

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А.А. Алиев

akper.aliev@gmail.com

А.Ю. Ампилогов

ampilogov@gmail.com

ПАО «Корпорация «Иркут», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены проблема термоциклирования и обледенения внешнего лакокрасочного покрытия воздушного судна, а также негативное влияние этих процессов, выражающееся в периодических деформациях растяжения-сжатия и абсорбции атмосферной влаги в микронеровности рельефа с ее последующим замерзанием и постепенным расклиниванием впадин. Отмечена повышенная трудоемкость методики лабораторных испытаний в условиях воздействия циклических перепадов температур, имитирующих эксплуатационные условия работы лакокрасочного покрытия воздушного судна. Показана целесообразность разработки расчетного метода оценки морозостойкости для конкретных условий эксплуатации. Метод учитывает действие совокупности усадочных напряжений, переохлаждения и расклинивающего воздействия льда. Основные физико-механические свойства льда и лакокрасочного покрытия приняты однородными и равными среднеинтегральным значениям, коэффициенты термического линейного расширения подложки и покрытия приняты постоянными и независимыми от температуры. Трением льда о поверхность впадин микронеровностей, а также полетными нагрузками на лакокрасочное покрытие, вызванными набегающими потоками воздуха и деформацией конструкции воздушного судна, пренебрегаем. На основе метода эквивалентных напряжений предложен метод расчета морозостойкости лакокрасочного покрытия воздушного судна при циклическом обледенении. На примере полиэфируретанового покрытия на дюралюминиевой пластине проведены испытания на морозостойкость в диапазоне температур от -50 до 25 °С числом $F = 2000$ циклов

Ключевые слова

Обледенение, покрытие, микрорельеф, усталость, расчет, морозостойкость, растрескивание

замерзания и оттаивания. Выполнен термоциклический расчет коэффициента запаса морозостойкости при периодическом обледенении. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными

Поступила 11.10.2019

Принята 25.11.2019

© Автор(ы), 2020

Введение. Внешнее лакокрасочное покрытие (ЛКП) воздушного судна (ВС) в процессе эксплуатации подвергается различным разрушительным физико-механическим воздействиям, в том числе периодическому переохлаждению и обледенению. Отсутствие для большинства элементов конструкции возможности свободно изменять объем при изменении температуры, а также значительные различия коэффициентов термического линейного расширения (КТЛР), механических и теплофизических свойств работающих совместно материалов ЛКП и подложки приводят к возникновению знакопеременных циклов напряжений, что может вызвать усталость, последующее появление трещин и разрушение покрытия [1, 2].

Обледенение заключается в отложении льда на поверхностях ВС в диапазоне температур от -10 до -5 °С, а при интенсивном конвективном теплообмене даже при -50 °С [3, 4]. Процесс льдообразования начинается с абсорбции воды в микронеровности ($Rz \leq 1$ мкм [5]) ЛКП за счет капиллярных сил. В условиях низких температур абсорбированная вода замерзает и расширяется, расклинивая берега впадин микрорельефа.

При оттаивании в покрытии происходит релаксация инициированных переохлаждением напряжений. В результате периодических циклов замерзания/оттаивания (биаксиального растяжения-сжатия) на дне впадин микрорельефа постепенно образуются усталостные трещины — морозобоины. За счет роста трещины глубина внедрения льда со временем увеличивается, что приводит к сквозному растрескиванию пленки и прониканию внешних (нередко агрессивных) сред к поверхностным слоям защищаемого изделия. С ростом низкотемпературной повреждаемости перемычки между дискретными морозобойными трещинами разрушаются и возникает протяженная (магистральная) трещина длиной несколько десятков сантиметров и более. Как показывает осмотр, в начале процесса криогенного разрушения ЛКП дробится на крупные прямоугольные области. В дальнейшем ЛКП распадается на более мелкие фрагменты практически квадратной формы с образованием кракелюра — характерной упорядоченной сетчатой системы параллельных и перпендикулярных магистральных трещин на примерно равном расстоянии друг от друга (эффект «шахматной доски») (рис. 1).

