

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Целишев Г.П., Цехмestрюк Г.С., Курочкин А.А., Руссков В.В., Митин С.В. Методика расчёта низкочастотных амортизаторов для корабельного оборудования // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 2007. – 552 с.
2. Ляпунов В.Т., Лавендел Э.Э., Шляпочников С.А. Резиновые виброизоляторы: Справочник. – Л.: Судостроение, 1988. – 216 с.
3. Ильинский В.С. Защита аппаратов от механических воздействий. – М.: Энергия, 1970. – 320 с.
4. Поздеев Л.В. К определению механических параметров амортизаторов // Современная техника и технологии: Труды XV Междунар. научно-практ. конф. молодых учёных. – Томск, 2009. – Т. 1. – С. 463–464.
5. Сборный резинометаллический амортизатор с осевым ограничителем АРМОО: пат. 2358167 Рос. Федерация; заявл. 10.09.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16. – 7 с.: ил.
6. Беляковский Н.Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах. – Л.: Судостроение, 1965. – 523 с.

Поступила 12.04.2010 г.

УДК 62-192

## НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.И. Реутов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: aireutov@yandex.ru

*Предложена статистическая модель оценки надежности по критерию конструкционной прочности изделий из полимерных композиционных материалов. Приведены данные о рассеянии и статистической изменчивости характеристик полимерных материалов на основе полипропилена на этапах жизненного цикла изделия – проектирования, производства и эксплуатации.*

### Ключевые слова:

*Полимерные материалы, статистические характеристики, надежность изделий.*

### Key words:

*Polymeric material, statistical characteristics, reliability of products.*

Полимерные материалы в изделиях применяются для замены традиционных материалов и в новых технологиях. Из них изготавливают конструктивные детали различного назначения.

Полимерные композиционные материалы на основе полипропилена (ПП) широко используют во многих отраслях промышленности. Это большая номенклатура марок ПП, включающая базовые марки полипропилена, рандом сополимер (статсополимер), блок-сополимер, наполненные и морозостойкие композиции. Из полимерных материалов на основе полипропилена изготавливают комплектующие детали автомобилей: бамперы, панели приборов, спойлеры, корпуса аккумуляторов; корпусные детали бытовой техники, трубы, фитинги, пленки различного назначения и др.

Расширение сферы применения полимерных материалов в промышленности сдерживается отсутствием научно обоснованного подхода к выбору критериев работоспособности, методов оценки надежности изделий, недостаточным опытом их эксплуатации в различных условиях. В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные и методы оценки надежности, учитывающие особенности поведения полимерных материалов. Особенностью полимерных композиционных материалов является значительное рассеяние прочностных и деформационных характеристик в исходном состоянии, а также их изменение и рассеяние в процессе эксплуатации. Кроме того, отсутствуют методы оценки надежности изделий из полимерных ма-

териалов на этапах проектирования, производства и эксплуатации с учетом статистической изменчивости их характеристик.

В соответствии с изложенным, была разработана методология прогнозирования надежности изделий из полимерных материалов по различным критериям.

Методология прогнозирования надежности включает следующее:

- выбор критерия работоспособности на основе анализа изделия, его назначения, режима работы, условий эксплуатации, вида ожидаемых отказов;
- установление комплекса механических и теплофизических характеристик полимерных композиционных материалов на основе критерия работоспособности изделия;
- разработку новых методов и устройств определения механических и усадочных характеристик, учитывающих особенности материалов;
- разработку вероятностно-статистических моделей оценки надежности изделий из полимерных композиционных материалов на этапах проектирования, производства и эксплуатации;
- исследование статистической изменчивости деформационно-прочностных и усадочных характеристик материалов на этапах жизненного цикла изделия;
- установление взаимосвязей между надежностью и характеристиками материала, входящих в модель надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации.

- прогнозирование надежности, включающие полностью или частично учет определяющих факторов при проектировании, производстве и эксплуатации изделия.

Для оценки надежности изделий из полимерных материалов по основным критериям (прочность, жесткость, климатическая стойкость, размерная точность) необходимо иметь информацию по статистической изменчивости деформационно-прочностных, упругих, дилатометрических и усадочных характеристик.

