

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарева Н.В., Лихачева Н.Н., Ткачик З.А. Использование пластмассовых отходов за рубежом. – Пластические массы, 2002. № 5. – С. 10-15.
2. К. Капур, Л. Ламберсон. Надежность и проектирование систем. – М.: Изд-во Мир, 1980. – 604с.
3. Реутов Ю.И. Материаловедческое обеспечение надежности конструкций и изделий из полимерных строительных материалов. – Строительные материалы, 1994. № 2. С.3-7.

УДК 678.620.1

А.И. РЕУТОВ, А.А. СИДОРЕНКО, И.С. ФИЛАТОВ

ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Рассмотрено старение полимерных материалов на основе полипропилена в условиях умеренного и холодного климатов. Определены статистические характеристики прочностных и деформационных свойств материалов. Предложен метод оценки вероятности безотказной работы полимерного материала на основе распределений случайных величин: относительной деформации при разрыве и относительной деформации при пределе текучести.

Прогнозирование срока службы изделий из полимерных материалов проводится на основе изучения механизма физико-химических процессов протекающих в материале при старении, моделирования условий эксплуатации и проведении ускоренного старения в лабораторных условиях и оценки изменения эксплуатационных свойств методами экстраполяции [1,2].

Следует отметить, что отсутствует единый подход к выбору параметра, по изменению которого проводится оценка климатической устойчивости материала. Кроме того, не установлены и предельные значения исследуемых параметров.

Известно, что одним из наиболее чувствительных к старению параметров является относительная деформация при разрыве. При достижении ею значения относительной деформации при пределе текучести, полимерный материал становится хрупким, то есть наступает потеря его работоспособности.

Для оценки климатической устойчивости предложен относительный показатель $\alpha(t)$

$$\alpha(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_T}{\varepsilon_0 - \varepsilon_T}, \quad (1)$$

где ε_0 , $\varepsilon(t)$ - исходное и текущее значение относительной деформации при разрыве; ε_T - относительная деформация при пределе текучести.

Относительный показатель климатической устойчивости не зависит от исходного и предельного значения исследуемого параметра материала, а также от его типа и изменяется от 1 до 0. Относительный показатель климатической устойчивости позволяет проводить сравнение климатической устойчивости различных полимерных материалов и определять их время сохраняемости из решения уравнения $\alpha(t) = 0$ [2].

Особенностью полимерных композиционных материалов является значительное рассеяние прочностных и деформационных характеристик в исходном состоянии, а также при старении. Среднее квадратическое отклонение характеризующие меру рассеяния исследуемых параметров, существенно изменяются в процессе старения.

В настоящей работе изучалось старение материалов на основе полипропилена в условиях умеренного (г. Томск) и холодного климата (г. Якутск).

Испытанию подвергались образцы полимерных материалов на основе полипропилена:

- блоксополимер пропилен с этиленом 22007-16, бесцветный, 22015-16, бесцветный ГОСТ 26996-86;
- морозостойкий полипропилен 15-04, черный и 15-06, черный, ТУ 6-05-1931-82;
- морозостойкий полипропилен 15-04, бесцветный и 15-06, бесцветный ТУ 6-05-1931-82.
- полипропилен (ПП) 21060-16, бесцветный ГОСТ 26996-86.

Деформационно-прочностные характеристики определялись на образцах № 5 по ГОСТ 11262-80 на разрывной машине для испытания пластмасс 2166 Р-5.

Все образцы изготавливались методом литья под давлением на термопластавтомате марки KuASY 260/100 .

На рис.1 показана зависимость среднего значения и среднего квадратического отклонения максимальной прочности при растяжении от времени старения для термопластов на основе полипропилена в условиях холодного климата. В исходном состоянии максимальная прочность при растяжении материалов на основе полипропилена соответствует пределу текучести. Экспонирование образцов материала проводилось на климатической площадке в районе г. Якутска. Видно, что для морозостойкого полипропилена МПП 15-04, черного в течение года экспонирования прочность практически не изменилась, тогда как для остальных материалов прочность уменьшился до 30 % от исходного значения. Среднее квадратическое отклонение максимальной прочности при растяжении вначале с увеличением времени старения возрастает, а затем после достижения предельного значения снижается. Модуль упругости при растяжении за этот же период изменяется незначительно. Так для морозостойкого полипропилена модуль упругости изменяется от 1100 МПа до 920 МПа, а для блок-сополимера пропилен с этиленом с 1170 МПа до 1390 МПа.