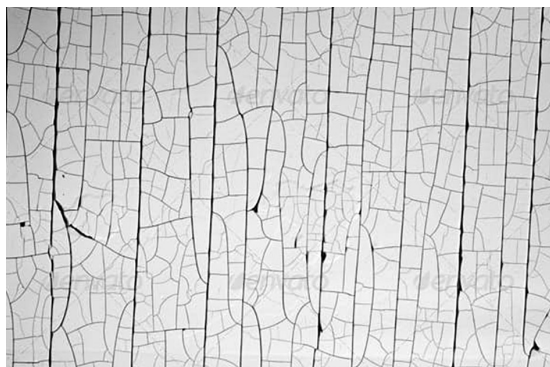


Рис. 1. Кракелюр — криогенное растрескивание ЛКП в виде сетки из морозобойных трещин

Методы определения влияния ледяного поля (наледи) и циклического криогенного воздействия на ЛКП приведены в ГОСТ 27037–86¹ и стандарте ASTM D6944–15², предписывающих чередовать (не менее 10 раз, $F \geq 10$) воздействия (длительностью один час) на ЛКП высокой и низкой температуры. Рекомендуемый диапазон от -60 до 40 °С, допускаются и иные температурно-временные режимы. Пригодным считается лакокрасочный материал (ЛКМ), который не растрескивается за заданное число термоциклов.

Следует отметить, что магистральный самолет за средний календарный срок эксплуатации внешнего ЛКП (не менее 4 лет³ при двух полетах в сутки) подвергается не менее чем $F \sim 2000$ термоциклам с перепадами температур до -50 °С.

Стандарт ограничивается лишь минимальным числом термоциклов ($F \geq 10$), очевидно, что результаты испытаний при недостаточном их числе не могут служить достоверной оценкой сопротивляемости ЛКП низким температурам. Однако при числе криогенных нагружений $F = 2000$ общая длительность испытаний превысит 4000 ч, что делает процесс определения морозостойкости в лабораторных условиях весьма трудоемким и длительным.

¹ ГОСТ 27037–86. Материалы лакокрасочные. Метод определения устойчивости к воздействию переменных температур.

² ASTM D6944–15. Standard Practice for Determining the Resistance of Cured Coatings to Thermal Cycling.

³ ОСТ 1 00481–83. Покрyтия лакокрасочные на основе полиуретановых эмалей для пассажирских самолетов (вертолетов). Показатели и нормы качества.

Поэтому в добавление к результатам малоцикловых криогенных испытаний в качестве вспомогательного метода представляется целесообразным расчетным способом оценить выносливость ЛКП ВС к воздействию низких температур.

Цель работы — разработка расчетного метода определения коэффициента запаса морозостойкости ЛКП в условиях периодического обледенения и перепадов температур и проверка его согласованности с экспериментальными данными.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. В случае периодического обледенения на внешнее ЛКП ВС действует совокупность различных циклических растягивающих и сжимающих напряжений, требующих пересчета в простой цикл (т. е. характеризующийся постоянством по модулю скорости изменения напряжения) с сохранением той же долговечности.

Промерзание ЛКП — сложный термодинамический процесс, сопровождающийся изменением теплофизических характеристик материала, агрегатного состояния и массопереносом воды и т. п. Вследствие этого выявление действительной схемы термомеханического воздействия ледяного покрова на микронеровности ЛКП осуществимо лишь при некоторой степени упрощения [6].

Принимаем, что основные физико-механические свойства льда и ЛКП однородны и соответствуют среднеинтегральным значениям, а КТЛР подложки и покрытия полагаем постоянными и независимыми от температуры. Трением льда о поверхность впадин микронеровностей, а также полетными нагрузками на ЛКП, вызванными набегающими потоками воздуха и деформацией конструкции ВС, пренебрегаем.