Модель расчета надежности по критерию прочности основана на анализе распределений действующих и предельных напряжений. Для оценки прочностной надежности необходимо знать распределение случайных величин – максимального эквивалентного напряжения и предельных прочностных характеристик.

На этапе проектирования учитываются факторы, влияющие на изменчивость эквивалентных напряжений для сложного напряженного состояния нагруженного изделия и на изменчивость предельных прочностных характеристик. К факторам, влияющим на изменчивость эквивалентных напряжений, относятся рассеяние характеристик, вид напряженного состояния и температура. Составляющими модели расчета надежности по критерию прочности в общем случае являются характеристики полимерного материала: модуль упругости  $E$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ , коэффициенты линейного теплового расширения в стеклообразном  $\alpha_{ст}$  и в высокоэластическом  $\alpha_{в.э}$  состояниях и температура стеклования  $T_{ст}$ .

Анализ факторов, влияющих на прочность, показывает ее зависимость от состояния или чистоты поверхности, масштабного фактора или влияние абсолютных размеров образца, влияние концентраторов напряжений и температуры.

Для изделий из полимерных конструкционных материалов, работающих под нагрузкой, полимерных покрытий материалов с различными коэффициентами линейного теплового расширения, полимерных деталей, армированных металлическими вставками, металлополимерных изделий, оценка надежности проводится по критерию прочности.

Для полимерных материалов на основе ПП в качестве предельной прочностной характеристики выбирается предел текучести. Известно, что распределение случайных величин напряжения и прочности для элементов конструкций из полимерных материалов может быть описано нормальным законом. Зная эти распределения случайных величин, на основе статистической модели надежности можно определить вероятность безотказной работы элемента по критерию прочности [1, 2].

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

$$R = 1 - \Phi \left[ - \frac{\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_{эжв}}{\sqrt{S_{\sigma_m}^2 + S_{\sigma_{эжв}}^2}} \right],$$

где  $\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_{эжв}$  – среднее значение предела текучести при растяжении; эквивалентного напряжения;  $S_{\sigma_m}, S_{\sigma_{эжв}}$  – среднее квадратическое отклонение предела текучести при растяжении; эквивалентного напряжения.

В качестве объектов исследования были выбраны термопласты на основе ПП: гомополимер полипропилена ПП 21060-16, блок-сополимера пропилена с этиленом БСПЭ 22007-16, морозостойкие марки полипропилена МПП 15-04, МПП 15-04-901, асбестонаполненный полипропилен ПП 21060-А20, стеклонаполненный полипропилен СНП 21060-16-С30. Образцы представляли собой форму лопаток с площадью поперечного сечения  $A_0$ : 2,5; 10; 39; 200 мм<sup>2</sup>, изготовленные методом литья под давлением в количестве 30 шт. для каждого типоразмера. Образцы испытывали на растяжение на испытательной машине 2167 Р-50 при скорости растяжения 50 мм/мин.

На рис. 1 показана зависимость среднего значения и среднего квадратического отклонения предела текучести от логарифма площади поперечного сечения образца  $A_0$  для термопластов на основе ПП. Увеличение площади поперечного сечения образцов вызывает уменьшение среднего значения и изменение среднего квадратического отклонения предела текучести исследуемых термопластов. Это связано со слоевой структурой, формирующейся в процессе переработки материала в изделие. Кроме того, масштабный фактор оказывает существенное влияние на другие деформационно-прочностные свойства материалов на основе полипропилена [3, 4].

На разброс значений эквивалентных напряжений влияет рассеяние упругих, деформационных, и теплофизических характеристик, табл. 1.

