходов

Содержание отходов, %	$\sigma_{ит}$, МПа		$\varepsilon_{ит}$		E_p , МПа		ϑE , %	
	I	II	I	II	I	II	I	II
0	137,2	121,6	0,063	0,059	1750	2060	10,2	3,8
20	133,1	116,7	0,063	0,058	1880	1990	9,3	1,6
30	131,2	114,8	0,058	0,057	1930	2020	8,0	3,1
40	126,8	114,4	0,060	0,058	1930	2000	4,6	3,7
50	126,9	110,3	0,062	0,051	1860	2150	6,2	4,8
75	-	102,9	-	0,048	-	2120	-	5
100	-	98,8	-	0,045	-	2170	-	-

Таблица 2

Механические характеристики полиамида ПА6 - 21ОКС при изгибе в зависимости от количества в нём оборотных отходов

Содержание отходов, %	$\sigma_{ви}$, МПа		$\vartheta\sigma$, %		$\Delta \omega$, мм		$E_{и}$, МПа		ϑE , %	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
0	229,3	192,9	1,2	2,2	1,10	1,12	6500	5700	2,3	8,6
20	216,2	191,1	1,7	2,0	1,23	1,12	5970	6180	4,7	0,7
30	213,4	188,4	2,7	1,9	1,19	1,19	6200	6040	2,2	1,3
40	210,4	186,5	1,3	3,1	1,25	1,19	5880	5990	1,8	0,3
50	209,2	190,7	1,9	2,2	1,27	1,22	5840	6030	4,8	3,4
75	-	189,1	-	4,7	-	1,28	-	5840	-	2,1
100	-	170,9	-	8,2	-	1,61	-	4650	-	7,6

Таблица 3

Механические характеристики полиамида ПА6 - 21ОКС при ударе в зависимости от количества в нём оборотных отходов

Содержание отходов, %	a_n , Н/м		ϑa , %		σ_z , Н/м ²		$\vartheta\sigma$, %	
	I	II	I	II	I	II	I	II
0	0,390	0,326	2,9	3,0	0,975	0,816	2,9	3,0
20	0,390	0,322	4,2	2,7	0,976	0,804	4,3	2,7
30	0,386	0,311	3,7	3,1	0,966	0,777	3,7	3,1
40	0,386	0,311	1,9	4,4	0,965	0,778	1,9	4,4
50	0,351	0,283	1,4	9,0	0,877	0,708	1,4	9,0
75	-	0,259	-	7,8	-	0,648	-	7,8
100	-	0,244	-	3,5	-	0,611	-	3,5

Однородное напряженное состояние, создаваемое при одноосном растяжении образцов полиамида, наиболее опасно по сравнению с неоднородным напряжённым состоянием, возникающим при изгибе.

Модуль упругости полиамида ПА6 – 21ОКС с различным содержанием оборотных отходов несколько выше (до 5%), чем для первичного полиамида и практически не зависит от количества используемых при изготовлении оборотных отходов (за исключением данных для вторичного полиамида при испытании на изгиб).

Снижение прочностных характеристик полиамида с 40%-м содержанием оборотных отходов не превышало 7%, а с 50%-м содержанием отходов – 12% по сравнению с характеристиками первичного полиамида.

Некоторые прочностные характеристики вторичного полиамида на 25% ниже характеристик первичного полиамида.

Следует отметить практически одинаковые значения коэффициента вариации средних значений механических характеристик исследуемых модификаций ПА6 - 21ОКС при всех видах испытаний.

Значения механических характеристик при испытании на одноосное сжатие ($\sigma_{ис}$ – предел прочности; $\varepsilon_{ис}$ – относительная продольная деформация, соответствующая этому пределу; E_c – модуль упругости) при сжатии полиамида представлены в таблице 4.

При анализе характеристик выяснилось, что предел пропорциональности полиамида при сжатии составлял значения, равные семидесяти процентам от предела прочности. Модуль упругости полиамида при сжатии в среднем на 13 % больше, предел прочности на 8 % меньше, а деформации при одноосном сжатии – в два раза больше, чем соответствующие характеристики при одноосном растяжении. Наблюдается снижение кратковременной прочности, что можно объяснить тем, что образцы были изготовлены не литьём под давлением, а посредством механической обработки.

Таблица 4

Механические характеристики полиамида ПА6 - 21ОКС (вторая партия образцов) при сжатии в зависимости от содержания оборотных отходов

Содержание отходов, %	$\sigma_{ис}$, МПа	$\varepsilon_{ис}$	E_c , МПа
20	100,5	0,102	2340
30	105,4	0,136	2230
40	108,0	0,146	2300
50	104,4	0,146	2330

Для оценки долговечности исследуемых полиамидов проводились испытания на длительную прочность (статическую усталость) при одноосном растяжении образцов второй партии полиамида ПА6 - 21ОКС. В ходе опытов поддерживалась постоянная заданная нагрузка и температура ($T=20\pm 2^\circ\text{C}$). Учитывая то, что при нагружении изменение поперечного сечения образцов не превышало 2-3%, обработку результатов опытов производили в условных напряжениях. При статической обработке по способу наименьших квадратов экспериментальные данные по длительной прочности модификации полиамида вто-

рой партии аппроксимированы уравнениями вида $\sigma=A-B \lg \tau$, где σ – растягивающие напряжения, МПа; τ – время, с. Результаты обработки данных представлены в табл. 5.

