

УДК 629.7.017

О.А. Фененко

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ВЛИЯНИЕ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЛАНЕРА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье раскрыты изменение механических свойств конструкционного материала (алюминиевого сплава) элемента конструкции планера летательного аппарата под влиянием деградационных процессов. Определена зависимость деградационного коэффициента от воздействия внешних факторов (эксплуатационных, атмосферных).

Ключевые слова: механические характеристики конструкционного материала, предел прочности, деградационные процессы.

Введение

Надёжная и безопасная работа металлоизделий силовых элементов и обшивки планера летательных аппаратов (ЛА) при эксплуатации в значительной мере обуславливается структурой и физико-механическими свойствами применяемых конструкционных материалов (КМ).

Структурная неоднородность КМ до эксплуатации проявляется в разбросе значений его механических характеристик в локальных объёмах. Существенная исходная структурная неоднородность материала, вызванная технологическими операциями при его изготовлении (литьё, прокатка, термомеханическая обработка и т.д.), усиливается при эксплуатации. Неоднородность механических свойств КМ по сечению какого-либо изделия оценивают по распределению значений твердости. При этом анализ неоднородности структуры проводят как на основании прямых значений твердости, так и на значениях полученных статистическими методами.

Причиной эксплуатационных разрушений силовых элементов и обшивки планера ЛА является деградационные процессы [1], которые обусловлены процессами старения, износа, коррозии и усталости при эксплуатации под влиянием эксплуатационных и атмосферных факторов, которые возникают в условиях, когда устройство или его отдельные элементы приближаются к предельному состоянию под влиянием вышеуказанных процессов. Чаще всего коррозионная усталость проявляется в силовых элементах и обшивке конструкции планера ЛА [2]. Влияние коррозионной среды на сопротивление усталостному разрушению металлических материалов широко изучалось многими отечественными и зарубежными исследователями [3].

Большинство авторов сходятся во мнении, что важную роль в задержке и развитии усталостных трещин играет наличие поверхностных (в большинстве случаев оксидных) плёнок. Их состояние во многом определяет интенсивность растворения металла и поглощения им водорода. Характер первичных коррозионных повреждений металла зависит от многих факторов, в том числе и от условий образования и разрушения барьерных оксидных плёнок [4 – 6].

Несмотря на то, что изучению механизмов коррозионной усталости посвящено большое количество работ [7 – 10], на сегодняшний день нет единой точки зрения на процесс коррозионно-усталостного разрушения.

Основными КМ для изготовления силового набора и обшивки планера ЛА есть алюминиевые сплавы, которые характеризуются высокой коррозионной стойкостью, однако дюралюмины имеют очень низкую коррозионную стойкость в различных средах [4] из-за введение в состав сплава различных химических элементов (ГОСТ 1583-93, ГОСТ 4784-97), табл. 1.

В связи с этим устойчивость алюминиевого сплава к коррозии определяется не по изменению веса образцов и не по скорости проникновения коррозии, а по изменению механических свойств этих сплавов (твёрдость, относительная прочность, относительная текучесть, относительная пластичность) [11].

Для оценки уровня механических свойств материалов традиционно используют твердость – характеристику, которая может служить наиболее наглядным показателем проявления упрочнения и позволяет косвенно оценивать механические характеристики материала, например, уровень прочности, не проводя специальных испытаний. Основным механическим показателем является предел прочности σ_b .

Таблица 1

Химический состав в % материала Д19

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Zn	Be
91.095 - 94	3,8-4,3	1,7-2,3	0,5-1	до 0,5	до 0,5	до 0,1	до 0.1	0,0002-0,005

Проведя анализ материалов осмотров самолётного парка типа МиГ-29 по-самолётно за период с 2010 по 2015 год, были построены графики изменения толщины КМ ($\delta_{\text{км}}$) элементов конструкции планера (обшивки, силовых элементов) за период эксплуатации по результатам измерений ультразвуковым толщиномером (рис. 1, а).

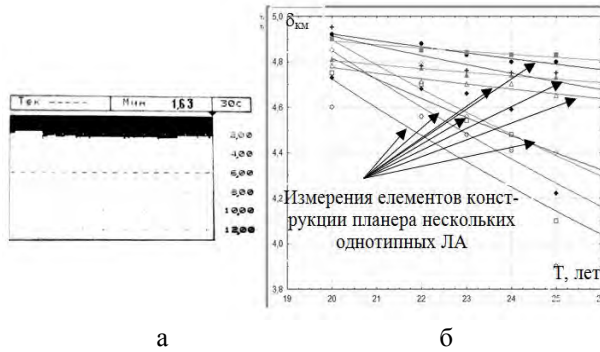


Рис. 1. Анализ материалов осмотров
а – пример измерения ультразвуковым толщиномером в 2-х мм зоне; б – изменение $\delta_{\text{км}}$ за период эксплуатации одинакового элемента конструкции планера на нескольких ЛА

Из графиков рис. 2, б видно как с увеличением срока эксплуатации без выполнения операций по контролю технического состояния и плановых ремонтов, во время которых производится полная диагностика силовых элементов конструкции ЛА, $\delta_{\text{км}}$ силового элемента конструкции планера уменьшилась в среднем почти на 20% из-за внутренних коррозионных процессов, что может привести к снижению прочности элемента конструкции и всей конструкции ЛА в целом.

