

По нашему мнению, перспективным вариантом решения проблемы «мусорного острова» [1] является применение мобильных установок, работающих на водороде, полученном при переработки полимерных отходов. Если электрическая мощность блока питания массой 10 кг составляет 1 кВт, то масса блока питания в 2,5 т обеспечит мощность 250 кВт. Блок питания такой массы можно расположить на автомобиле грузоподъёмностью 5 т. Расчёты показали, что производительность такой мобильной установки за 1 ч обеспечит для случая  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  производство 8 кг водорода из 55 кг полиэтилена, 5,5 кг водорода – из 125 кг ПВХ, 8 кг водорода – из 163 кг ПЭТ. Для сравнения, из [7] известно, что производительность электролизного водорода (как наиболее конкурентоспособного способа производства водорода [2]) варьируется от 9 кг/ч на установке с твёрдым полимерным электролитом до 45 кг/ч с водно-щелочным электролитом, при этом на выработку одного килограмма электролизного водорода в среднем затрачивается 204 МДж энергии.

Таким образом, производительность мобильных установок по переработке полимерных отходов с получением водорода сравнима с производительностью водорода традиционным электролизным способом на установке с твёрдым полимерным электролитом, а энергетические затраты при этом в 1,5 – 2 раза ниже.

Ещё большую конкурентоспособность предлагаемого способа обеспечивает получение из полимерных отходов ликвидной продукции и решение экологических проблем, связанных с захоронением этих полимерных отходов.

#### Литература

1. Латышенко К.П., Гарелина С.А. Экологические и энергетические проблемы современности // Известия МГМУ «МАМИ», № 3 (17), 2013, т. 2. – С. 55 – 62.
2. Латышенко К.П., Гарелина С.А. Плазмохимическая технология – основа производства водорода из полимерных отходов // Известия МГМУ «МАМИ», № 3 (17), 2013, т. 2. – С. 63 – 69.
3. Латышенко К.П., Гарелина С.А. Плазмохимический реактор по переработке полимерных отходов в водород и другую ликвидную продукцию // Известия МГМУ «МАМИ», № 1 (19), 2014, т. 3. – С. 10 – 17.
4. Практическое руководство по повышению энергоэффективности муниципальных систем/Под ред. А.С. Копеца, Р.В. Кишканя. – Донецк, 2007. – 204 с.
5. Гривнак, Л.Н. Экологические основы природоиспользования / Л.Н. Гривнак. – М.: 2002. – 66 с.
6. Гарелина С.А., Климовский И.И. Аналитическое представление констант равновесия, скоростей термической диссоциации и трёхчастичной ассоциации для двухатомных молекул и радикалов в диапазоне температур от 500 до 5000 К // Альтернативная энергетика и экология. – 2007, № 5 (49). – С. 73 – 85.
7. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В. Водород для производства энергии: проблемы и перспективы // Альтернативная энергетика экология. – 2006. № 8 (40). – С. 72 – 90.

#### **Экспериментальное исследование пластмасс на выносливость**

к.т.н. доц. Фролов В.Н., к.т.н. доц. Щербаков Ю.М., к.т.н. доц. Скачков Ю.А.

Университет машиностроения  
8(499)267-16-73

*Аннотация.* Проведены экспериментальные исследования ненаполненных поликарбонатов, а также наполненных поликарбоната и полиамида на выносливость при поперечном изгибе в режиме заданных циклических деформаций. Экспериментально установлено влияние технологического зазора на погрешность определения усталостных свойств. Исследованы зависимости напряжений от деформаций при поперечном изгибе и возможность описания их линейным, а также сте-

пенным законами. Получены пределы выносливости по деформациям и напряжениям исследованных пластмасс.

*Ключевые слова:* экспериментальное исследование, испытания пластмасс, усталостная деформация, усталостная прочность, выносливость

В настоящей работе приводится описание апробации метода испытаний пластмасс на выносливость в режиме заданной деформации, позволяющего получать предельные значения не только деформаций, но и напряжений, используя при этом результаты дополнительных испытаний в квазистатическом режиме при “мгновенном нагружении” [1].

