

01, январь 2016

УДК 620.193

Характеристики прочности металлов с коррозионным повреждением

***Иванов М.К.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции»*

***Долгих Д.И.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции»*

*Научный руководитель: Татарников О. В., д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции»*

anja-dolгих@mail.ru

Все материальные предметы, конструкции, сооружения с момента создания подвергаются разрушающему действию внешней среды, определяемым термином «коррозия». Коррозия (от латинского слова - *corrodere*, что означает разъедать) - разрушение материала под действием различных физико-химических и биологических факторов внешней среды. Впервые этот термин появился в 1667 году в английском журнале «Philosophical Transactions». В земных условиях не корродируют только благородные металлы (золото и платина). Без специальной антикоррозионной защиты срок службы изделий из других металлов весьма ограничен. Значительны прямые потери конструкционного металла от коррозии, но много больше вреда от отказов оборудования. Любое проявление коррозии свидетельствует о повреждении поверхности металла. Для элементов конструкции авиационной или космической техники задаются при проектировании минимальные запасы прочности и жёсткие требования при изготовлении к состоянию поверхностей, поэтому возможность влияния на прочность и надёжность любого повреждения высокоответственного элемента должна быть оценена. Это особенно важно для деталей, испытывающих переменные во времени нагрузки,— присутствие даже незначительных на первый взгляд повреждений может катастрофически снизить усталостную прочность.

В настоящее время гражданские пассажирские самолёты проектируются на ресурс 60...100 000 лётных часов при календарном сроке службы не менее 30 лет. Типичные сроки службы военных самолётов также не менее 30 лет. При таких сроках вероятность пусть даже небольших коррозионных повреждений (КП) очень высока.

При обнаружении коррозии её обычно останавливают путём удаления поражённого коррозией металла и восстановления защитного покрытия. Однако, если коррозия всё же, пусть теоретически, возможна, то в период времени между осмотрами, определяя условия безопасности, приходится допускать работу конструкции с повреждением. Необходимо убедиться, что за этот период разрушения не может произойти.

В качестве основы для оценок усталостной долговечности деталей, элементов конструкций используются кривые усталости (кривые Веллера), представляющие собой зависимости числа циклов нагрузки данных элементов до разрушения. Кривые получают трудоёмким и занимающим много времени экспериментом. Зная напряжения в детали, по кривой усталости можно определить число циклов, которое она может выдержать. Однако форма и размеры детали заданы чертежом, а КП могут быть самые разные по форме и размерам, для всех форм и размеров получить кривые усталости невозможно. В работе рассматривается решение данной проблемы.

В Сибирском НИИ авиации проводятся такие исследования прочности и усталостной долговечности элементов авиаконструкций, включая коррозионно-климатические условия эксплуатации. Цель настоящей работы — исследование и анализ коррозионных повреждений на предмет определения вида и меры коррозии, определяющих прочность и сопротивление усталости. Объектом исследования были коррозионные повреждения реального элемента конструкции самолёта.

В докладе представляются результаты металлографического исследования КП элементов конструкции самолёта и оценка параметров КП по критерию тесноты связи с усталостной прочностью металла с повреждением.

Согласно имеющимся в настоящее время классификациям коррозии по различным признакам: механизму процесса, по условиям протекания, по характеру коррозионного разрушения и т.п. — существуют много видов её видов (не менее 25 [1]): точечная (питтинговая), язвенная, щелевая, межкристаллитная, расслаивающая, коррозия под напряжением или коррозионное растрескивание и т.д. Коррозия может быть общая (равномерная или неравномерная) или местная (локальная).

С позиции оценки прочности возможно разделение коррозионных повреждений на две основные группы: коррозия с образованием трещины - коррозионное растрескивание

(рис.1) и коррозия, создающая язву (кратер) с растравленной поверхностью, но без зародышей трещин (рис. 2).



