

УДК: 539.3

Экспериментальное исследование механических свойств полимерных покрытий на образцах из алюминиевого сплава

Гетманов А.Г.¹, Мамонов С.В.^{2*}, Мартиросов М.И.¹, Рабинский Л.Н.^{1}.**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Компания «Транснефть», ул. Полянка, 57, Москва, 119180, Россия*

**e-mail:sergei.mamonov@gmail.com*

***e-mail:f9_dec@mai.ru*

Аннотация

Анализируются результаты экспериментальных исследований по растяжению алюминиевых образцов без покрытия и с нанесенными на них защитными покрытиями различных типов, предложена методика определения модуля упругости.

Ключевые слова: эксперимент, растяжение, алюминиевый сплав, защитные покрытия, порошковые краски, лаки, модуль упругости

Введение

Одним из основных металлических конструкционных материалов для авиастроения в настоящее время является алюминий, используемый в виде сплавов. Однако в связи с агрессивностью окружающей среды детали авиационных элементов конструкций из алюминиевых сплавов требуют нанесения различных защитных лакокрасочных покрытий. Это обусловлено, прежде всего, хорошими

антикоррозионными характеристиками большинства применяемых покрытий. Сочетание алюминиевой основы и лакокрасочного покрытия обеспечивает конструкции в целом прочность, долговечность, устойчивость к истиранию и необходимые функциональные свойства.

Постановка задачи

Экспериментальное исследование механических свойств покрытий проведено на образцах-полосах из алюминиевого сплава 1163 РДТВ (РД – плакированные листы с плакировкой регламентированной толщины, Т – закаленные в воде и естественно состаренные, В – обшивочные). Основными преимуществами сплава на основе алюминия являются: низкая плотность, высокая удельная прочность, хорошая коррозионная стойкость, легкость механической обработки. Алюминиевые сплавы сравнительно легко поддаются горячей и холодной деформации, прокатке, ковке, прессованию, волочению, гибке, листовой штамповке. Все сплавы на основе алюминия можно сваривать точечной сваркой, а специальные – сваркой плавлением и другими видами сварки. Алюминиевые сплавы легко обрабатываются резанием. Сплав 1163 системы Al – Cu – Mg – один из основных конструкционных металлических материалов в авиастроении. По сравнению с другими сплавами этой системы он обладает повышенной выносливостью и более высокой вязкостью разрушения, благодаря чему его активно применяют в самолетах длительного ресурса в элементах конструкций, критичных по усталости. Механические характеристики данного сплава (ГОСТ 21631-76, ТУ 1-801-84-83) представлены в таблице 1 по В-базису. В-базис – расчетное значение, определенное с вероятностью

неразрушения 90% и доверительной вероятностью 95%. В-базис принимается при условии стопроцентного контроля образцов.

Таблица 1

Механические характеристики сплава 1163 РДТВ

№ п/п	Механическая характеристика	Значение
1	2	3
1	Предел прочности, МПа	459
2	Условный предел текучести, МПа	341
3	Модуль упругости, 10^5 МПа	0,69
4	Модуль сдвига, 10^5 МПа	0,27
5	Коэффициент Пуассона	0,31
6	Относительное удлинение, %	13
7	Плотность, кг/м^3	2780

Ширина испытываемых образцов-полос составляла 12 мм, длина 120 мм. В экспериментах исследовались образцы следующей толщины: 1,0 мм, 1,2 мм, 1,5 мм и 1,9 мм. В качестве покрытий использовались порошковая полимерная краска фирмы EUROPOLVERI (Италия) на эпоксидно-полиэфирной основе, а также современные защитные лаки (непигментированные покрытия). Нанесение на окрашиваемую поверхность в качестве второго слоя лака значительно повышает прочностные и эксплуатационные характеристики покрытия в целом. Перед нанесением покрытий на алюминиевые образцы-полосы проводилась предварительная подготовка поверхностей: обезжиривание (удаление с поверхности органических загрязнений) и хромирование (обработка поверхности соединениями, содержащими шестивалентный хром, что повышает защитные свойства алюминиевых сплавов и делает покрытие более долговечным).