### Образцы, материалы и условия испытаний на выносливость

В таблице 1 приведены материалы, использовавшиеся для испытаний на выносливость: поликарбонаты марок PC-007, Udel и Makrolon – ненаполненные; поликарбонат марки ПК-М2, наполненный фторопластом-42 и двуокисью титана; полиамид ПА610-Л-Г5 наполненный 5% графита. Использовались стандартные образцы по ГОСТ 4647-69 в виде призм 3-х типов. Размеры образцов и условия испытаний приведены в таблице 2. Образцы изготавливались из термопластов методом литья под давлением.

Таблица 1

### Материалы для испытаний на выносливость

Материал, марка	Тип образца
Поликарбонат (отеч.) PC-007	1, 2, 3
Поликарбонат (импортн.) Udel	2
Поликарбонат (импортн.) Makrolon	2
Поликарбонат (с фторопластом) ПК-М2	2
Полиамид (с графитом) ПА610-Л-Г5	2

Таблица 2

### Размеры образцов и условия испытаний

Тип образца	Размеры образцов			Условия испытаний				
	L мм	s мм	B мм	T °C	$\nu$ Гц	$\ell$ мм	$\delta$ мм	D мм
1	118	4	10	22	5	45	1,9	8
2	80	4	10	22	5	25	2,8	8
3	50	4	6	22	5	22	1,4	8

### Оборудование для проведения испытаний

Для проведения испытаний на выносливость в режиме заданных деформаций использовали прибор типа AS-110, изготовленный в Венгрии. На этом приборе возвратно-поступательные перемещения подвижной траверсы с размещенными на ней зажимами осуществляются от кривошипно-шатунного механизма. Предусмотрена возможность регулировки амплитуды колебаний подвижной траверсы. В дополнение к прибору была изготовлена оснастка, с помощью которой был реализован режим испытаний, схематично показанный на рисунке 1 работы [1]. На подвижной траверсе размещались две пары подвижных штифтов. Расстояние штифта одной из пар в его крайних положениях цикла от горизонтальной плоскости корпуса прибора измерялось с помощью рейсмуса с погрешностью  $\pm 0,05$  мм.

Для определения зависимости напряжений от деформаций в квазистатическом режиме “мгновенного нагружения” использовался пластометр фирмы Toyoseiki (Япония). На этом приборе квазистатическое “мгновенное” нагружение призматического образца осуществлялось по схеме основных испытаний на выносливость, т.е. при поперечном изгибе. Образец устанавливали на рабочем столе пластометра на опоры. Посередине образца через рычажную

систему и шток пластометра прикладывали фиксированную нагрузку  $P$  и измеряли индикатором часового типа прогиб  $v_{\max}$ . Значения всех фиксированных нагрузок задавались в диапазоне от 0 до 50 Н. По прогибам  $v_{\max}$  рассчитывали деформации  $\varepsilon_{\max}$ , а по нагрузке  $P$  - напряжения  $\sigma_{\max}$ , возникающие при поперечном изгибе.

#### Описание общей последовательности проведения испытаний

Испытания осуществлялись в следующей последовательности:

– проводилась серия испытаний на выносливость на образцах одного типа для данного материала с вариацией амплитуды циклических деформаций, на основе которой определялся прогиб в центральной части образца, рассчитывалась и строилась зависимость  $\varepsilon_{\max} = f(\lg N_p)$ ;

– проводилась серия тарировочных испытаний, в процессе которой варьировалась величина силы, приложенной к образцу в квазистатическом режиме “мгновенной” деформации и определялся прогиб в центральной части образца. По этим результатам рассчитывалась зависимость  $\sigma_{\max} = f_2(\varepsilon_{\max})$ .

– по зависимости  $\varepsilon_{\max} = f_1(\lg N_p)$ , полученной при циклических испытаниях на выносливость, и зависимости  $\sigma_{\max} = f_2(\varepsilon_{\max})$ , полученной из тарировочных испытаний, определялась зависимость  $\sigma_{\max} = f_3(\lg N_p)$ , по которой находилась оценочная величина предела выносливости.

#### Описание тарировочных испытаний

Проводилось два вида тарировочных испытаний. В испытаниях первого вида изучалось влияние продолжительности циклического испытания на секущий модуль материала  $E_m$ . Целью испытаний второго вида было определение зависимости прогиба  $v_{\max}$  образца от поперечной силы  $P$  при квазистатических испытаниях с “мгновенным” нагружением и расчёт по этой зависимости напряжений  $\sigma_{\max}$  от деформаций  $\varepsilon_{\max}$ .