Рис. 1. Трещина коррозионного растрескивания в алюминиевом сплаве

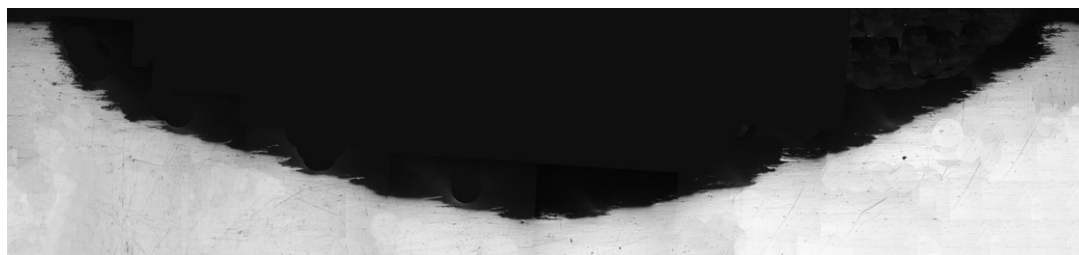


Рис. 2. Профиль коррозионной язвы в алюминиевом сплаве В95пчТ2

Это может быть питтинг, коррозионная язва, каверна, образующаяся при щелевой коррозии и т.п.

Исследовался материал лонжерона крыла самолёта (рис. 3). Лонжерон изготовлен горячей штамповкой из алюминиевого сплава В95пчТ2, что предполагает течение металла в штампе и наличие текстуры, а значит и анизотропии свойств, включая коррозионные и усталостные, в различных направлениях.

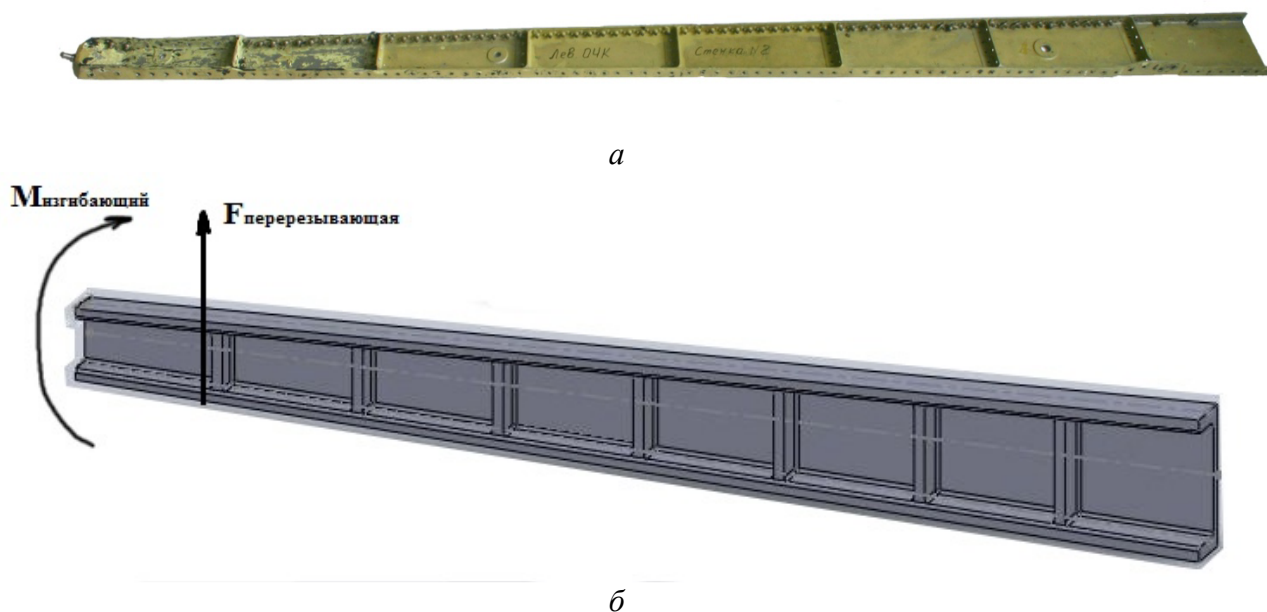


Рис. 3. Общий вид стенки (лонжерона) ОЧК крыла (а),
схема работы лонжерона в конструкции (б)

Анизотропию коррозионных свойств изучали путём создания в лабораторных условиях локальных коррозионных повреждений различных элементов лонжерона (верхней и нижней полки, стенок, стоек) и металлографического анализа коррозии и структуры сплава.

Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе МИМ-10. Для этой цели по зоне коррозионного повреждения в направлениях вдоль и поперёк размаха лонжерона выполнялись разрезы и готовились металлографические шлифы. Для выявления структуры сплава и тонких особенностей коррозионного повреждения поверхность шлифа слегка протравливалась реактивом Келлера (состава: $2\text{HF} + 3\text{HCl} + 5\text{HNO}_3 + 90\text{H}_2\text{O}$), обычно применяемого в металлографических исследованиях алюминиевых сплавов. Степень протравливания подбиралась опытным путём. Сложность состояла в том, чтобы выявить границы зёрен и сохранить тонкие особенности повреждения.

Рис. 4 показывает, что поверхность коррозионной язвы неровная, изрезанная, но в направлении развития усталостной трещины в полке от осевой нагрузки коррозионных зародышей трещины нет, в то время как для направления рис. 5 характерна межкристаллитная коррозия, создающая предпосылки для быстрого зарождения усталостной трещины при циклическом нагружении.

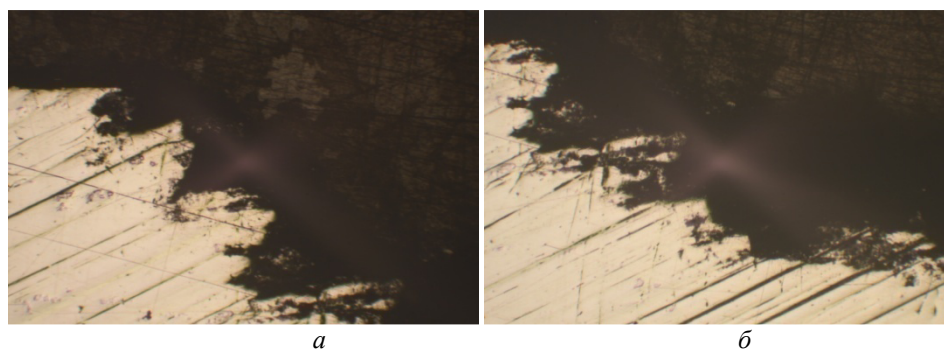


Рис. 4. Направление плоскости шлифа параллельно поверхности полки лонжерона. Бок (а) и зона дна (б) коррозионной язвы. Сплав В95пчТ2. Увеличение 50^х

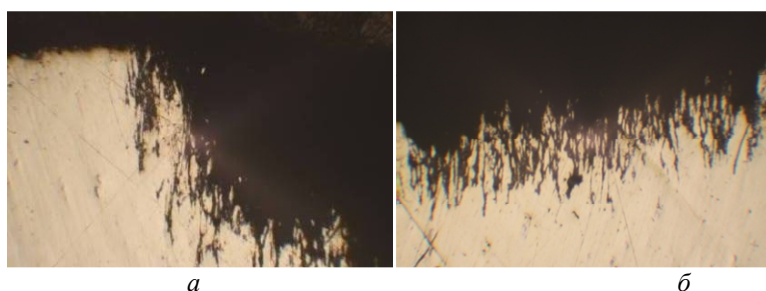


Рис. 5. Направление плоскости шлифа вдоль размаха полки лонжерона. Бок (а) и дно (б) коррозионной язвы. Сплав В95пчТ2. Увеличение 50^х

Известно, что процесс разрушения металла под действием повторяющихся нагрузок (усталость металла) состоит из двух стадий:

- инкубационной, определяемой зарождением трещины;
- развития усталостной трещины до финального разрушения элемента конструкции.

Очевидно, что если есть начальные коррозионные трещины, то первая стадия отсутствует; долговечность будет больше при наличии инкубационного периода.

Лонжерон крыла самолёта является балкой, работающей на изгиб. Полки лонжерона нагружаются осевой нагрузкой и потому структура сплава, обеспечивающая отсутствие зародышевых коррозионных трещин, более стойка к усталостному разрушению даже при наличии коррозионных повреждений. Известно, что вытянутая вдоль направления действующих нагрузок текстура (волокно) обеспечивает более высокие прочностные свойства металла в этом направлении, но из результатов анализа видно, что данная технология изготовления лонжерона создаёт структуру металла наиболее стойкую к усталостному разрушению и при наличии коррозии.

