

УДК 669.716:620.197.3

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ «ЧЕРНОГО» ПОКРЫТИЯ НА  
ОБНАРУЖЕНИЕ КОРРОЗИИ В АЛЮМИНИИ  
МЕТОДОМ АКТИВНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ  
ТЕРМОГРАФИИ**

А.О. Чулков, В.П. Вавилов

Томский политехнический университет  
E-mail: chulkovao@tpu.ru, vavilov@tpu.ru

**Чулков Арсений Олегович**, аспирант кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: chulkovao@tpu.ru  
Область научных интересов: тепловой неразрушающий контроль.

**Вавилов Владимир Платонович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией «Тепловые методы контроля» Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: vavilov@tpu.ru  
Область научных интересов: тепловой неразрушающий контроль.

В настоящем исследовании впервые проанализировано влияние «черных» покрытий на величину отношения сигнал/шум над коррозионными дефектами в дюралюминии, а также на визуальное восприятие результатов активного теплового контроля коррозии, включая возможности компьютерной обработки данных. На примере покрытия из акриловой матовой краски черного цвета показано, что толщина покрытия должна составлять 15–20 мкм, причем наилучшее восприятие результатов контроля имеет место в случае анализа исходных инфракрасных термограмм.

**Ключевые слова:**

Тепловой контроль, коррозия, алюминий, Фурье-анализ, анализ главных компонент.

Алюминиевые панели самолетов подвержены скрытой коррозии, которая, как правило, начинается вокруг заклепок, но может распространяться на значительные зоны. Обнаружение коррозионного износа сводится к задаче толщинометрии, которую в промышленности, как правило, решают с помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля (НК). Тем не менее в авиации необходимость сплошного контроля больших площадей на открытом воздухе ставит задачу разработки новых методов НК, среди которых, по-видимому, наиболее перспективен тепловой/инфракрасный (ИК) контроль. Исследования по данному методу на протяжении 20 последних лет проводятся в США, прежде всего корпорацией Boeing [1]. При этом на американском рынке доминирует компания Thermal Wave Imaging, которая поставляет тепловые дефектоскопы, реализующие запатентованный принцип термографического обработки сигнала (TSP-Thermographic Signal Processing) [2]. В Европе в последние годы появился ряд тепловых дефектоскопов разработки германских фирм Thermosensorik, Edevis и Automation Technologies, а сам тепловой метод НК получил признание корпорации Airbus.

Для обнаружения коррозии в алюминиевых панелях используют классический вариант активного одностороннего теплового контроля, в котором объект испытаний нагревается мощным тепловым импульсом, а с помощью быстродействующей ИК-камеры регистрируют температурное поле панелей на стадии охлаждения.

Основными проблемами теплового контроля коррозии являются:

- малое время существования температурных сигналов (0,1–0,5 с) в зонах коррозии ввиду высокой теплопроводности алюминия;
- высокий коэффициент отражения алюминия как в ИК-, так и в видимом диапазонах, что затрудняет нагрев панелей оптическим излучением и регистрацию их собственного теплового излучения с помощью ИК-тепловизора; светлая окраска самолетов существенно повышает коэффициент излучения в ИК-диапазоне, но по-прежнему затрудняет оптический нагрев панелей.

В экспериментальных исследованиях, а зачастую и на практике, применяют так называемые черные покрытия, которые создают условия абсолютно черного тела в типичных тепловизионных диапазонах (3–5 и 7–13 мкм) и, как правило, обладают черным цветом в видимом диапазоне

для обеспечения максимального поглощения потока нагрева. В качестве покрытий используют масляные и акриловые краски, эмали, графитовые суспензии в воде, сажу и т. п. Следует отметить, что, несмотря на большое число предложенных способов учета коэффициента излучения в оптической пирометрии и ИК-термографии, нанесение «черных» покрытий является надежным и наиболее популярным способом обеспечения надежных температурных измерений. Основным недостатком этого способа является необходимость нанесения и удаления покрытий, что не всегда приемлемо на практике.