Анализ результатов табл. 5 позволяет утверждать, что при высоких напряжениях и соответственно малых временах выдержки под нагрузкой, долговечность полиамида ПА6 - 21ОКС с различным содержанием оборотных отходов различается более существенно, чем при малых напряжениях (в исследованном диапазоне долговечности 10^6 с.), где разница в долговечности статистически не подтверждается. Следует отметить, что несколько образцов полиамида с содержанием оборотных отходов более 40% имели меньшую длительную прочность, чем образцы в генеральной выборке.

Таблица 5

Результаты обработки данных испытаний на длительную прочность полиамида ПА6 - 21ОКС с различным содержанием оборотных отходов

Содержание отходов, %	Число образцов		Коэффициенты уравнения длительной прочности	
	разрушенных	в выборке	A, МПа	B, МПа
0	11	11	126,6	8,0
20	8	8	124,9	8,2
30	9	9	116,4	6,6
40	9	8	114,9	6,2
50	12	9	113,0	5,9
75	8	7	120,4	6,2
100	7	5	106,9	5,2

Представляют интерес экспериментальные данные по циклической усталости стеклонаполненного полиамида с содержанием оборотных отходов 30%, 40%, 50%. До испытаний образцы хранились в отапливаемом складском помещении в течение 6 месяцев. Частота нагружения в условиях одноосного растяжения составляла 5-7 Гц при коэффициенте асимметрии синусоидального цикла $R=0,5$. В ходе опытов поддерживалась заданная величина условных напряжений. Статистической обработкой опытных данных по способу наименьших квадратов получены кривые усталости $\sigma_{max}=C-D \lg \tau$, отвечающие 50% вероятности разрушения. В зависимости от процентного содержания оборотных отходов в материале 30%, 40%, 50% получены значения (в МПа): $C_1=86,6$; $D_1= 5,2$; $C_2=77,5$; $D_2=4,6$; $C_3=97,4$ и $D_3= 9,0$. Усталостная циклическая прочность модификации полиамида ПА6 - 21ОКС ниже длительной статической прочности.

Выводы. В ходе проведенной работы были исследованы механические характеристики полиамидов, содержащих разное количество оборотных (технологических) отходов, проведен их анализ, дана оценка усталостной циклической прочности. Данные исследования показывают, что стеклонаполненный полиамид ПА6 - 21ОКС с содержанием технологических оборотных отходов имеет достаточную конструкционную прочность и может быть использован для крепежа в противомембранной конструкции. В этом случае решается также проблема использования отходов.

Литература

1. Гладштейн, О. И. Особенности применения геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве / О. И. Гладштейн // Гидротехника. – 2009. – № 1 (14). – С. 69–70.
2. Огородов, Л. И. Технология получения и механические характеристики стеклонаполненного полиамида с различным содержанием оборотных отходов / Л. И. Огородов, А. И. Алексейцев // Конструкции из композиционных материалов. – 1994. – № 3. – С. 15–22.
3. Огородов, Л. И. Длительная прочность пленочных полимерных материалов и расчет ресурса противofильтрационных конструкций / Л. И. Огородов, В. А. Шапкина // Вузовская наука – региону:

материалы XV Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 28 февраля 2017 г. / [отв. ред. Л. И. Соколов]. – Вологда, 2017. – С. 36–38.

4. Огородов, Л. И. Перспективные геосинтетические материалы для противofильтрационных конструкций и их механические характеристики / Л. И. Огородов, В. А. Шапкина // Вузовская наука – региону: материалы XVI Всерос. научн. конф. с междунар. участием. – Вологда, 2018. – С. 45–47.

5. Шапкина, В. А. Механические характеристики полиэтилена низкой плотности, используемого в противofильтрационных конструкциях / В. А. Шапкина, Л. И. Огородов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 10–11. – С. 112–119.

L.I. Ogorodov, V.A. Shapkina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Vologda State University

MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS-FILLED POLYAMIDE, ADVANCED FOR USAGE IN IMPERVIOUS CONSTRUCTIONS

Experimental data of tests of glass-filled polyamide and polyamide with different content of technological waste at axial tension, bending, compression are presented. The comparison of mechanical properties is given. Fatigue strength of glass-filled polyamide and polyamide with different content of technological waste is estimated.

Mechanical properties, glass-filled polyamide, polyamide with different content of technological waste, impervious constructions.