Вторая задача состояла в определении «меры» коррозии, которая определяет усталостную долговечность металла с повреждением.

Из стенок лонжерона были вырезаны в направлениях соответствующих направлению текстуры металла полки (вдоль по размаху лонжерона) образцы типа полос, в которых выращивались коррозионные повреждения двух типов, схематично представленных на рис. 6 (модели построены с помощью системы проектирования SolidWorks).

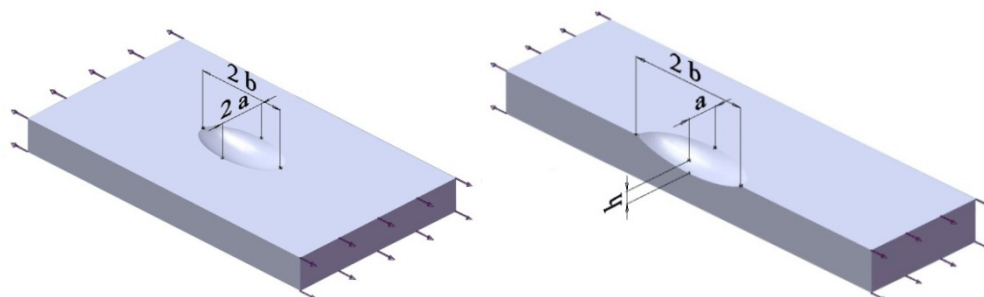


Рис. 6. Модели поверхностной и кромочной коррозионных язв

На моделях показаны основные размеры повреждений, характеризующие их форму. Коррозионные повреждения могут иметь самые различные соотношения глубины (h) к ширине на поверхности ($2a$) и длине на поверхности ($2b$).

Образцы с повреждениями испытывали на усталость циклическим растяжением с максимальным напряжением цикла $\sigma = 98$ или 132 или 176 МПа с регистрацией числа циклов до зарождения усталостной трещины. На рис. 7 показаны два основных вида разрушений и усталостных изломов.