Известно, что при технологическом высыхании (отверждении) полимерного покрытия в результате испарения летучих компонентов и других процессов происходит его усадка. Адгезия и микрорельеф жесткой подложки не позволяют пленке сжиматься, поэтому она сокращается по толщине и в ней возникают постоянно действующие биаксиальные растягивающие усадочные напряжения σ_c [7, 8], определяемые по стандартной методике⁴.

В процессе обледенения в покрытии наряду с усадочными присутствуют следующие напряжения (рис. 2).

⁴ ASTM D6991–05. Standard Test Method for Measurements of Internal Stresses in Organic Coatings by Cantilever (Beam) Method.

Растягивающее (расклинивающее) напряжение σ_i вызвано расклинивающим давлением на берега микровпадины ледяной пробки, растущей от поверхности ко дну⁵. В работе [9] предложено следующее выражение для оценки напряжения в открытой трещине:

$$\sigma_i = \frac{1}{3} \frac{E E_i \left(\frac{1}{\rho_i} - 1 \right)}{0,5 E_i (1 + \mu) + E (1 - 2\mu_i)}, \quad (1)$$

где $E_i = 9000$ МПа — модуль Юнга для льда; $\rho_i = 0,92$ — плотность льда; E, μ — действительный модуль Юнга и коэффициент Пуассона для материала покрытия; $\mu_i = 0,36$ — коэффициент Пуассона для льда.

Термическое напряжение сжатия/расширения ЛКП вследствие перепадов температуры [10] можно определить так:

$$\sigma_T = (\alpha_f - \alpha_s)(T - T_0)E / (1 - \mu^2), \quad (2)$$

где α_f и α_s — КТЛР пленки и подложки в диапазоне температур $T - T_0$ (начальной (наземной) и забортной температур).

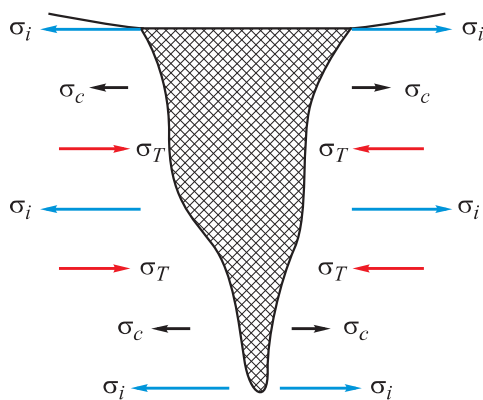


Рис. 2. Упрощенная схема напряжений во впадине микрорельефа при обледенении:

σ_i — напряжение от расширения льда;
 σ_c — усадочное напряжение;
 σ_T — напряжение от криогенного сжатия

Результирующее напряжение в покрытии представляет собой алгебраическую сумму усадочного, расклинивающего и термического напряжений

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_c + \sigma_i + \sigma_T. \quad (3)$$

⁵ СНиП 2.06.04–82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Нагрузки на сооружения от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении.

Термомеханическое нагружение ЛКП в цикле земля–воздух–земля представляет собой циклическое деформирование, приводящее к усталостному разрушению, для оценки которого необходимо знать максимальное и минимальное напряжения цикла (σ_{\max} и σ_{\min}) или среднее напряжение и амплитуду (σ_m и σ_a). Для проведения подобной оценки применяется метод эквивалентных напряжений, аппроксимирующий локальные сложные напряженные состояния в одноосное растяжение-сжатие [11, 12].

Расчет усталостной долговечности может проводиться по трем теориям (подобия [13], качества конструкции [14] и рейтингов усталости [12]), в которых для схематизации циклограммы напряжений используются метод дождя и линейная теория Пальмгрена — Майнера для суммирования повреждений [15].

Полученные циклы приводятся к отнулевым циклам равного повреждения по формулам Одингга [13, 14] или Уолкера [12], затем вычисляются эквивалентное напряжение и долговечность.