Детерминированные модели оценки климатической устойчивости полимерных материалов и времени сохраняемости не позволяют ответить на вопрос – какое время и с какой вероятностью будет обеспечена работоспособность материала.

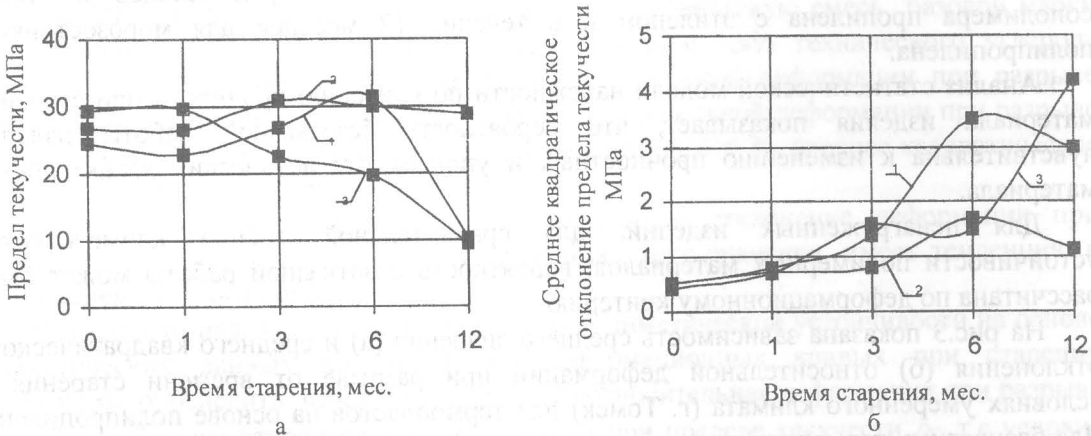


Рис. 1. Зависимость среднего значения (а) и среднего квадратического отклонения (б) предела текучести от времени старения для образцов с площадью поперечного сечения 2х5 мм² (г. Якутск) для материалов на основе полипропилена: 1 –МПП 15-04, бесцветный; 2 - МПП 15-04, черный; 3 – БСПЭ 22007-16.

Для оценки прочностной надежности необходимо знать распределение случайных величин – максимального эквивалентного напряжения и прочности. Известно, что распределение случайных величин напряжения и прочности для элементов конструкций из полимерных материалов может быть описано нормальным законом [3].

Зная эти распределение случайных величин, можно определить вероятность безотказной работы элемента по критерию прочности [4].

$$R = 1 - \Phi \left[- \frac{\bar{\sigma}_{pm} - \bar{\sigma}_{эkv}}{\sqrt{S_{\sigma_{pm}}^2 + S_{\sigma_{эkv}}^2}} \right], \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_{pm}$ – среднее значение максимальной прочности при растяжении; $\bar{\sigma}_{эkv}$ – среднее значение эквивалентного напряжения; $S_{\sigma_{pm}}$ – среднее квадратическое отклонение, эквивалентного напряжения; $S_{\sigma_{эkv}}$ – среднее квадратическое отклонение максимальной прочности при растяжении.

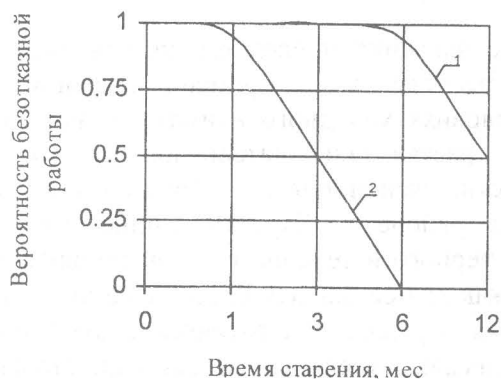


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы от времени старения термопластов на основе полипропилена: 1 – МПП 15-04, бесцветный; 2 – БСПЭ 22007-16 в условиях холодного климата

На рис. 2 показана зависимость вероятности безотказной работы от времени старения термопластов на основе полипропилена в условиях холодного климата. Вероятность безотказной работы рассчитана для случая одноосного напряженного состояния при исходном коэффициенте безопасности равном 1,5 для обоих материалов. Действующие напряжения определялись для постоянной деформации при изменении при старении модуля упругости.

