

*Барабаш Д. Е., д-р техн. наук, проф.,  
Чернухин С. П., аспирант  
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет  
Волков В. В., канд. физ.-мат. наук, доц.  
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил Военно-воздушная академия  
им. проф. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж)*

## ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ЧАСТОТНО-РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

**barabash60170@yandex.ru**

*Представлены основные положения современной методики оценки свойств герметизирующих материалов на полимерной и битумно-полимерной основе. Показана связь скорости деградационных процессов с условиями эксплуатации герметиков. Выявлена целевая функция оценки качества полимерных аэродромных герметиков.*

***Ключевые слова:** деградация, аэродромный герметик, частотно-резонансный метод.*

Деформационные швы аэродромных покрытий являются своеобразным барьером на пути проникновения атмосферной влаги в основание. Герметизирующие материалы, заполняющие указанные швы, должны обладать целым комплексом свойств, подчас противоречивых. Так, например, герметик должен обладать низкой липкостью при высокой температуре окружающей среды и одновременно обеспечивать достаточное удлинение при отрицательной температуре. Как полимерный материал герметик должен быть весьма устойчив к ультрафиолетовому облучению. При высокой степени эксплуатации аэродромного покрытия герметизирующий материал должен быть устойчив к циклическим нагрузкам. Этот перечень требований далеко не полный, но он позволяет осознать важность проблемы надежной герметизации аэродромных швов. Предлагаемые современные герметизирующие материалы, на первый взгляд, достаточно эффективны. В большинстве случаев указываемые производителем значения физико-механических характеристик соответствуют требованиям ГОСТ 30740-2000. Вместе с тем многообразие климатических условий на территории России и наличие большого числа регионов с длительным периодом устойчивых отрицательных температур предъявляют особые требования к комплексу физико-механических характеристик аэродромных герметиков.

Кроме того, с момента вступления России в ВТО на первый план при оценке качества материалов выдвигаются требования обеспечения безопасности, как производства полетов, так и окружающей среды. Эти требования возможно оценить только при помощи теории рисков, что и предполагают новые стандарты ВТО.

В этой связи весьма актуален вопрос ограничения перечня характеристик герметизирующих материалов и обоснования их значений.

Это обусловлено, в первую очередь, тем, что потребителя, в конечном счете, интересует продолжительность эксплуатации герметизирующего материала на конкретном аэродроме в конкретных климатических условиях.

Знание сроков надежной эксплуатации герметика позволит рационально и своевременно расходовать финансы на поддержание аэродрома в состоянии, обеспечивающем безопасную эксплуатацию воздушных судов.

Поскольку основой большинства современных герметиков служат полимеры, то в силу термофлуктуационной природы своих связей они неизбежно стареют, что сопровождается изменением их физико-механических характеристик и снижением качества герметизации. Для описания указанных деградационных процессов наибольшее распространение получили уравнения Журкова – Бисси и их модификации. Прогнозирование изменения свойств герметизирующих материалов в условиях совместного воздействия деструктивных факторов является весьма сложной и важной задачей строительного материаловедения.

В этой связи представляется актуальной выборка наиболее показательной целевой характеристики герметизирующего материала, отражающей его основное предназначение.

Например, деформативность при отрицательных температурах характеризуется относительным удлинением образца. С точки зрения надежной герметизации шва показатель деформативности представляется наиболее важным. Приводимые в некоторых технических условиях данные о величине относительного удлинения в шве при +20°C, некорректны, поскольку при такой температуре швы покрытия, как правило, сжимаются, а не расширяются [1].

Существующий в настоящее время ГОСТ 30740-2000, регламентирующий определение ос-

новых физико-механических характеристик герметиков, не в полной мере учитывает особенности эксплуатации этих материалов в различных дорожно-климатических зонах. Как уже указывалось выше, на деградацию значений физико-механических характеристик герметизирующих материалов решающее влияние оказывают температура, ультрафиолетовое облучение и деформации.

Очевидно, что в различных климатических районах, при эксплуатации различных типов воздушных судов с различной интенсивностью, вариативность значений указанных характеристик будет весьма высока.

Проводить испытания герметиков при некоторых усредненных показателях влияющих факторов, по крайней мере, нерационально. Это обусловлено тем, что в результате испытаний можно получить заключение о пригодности того или иного герметика для эксплуатации, а в реальности он не будет соответствовать предъявляемым требованиям.