В Томском политехническом университете исследования по тепловому НК коррозии проводятся в течение ряда последних лет. В сотрудничестве с зарубежными исследователями была разработана теория метода и предложен простой алгоритм количественной оценки коррозии согласно формуле

$$\Delta L / L = 1 - T_{nd} / T_d,$$

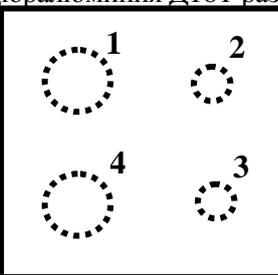
где  $\Delta L / L$  – относительный унос материала;  $T_{nd}, T_d$  – температуры в бездефектной и дефектной зонах. Данная формула подтвердила свою высокую точность в случае одномерных моделей, т. е. для зон коррозии большой площади, где краевой диффузией тепла можно пренебречь [3]. Во многих практических задачах гипотеза одномерности модели является приемлемой. Если же речь идет о дефектах небольшой площади, тем более в высокотеплопроводных металлах, предлагаются более сложные алгоритмы, основанные на визуальной оценке поперечных зон коррозионных пятен непосредственно на ИК-термограммах [4].

Следует заметить, что влияние «черных» покрытий на эффективность теплового НК коррозии в металлах практически не исследовано. Строгий анализ этого влияния требует постановки достаточно «тонких» экспериментов по исследованию спектрального пропускания покрытий различного типа в видимом и ИК-диапазонах. В настоящем исследовании феноменологически исследовано влияние «черного» покрытия различной толщины на эффективность выявления участков скрытой коррозии в алюминии.

На первом этапе исследований оценили поглощение покрытий различной толщины. Эксперимент заключался в измерении спада сигнала на выходе германиевого фотодиода, регистрирующего прохождение излучения галогеновых и ксеноновых ламп через лавсановую пленку, на которую последовательно наносили покрытия из акриловой матовой эмали черного цвета, причем толщина одного слоя равнялась 8,0–8,2 мкм, соответственно четырех слоев – в среднем 32,6 мкм. Установлено, что двухслойное покрытие поглощает около 60 % световой энергии, а четырехслойное покрытие – около 90 %.

Для ИК-термографических исследований был изготовлен стандартный образец из дюралюминия Д16Т размером 100×100×1,88 мм, содержащий четыре дефекта различного диаметра с дефектами, характеризующимися различным относительным уносом материала (табл. 1). На лицевую поверхность образца наносили вышеуказанные покрытия.

**Таблица 1.** Описание стандартного образца из дюралюминия Д16Т размером 100×100×1,88 мм

| № дефекта         | 1    | 2    | 3    | 4    |  |
|-------------------|------|------|------|------|--|
| Унос материала, % | 71,8 | 25,4 | 10,5 | 22,6 |  |
| Диаметр, мм       | 20   | 10   | 10   | 20   |  |

Использована экспериментальная установка, разработанная в Томском политехническом университете на базе исследовательского тепловизора высокого уровня FLIR SC 7700M (спектральный диапазон 8–10 мкм, температурная чувствительность 20 мК, формат изображения 640×512 элементов) и источника импульсного оптического нагрева из двух ксеноновых ламп Bownens (полная энергия импульса 3,2 кДж, длительность импульса 5 мс), см. рис. 1. Результатом тестов являлись последовательности из 500 термограмм, записанных с частотой 50 Гц. В дальней-

шем для обработки использовали только последовательности из 25 изображений, соответствующих интервалу времени 0,5 с, в течение которых развивались и исчезали сигналы от коррозионных дефектов.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка для активного теплового контроля

Для обработки данных использовали компьютерную программу ThermoFit Pro (разработка ТПУ), в которой реализованы практически все современные алгоритмы обработки ИК-термограмм, а именно: пространственная и временная фильтрация, полиномиальная аппроксимация, Фурье-анализ, скалярный и комплексный вейвлет-анализ, метод анализа главных компонент (МАГК), анализ производных и статистический анализ.

Анализируя экспериментальные данные, следует отметить, что в изделии без покрытия дефекты не обнаруживаются в принципе. Нанесение четырех последовательных покрытий вышеупомянутой толщины обеспечило нагрев изделия от 0,4 до 0,8 °С выше температуры окружающей среды. Тем не менее на фоне даже столь незначительного нагрева по крайней мере часть дефектов уверенно выявлялась.