Качественная подготовка окрашиваемой поверхности обеспечивает высокие адгезионные характеристики.

В работе исследовались следующие лакокрасочные покрытия:

- *Покрытие №1.* Краска черная (RAL 9005) глянцевая порошковая без лака;
- *Покрытие №2.* Краска черная (RAL 9005) глянцевая порошковая + защитный порошковый лак Limerton (Франция);
- *Покрытие №3.* Краска черная (RAL 9005) глянцевая порошковая + защитно-декоративный лак (с блестками), нанесенный по технологии Glitter;
- *Покрытие №4.* Краска черная (RAL9005) глянцевая порошковая + защитный керамический наноструктурированный лак Ceramiclear Deltron D8105 фирмы PPG Industries (США). Этот лак содержит керамические наночастицы, которые после нанесения лака на поверхность, затвердевая в печи полимеризации, образуют густую сетчатую структуру, которая выступает в качестве защитного слоя окрашиваемой алюминиевой поверхности, улучшает ее эксплуатационные свойства.

Нанесение покрытий проводилось в порошковой камере Gema (Швейцария) методом электростатического распыления. При этом электрически заряженные частицы порошковой краски притягиваются к заземленной окрашиваемой поверхности и прилипают к ней. Толщина покрытий составляет ~100 мкм, причем для покрытий типа: краска + лак, толщина краски составляет ~60 мкм, а лака ~40 мкм. Для покрытия №1 толщина краски составляет ~100 мкм. Контроль толщины покрытия осуществлялся электронным толщиномером QuaNix 7500 (Германия), предназначенным для измерения толщины покрытия на ферромагнитных и

неферромагнитных поверхностях. Такой прибор обладает точностью $\pm 1 \text{ мкм} + 0,02X$, где X – результат измерения.

Полимеризация нанесенного покрытия проходила в печи полимеризации (термокамере).

Определение модуля упругости покрытия основано на сопоставлении значений модуля упругости, полученных для исходного материала (в рассматриваемом исследовании алюминиевый сплав 1163 РДТВ) и эффективного модуля упругости для образцов с изучаемыми покрытиями. Различия между этими величинами составляют 10-15%. В этом случае точность оценки модуля упругости покрытия в значительной степени зависит от точности определения напряжения и деформации в процессе испытаний образцов материалов [1, 2].

Эксперименты проводились на электромеханической испытательной машине INSTRON (Великобритания), модель 5960. Управление испытательной машиной осуществлялось посредством программного обеспечения INSTRON Bluehill, с помощью которого проводилось задание параметров испытания, управление системой, сбор и анализ данных, полученных в ходе экспериментальных работ.

Анализ полученных результатов

Основное соотношение для определения связи между эффективным модулем упругости трехслойного образца (алюминиевая подложка + полимерное покрытие с двух сторон) и модулем упругости алюминиевого сплава 1163 РДТВ и лакокрасочного покрытия можно получить из рассмотрения задачи о растяжении трехслойной полосы. Примем, что в испытании задается определенный уровень

деформаций, общий как для слоя покрытия, так и для полосы алюминиевой подложки. Уравнение равновесия полосы в этом случае можно записать в виде [1]:

$$S_0 E_0 = S_{\text{п}} E_{\text{п}} + S_{\text{Al}} E_{\text{Al}}, \quad (1)$$

или

$$E_0 = E_{\text{п}} S_{\text{п}} / S_0 + E_{\text{Al}} S_{\text{Al}} / S_0, \quad (2)$$

где S_0 , E_0 – общая площадь сечения образца-полосы и эффективный модуль упругости, определяемый по результатам испытания на растяжение полосы с покрытием, $S_{\text{п}}$, $E_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения, соответствующая слою покрытия и модуль упругости покрытия, S_{Al} , E_{Al} – площадь поперечного сечения алюминиевой полосы и модуль упругости алюминиевого сплава 1163 РДТВ.