Время нагружения при тарировочных испытаниях не превышало 1 секунды. Прогиб измеряли индикатором часового типа пластометра с ценой деления 0,01 мм. При испытаниях первого вида образец “тренировали” в динамическом режиме на приборе типа AS-110 разное время. После этого образец устанавливали на рабочий стол пластометра и проводили определение прогиба с последующим расчётом мгновенного модуля упругости  $E_m$ . В таблице 3 показано влияние на модуль  $E_m$  продолжительности “тренировки” при прогибе  $v_{\max}$ , соответствующем базе  $10^5$  циклов. Продолжительность “тренировки” практически не оказывает существенного влияния на величину модуля упругости  $E_m$ , поэтому в последующих опытах использовался интервал времени “тренировки”, равный 1 мин.

Таблица 3

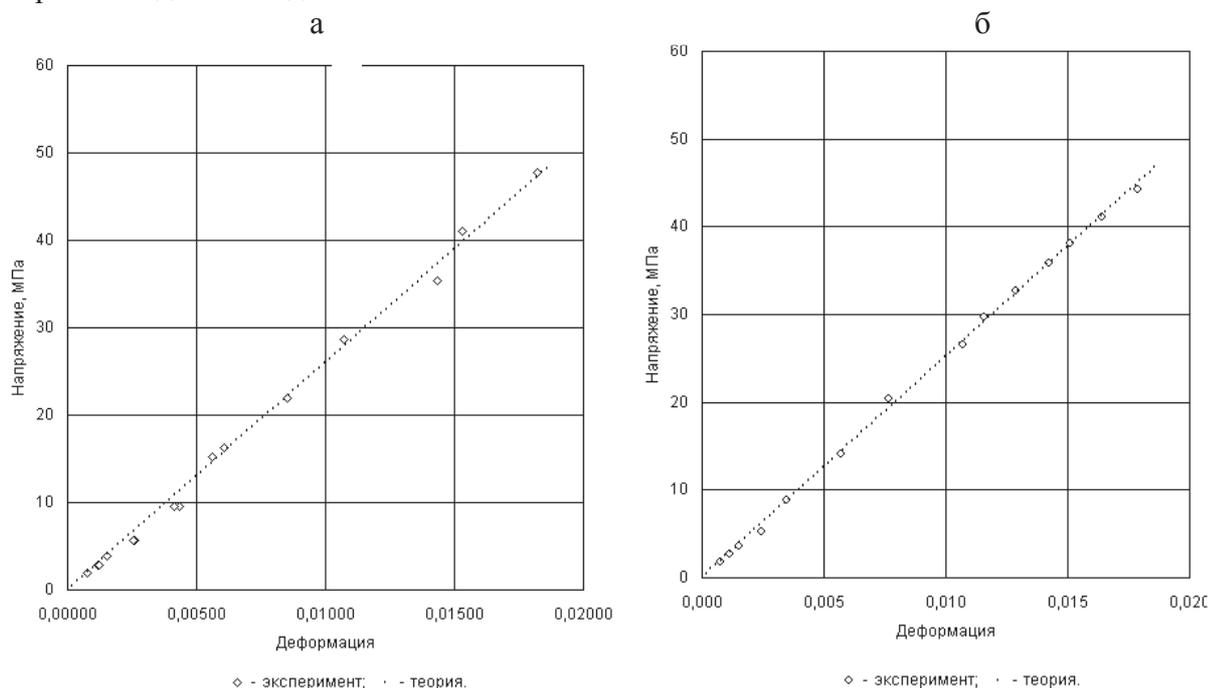
#### Влияние продолжительности “тренировки” образца на “мгновенный модуль” упругости $E_m$ при $P = 3$ кгс

Материал	Максимальный прогиб	Время “тренировки”	$E_m$
	мм		МПа
PC-007	1,85	1	2673,3
		60	2634,0
		240	2634,0
Udel	1,40	1	3338,5
		540	3418,0