Для сравнения результатов отдельных тестов использовали концепцию отношения сигнал/шум:

$$S = (\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}) / \sigma_{nd},$$

где использованы средние температуры в дефектной и бездефектной зонах, а  $\sigma_{nd}$  есть стандартное отклонение температуры в бездефектной зоне.

Соответствующие значения  $S$  приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Влияние толщины «черного» покрытия на выявляемость дефектов в стандартном образце из дюралюминия

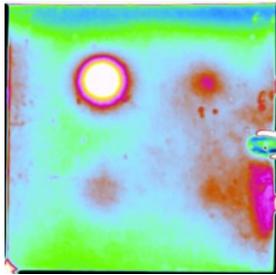
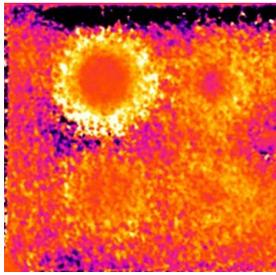
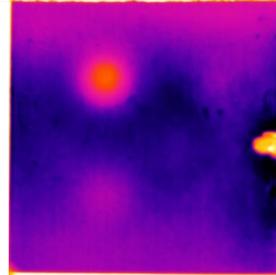
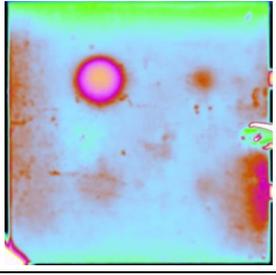
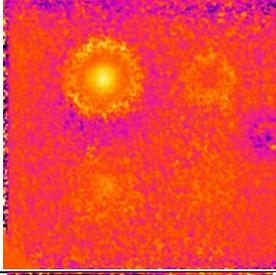
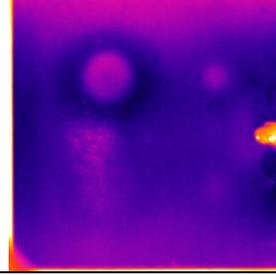
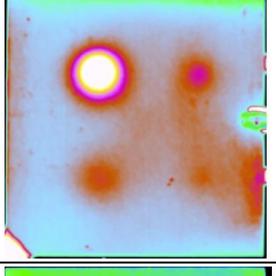
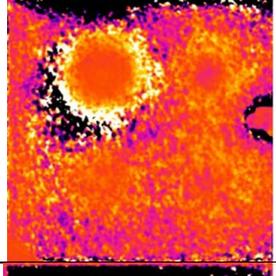
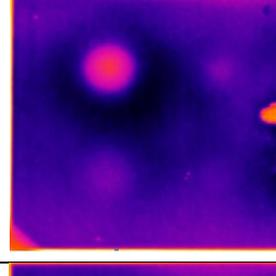
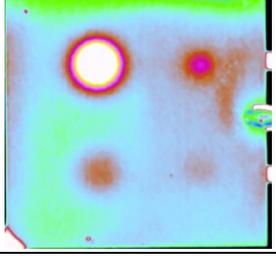
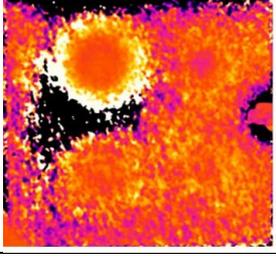
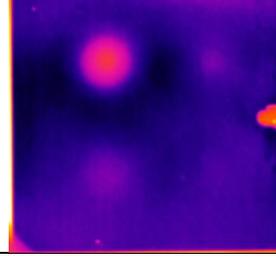
| Алгоритм обработки данных | Отношение сигнал/шум $S$ |            |            |            |
|---------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
|                           | Дефект № 1               | Дефект № 2 | Дефект № 3 | Дефект № 4 |
| Толщина покрытия 8,2 мкм  |                          |            |            |            |
| Исходные данные           | 20,6                     | 15,0       | 6,1        | 5,2        |
| Фурье-анализ (фазограмма) | 2,6                      | 0,4        | 0,6        | 1,5        |
| МАГК *                    | 30,3                     | 17,9       | 7,9        | 8,8        |
| Толщина покрытия 16,3 мкм |                          |            |            |            |
| Исходные данные           | 18,3                     | 7,6        | 3,7        | 7,1        |
| Фурье-анализ (фазограмма) | 1,1                      | 2,6        | 1,0        | 0,1        |
| МАГК                      | 31,0                     | 10,0       | 4,9        | 7,4        |
| Толщина покрытия 24,5 мкм |                          |            |            |            |
| Исходные данные           | 26,9                     | 9,5        | 3,7        | 7,3        |
| Фурье-анализ (фазограмма) | 0,2                      | 2,0        | 1,0        | 0,3        |
| МАГК                      | 32,1                     | 13,6       | 4,7        | 7,6        |
| Толщина покрытия 32,8 мкм |                          |            |            |            |
| Исходные данные           | 32,1                     | 8,5        | 6,7        | 7,7        |
| Фурье-анализ (фазограмма) | 0,7                      | 2,2        | 0,8        | 0,7        |
| МАГК                      | 52,0                     | 15,0       | 9,9        | 8,0        |