Из графика видно, что вероятность безотказной работы для рассмотренной модели существенно зависит от времени старения, особенно для слабо

стабилизированных бесцветных термопластов. Для исследованных материалов вероятность безотказной работы падает до 0,5 в течение трех месяцев для блок-сополимера пропилен с этиленом и в течение 12 месяцев для морозостойкого полипропилена.

Анализ статистической модели надежности по критерию прочности при старении материала изделия показывает, что вероятность безотказной работы изделий чувствительна к изменению прочностных и упругих статистических характеристик материала.

Для ненагруженных изделий, для сравнительной оценки климатической устойчивости полимерных материалов, вероятность безотказной работы может быть рассчитана по деформационному критерию.

На рис.3 показана зависимость среднего значения (а) и среднего квадратического отклонения (б) относительной деформации при разрыве от времени старения в условиях умеренного климата (г. Томск) для термопластов на основе полипропилена. Для бесцветных термопластов после шести месяцев экспонирования, среднее значение относительной деформации при разрыве достигает у материалов МПП 15-04 – 15 % и БСПЭ 22007 – 11 %.

Для МПП 15-04, черного, представляющего механическую смесь базовой марки полипропилена (ПП), 10% бутилкаучука (БК) и 0,4% технического углерода ДГ-100 за три года старения видимых изменений среднего значения относительной деформации при разрыве не произошло.

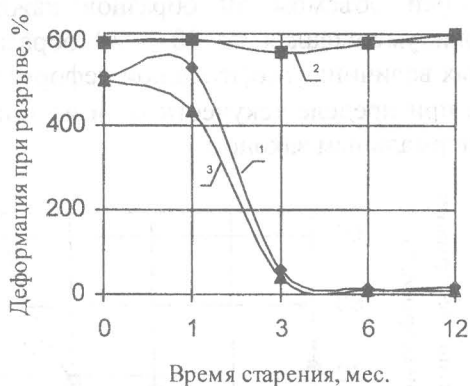


Рис. 3. Зависимость среднего значения (а) и среднего квадратического отклонения (б) относительной деформации при разрыве от времени старения (г. Томск) для термопластов на основе полипропилена: 1 – МПП 15-04, бесцветный; 2 – МПП 15-04, черный; 3 – БСПЭ 22007 – 16

Среднее значение относительной деформации при разрыве после трех лет экспозиции в условиях умеренного климата 627% среднее квадратическое отклонение деформации при разрыве 22,7%. Для всех бесцветных материалов среднее квадратическое отклонение деформации при разрыве в течение первого месяца уменьшается, а затем проходя через максимальное значение достигает 1%.

На рис.4 и 5 показаны зависимости среднего значения (а) и среднего квадратического отклонения (б) относительной деформации при разрыве от времени старения в условиях холодного климата (г. Якутск) для термопластов на основе полипропилена. Для бесцветных материалов среднее значение относительной деформации при разрыве достигает значения относительной деформации при пределе текучести через год у МПП 15-06 и через полгода для остальных материалов.

Для МПП 15-04, черного, через три года экспонирования в условиях холодного климата среднее значение относительной деформации при разрыве 624 %, среднее квадратическое отклонение деформации при разрыве 33,4%.

Для МПП 15-06, черного, представляющего механическую смесь базовой марки полипропилена (ПП), 10% полиизобутилена (ПИБ) и 0,4% технического углерода ДГ-100 за год старения среднее значение относительной деформации при разрыве практически не изменилось. Среднее значение относительной деформации при разрыве после года экспозиции в условиях умеренного климата 610 %, среднее квадратическое отклонение деформации при разрыве 46,5%.