На рисунке 1 представлены экспериментальные зависимости  $\sigma_{\max} = f(\varepsilon_{\max})$  для ненаполненных поликарбонатов Udel (а) и Makrolon (б), полученные в режиме “мгновенного”

нагрузки, а также их аппроксимация законом Гука. При построении экспериментального графика зависимости  $\sigma_{\max} = f(\varepsilon_{\max})$  деформации  $\varepsilon_{\max}$  рассчитывали по уравнению (6) работы [1], а напряжения  $\sigma_{\max}$  – по уравнению (5). Поликарбонаты Udel и Makrolon хорошо описываются законом Гука, в то время как отечественные поликарбонаты РС-007 и ПК-М2, а также полиамид ПА 610-Л-Г5 дают отклонение от линейного закона.

На рисунке 2 показаны экспериментальные зависимости  $\sigma_{\max} = f(\varepsilon_{\max})$  для ненаполненного поликарбоната РС-007 (а) и для наполненного полиамида ПА 610-Л-Г-5 (б), а также их аппроксимации на основе степенного закона. При расчёте напряжений  $\sigma_{\max}$  в этом случае использовалось уравнение (3) работы [1], а при расчёте деформаций  $\varepsilon_{\max}$  – уравнение (4) работы [1]. Во всех случаях разброс экспериментальных точек не превышает погрешность эксперимента для исследованных пластмасс.



**Рисунок 1. Экспериментальные зависимости напряжений  $\sigma_{\max}$  от деформаций  $\varepsilon_{\max}$  для ненаполненных поликарбонатов и их аппроксимация законом Гука**

Обработка показанных выше результатов по линейной и нелинейной модели проводилась с использованием метода наименьших квадратов [2]. Определялись соответствующие коэффициенты при минимизации функции, задаваемой в виде:

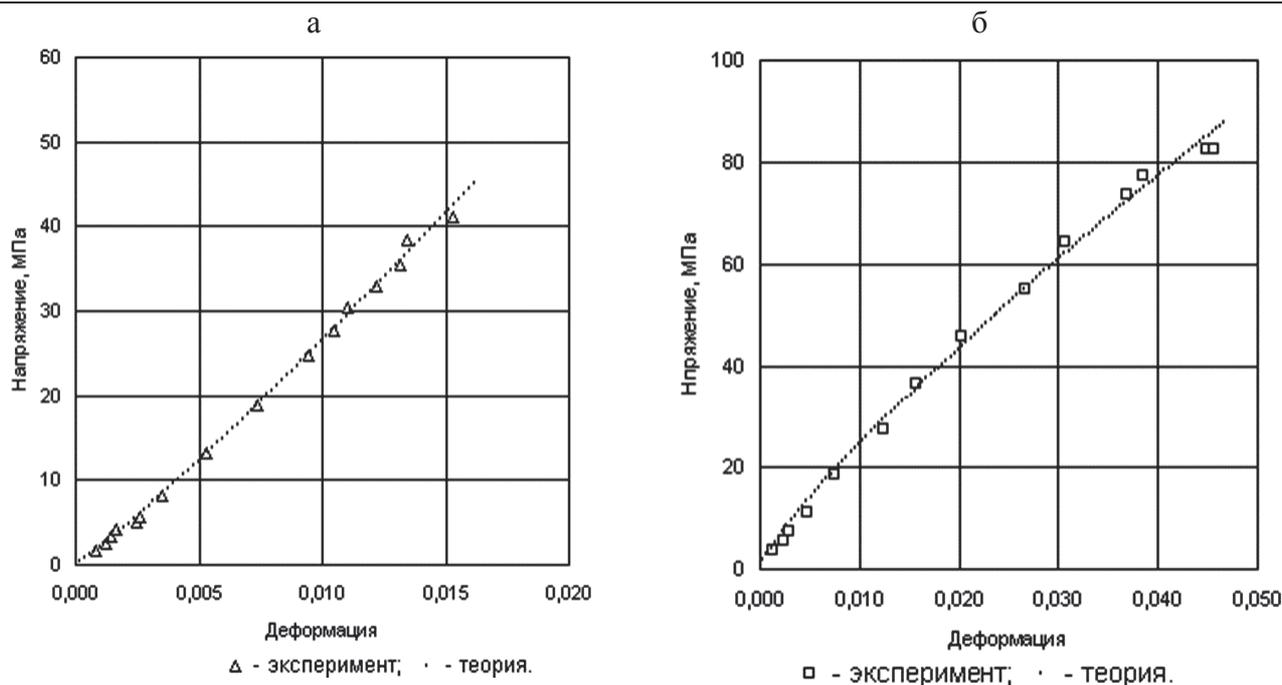
$$F = \sum (\max \sigma_i - \max \hat{\sigma}_i)^2 .$$