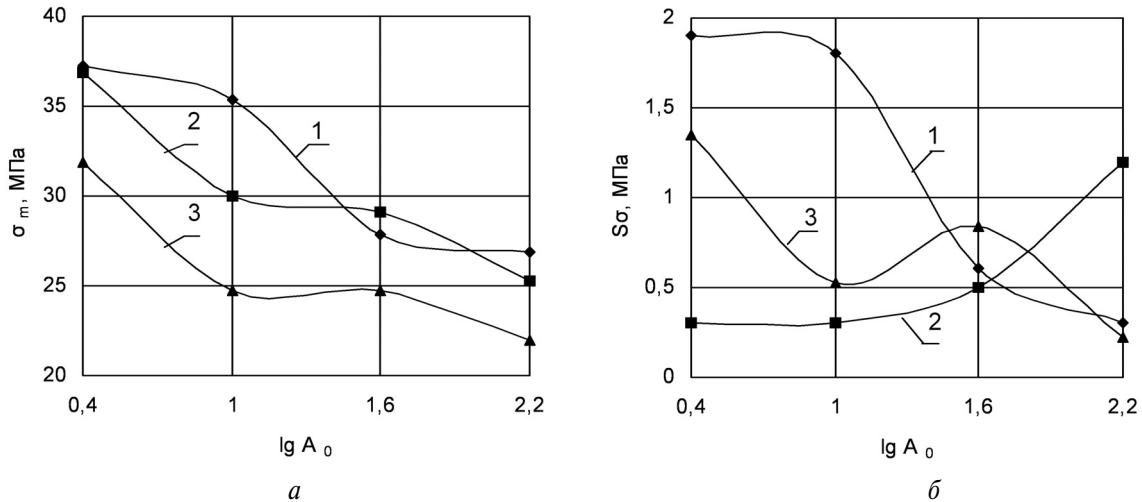
**Таблица 1.** Статистики характеристик композиций полипропилена

Материал	$E$ , МПа	$\mu$	$\alpha_{ст}, 10^{-6}$ , 1/град	$\alpha_{в.э}, 10^{-6}$ , 1/град	$T_{ст}$ , К
БСПЭ 22007-16	1170/95	0,37/0,020	–	98/12	–
МПП 15-04, бесцветный	1110/77	0,36/0,018	–	104/14	–
МПП 15-04-901	1100/76	0,36/0,017	–	101/13	–
СНП 21060-16-С30	1500/114	0,26/0,016	15/2,7	30/3,2	272/2

Примечание: числитель – среднее значение показателя, знаменатель – среднее квадратичное отклонение показателя.

В изделиях из полимерных материалов в местах резкого изменения формы, деталях, армированных металлическими вставками, в полимерных покрытиях имеются места концентрации напряжений. Максимальные местные напряжения определяются через коэффициенты концентрации напряжений.

Нами установлено, что с увеличением площади поперечного сечения образцов возрастает чувствительность материала к концентрации напряжений, но эффективный коэффициент концентрации напряжений остается меньше единицы, т. е. в исходном состоянии при температуре испытания



**Рис. 1.** Зависимость: а) среднего значения предела текучести и б) среднего квадратического отклонения предела текучести от логарифма площади поперечного сечения образцов  $A_0$ . Термопласты на основе полипропилена: 1) ПП 21060-16, бесцветный; 2) ПП 21060-A20; 3) МПП 15-04 бесцветный

$23 \pm 2$  °С материалы на основе ПП нечувствительны к концентраторам напряжений.

Экспериментальные данные по средним значениям и средним квадратическим отклонениям прочности при растяжении, прочности образцов с концентратором напряжений и эффективному коэффициенту концентрации напряжений для полимерных материалов на основе полистирола (УПС-825, АБС-2020), поликарбоната ПК-2 и стеклонаполненного полиамида ПА 610-1-108 приведены в табл. 2.

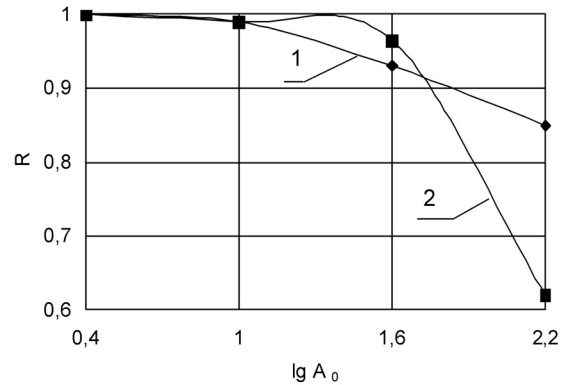
**Таблица 2.** Эффективный коэффициент концентрации напряжений термопластов