\* Наилучшая компонента

Дефекты 1 и 2, создающие сравнительно высокие температурные сигналы, лучше всего выявляются по критерию  $S$  при использовании четырехслойного покрытия, в то время как отношение сигнал/шум для «слабых» дефектов 3 и 4 неоднозначно зависит от толщины покрытий. Мы считаем, что полученные результаты показывают, что критерий отношения сигнал/шум не может считаться достаточным в тепловом контроле, поскольку в величине  $S$ , зависящей только от распределения амплитудных пиксельных значений, отсутствует информация о конфигурации температурных аномалий. Кроме того, на  $S$  существенно сказывается выбор бездефектной зоны для вычисления величины  $\sigma_n$ , на которую влияет наличие царапин дюралюминия, локальных утолщений покрытия, неравномерный нагрев и другие факторы.

Эвристическое восприятие ИК-термограмм иллюстрируется данными в табл. 3, полученными как без какой-либо компьютерной обработки, так и с использованием Фурье-преобразования и МАГК.

**Таблица 3.** ИК-термограммы стандартного образца из дюралюминия с «черными» покрытиями различной толщины

| Толщина покрытия, мкм | Исходные данные   | Фурье-анализ (фазограмма)  | МАГК (наилучшая компонента)   |
|-----------------------|---|--|---|
| 8,2                   |   |   |   |
| 16,3                  |  |  |  |
| 24,5                  |  |  |  |
| 32,8                  |  |  |  |

Из табл. 3 видно, что оптимальным для оператора является четырехслойное покрытие, обеспечивающее однородный тепловой фон в бездефектных областях. Другим выводом, кото-

рый противоречит большинству ранее опубликованных работ, является то, что наиболее естественными для анализа выглядят исходные ИК-термограммы (для покрытий любой толщины). Компьютерная обработка с использованием Фурье-преобразования и МАГК не улучшает визуальное восприятие результатов контроля, поскольку вокруг дефектных областей возникают кольцеобразные зоны со специфическим поведением сигналов (фазы и главных компонент). Учитывая, что оптическое излучение нагрева, с учетом отражения от дюралюминия, дважды проходит через покрытие, рекомендуется наносить не менее двух слоев акрилового покрытия толщиной 15–20 мкм.

*Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации государственного задания Минобрнауки России на 2014-2016 гг., НИР № 445 (ОНГ).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alcott J. An investigation of nondestructive inspection equipment: Detecting hidden corrosion on USAF aircraft // Mater. Evaluation. – 1994. – № 5. – P. 64–73.
2. Shepard S. Advances in pulsed thermography // Proc. SPIE «Thermosense-XXIII». – 2001. – Vol. 4360.– P. 511–515.
3. Vavilov V., Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Bales M. Inversion for Hidden Corrosion Characterization: Theory and Applications // Intern. J. Heat & Mass Transfer. – 1996. – Vol. 39. – P. 355–371.
4. Marinetti S., Vavilov V. IR thermographic detection and characterization of hidden corrosion in metals: General analysis // Corrosion science. – 2010. – Vol. 52. – Issue 3. – P. 865–872.

Поступила 22.04.2014 г.