Для линейной модели принимали  $\max \sigma_i = E \cdot \max \hat{\varepsilon}_i$ , а для нелинейной модели –  $\max \sigma_i = c \cdot \max \hat{\varepsilon}_i^n$ . Значения  $\max \hat{\sigma}_i$  и  $\max \hat{\varepsilon}_i$  определяли по уравнениям (3) и (4) работы [1], записанным в виде

$$\max \hat{\sigma}_i = \frac{(n+2)P_i \ell}{bs^2} ,$$

$$\max \hat{\varepsilon}_i = \max v_i \cdot \frac{(2n+1)s}{2n\ell^2} .$$

Характеристики  $E$ ,  $c$ ,  $n$  закона Гука, степенного закона, а также среднеквадратичные отклонения  $s_\Gamma$ ,  $s_c$  экспериментальных и расчётных напряжений представлены в таблице 4.



**Рисунок 2. Экспериментальные зависимости напряжений  $\sigma_{\max}$  от деформаций  $\epsilon_{\max}$  и их аппроксимация степенным законом**

**Определение влияния технологического зазора на выносливость пластмасс**

Результаты испытаний на выносливость были получены в виде зависимости между задаваемой величиной максимального прогиба  $v_{\max}$  и числом циклов  $N_p$ , которое образец проработал до фактического разрушения. Число циклов  $N_p$  рассчитывалось по формуле  $N_p = \tau_p f$ , где  $\tau_p$  – время от начала испытания до разрушения образца,  $f$  – частота колебаний.

Влияние технологического зазора  $\delta$  на выносливость пластмасс экспериментально изучалось на образцах разных размеров при различных значениях параметра  $2l$  (расстояние между опорами). Величины технологического зазора  $\delta$  приведены в таблице 2.

Таблица 4

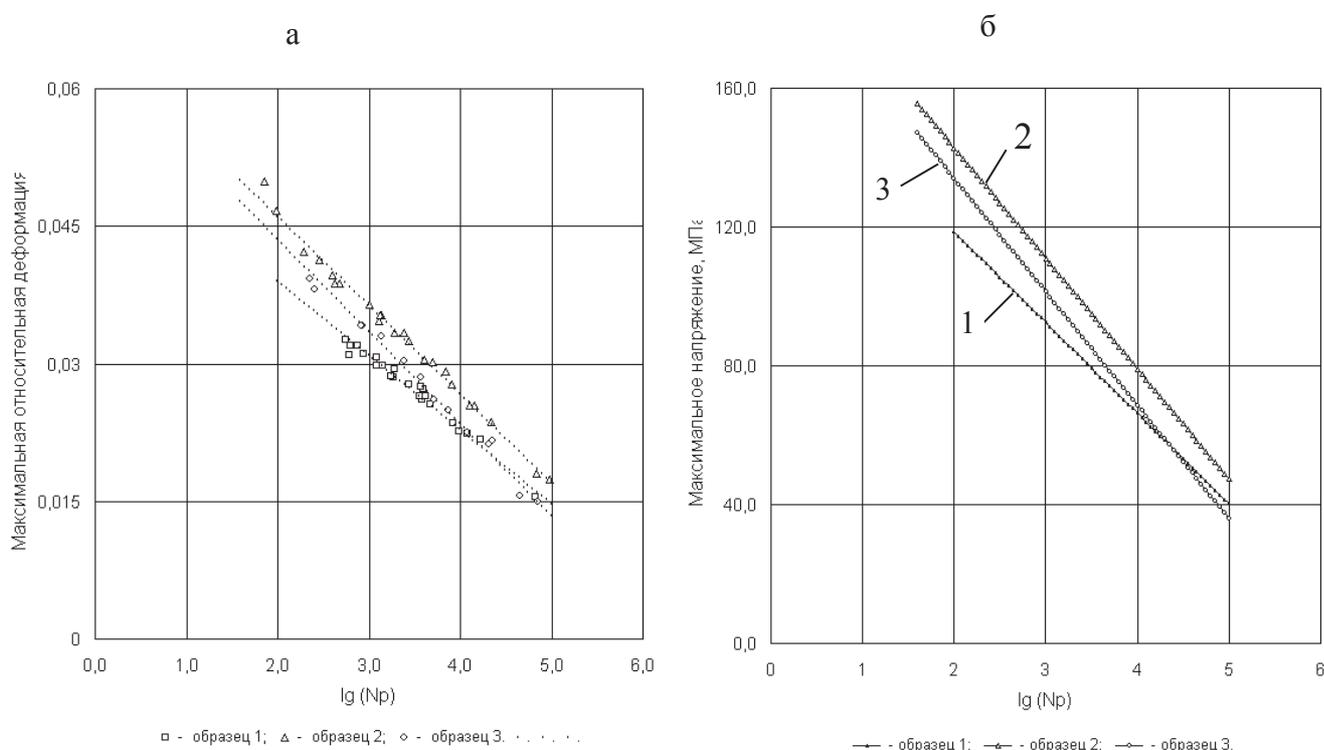
**Константы линейного, степенного закона и среднеквадратичные отклонения при описании зависимости  $\sigma_{\max} = f(\epsilon_{\max})$**