Цель работы – установить изменение $\sigma_{\text{в}}$ КМ от твёрдости конструкционного материала под влиянием деградационных процессов. Разработать коэффициент деградационного процесса влияющего на изменение прочности КМ элемента конструкции планера ЛА в период длительной эксплуатации.

Изложение основного материала

Для исследования был отобран элемент конструкции планера ЛА (КМ дюраль Д19), у которого было выявлено уменьшение $\delta_{\text{км}}$ элемента конструкции планера, при помощи ультразвукового толщиномера, после 20 лет эксплуатации и наработкой 260 часов, что составляет 390 циклов нагруженной работы планера.

Методика проведения исследования заключается в измерении твердости по всей поверхности образца (который был вырезан из стыковочной ленты крепления киля к подкилевой надстройке летательного аппарата типа МиГ-29). Выполнено разметку образца на сектора 10X10 мм, в каждом секторе производилось по 3 замера (рис. 2, а).

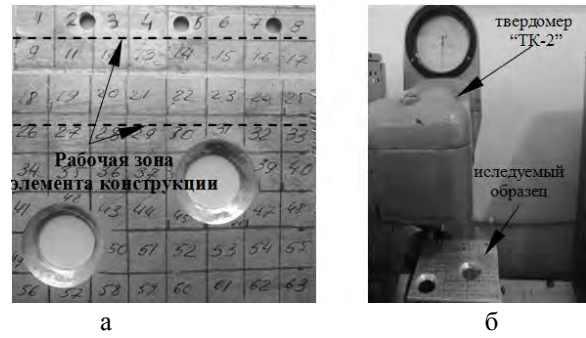


Рис. 2. Работа с образцом:
а – исследуемый образец с разметкой;
б – выполнение замеров твёрдости на твёрдомере “TK-2”

Измерение проводили на твёрдомере “TK-2”, данный прибор проводит измерения твердости по методу Роквелла по шкале HRB стальным шариком диаметром 1,588 мм с предварительной нагрузкой 98,1Н и основной 882,6 Н [12 – 14] (рис. 2, б). Значения твердости, полученные в каждой точке, усредняли для дальнейшего анализа в программе STATISTIKA.

Анализируя полученные данные (табл. 2) можно сделать вывод, что самые минимальные значения по шкале HRB находятся в самой напряженной зоне работы исследуемого элемента конструкции планера ЛА [6]. Процессы, которые происходят в данной зоне, были рассмотрены в [5].

Таблица 2

Значения HRB по поверхности образца

Рабочая зона элемента конструкции	72	73	72	71	70	72	69	71
	34	41	42	37	47	66	61	73
	56	59	56	57	56	49	43	61
	49	51	50	53	51	62	57	51
	50	49	52	53	61	60	59	60
	71	72	71	61	64	67	66	71
	61	62	64	61	58	57	61	60
	68	73	69	65	66	64	61	60

Поскольку поле средних значений твердости даёт лишь общее представление о состоянии КМ, для его оценки рекомендуется использовать характеристики рассеивания для массива случайных величин, вычисленных по формулам теории математической статистики. Эти характеристики показывают, насколько велико рассеивание величин, составляющих массив данных, по отношению к среднему значению данной выборки.

По полученным опытным данным мы определили $\sigma_{\text{в}}$ в каждом квадрате образца по формуле

$$\sigma_{\text{в}} = k \text{ НВ, МПа} \quad (1)$$

где – $k = 0,38$, коэффициент относительной прочности для алюминиевых сплавов типа дюраль [15],

НВ определяем по таблице твёрдости в зависимости от полученных значений HRB (табл. 3).

Значения среднеквадратического отклонения S_{σ_b} и коэффициента вариации $v_{НВ}$ рассчитывали соответственно по формулам [15]

$$S_{\sigma_b} = k \cdot \sqrt{\frac{1}{\delta-1} \sum_{i=1}^n \left(НВ_i - \bar{НВ} \right)^2}; \quad (2)$$

$$v_{НВ} = \frac{S_{\sigma_b}}{\bar{НВ}}, \quad (3)$$

где k – поправочный коэффициент, зависящий от δ ;

НВ – значение твердости для i -го измерения;

$\bar{НВ}$ – среднее значение твердости в зоне изменения толщины.