Для всех термопластов среднее квадратическое отклонение деформации при разрыве в процессе старения, достигая максимального значения, имеет тенденцию к дальнейшему уменьшению до 1-2%.

Для оценки надежности, при определении климатической устойчивости на основе статистических данных по изменению деформационных кривых при старении необходимо определить вероятность того, что относительная деформация при разрыве $\varepsilon_p(t)$ будет больше относительной деформации при пределе текучести ε_T , т.е условие работоспособности материала. В этом случае, вероятность безотказной работы $R(t)$ можно представить в виде

$$R(t) = P(\varepsilon_p(t) > \varepsilon_m) = P(\varepsilon_p(t) - \varepsilon_T > 0) \quad (3)$$

Для того, чтобы оценить надежность, необходимо знать распределения случайных величин: относительной деформации при разрыве $\varepsilon_p(t)$ и относительной деформации при пределе текучести ε_T . Для проверки согласия опытного распределения с нормальным применялся критерий W с объемом выборки до 50. В исходном состоянии

статистической обработке подвергались выборки объемом 50 образцов каждого материала, в процессе старения объем выборки уменьшался до 20 – 30 образцов. Проверка показала, что распределения случайных величин: относительной деформации при разрыве $\varepsilon_p(t)$ и относительной деформации при пределе текучести ε_T в исходном состоянии и при старении могут быть описаны нормальным законом.

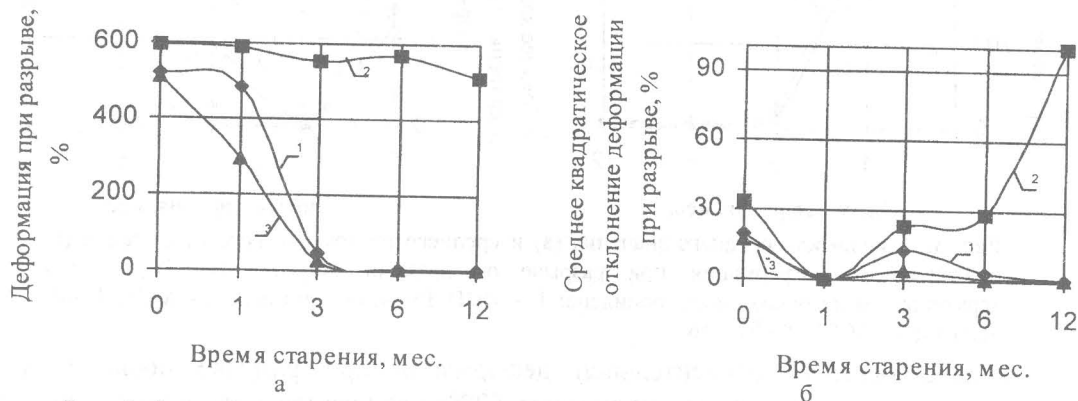


Рис. 4. Зависимость среднего значения (а) и среднего квадратического отклонения (б) относительной деформации при разрыве от времени старения (г. Якутск) для термопластов на основе полипропилена: 1 – МПП 15-04, бесцветный; 2 – МПП 15-04, черный; 3 – БСПЭ 22007 – 16