Материал	Закон Гука		Степенной закон		
	Е МПа	$s_r$	с МПа	n	$s_c$
PC-007	2505,7	0,193	4370,3	1,1092	0,047
Udel	2593,1	0,094	3112,0	1,0364	0,066
Makrolon	2513,4	0,067	2405,3	0,9915	0,059
ПК-М2	2591,8	0,208	5753,3	1,1550	0,087
ПА 610-Л-Г5	2233,4	0,157	1107,1	0,8277	0,126

На рисунке 3 показаны зависимости деформаций  $\epsilon_{\max}$  и напряжений  $\sigma_{\max}$  от  $lgN_p$  для поликарбоната PC-007 (производства ОАО «Казаньоргсинтез») при разных зазорах  $\delta$ . На рисунке 3а даны экспериментальные зависимости  $\epsilon_{\max}$  от  $lgN_p$ . Фигурными знаками обо-

значены экспериментальные значения  $\varepsilon_{\max}$ , а точечные линии – результат расчета по линейным аппроксимирующим зависимостям:

$$\varepsilon_{\max} = a \cdot \lg N_p + b. \quad (1)$$



**Рисунок 3. Зависимости усталостных деформаций  $\varepsilon_{\max}$  и напряжений  $\sigma_{\max}$  от  $\lg N_p$  для поликарбоната PC-007, полученные на образцах 3-х типов при разных зазорах  $\delta$**

Экспериментальные точки в полулогарифмических координатах хорошо группируются возле прямых, положения которых были рассчитаны по методу наименьших квадратов. Параметры  $a$  и  $b$  рассчитывали по данным эксперимента на выносливость для нелинейно-упругой модели. Экспериментальные значения деформаций  $\varepsilon_{\max}$  были рассчитаны по данным прогиба  $v_{\max}$  с привлечением нелинейно-упругой модели. Аппроксимирующие значения напряжений определяли по формуле

$$\sigma_{\max} = c \cdot [a \cdot \lg N_p + b]^n, \quad (2)$$

где параметры  $c$  и  $n$  были рассчитаны на основе данных предварительного эксперимента для нелинейно-упругой модели.

На рисунке 3б показаны аппроксимирующие зависимости  $\sigma_{\max} = f(\lg N_p)$ , в которых  $\varepsilon_{\max}$  рассчитывались по уравнению (2).

Аналог уравнения (2) для линейной модели имеет вид

$$\sigma_{\max} = E \cdot (a \lg N_p + b), \quad (3)$$

где  $E$  – модуль Юнга; здесь параметры  $a$ ,  $b$  определялись для линейно-упругой модели, причём деформация  $\varepsilon_{\max}$  рассчитывалась по формуле (6) работы [1].