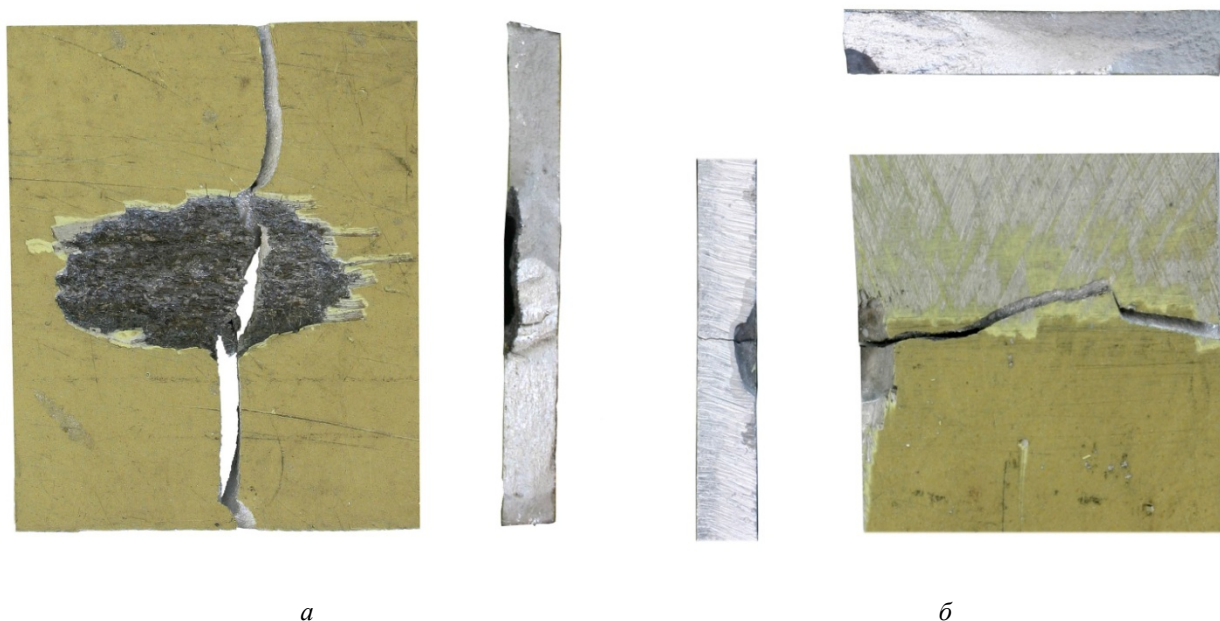


Рис. 7. Виды в плане и изломы образцов с поверхностным (а) и кромочным (б) КП после усталостных испытаний

На части образцов также были выполнены металлографические исследования с целью убедиться в отсутствии трещин, идущих от поверхности язвы.

КП могли быть самой различной формы. На рис. 8 показан реальный профиль коррозионной язвы. Необходимо было измерить КП по поверхности и в изломе.

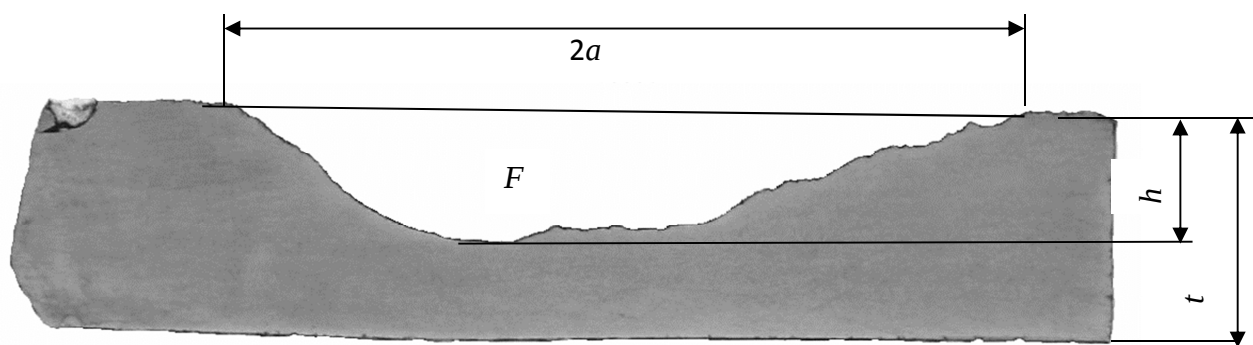


Рис. 8. Пример реального контура коррозионной язвы

Задача состояла в следующем: какие размеры язвы сложной формы определяют остаточную прочность металла с повреждением? В авиационной практике для этой цели обычно используют относительную глубину h/t язвы. Важно наиболее точно по параметру КП определить остаточную усталостную долговечность элемента конструкции. С этой целью сравниваем два параметра: традиционный h/t и параметр $f = \frac{F}{t^2}$, где F — площадь сечения миделя язвы, t — толщина металла в зоне повреждения.

КП в элементах конструкции типовой толщиной 1, 2...6мм обычно невелики, поэтому размеры (h , $2a$, $2b$) снимались на изломах при увеличении X20 на оптическом проекторе. Площади в изломе (F) измерялись на увеличенном изображении либо счётом с помощью миллиметровой бумаги, либо специальной программой после сканирования и ввода изображения в компьютер.

Результаты измерений вместе данными испытаний образцов с поверхностными язвами представлены в таблицах 1- 3.

Таблица 1

Результаты усталостных испытаний образцов с поверхностными КП,
 $\sigma = 98 \text{ МПа}$