Материал	$\sigma_{рм}$ , МПа	$S\sigma_{рм}$ , МПа	$\sigma_{рмк}$ , МПа	$S\sigma_{рмк}$ , МПа	$K_э$
УПС 825 черный	27,3	0,58	25,9	0,76	1,05
АБС 2020	40,7	0,65	36,2	0,9	1,12
ПА 610-1-108	134,0	8,62	100,1	3,46	1,34
Поликарбонат ПК-2	62,2	1,19	52,0	2,46	1,20

Примечание:  $\sigma_{рм}$ ,  $S\sigma_{рм}$ ,  $\sigma_{рмк}$ ,  $S\sigma_{рмк}$  – среднее значение, среднее квадратическое отклонение прочности при растяжении образцов без концентратора напряжений и с концентратором напряжений, МПа;  $K_э$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

При расчете на прочность деталей из полимерных материалов больших поперечных сечений необходим совместный учет влияния масштабного фактора и концентрации напряжений.

На основе статистической модели надежности рассчитана вероятность безотказной работы для изделий из ПП 21060-16 и асбестонаполненного ПП 21060-A20, работающих в условиях одноосного напряженного состояния, рис. 2. Коэффициент безопасности для площади поперечного сечения  $2,5 \text{ мм}^2$  был установлен 1,5 для обоих материалов.



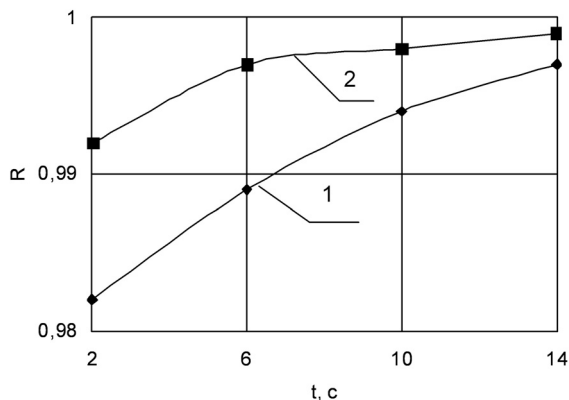
**Рис. 2.** Зависимость вероятности безотказной работы от  $\lg$  площади поперечного сечения образцов  $A_0$  для термопластов на основе полипропилена: 1) ПП 21060-16, бесцветный; 2) ПП 21060-A20

Коэффициент безопасности определялся как отношение среднего значения предела текучести  $\sigma_{п}$  к среднему значению эквивалентному напряжению  $\sigma_{экр}$ . С увеличением площади поперечного сечения происходит уменьшение вероятности безотказной работы. Для термопласта ПП 21060-A20 при увеличении площади поперечного сечения образцов с  $2,5$  до  $200 \text{ мм}^2$  вероятность безотказной работы уменьшается от 0,999 до почти 0,6, а коэффициент безопасности остается больше единицы.

На этапе производства анализируются технологические факторы, оказывающие влияние на изменчивость механических и теплофизических свойств материалов. К технологическим факторам относятся режимы переработки материала, а также содержание технологических и производственных отходов в исходном сырье.

На рис. 3 приведена зависимость вероятности безотказной работы по критерию прочности от времени выдержки под давлением для материала ПП 21060-16 для различных температур литья. Видно,

что уменьшение времени выдержки под давлением и повышение температуры литья приводит к снижению вероятности безотказной работы. Это связано с незначительным уменьшением среднего значения предела текучести материала и с увеличением его среднего квадратического отклонения.



**Рис. 3.** Зависимость вероятности безотказной работы от времени выдержки под давлением ПП 21060-16 и температуры литья при давлении литья 80 МПа: 1) 270; 2) 200 °C

На этапе эксплуатации анализируются внешние факторы, оказывающие воздействия на изменчивость материаловедческих характеристик, входящих в модель расчета прочностной надежности и на изменчивость предельных прочностных характеристик. К внешним факторам относятся естественные и искусственные климатические факторы, радиационные воздействия и ионизирующие излучения.

Для оценки влияния эксплуатационных факторов на надежность изделий из полимерных материалов, работающих под нагрузкой, рассмотрено влияние естественных климатических факторов.