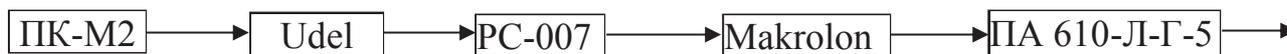
Для образцов типов 1 и 3 экспериментальные зависимости близки в области малых деформаций, для реализации которых использовались сравнительно небольшие зазоры  $\delta$ , в то время как для образца типа 2, с графиком экспериментальной зависимости расположен-

ным несколько выше, использовался максимальный зазор (таблица 2, рисунок 4). Для уменьшения погрешности определения усталостной прочности пластмасс необходимо минимизировать величину технологического зазора  $\delta$ , обеспечив при этом отсутствие зажима концевых участков образца в процессе проведения испытаний.

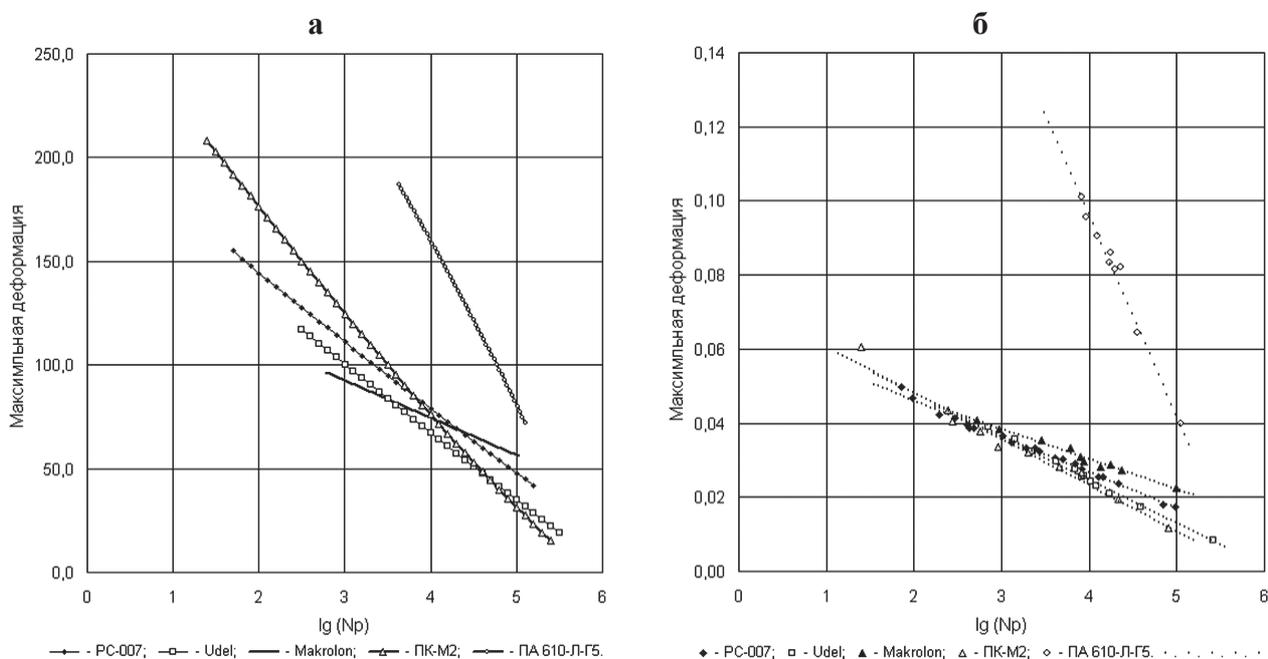
### Сравнение пластмасс по результатам испытаний на выносливость

Для сравнения пластмасс при испытаниях на выносливость рассмотрим данные, полученные на образцах одинакового размера при зазоре 2,8 мм. На рисунке 4 показаны результаты испытаний на выносливость поликарбонатов отечественного и импортного производства, а также полиамида отечественного производства. На рисунке 4а представлены экспериментальные зависимости  $\varepsilon_{\max}$  от  $\lg N_p$  для исследованных пластмасс, а также аппроксимирующие прямые, полученные по формуле (1). На рисунке 4б показаны аппроксимирующие зависимости усталостной прочности  $\sigma_{\max}$  от  $\lg N_p$ , полученные по формуле (2). Расчёты деформаций  $\varepsilon_{\max}$  и напряжений  $\sigma_{\max}$  в обоих случаях были выполнены по нелинейно-упругой модели материала. На основе регрессионного анализа были рассчитаны коэффициенты  $a$ ,  $b$  и среднеквадратичные отклонения  $s_\varepsilon$  и  $s_\sigma$ . Аналогично те же экспериментальные данные были обработаны по линейно-упругой модели. В этом случае для расчёта напряжений вместо степенной зависимости (2) использовалась линейная зависимость (уравнение (3)).