Таблица 3

Опытные значения твёрдости образца

№ п/п	Твёрдость		σ_{σ} , МПа	№ п/п	Твёрдость		σ_{σ} , МПа
	HRB	НВ			HRB	НВ	
1	39	82	2952	11	61	107	3852
2	42	85	3060	12	62	109	3924
3	43	87	3132	13	64	112	4032
4	46	89	3204	14	66	115	4140
5	50	91	3276	15	67	117	4212
6	51	93	3348	16	68	119	4284
7	53	97	3492	17	70	121	4356
8	56	100	3600	18	71	122	4392
9	59	102	3672	19	72	128	4528
10	60	105	3780	20	73	130	4600

Из данных табл. 3 следует, что увеличению среднеквадратического отклонения при переходе к верхним и нижним зонам образца соответствует такой же рост коэффициента $v_{НВ}$.

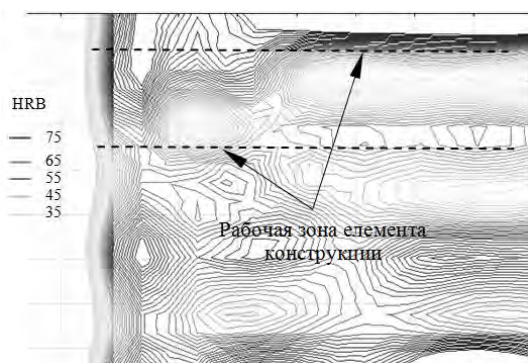


Рис. 3. Изменение твёрдости исследуемого образца

Анализ значений твердости и их рассеивания (рис. 3) по всей площади образца, а также уровни окончательных напряжений при эксплуатации показывает, что в наиболее нагруженной части элемента конструкции в зоне перехода от толщины КМ – 5 мм к толщине КМ – 2 мм, наблюдается существенное уменьшение рассеивания значений твердости, которое указывает на деградацию механических свойств КМ и возникновение дефекта [16, 17].

В связи с изменениями механических свойств КМ введём механический показатель деградации K_d , который будет характеризовать изменение какого-либо механического свойства КМ за время деградационного процесса (коррозия), выраженное в процентах.

Одним из таких показателей свойств КМ есть предел прочности K_{σ} :

$$K_{\sigma} = \Delta\sigma_b / \Delta\sigma_p, \quad (4)$$

где $\Delta\sigma_b$ – изменение предела прочности при растяжении за время τ коррозии; $\Delta\sigma_p$ – предел прочности при растяжении до коррозии.

Рассчитывая K_{σ} для данного образца получили:

$$K_{\sigma} = 4012,5 / 4300 = 0,9331395 < 1,3$$

Полученный результат показывает, что показатель K_{σ} меньше коэффициента показателя норм прочности, что ведёт к разрушению конструкции планера ЛА.

Для установления равномерной коррозии КМ и количественного выражения ее скорости выбор показателя коррозии не имеет принципиального значения и делается на основании применяемого метода исследования, необходимой точности измерений и т. п. В случае неравномерной, местной коррозии выбор показателя коррозии имеет существенное значение. Так, точечная коррозия может быть количественно выражена только с помощью показателя склонности к коррозии. Межкристаллическая коррозия металла может быть установлена и количественно выражена с помощью глубинного показателя при микроисследовании, прочностного показателя и изменения электрического сопротивления образцов.

Тогда K_d

$$K_d = \sum K_n / n, \quad (5)$$

где K_n – показатели эксплуатационных, физико-химических, физико-механических, климатических процессов, которые непосредственно влияют на надёжность конструкции планера ЛА.

Показатель K_d указывает, как деградационные процессы влияют на надёжность ЛА за весь период его эксплуатации.

Таким образом, при оценке состояния ЛА с помощью детерминированных моделей износа нужно учитывать показатель K_d для определения остаточного срока службы (ресурса) [15 – 18]. Такая методология расширяет возможности методов оценки и делает их наиболее соответствующими физическим процессам изнашивания и здравому смыслу. В рамках такой методологии можно понять и учесть при расчетах состояния объекта тот факт, что фактический срок службы может существенно превышать нормативный. При этом установленный в документации срок службы (ресурс) имеет смысл минимального срока эксплуатации (ресурса), в течение которого изготовитель гарантирует нормальную работу с большой вероятностью.