Алгоритм усталостного расчета. На основных этапах типового полета магистрального самолета забортная температура меняется следующим образом:

- рулежка (1 и 9-й этапы) $T = 298$ К;
- взлет и посадка (2 и 8-й этапы) $T = 288$ К;
- начальный набор высоты и разгон (3-й этап) и заход на посадку (7-й этап) $T = 282$ К;
- набор крейсерской высоты с участком разгона (4-й этап), снижение и торможение (6-й этап) $T = 269$ К;
- крейсерский полет (5-й этап) $T = 223$ К.

По формулам (1)–(3) определяем напряжения σ_c , σ_T и σ_i для каждого этапа полета. Таким образом, формируем цикл криогенного нагружения, характеризующийся минимальным σ_{\min} и максимальным σ_{\max} значениями результирующего напряжения.

Среднее напряжение определяем по выражению

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2. \quad (4)$$

Приведенное напряжение цикла по формуле Одингга запишем как

$$\sigma_{\text{Од}} = \sqrt{2\sigma_{\max}(\sigma_{\max} - \sigma_m)}. \quad (5)$$

Эквивалентное напряжение цикла, повреждающая способность которого равна всей совокупности нагрузок истории нагружения, можно представить так:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[m]{F\sigma_{\text{ОД}}^m}, \quad (6)$$

где m — показатель, определяющий угол наклона усталостной кривой σ - N материала ЛКП; F — число теплосмен (термоциклов).

Далее рассчитаем соответствующее число циклов до разрушения [16]

$$N = \exp((\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{ЭКВ}}) / A), \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности материала ЛКП; A — константа материала ЛКП, характеризующая скорость падения выносливости (определяется экспериментально при усталостных испытаниях [16]).

Предположим, что коэффициент запаса морозостойкости⁶

$$k = N / F \quad (8)$$

должен быть не менее 1,5.

Для экспериментального подтверждения расчета в качестве исследуемого ЛКП выбран полиэфируретановый лак, наносимый на дюралюминиевую (Д16АТ) подложку (шесть пластин $120 \times 10 \times 2$ мм) слоем толщиной 100 мкм, со следующими физико-механическими свойствами [17]: усадочное напряжение $\sigma_c \sim 3$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$; плотность $\rho = 950$ кг/м³; параметр наклона усталостной кривой $m = 9,06$; предел прочности $\sigma_{\text{в}} \approx 9$ МПа; константа материала, характеризующая скорость падения выносливости, $A = 0,5$; КТЛР в рабочем диапазоне температур $\alpha_f = 70 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; КТЛР сплава Д16 в рабочем диапазоне температур $\alpha_s = 21,6 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ [18].

При охлаждении до -50 °С и переходе из эластичного состояния в стеклообразное модуль упругости ЛКМ экспоненциально увеличивается более чем в 2 раза [19]. Динамика изменения модуля Юнга исследуемого лака с изменением температуры следующая: $E = 30, 35, 38, 47$ и 78 МПа при $T = 298, 288, 282, 269$ и 223 К соответственно.

Испытания на морозостойкость проводили по стандартной методике⁷ (метод А, п. 2.4.1) в камере холода ULTF 320 при температуре (-50 ± 20) °С с двухчасовой выдержкой при данной температуре. Общее число испыта-

⁶ Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории, п. 25.303.

⁷ ГОСТ 9.401–91. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов (с Изменениями № 1, 2).

ний составило 2000 термоциклов. Отсчет времени испытаний начинали спустя 5 мин после стабилизации температуры в испытательной камере.

Оценку деструктивных процессов проводили, исследуя поверхность образцов на предмет наличия или отсутствия трещин после заданного числа термоциклов при осмотре.

Для осмотра образцов после извлечения из камеры применяли лупу с семикратным увеличением по ГОСТ 25706–83⁸. При вынужденных простоях образцы хранили при (23 ± 2) °С и относительной влажности не более (50 ± 5) %.

За результат испытаний принимали максимальное число термоциклов, при котором не наблюдалось растрескивания на каждом образце при осмотре.