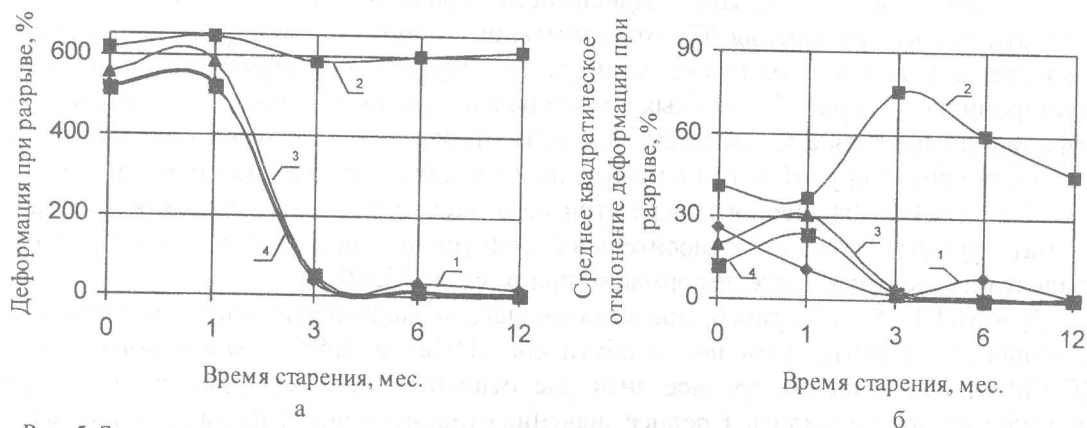


Рис. 5. Зависимость среднего значения(а) и среднего квадратического отклонения (б) относительной деформации при разрыве от времени старения (г. Якутск) для термопластов на основе полипропилена: 1 – МПП 15-06, бесцветный; 2 – МПП 15-06, черный; 3 – ПП 21060-16; 4 – БСПЭ 22015– 16

Метод оценки климатической устойчивости полимерных материалов на основе вероятностно-статистического метода заключается в следующем. На рис.6 показаны типичные кривые относительной деформации при разрыве $\varepsilon_p(t)$ и относительной деформации при пределе текучести ε_T . Кривая относительной деформации при пределе текучести ε_T представляет собой предельное значение кривой относительной деформации при разрыве $\varepsilon_p(t)$. До пересечения средних значений относительной деформации при разрыве $\varepsilon_p(t)$ и относительной деформации при пределе текучести ε_T , возникает перекрытие их распределений.

На рис. 6,б показано перекрытие распределений относительной деформации при разрыве $f_{\varepsilon}(\varepsilon_p(t))$ со средним значением $\bar{\varepsilon}_p$ и средним квадратическим отклонением $S_{\varepsilon p}$, а

также относительной деформации при пределе текучести $f_{\varepsilon}(\varepsilon_T)$ со средним значением ε_T и средним квадратическим отклонением $S_{\varepsilon T}$.

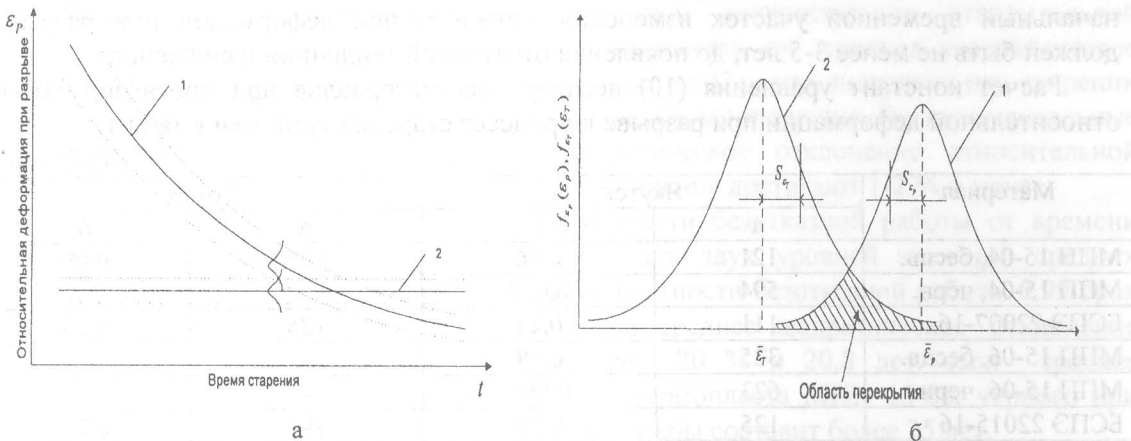


Рис. 6.: а - типичная кривая относительной деформации при разрыве $\varepsilon_p(t)$ -1 и относительной деформации при пределе текучести ε_T - 2; б - перекрытие распределений относительной деформации при пределе текучести $f_{\varepsilon}(\varepsilon_T)$ - 1, относительной деформации при разрыве $f_{\varepsilon}(\varepsilon_p(t))$ - 2