Так, например, для герметиков марки «БРИТ» помимо стандартных требований ГОСТ 30740-2000, использовали дополнительно другие нормативные документы. Производитель счел не-

$$F(h, T, N) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{h_z \cdot h_r} \cdot \left(\frac{h_{\Delta} - h_{\Delta 0}}{h_{\Delta \max}}\right)^{\alpha} \cdot \left(k \cdot \exp\left(-\frac{U}{RT}\right)\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{N_{\Delta} - N_{\Delta 0}}{N_{\Delta \max}}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{N_{TP} - N_{TP0}}{N_{TP \max}}\right)^{\beta} \cdot \sum P(h_r, h_B)\right] \quad (1),$$

где  $\alpha = \frac{h_{\Delta \max}}{(h_{\Delta \max} - h_{\Delta 0})}$  - эмпирический коэффициент;  $h_{\Delta 0}$  - ширина раскрытия деформационного шва при герметизации;  $h_{\Delta}$  - величина экскурсии герметизирующего материала в деформационном шве покрытия;  $h_{\Delta \max}$  - максимальная ширина раскрытия деформационного шва;  $\beta = \frac{h_B}{h_{B \max}}$  - эмпирический коэффициент, учитывающий величину вертикального перемещения краев шва ( $h_B$ ) относительно его максимально возможного перемещения ( $h_{B \max}$ );  $N_{\Delta \max}$  - максимальное число циклов нагружения, которое выдерживает исследуемый материал при испытаниях, с учетом воздействия температурного фактора;  $N_{\Delta}$  - число циклов нагружения обусловленное температур-

обходимым указать температуру размягчения по КиШ в соответствии с ГОСТ 11506 и водопоглощение по ГОСТ 25945.

Очевидно, что такой достаточно произвольный набор характеристик не позволяет конечному потребителю ответить на самый важный вопрос: какова же продолжительность надежной эксплуатации приобретаемого герметика в реальных условиях?

В реальных условиях эксплуатации на герметизирующий материал, помимо эксплуатационных нагрузок, дополнительно воздействуют УФО, агрессивные среды и т.д. Суммарное воздействие эксплуатационных и климатических факторов значительно усложняет оценку протекания деградационных процессов в герметизирующем материале.

Поскольку гарантийный срок эксплуатации герметиков составляет не менее 5 лет, то за указанный период количество циклов нагружения, например, для аэродромов II дорожно - климатической зоны, достигает  $10^4$ . Предельное состояние  $F$  герметизирующего материала, с достаточной адекватностью можно выразить через деградационную модель (1), учитывающую случайный процесс появления усталостных микроразрушений.

ным воздействием на покрытие;  $N_{\Delta 0}$  - число циклов нагружения на момент определения состояния герметика при прогнозировании его долговечности, обусловленное температурным воздействием;  $N_{TP}$  - число циклов нагружения обусловленное механическим воздействием на покрытие;  $N_{TP0}$  - число циклов нагружения на момент определения состояния герметика при прогнозировании его долговечности, обусловленное механическими нагрузками;  $N_{TP \max}$  - максимальное число нагружений которое выдерживает герметик при испытаниях;  $\sum P(h_r, h_B)$  - вероятность образования микроразрушений герметика.

Внутренняя энергия герметизирующего материала находящегося в деформационном шве:

$$U = \frac{(T_{\min} \cdot h_{\Delta \max} + T_{\max} \cdot h_{\Delta \min}) - (T_{\min} + T_{\max}) \cdot (h_{\Delta \min} + h_{\Delta \max})}{(T_{\min}^2 + T_{\max}^2) - (T_{\min} + T_{\max})^2}$$

Коэффициент, учитывающий свойства герметизирующего материала:

$$k = \frac{(h_{\Delta \min} + h_{\Delta \max}) \cdot (T_{\min}^2 + T_{\max}^2) - (T_{\min} \cdot h_{\Delta \max} + T_{\max} \cdot h_{\Delta \min}) \cdot (T_{\min} + T_{\max})}{2(T_{\min}^2 + T_{\max}^2) - (T_{\min} + T_{\max})^2}$$