Формула (2) использовалась для расчета модуля упругости исследуемого покрытия.

Экспериментальные и рассчитанные по формуле (2) значения представлены в нижеприведенной таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний на растяжение образцов с покрытиями и
экспериментальные значения модуля упругости исследуемых покрытий

№ покрытия- образца	Площадь поперечного сечения образца, мм ²	Площадь поперечного сечения алюминиевой подложки, мм ²	Площадь поперечного сечения покрытия, мм ²	Эффективный модуль упругости, 10 ⁵ МПа	Модуль упругости покрытия, 10 ⁴ МПа
1	2	3	4	5	6
1-1	14,4	12	2,4	0,62500	0,3000
1-2	14,4	12	2,4	0,62583	0,3050
1-3	16,8	14,4	2,4	0,63571	0,3100
1-4	16,8	14,4	2,4	0,63471	0,3030
1-5	20,4	18	2,4	0,64459	0,3040
1-6	20,4	18	2,4	0,64459	0,3040
1-7	25,2	22,8	2,4	0,65343	0,3060
1-8	25,2	22,8	2,4	0,65305	0,3020
1-1	14,4	12	2,4	0,58475	0,0585
1-2	14,4	12	2,4	0,58483	0,0590
1-3	16,8	14,4	2,4	0,59971	0,0580
1-4	16,8	14,4	2,4	0,59979	0,0585
1-5	20,4	18	2,4	0,61541	0,0560
1-6	20,4	18	2,4	0,61553	0,0570
1-7	25,2	22,8	2,4	0,62988	0,0587
1-8	25,2	22,8	2,4	0,62993	0,0593
1-1	14,4	12	2,4	0,60368	0,1721
1-2	14,4	12	2,4	0,60350	0,1710
1-3	16,8	14,4	2,4	0,61593	0,1715
1-4	16,8	14,4	2,4	0,61589	0,1712
1-5	20,4	18	2,4	0,62900	0,1715
1-6	20,4	18	2,4	0,62905	0,1719
1-7	25,2	22,8	2,4	0,64063	0,1716
1-8	25,2	22,8	2,4	0,64061	0,1714
1-1	14,4	12	2,4	0,60967	0,2080
1-2	14,4	12	2,4	0,60963	0,2078
1-3	16,8	14,4	2,4	0,62116	0,2081
1-4	16,8	14,4	2,4	0,62119	0,2083

№ покрытия-образца	Площадь поперечного сечения образца, мм ²	Площадь поперечного сечения алюминиевой подложки, мм ²	Площадь поперечного сечения покрытия, мм ²	Эффективный модуль упругости, 10 ⁵ МПа	Модуль упругости покрытия, 10 ⁴ МПа
1	2	3	4	5	6
1-5	20,4	18	2,4	0,63329	0,2080
1-6	20,4	18	2,4	0,63326	0,2077
1-7	25,2	22,8	2,4	0,64406	0,2076
1-8	25,2	22,8	2,4	0,64407	0,2077

Следует отметить хорошую воспроизводимость полученных результатов на образцах с различной толщиной подложки. Диаграммы схожи как в упругой зоне, так и за пределом текучести, что свидетельствует о правильности построения эксперимента.