На рис. 4 показана зависимость среднего значения и среднего квадратического отклонения предела текучести от времени старения для образцов различных поперечных сечений термопласта блок-со-

полимера пропилена с этиленом БСПЭ 22007 в условиях холодного климата. Экспонирование образцов материала проводилось на климатической площадке в районе г. Якутска.

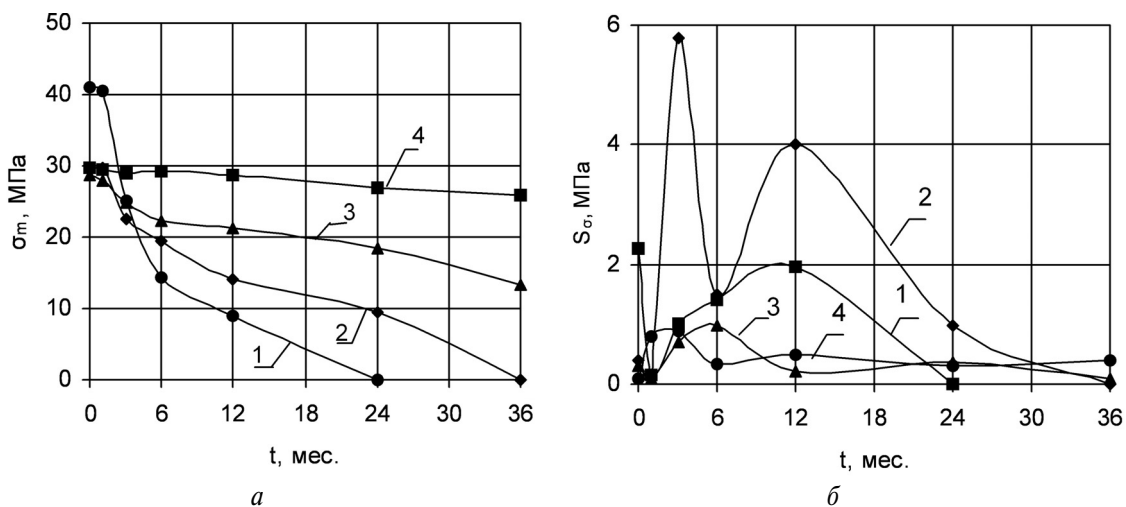
В связи с тем, что воздействие солнечного излучения вызывает изменение структуры в поверхностных слоях образцов, влияние этого процесса на свойства материала при естественном старении должно зависеть от толщины образцов. Действительно, для бесцветных материалов блок-сополимера пропилена с этиленом БСПЭ 22007 и морозостойкого полипропилена МПП 15-04 предел текучести образцов толщиной 1 мм резко уменьшается уже после 1 месяца экспонирования. После двух лет экспонирования образцы материалов МПП 15-04 бесцветный и БСПЭ 22007-16 толщиной 1 мм полностью теряют прочность. В этом случае образцы рассыпаются в момент съема со стенда климатической станции.

С повышением толщины образцов увеличивается стойкость материала к старению. Это связано с тем, что, в процессе старения после насыщения поверхностных слоев кислородосодержащими продуктами и закрытия каналов свободного доступа кислорода в более глубокие слои материала наблюдается монотонное снижение прочности [5].

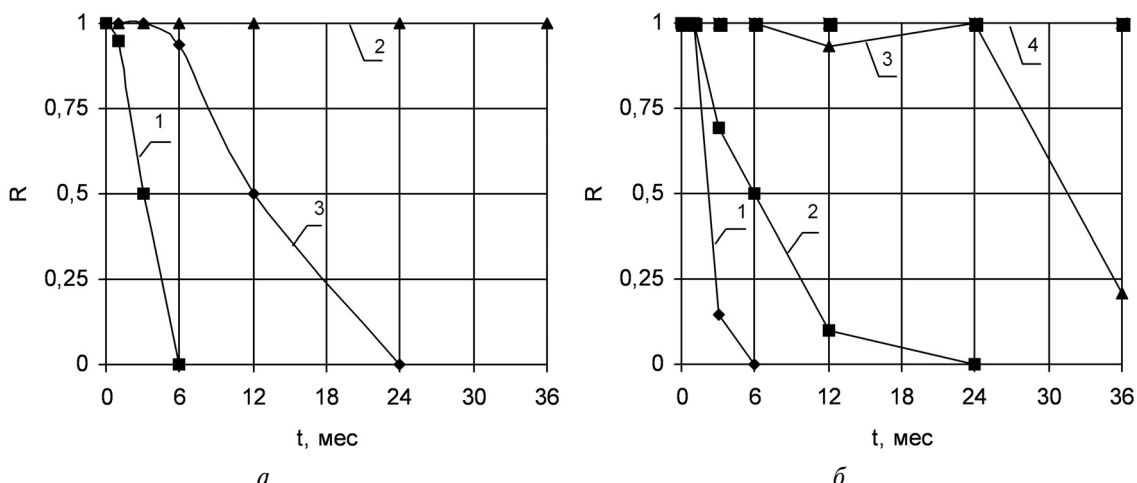
Среднее квадратическое отклонение предела текучести при растяжении вначале с увеличением времени старения возрастает, а затем после достижения предельного значения снижается.