Статистический подход к задаче прогнозирования остаточного срока службы (ресурса) развивается на основе моделей, которые, могут оказаться наиболее приемлемыми во многих реальных ситуациях, связанных с оценкой состояния ЛА в условиях, когда потеря работоспособности в основном обусловлена физико-механической деградацией объекта оценки.

Выводы

Таким образом в работе рассмотрено распределение твёрдости КМ по всей площади исследованного образца, в котором произошли физико-химические изменения. Проведено исследование изменения физико-механических свойств, которые связаны с деградационными процессами. Установлена зависимость изменения прочности изделия от изменения твёрдости КМ. В связи с выше изложенным материалом возникает ряд задач:

– разработать математическую модель надёжности, которая позволила бы описать изменения технического состояния силовых элементов конструкции ЛА, эксплуатация которого планируется выше назначенных показателей эксплуатации и установленных ресурсов, с учётом коэффициента деградационных процессов;

– разработать методику определения окончательного ресурса ЛА по статистическим данным его технического состояния.

Список литературы

1. Клюев В.В. Энциклопедия в 4 томах / В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 1998. – 592 с.
2. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: пер. с англ. / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
3. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. – К., 1976. – 126 с.
4. Бобилев А.В. Механические и технологические свойства металлов / А.В. Бобилев. – Справ., изд. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Металлургия, 1987. – 208 с.
5. Анишко О.Б. Дефекты стыковочной ленты узла крепления киля к подкилевой надстройке и физико-химические процессы, приводящие к ним / О.Б. Анишко, О.А. Фененко // Интегрированные технологии и энергосбережение: IV Міжн. НПК. – Х., 2014. – С. 96-102.

6. Анишко О.Б. Влияние внешних факторов при постановке задачи прочность узла крепления киля самолёта МиГ-29 / О.Б. Анишко, О.А. Фененко // Интегрированные технологии и энергосбережение: IV Міжнародна наук.-практ. конф., 28 вересня-1 жовтня 2015 р. – Х., 2015. – С. 31-34.

7. Аболихина Е.В. Коррозионная стойкость обшивок нижних панелей внутренних кессонов крыла самолётов Ан-24, Ан-26 / Е.В. Аболихина, А.И. Семенец, А.П. Еретин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: К., 2009. – № 41. – С. 76-91.

8. Лебедев А.А. Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твёрдости / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, В.П. Швец // Проблемы прочности: К., 2007. – № 6. – С. 5-12.

9. Стоев П.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твёрдости / П.И. Стоев, В.И. Моценко // Вестник ХНУ им. Каразина. – Х., 2003. – Т. 601. – № 2. – С. 106-112.

10. Шарко А.В. Изменения механизма точечной коррозии на основе изменения физико-механических свойств алюминиевых сплавов / А.В. Шарко, В.Д. Нигалатий // Известия Волг ГТУ: Волгоград, 2014. – Т. 12. – № 21 (148) – С. 93-97.

11. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твёрдости / М.П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с. ил.

12. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости / А.Г. Колмаков. – Справ. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИнтерметИнжиниринг, 2005. – 150 с.

13. Матюнин В.М. Механико-технологические испытания и свойства конструкционных материалов: уч. пособ. / В.М. Матюнин. – М.: МЭИ, 2005. – 140 с.

14. Каменичный И.С. Спутник термиста / И.С. Каменичный. – К.: Техника, 1969. – 232 с.

15. Троценко В.Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению / под ред. В.Т. Троценко. – К.: Наук. думка, 1994. – Ч. 2. – 700 с.

16. Надёжность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. – М.: Машиностроение, 1987. – 351 с.

17. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

18. Козг Ю.К. Основы надёжности авиационной техники / Ю.К. Козг, Р.А. Майский – М.: Машиностроение, 1993. – 176 с.

Поступила в редколлегию 8.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПЛАНЕРА ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

О.О. Фененко

У статті розкрито зміна механічних характеристик конструкційного матеріалу (алюмінієвого сплаву) елемента конструкції планера літального апарату під впливом деградаційних процесів. Визначено залежність деградаційного коефіцієнта від впливу зовнішніх факторів (експлуатаційних, атмосферних).

Ключові слова: механічні характеристики конструкційного матеріалу, межа міцності, деградаційні процеси.

EFFECT ON MECHANICAL DEGRADATION PROCESSES FEATURES OF STRUCTURAL MATERIALS ELEMENTS CONSTRUCTION AIRFRAME

O.O. Fenenko

The article deals with the mechanical properties of structural materials (aluminum alloy) elements of the airframe of the aircraft under the influence of degradation processes. The dependence of the degradation factor of the impact of external factors (performance, atmospheric).

Keywords: mechanical properties of the material of construction, the strength, de-gradation process.