Обсуждение полученных результатов. Проведенные испытания показали, что все образцы с покрытием достаточно устойчивы в течение как минимум 2000 термоциклов, так как при осмотре у них отсутствовали трещины после указанной продолжительности испытаний.

Результат расчета. Принимаем $F = 2000$ циклов, температурный диапазон полета $T_0 = 298$ К (25 °С)...223 К (–50 °С)...298 К (25 °С).

По формулам (1)–(3) определяем напряжения для каждого этапа полета и формируем цикл нагружения.

Вследствие большого числа режимов полета во избежание излишнего увеличения объема настоящей работы проведем наглядный расчет только для 5-го этапа (крейсерский полет, $T = 223$ К, модуль Юнга ЛКП $E = 78$ МПа).

Расклинивающее напряжение

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{3} \frac{E E_i \left(\frac{1}{\rho_i} - 1 \right)}{0,5 E_i (1 + \mu) + E (1 - 2\mu_i)} = \\ &= \frac{1}{3} \frac{78 \cdot 9000 \left(\frac{1}{0,92} - 1 \right)}{0,5 \cdot 9000 (1 + 0,35) + 78 (1 - 2 \cdot 0,36)} = 3,334 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Термическое напряжение

$$\begin{aligned} \sigma_T &= (\alpha_f - \alpha_s)(T - T_0)E / (1 - \mu^2) = \\ &= (70 \cdot 10^{-6} - 21,6 \cdot 10^{-6})(223 - 298)78 / (1 - 0,35^2) = -0,323 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

⁸ ГОСТ 25706–83. Лупы. Типы, основные параметры. Общие технические требования (с Изменением № 1).

Результирующее напряжение

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_c + \sigma_i + \sigma_T = 3 + 3,334 - 0,323 = 6,011 \text{ МПа.}$$

Аналогично рассчитываем значения σ_i , σ_T и для остальных режимов (таблица).

**Расчетные значения напряжений в полиэфируретановом покрытии
по этапам типового полета магистрального самолета
в диапазоне температур $-50...25 \text{ }^\circ\text{C}$**

Параметры	Этапы типового полета ВС / Забортная температура, К								
	1/298	2/288	3/282	4/269	5/223	6/269	7/282	8/288	9/298
σ_c , МПа	3	3	3	3	3	3	3	3	3
σ_b , МПа	0	0	0	2,012	3,334	2,012	0	0	0
σ_T , МПа	0	- 0,019	- 0,034	- 0,075	- 0,323	- 0,075	- 0,034	- 0,019	0
σ_{Σ} , МПа	3	2,981	2,966	4,937	6,011	4,937	2,966	2,981	3
T , К	298	288	282	269	223	269	282	288	298
E , МПа	30	35	38	47	78	47	38	35	30

На основе результирующих напряжений каждого этапа полета (рис. 3) определяем, что минимальное напряжение ($\sigma_{\min} = 2,966 \text{ МПа}$) соответствует 3-му этапу (начальный набор высоты и разгон), а максимальное ($\sigma_{\max} = 6,011 \text{ МПа}$) — 5-му этапу (крейсерский полет).

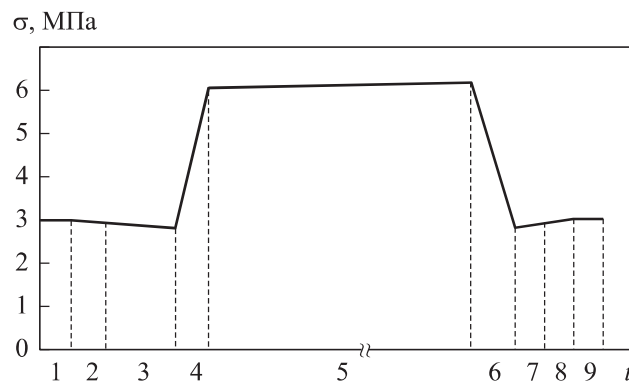


Рис. 3. Результирующее переменное криогенное термомеханическое напряжение в полиэфируретановом ЛКП ВС по этапам типового полета

Среднее напряжение составляет $\sigma_m = 4,49 \text{ МПа}$.