Приведенные выкладки соответствуют основным положениям термофлуктуационной теории Журкова-Бисси. Указанную модель можно использовать при установлении напряженно - деформированного состояния герметика в лабораторных условиях с адекватным переносом результатов лабораторных испытаний в натурные условия. Анализ напряженно - деформированного состояния герметика в условиях изменяющихся температур проводили при помощи разработанной экспериментальной установки, принцип действия которой основан на регистрации изменения плотности ферромагнитного порошка в образце испытуемого композитного материала при приложении к нему циклических нагрузжений [2]. За базовую качественную характеристику при выборе того или иного вида герметизирующего материала рекомендуется зависимость  $E = f(T)$ . Наглядность указанной характеристики позволит потребителю оценить поведение герметизирующих материалов в различных температурных диапазонах. Для сравнительного анализа эффективности использования герметиков различной основы использовали материалы, широко применяющиеся на аэродромах государственной авиации.

Исследовали образцы герметиков на основе полимерного и битумно-полимерного сырья: герметик на основе деструктурированного дивинилстирольного термоэластопласта (ДДСТ-30P-01), аэродромный полимерный герметик холодного отверждения (АПГХО), битумно-полимерный (БПАГ-50).

Предельное состояние герметизирующих материалов моделировали при помощи разработанной установки несколькими способами:

- приложением нагрузок близких предельным (возникающих, в частности, при больших скоростях нагружения);
- приложением многоцикловых непредельных нагрузок с числом циклов обеспечивающих предельное состояние;
- проведением испытаний при повышенных температурах.

Образцы герметизирующих материалов, содержащие ферромагнитный порошок, подвергали многоцикловым деформациям с малой скоростью. Через определенное число циклов деформации нагружающую часть экспериментальной установки останавливали в момент, когда внутреннее напряжение в образце достигало величины равной двум процентам от максимального напряжения. После этого фиксировали величину изменения рабочей частоты при движении измерительной части экспериментальной установки вдоль неде-

формированного образца.

Проведенное предварительное планирование эксперимента показало целесообразность его разбиения на серии. В связи с этим первым этапом экспериментальных исследований поведения герметизирующих материалов в области предельных состояний являлось определение относительного удлинения образцов при однократном растяжении [3] и определение величин физико - механических характеристик: модуля упругости ( $E$ ), коэффициента Пуассона ( $\nu$ ), зависимости напряжений от деформаций ( $\sigma(\epsilon)$ ).

Использование системы визуального контроля изменения геометрии при нагружении позволяло достичь большей точности снимаемых измерительной системой значений и контроля изменения геометрических параметров в реальном времени. Исследования проводили при температурах: минус 50, минус 35, 0, +20, +60 °С. Указанные величины температур приняты исходя из требований стандартов. Полученные экспериментальные данные позволили определить ряд физико-механических констант рассматриваемых материалов и их дополнительные термодинамические параметры (энергия активации, времена релаксации) [4].

В процессе многоцикловых деформаций производили измерения не только изменения внешней геометрии образцов, но и перераспределение ферромагнитного порошка в их объеме.

Все исследуемые образцы после проведения необходимых испытаний подвергали дальнейшему нагружению вплоть до разрушения, что позволило вычислить когезионную прочность исследуемых материалов, их предельную цикловую долговечность, распределение частоты разрушения образцов от числа циклов нагружения. Часть указанных характеристик косвенно оценивали по изменению геометрии так называемой «шейки» (т.е. величине накопления остаточных деформаций) и перераспределению плотности ферромагнитного порошка по сечению образцов.

На рисунках 1 и 2 показаны изменения ширины шейки вдоль образца по длине и плотности ферромагнитных частиц в зависимости от количества циклов нагружений.

Сравнение изменения геометрии образцов с изменением относительной плотности материалов показало, что ширина образца изменялась функционально меньше величины изменения относительной плотности, что указывало на наличие внутреннего течения материала в образце при многократных нагружениях. Повышение температуры приводило к изменению распределения