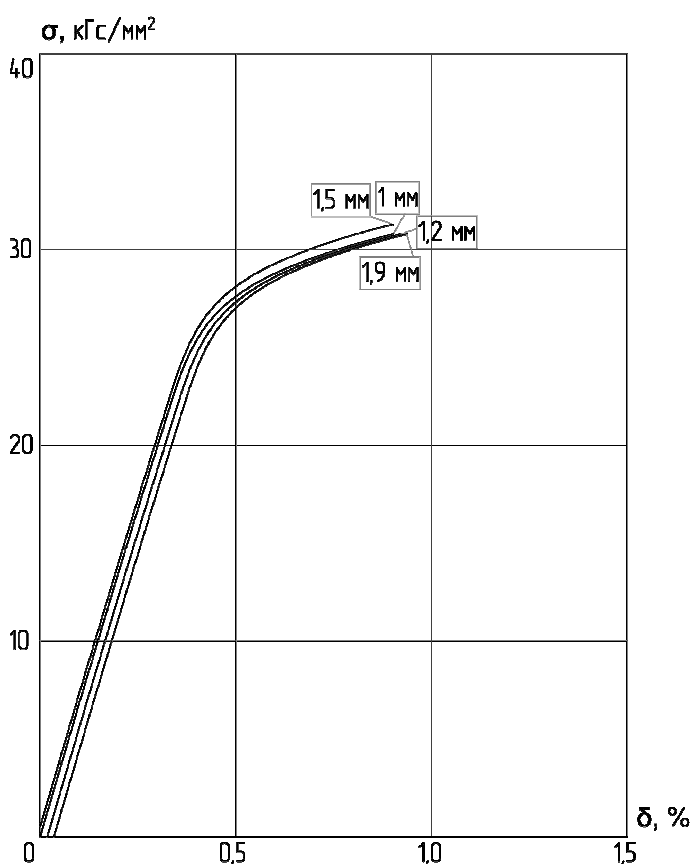


Рисунок 1. Диаграммы растяжения для образцов различной толщины (1; 1,2;

1,5; 1,9 мм) для покрытия № 1

Таблица 3

Сводные значения модулей упругости для различных типов покрытий

Номер покрытия	$\overline{E}_n, 10^4$ МПа	$S_E, 10^4$ МПа	$\Delta_E, 10^4$ МПа
1	2	3	4
1	3,043	0,0030	0,0021
2	0,581	0,0011	0,0008
3	1,715	0,0003	0,0002
4	2,079	0,0002	0,0002

S_E - среднеквадратичное отклонение,

Δ_E – доверительный интервал при доверительной вероятности 0,95.

Из анализа экспериментальных данных, представленных в таблице 3, очевидно, что наибольшим модулем упругости обладает покрытие №1 – краска черная (RAL 9005) глянцевая порошковая без защитного лака. Нанесение лака на порошковую краску приводит к снижению модуля упругости всего покрытия. Наименьшее снижение модуля упругости при сохранении высоких декоративных характеристик покрытия достигается при использовании керамического наноструктурированного лака (покрытие №4).

Аналогичные выводы были сделаны и для образцов со стальной подложкой (листовая прокатная сталь 08 ПС) по результатам экспериментально-теоретических работ, проведенных ранее [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих

научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8) и гранта РФФИ (код проекта 11-01-00540_a).

Заключение

Разработан экспериментально-расчетный метод определения модуля упругости многослойных полимерных покрытий, наносимых на металлические поверхности. Метод основан на использовании аналитического решения задачи о растяжении трехслойных полос и результатов экспериментов на растяжение образцов из алюминиевого сплава 1163 РДТВ с защитными покрытиями.

Библиографический список

1. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Сравнительная характеристика прочностных свойств образцов с различными типами покрытий для изделий авиационной техники // Электронный журнал «Труды МАИ», выпуск №40. – М., МАИ, 2010. С. 1-14.
2. Д.Г. Гаврилов, Ю.П. Зезин, Е.В. Ломакин, С.В. Мамонов, М.И. Мартиросов, Л.Н. Рабинский. Изучение механических свойств наноструктурированных лакокрасочных покрытий // Всероссийский научный журнал «Механика композиционных материалов и конструкций». Том 16, №4/2, 2010. С.639-647.
3. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Л.Н. Рабинский. Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.- 632 с.