Приведенное напряжение по формуле Одингга $\sigma_{Од} = 2,1 \text{ МПа}$.

Эквивалентное напряжение цикла

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[n]{F\sigma_{\text{Од}}^m} = \sqrt[9,06]{2000 \cdot 2,1^{9,06}} = 4,86 \text{ МПа.}$$

Число термоциклов до разрушения $N = 3903$.

Коэффициент запаса морозостойкости

$$k = N / F = 3903 / 2000 \approx 1,95 > 1,5.$$

Поскольку $k > 1,5$, запас морозостойкости на период эксплуатации 4 года обеспечивается.

Несмотря на то, что данный расчет носит приближенный характер, так как основан только на усредненных параметрах, полученные результаты не противоречат данным эксперимента ($N = 3903$ термоцикла). Разработанная методика может быть использована для предварительной расчетной оценки морозостойкости ЛКП ВС.

Заключение. Для выбора ЛКМ внешних покрытий ВС по условиям прочности необходим учет влияния циклического обледенения. Подтверждение заданного ресурса ЛКП ВС требует расчета его долговечности.

Для упрощения расчета термомеханические нагрузки на ЛКП ВС разделены на три составляющие — напряжения от усадки, температурных перепадов и давления льда, обуславливающие двухосное (биаксиальное) деформирование пленки. Для расчетной оценки морозостойкости выбран метод эквивалентных напряжений с использованием циклограммы нагружения переменными термомеханическими напряжениями, составляющими полетный цикл.

В качестве примера выполнен расчет морозостойкости полиэфируретанового внешнего покрытия на подложке из листа Д16АТ для диапазона рабочих температур $-50 \dots 25$ °С. Согласно расчету, на период эксплуатации 4 года (2000 полетов) предлагаемое ЛКП имеет почти двукратный запас морозостойкости (3903 термоцикла).

В результате испытаний на морозостойкость в течение 2000 термоциклов не выявлено микротрещин, что согласуется с расчетными данными. Разработанная методика может быть использована для предварительной расчетной оценки морозостойкости ЛКП ВС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tiong U.H., Clark G. Aircraft joints and corrosion control. Structural integrity: influence of efficiency and green imperatives. *Proc. 26th ICAF Symp. Springer*, 2011, pp. 625–634. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1664-3_50
- [2] Андриященко Е.А. Светостойкость лакокрасочных покрытий. М., Химия, 1986.