плотности вещества внутри образца и, соответ-

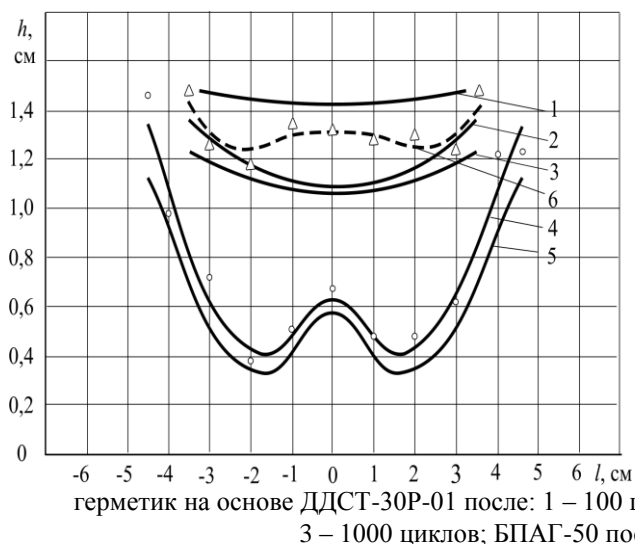


Рис. 1. Зависимость ширины шейки образца ( $h$ ) от количества циклов нагружения

Наибольшие изменения претерпевала шеечная часть образца, которая и являлась центром накопления остаточных деформаций. Вместе с тем, указанные испытания позволили установить значительные различия в работе полимерных и битумно-полимерных герметиков.

Так, после 1000 циклов знакопеременных воздействий относительная плотность герметика на основе ДСТ-30Р-01 не упала ниже 0,17, тогда как у битумно-полимерных герметиков показатель относительной плотности после указанного количества циклов составлял менее 0,09.

Поскольку предельное состояние герметиков в деформационных швах определяет циклическую долговечность, а в практике эксплуатации покрытий большой интерес представляет эксплуатационная долговечность, то, зная число циклов взлета-посадки и климатическую зону расположения аэродрома, за заданный интервал времени, можно получить прогноз эксплуатационной долговечности.

Указанная методика была апробирована в диссертационных исследованиях и на практике.

Полученные результаты для указанных герметиков отражают не только особенности их строения и структуры, но и зависимость скорости деградиационных процессов от условий эксплуатации. Вместе с тем, приведенная методика имеет и свои недостатки, связанные с введением в исходный герметик ферромагнитного порошка. Несмотря на незначительный объем вводимого по-

ственно, к изменению его геометрии.

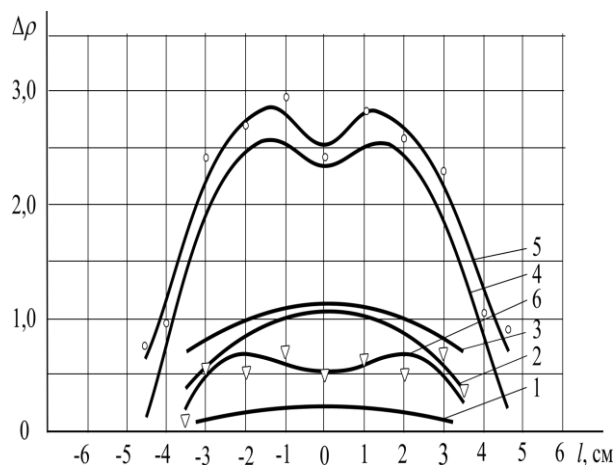


Рис. 2. Перераспределение плотности ферромагнитных частиц ( $\Delta\rho$ ) по длине образца в зависимости от количества циклов нагружения

рошка нельзя исключить его влияние на структурообразование.

В связи с этим, в настоящее время проводятся пилотные испытания установки, регистрирующей изменения структуры и относительной плотности герметиков по изменению их диэлектрической проницаемости после приложения заданного количества циклов нагрузки и температурных воздействий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барабаш Д.Е. Прогнозирование изменения свойств герметиков в условиях многоцикловых нагружений / Д.Е. Барабаш, О.А. Сидоркин, В.В. Волков// Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2006. - №6. -С. 32-36
2. Пат. 2293979 РФ С 04 В 26/04. Способ определения возникновения внутренних нарушений сплошности вязких герметизирующих материалов при многоцикловых нагружениях / Д.Е. Барабаш, Ю.М. Борисов, В.В. Волков, О.А. Сидоркин. Приоритет 28.09.2005. - 6 с.
3. Канунников О. В. О выборе качественного аэродромного герметика / О.В. Канунников, В. А. Башкатова// Аэропорты. Прогрессивные технологии. - 2001. -№ 1. С. 24-26
4. Энциклопедия полимеров/ Редколлегия: В.А. Каргин и др. Том 2. - М.: Сов. Энциклопедия, 1974. - 1032 стб.