Для термопластов на основе полипропилена необходима модификация материалов, особенно для зоны холодного климата. Модифицированные материалы должны быть морозостойкими и обладать устойчивостью к действию солнечной радиации.

У материала МПП 15-04-901, светостабилизированного сажей, в течении 3-х лет старения в условиях холодного климата для всех толщин образцов не наблюдается существенного изменения свойств.



**Рис. 4.** Зависимость: а) среднего значения и б) среднего квадратического отклонения предела текучести от времени старения в условиях холодного климата для материала БСПЭ 22007-16. Площадь поперечного сечения образцов: 1) 1x2,5; 2) 2x5, 3) 3x13; 4) 8x25 мм²



**Рис. 5.** Зависимость вероятности безотказной работы в условиях холодного климата от времени старения термопластов на основе полипропилена: 1) МПП 15-04, бесцветный; 2) МПП 15-04, черный; 3) БСПЭ 22007-16 – а; для образцов из термопласта БСПЭ 22007-16 с площадью поперечного сечения: 1) 1×2,5; 2) 2×5; 3) 3×13; 4) 8×25 мм<sup>2</sup> – б

На рис. 5, а, показана зависимость вероятности безотказной работы от времени старения стандартных образцов термопластов толщиной 2 мм на основе полипропилена в условиях холодного климата. Вероятность безотказной работы рассчитана для случая одноосного напряженного состояния при исходном коэффициенте безопасности 1,5 для материалов. Действующие напряжения при старении определялись для постоянной деформации при изменении 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 3-х мес. для блок-сополимера пропилен с этиленом и в течение 12 мес. для морозостойкого полипропилена.

Для термопласта МПП 15-04-901 вероятность безотказной работы за исследуемый промежуток времени не изменяется.

Зависимость вероятности безотказной работы от времени старения и с учетом масштабного фактора термопласта БСПЭ 22007-16 в условиях холодного климата показана на рис. 5, б.

Видно, что даже для слабо стабилизированного бесцветного термопласта БСПЭ 22007-16 с увеличением толщины образцов увеличивается вероятность безотказной работы, а для образца толщиной 8 мм в течение всего времени старения она близка к единице.

#### Выводы

Показано, что увеличение площади поперечного сечения образцов вызывает уменьшение среднего значения и изменение среднего квадратического отклонения предела текучести исследуемых термопластов на основе полипропилена. Эти материалы нечувствительны к концентраторам напряжений. С увеличением площади поперечного сечения образцов термопластов на основе полипропилена происходит уменьшение вероятности безотказной работы.

Установлено, что режимы переработки термопластов литьем под давлением и содержание технологических и производственных отходов в сырье влияют на вероятность безотказной работы.

С повышением толщины образцов увеличивается стойкость материала к старению и увеличивается вероятность безотказной работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 351 с.
- Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Реутов А.И. Определение вероятности безотказной работы конструкций из полимерных материалов // Физическая мезомеханика. – 2004. – Спец. вып. 7. – Ч. I. – С. 43–45.
- Реутов А.И. Прогнозирование надежности строительных изделий из полимерных материалов. – М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2007. – 184 с.
- Калинчев Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. – Л.: Химия, 1983. – 288 с.
- Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. – М.: Химия, 1982. – 224 с.

Поступила 06.05.2010 г.