Обозначим новую случайную величину

$$y = \varepsilon_p(t) - \varepsilon_T, \tag{4}$$

тогда вероятность безотказной работы $R(t)$ можно представить в виде

$$R(t) = P(y > 0). \tag{5}$$

Случайная величина y имеет нормальное распределение с математическим ожиданием

$$m_y = m_{\varepsilon_p} - m_{\varepsilon_T} \tag{6}$$

и средним квадратическим отклонением

$$S_y = \sqrt{S_{\varepsilon_p}^2 + S_{\varepsilon_T}^2}. \tag{7}$$

Вероятность безотказной работы, выраженную через y можно записать

$$R(t) = P(y > 0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - m_y}{S_y} \right)^2 \right] dy. \tag{8}$$

Выражая вероятность безотказной работы $R(t)$ через нормированную функцию нормального распределения, имеем

$$R = 1 - \Phi \left[-\frac{f(\bar{\varepsilon}_p) - \bar{\varepsilon}_T}{\sqrt{S_{\varepsilon_p}^2 + S_{\varepsilon_T}^2}} \right] \tag{9}$$

Известно, что зависимость относительной деформации при разрыве от времени старения может быть представлена экспонентой. При аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов, изменение относительной деформации при разрыве описывалось уравнением

$$\varepsilon_p(t) = a e^{bt}, \tag{10}$$

где a и b – константы материала.

Построение деформационных зависимостей и определение констант аппроксимирующей зависимости проведено с помощью программы Exel 2000, позволяющей строить диаграммы с неравномерными участками времени старения.

Особое внимание необходимо при аппроксимации данных для черных термопластов стабилизированных техническим углеродом. Для этих материалов начальный временной участок изменения относительной деформации при разрыве должен быть не менее 3-5 лет, до появления отчетливой тенденции к снижению.

Расчет констант уравнения (10) исследуемых материалов при прогнозировании относительной деформации при разрыве в процессе старения приведен в табл 1.

Таблица 1

Материал	Якутск		Томск	
	а	б	а	б
МПП 15-04, бесцв.	121	0,16	146	0,09
МПП 15-04, черн.	594	0,012	-	-
БСПЭ 22007-16	111	0,21	126	0,13
МПП 15-06, бесцв.	325	0,29	-	-
МПП 15-06, черн.	623	0,009	-	-
БСПЭ 22015-16	125	0,13	587	0,28
ПП 21060-16	372	0,41	931	0,37

Расчет вероятности безотказной работы по формулам (9) и (10) и построение диаграмм проведен в системе Mathcad 2000.

Средние значения относительной деформации при пределе текучести и средние квадратические отклонения приведены в табл.2.

Таблице 2

Материал	$\bar{\varepsilon}_t$	$S_{\varepsilon t}$
МПП 15-04, бесц.	14,2	0,55
МПП 15-04, черн.	14,1	0,53
БСПЭ 22007-16	13,1	0,56
МПП 15-06, бесц.	16,,8	0,78
МПП 15-06, черн.	16,6	0,9
БСПЭ 22015-16	12,2	0,54

На рис. 8 показана зависимость вероятности безотказной работы исследуемых термопластов от времени старения в условиях холодного климата.