- [3] Ерусалимский М.А. Обзор авиационных происшествий, связанных с обледенением. *Проблемы безопасности полетов*, 2002, № 1, с. 30–42.
- [4] Никитин А.И. Методика идентификации аэродинамических коэффициентов ЛА. *Сб. докл. 7 науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008»*. Ч. 2. М., ЦАГИ, 2008, с. 3–6.
- [5] Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. СПб., Химиздат, 2008.
- [6] Рассказов Л.Н., ред. Гидротехнические сооружения. Ч. 1. М., Издательство АСВ, 2011.
- [7] Углов А.А., Анищенко Л.М., Кузнецов С.Е. Адгезионная способность пленок. М., Радио и связь, 1987.
- [8] Панин А.В. Нелинейные волны локализованного пластического течения в наноструктурированных поверхностных слоях твердых тел и тонких пленках. *Физическая мезомеханика*, 2005, т. 8, № 3, с. 5–17.
- [9] Bost M., Pouya A. Stress generated by the freeze-thaw process in open cracks of rock walls: empirical model for tight limestone. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2017, vol. 76, no. 4, pp. 1491–1505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0955-6>
- [10] Воронин И.В., Кондрашов Э.К. Долговечность адгезионных связей полимерных покрытий. *Лакокрасочные материалы и их применение*, 1991, № 1, с. 25–26.
- [11] Райхер В.Л. Усталостная повреждаемость. М., МАТИ, 2006.
- [12] Стрижиус В.Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций. М., Машиностроение, 2012.
- [13] Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М., Машиностроение, 1993.
- [14] Лоим В.Б. Практика расчетной оценки долговечности авиаконструкций с использованием эффективных коэффициентов концентрации напряжений. *Вестник машиностроения*, 1998, № 9, с. 31–37.
- [15] Paris P.C., Tada H., Donald J.K. Service load fatigue damage — a historical perspective. *Int. J. Fatigue*, 1999, vol. 21, no. 1, pp. S35–S46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00054-7)
- [16] Пашаев А.М., Джанахмедов А.Х., Алиев А.А. Расчет на усталостную прочность внешнего лакокрасочного покрытия самолета. *Техника воздушного флота*, 2018, № 1, с. 12–19.
- [17] Алиев А.А. Трибофатические испытания лакокрасочного покрытия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 1, с. 92–100. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2018-1-92-100>
- [18] Рудометкин Ф.И., Недельский Г.В. Монтаж, эксплуатация и ремонт холодильных установок. М., Пищевая промышленность, 1975.
- [19] Браун Д., Шердрон Г., Керн В. Практическое руководство по синтезу и исследованию свойств полимеров. М., Химия, 1976.

Алиев Акпер Алиназар оглы — ведущий инженер-конструктор отдела разработки алгоритмов и программ отделения прочности ПАО «Корпорация «Иркут» (Российская Федерация, 125315, Москва, Ленинградский пр-т, д. 68).

Ампилогов Алексей Юрьевич — канд. техн. наук, начальник бригады отдела разработки алгоритмов и программ отделения прочности ПАО «Корпорация «Иркут» (Российская Федерация, 125315, Москва, Ленинградский пр-т, д. 68).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алиев А.А., Ампилогов А.Ю. Расчетный метод оценки морозостойкости лакокрасочных покрытий воздушных судов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 4–17.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-4-17>

METHOD FOR COMPUTATIONAL ESTIMATION OF FROST RESISTANCE IN AIRCRAFT PAINT COATINGS

A.A. Aliev

akper.aliev@gmail.com

A.Yu. Ampilogov

ampilogov@gmail.com

Irkut Corporation, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers the issues of temperature cycling and ice accretion on external paint coatings of aircraft as well as the negative effects of these processes expressed in periodic tension-compression strain and absorption of atmospheric moisture by surface microasperities with its subsequent freezing resulting in gradual cavity wedging. We note that laboratory testing methods recreating the temperature cycling that simulates actual operating conditions of aircraft paint coatings are increasingly labour-intensive. We substantiate the feasibility of developing a computational method for frost resistance estimation in specific operating conditions. The method takes into account the combination of contraction stresses, excessive cooling and wedging caused by ice build-up. We assume the main physical and mechanical properties of ice and paint to be homogeneous and equal to cumulative average values, and the linear thermal expansion coefficients of the substrate and coating to be constant and not dependent on temperature. We disregard ice friction over the microasperity cavities and in-flight loads on the paint coating caused by

Keywords

Ice accretion, coating, microrelief, fatigue, computation, frost resistance, fracturing

incident air flows and structural deformations of the aircraft. We present a method of computing frost resistance of aircraft paint coating subjected to cyclical ice accretion, which is based on the method of equivalent stresses. We tested frost resistance of a polyesterurethane coating over a duralumin plate in the range of -50 to 25 °C for $F = 2000$ freezing and thawing cycles. We performed a temperature cycling computation of the factor of safety for frost resistance in the case of periodic ice accretion. The results obtained are in good agreement with experimental data