Полученные данные позволяют провести ранжировку полимеров по предельным усталостным свойствам. В данном случае по предельным напряжениям  $\sigma_{\max}$  и деформациям  $\varepsilon_{\max}$  последовательность одна и та же:



Увеличение предельных усталостных свойств ряда происходит в направлении стрелок.



**Рисунок 4. Зависимости усталостных деформаций и напряжений от  $\lg N_p$  для исследованных пластмасс**

### Выводы

1. Установлено, что зависимость усталостной деформации  $\varepsilon_{\max}$  при разрушении от  $\lg(Np)$  (при условиях испытаний:  $\nu = 5$  Гц и  $T = T_{\text{комн}}$ ) для всех исследованных пластмасс имеет линейный характер, что позволяет использовать для аппроксимации простые формулы.
2. Погрешность эксперимента может быть минимизирована определением перед каждым опытом по уравнению (11) работы [1] величины минимального технологического зазора, не вызывающего зажим концевых зон образца, и установкой этого зазора на оборудовании.
3. Пределы выносливости по деформациям для поликарбонатов, рассчитанные по линейно-упругой и нелинейно-упругой моделям, различаются незначительно; а для полиамида ПА610-Л-Г5 использование линейно-упругой модели даёт погрешность 6,4%.
4. Пределы выносливости по напряжениям для поликарбонатов Udel и Makrolon при использовании линейно-упругой и нелинейно-упругой модели практически одинаковы, что указывает на применимость линейно-упругой модели к этим материалам. Поликарбонат ПК-М2 имеет слабо выраженные нелинейные свойства, а в поликарбонате РС-007 и полиамиде ПА610-Л-Г5 нелинейность проявляется более сильно и при использовании линейно-упругой модели погрешность достигает 9,4%.

### Литература

1. Щербаков Ю.М., Фролов В.Н. Метод испытаний пластмасс на выносливость // Известия МГТУ «МАМИ» № 1(19), 2014, т. 3.
2. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надёжности. - М.: Советское радио, 1962, 552 с.

### **Экологические аспекты перевода грузового транспорта города Москвы на более высокие стандарты топлива**

Д.т.н. проф. Графкина М.В., к.х.н. доц. Сотникова Е.В., к.т.н. Свиридова Е.Ю.,  
Широкова А.Н., Федорина А.И.  
Университет машиностроения  
8 (499) 2671605  
esotami@mail.ru

*Аннотация:* Проведен экологический мониторинг атмосферного воздуха вблизи автомагистралей г. Москвы. Дана оценка уровня загрязнения атмосферы и установлена его зависимость от дорожного трафика. Рассмотрены перспективы перевода грузового транспорта города на более высокие экологические стандарты. Даны рекомендации по снижению воздействия автотранспорта на городскую среду.

*Ключевые слова:* автомобильный транспорт, экологический мониторинг, выбросы автотранспорта, автомагистраль, комплексный индекс загрязнения атмосферы, дорожный трафик, экологические стандарты

Специфика загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом по сравнению с промышленными выбросами проявляется, прежде всего, в низком расположении источников загрязнения, в результате чего отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания скапливаются в зоне дыхания человека и слабее рассеиваются ветром. Близость автомагистралей к зонам жилой застройки создает серьёзную угрозу здоровью населения. [1] Основными причинами, влияющими на уровень загрязнения городской среды выбросами автотранспорта, являются ежегодное увеличение численности автомобильного парка, высокий уровень загрузки городских магистралей, низкие экологические характеристики транспортных средств и др.. Перевод автотранспорта на более высокие экологические стандарты топлива позволит улучшить экологическую обстановку в городе.