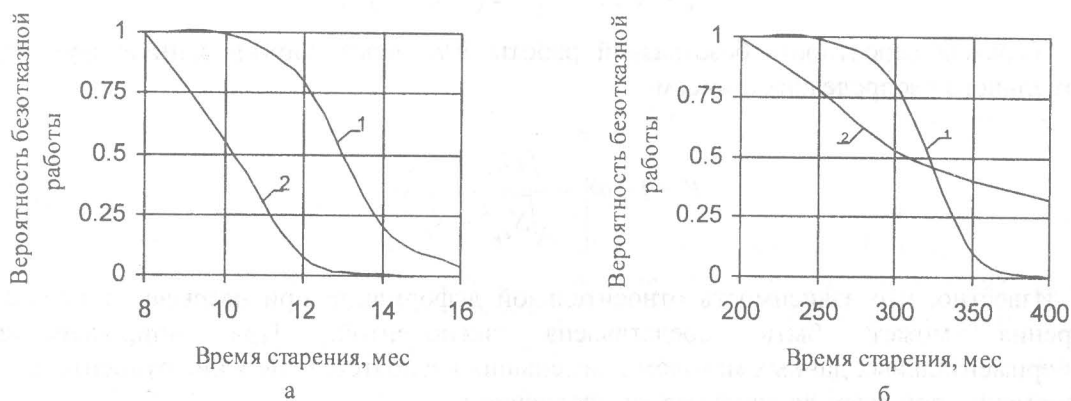


Рис. 8. Зависимость вероятности безотказной работы от времени старения термопластов на основе полипропилена в условиях холодного климата: а - 1 –МПП 15-04, бесцветный; 2 – БСПЭ 22007-16, б - МПП 15-04, черный; 1 - $S_{\varepsilon} = 2\%$, 2 - $S_{\varepsilon} = 20\%$

Задаваясь значением вероятности безотказной работы, можно определить срок службы материала по деформационному критерию. Так для бесцветных термопластов рис. 8,а при значении вероятности безотказной работы 0,99, срок службы для

МПП 15-04 составит 10 месяцев, а для БСПЭ 22007-16 8 месяцев в условиях холодного климата. Для термопластов стабилизированных техническим углеродом для оценки вероятности безотказной работы кроме задачи аппроксимации относительной деформации при разрыве, необходимо прогнозировать ее среднее квадратическое отклонение при больших сроках старения. Считается [2], что дисперсия при старении проходя через максимум стремиться к первоначальному значению. Экспериментальные исследования показывают, что среднее квадратическое отклонение относительной деформации при разрыве при больших сроках старения достигают 1-2 % и менее.

На рис. 8,б показана зависимость вероятности безотказной работы от времени старения для материала МПП 15-04, черный для двух уровней значений средних квадратических отклонений. При значении вероятности безотказной работы 0,99 срок службы для МПП 15-04 составит 16,6 лет, если среднее квадратическое отклонение относительной деформации при разрыве равно 20 % и 20,8 лет, если среднее квадратическое отклонение равно 2 %. Для термопласта МПП 15-06, черного при старении в условиях холодного климата, срок службы составит более 25 лет.

Полученные результаты расчета вероятности безотказной работы по деформационному критерию при старении для ряда конструкционных термопластов, свидетельствуют о возможности вероятностно-статистической оценки климатической устойчивости материалов в различных климатических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. – М.: Изд-во Химия, 1982. – 220 с.
2. Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. – М.: Изд-во Наука, 1983. – 215 с.
3. Реутов А.И., Реутов Ю.И., Сидоренко А.А. Prediction of the Reliability of Plastic Products. The 4 Korea-Russia Int. Symp. 5 of Science and Technology, KORUS, 2000. С. 199-203.
4. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Изд-во Мир, 1980. – 351 с.

В.А. КОРНЕВ, Ю.Б. ПРИХОДЬКО, А.Ф. ТРОЕГЛАЗОВ

ВЛИЯНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ НОРМАТИВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА НА КАЧЕСТВО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Как показал аналитический обзор работ по диагностике, при моделировании качества диагностирования авторы принимают значения нормативов (пределов) на диагностический параметр детерминированными на момент измерения при заданных режимах проведения диагностирования. Однако, в силу ряда причин, нормативы обладают некоторой неопределенностью. Каждая сложная машина обладает своего рода индивидуальностью. Особенно явно это прослеживается на примере автомобиля. Это можно объяснить технологической неоднородностью процессов производства и целым рядом других причин. Данный факт убедительно доказан экспериментально профессором Серовым. Поэтому правомерно предположить, что предельные значения диагностического параметра – величины случайные, подчиняющиеся определенным законам распределения. Попробуем оценить влияние статистической природы поля допуска на достоверность диагностирования при различных сочетаниях законов распределения параметра работоспособности, предельных значений параметра и погрешностей измерительных средств. Распределение погрешностей, как и ранее, считаем нормальным.