Received 11.10.2019

Accepted 25.11.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Tiong U.H., Clark G. Aircraft joints and corrosion control. Structural integrity: influence of efficiency and green imperatives. *Proc. 26th ICAF Symp.* Springer, 2011, pp. 625–634. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1664-3_50
- [2] Andryushchenko E.A. Svetostoykost' lakokrasochnykh pokrytiy [Light-resistance of paint coatings]. Moscow, Khimiya Publ., 1986.
- [3] Erusalimskiy M.A. Review on aviation accidents happened due to icing. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2002, no. 1, pp. 30–42 (in Russ.).
- [4] Nikitin A.I. [Identification method for aircraft aerodynamic coefficient]. *Sb. dokl. 7 Nauch. konf. po gidro-aviatsii "Gidroaviasalon-2008". Ch. 2* [Proc. 7th Sc. Conf. on Hydroaviation "Gidroaviasalon-2008". P. 2]. Moscow, TsAGI Publ., 2008, pp. 3–6 (in Russ.).
- [5] Yakovlev A.D. Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh pokrytiy [Chemistry and technology of paint coatings]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2008.
- [6] Rasskazov L.N., ed. *Gidrotehnicheskie sooruzheniya. Ch. 1.* [Hydrotechnical Structures]. Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2011.
- [7] Uglov A.A., Anishchenko L.M., Kuznetsov S.E. Adgezionnaya sposobnost' plenok [Adhesive properties of films]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987.
- [8] Panin A.V. Nonlinear waves of localized plastic flow in nanostructured surface layers of solids and thin films. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2005, vol. 8, no. 3, pp. 5–17 (in Russ.).
- [9] Bost M., Pouya A. Stress generated by the freeze-thaw process in open cracks of rock walls: empirical model for tight limestone. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2017, vol. 76, no. 4, pp. 1491–1505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0955-6>
- [10] Voronin I.V., Kondrashov E.K. Durability of adhesive bonds of polymer coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1991, no. 1, pp. 25–26 (in Russ.).
- [11] Raykher V.L. Ustalostnaya povrezhdanost' [Fatigue vulnerability]. Moscow, MATI Publ., 2006.

[12] Strizhius V.E. Metody rascheta ustalostnoy dolgovechnosti elementov aviakonstruktsiy [Calculation methods for fatigue endurance of aero-construction elements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012.

[13] Kogaev V.P. Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni [Stress calculations of the time-variable strain]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993.

[14] Loim V.B. Calculation assessment practice of avia-construction life duration using effective stress concentration coefficients. *Vestnik mashinostroeniya*, 1998, no. 9, pp. 31–37 (in Russ.).

[15] Paris P.C., Tada H., Donald J.K. Service load fatigue damage — a historical perspective. *Int. J. Fatigue*, 1999, vol. 21, no. 1, pp. S35–S46.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00054-7)

[16] Pashaev A.M., Dzhanakmedov A.Kh., Aliev A.A. Fatigue endurance calculation of aircraft outer paint covering. *Tekhnika vozdušnogo flota* [Aviation Science and Technology], 2018, no. 1, pp. 12–19 (in Russ.).

[17] Aliev A.A. Tribo-fatigue testing of paint coating. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2018, no. 1, pp. 92–100 (in Russ.).

DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2018-1-92-100>

[18] Rudometkin F.I., Nedel'skiy G.V. Montazh, ekspluatatsiya i remont kholodil'nykh ustanovok [Assembling, exploitation and repair of refrigerator plants]. Moscow, Pishhevaya promyshlennost' Publ., 1975.

[19] Braun D., Cherdron H., Kern W. Praktikum der Makromolekularen Organischen Chemie. Heidelberg, 1966.

Aliev A.A. — Leading Design Engineer, Department of Algorithm and Software Development, Department of Strength, Irkut Corporation (Leningradskiy prospekt 68, Moscow, 125315 Russian Federation).

Ampilogov A.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Team Head, Department of Algorithm and Software Development, Department of Strength, Irkut Corporation (Leningradskiy prospekt 68, Moscow, 125315 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aliev A.A., Ampilogov A.Yu. Method for computational estimation of frost resistance in aircraft paint coatings. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 4–17 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-3-4-17>