№ (i)	t, мм	f	h/t	N, циклов	σ			a		b	
					N	f	h/t	f	h/t	f	h/t
1	3,43	4,09	0,640	53378	0,298	0,360	0,147	5,23	4,48	-0,759	-1,79
2	3,55	2,95	0,704	58021							
3	3,42	5,39	0,625	67900							
4	2,08	3,37	0,577	71100							
5	3,40	2,46	0,471	73155							
6	3,55	2,11	0,620	79563							
7	3,40	2,07	0,515	87419							
8	3,58	1,29	0,503	87675							
9	3,07	1,61	0,521	88904							
10	3,67	2,12	0,518	98293							
11	3,55	1,72	0,535	98518							
12	3,08	1,21	0,487	102915							
13	3,40	1,73	0,471	107055							
14	3,40	1,99	0,412	111645							
15	3,64	1,68	0,494	121642							
16	3,65	1,32	0,384	140378							
17	3,40	1,14	0,324	147002							
18	3,50	1,53	0,400	150645							
19	3,43	0,96	0,321	156393							
20	3,52	1,27	0,312	158812							
21	4,05	0,76	0,469	191917							
22	3,60	0,38	0,333	214541							
23	3,45	0,80	0,387	227161							
24	3,39	1,15	0,354	238038							
25	3,40	0,52	0,265	253209							
26	3,54	0,48	0,311	263792							

27	3,42	0,85	0,292	280605							
28	3,70	0,43	0,405	286426							
29	3,54	0,48	0,254	344111							
30	3,70	0,33	0,365	361698							
31	3,50	0,72	0,257	444153							
32	3,64	0,32	0,206	466400							
33	3,60	0,13	0,167	619326							
34	3,70	0,41	0,324	627412							

Таблица 2

Результаты усталостных испытаний образцов с поверхностными КП,
 $\sigma = 132\text{МПа}$

№ (i)	t, мм	f	h/t	N, циклов	σ_y			a		b	
					N	f	h/t	f	h/t	f	h/t
1	1,93	2,52	0,570	24548	0,229	0,337	0,161	4,83	4,39	-0,578	-0,983
2	2,10	2,31	0,571	27222							
3	3,40	3,11	0,735	30331							
4	2,13	2,51	0,657	32080							
5	2,22	1,75	0,586	33132							
6	2,10	3,56	0,571	33306							
7	2,22	1,97	0,540	33953							
8	1,95	2,87	0,461	36631							
9	2,10	4,83	0,619	40794							
10	2,15	2,05	0,605	41406							
11	3,65	1,53	0,411	43241							
12	3,65	1,19	0,356	43384							
13	2,22	1,22	0,586	48380							
14	3,30	1,71	0,333	49818							
15	3,65	1,52	0,411	49884							
16	3,64	0,75	0,275	58069							
17	2,22	1,45	0,450	61481							
18	3,33	1,58	0,300	64359							
19	3,60	1,11	0,306	64647							
20	3,40	2,37	0,382	69891							
21	2,22	1,13	0,563	71575							
22	3,40	0,75	0,324	75400							
23	3,66	0,67	0,328	80270							
24	3,42	0,73	0,292	81351							
25	3,42	2,31	0,526	83227							

26	3,20	1,22	0,312	89568							
27	4,12	0,35	0,582	90704							
28	3,40	0,62	0,323	91476							
29	3,65	0,32	0,137	104764							
30	3,42	0,59	0,322	117308							
31	3,16	0,77	0,316	122252							
32	3,12	0,51	0,336	149492							
33	3,70	0,17	0,216	221220							

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний образцов с поверхностными КП,
 $\sigma = 176$ МПа

№ (i)	t, мм	f	h/t	N, циклов	σ			a		b	
					N	f	h/t	f	h/t	f	h/t
1	3,10	2,66	0,806	6720	0,258	0,455	0,214	4,34	3,94	-0,489	-0,995
2	3,70	2,61	0,514	11861							
3	3,60	0,79	0,278	12022							
4	3,60	1,61	0,472	12196							
5	3,45	1,85	0,551	12615							
6	1,95	3,05	0,513	15329							
7	3,38	2,14	0,651	16533							
8	1,95	2,92	0,513	16935							
9	3,39	1,59	0,383	17109							
10	1,95	1,45	0,487	19358							
11	3,08	1,57	0,682	19458							
12	3,60	0,79	0,333	19730							
13	1,95	2,07	0,549	20554							
14	3,9	1,75	0,436	22770							
15	3,55	0,37	0,296	23622							
16	3,08	1,32	0,519	24058							
17	4,00	1,36	0,388	24107							
18	3,60	1,45	0,333	26815							
19	3,50	0,50	0,357	27484							
20	3,50	0,84	0,286	28640							
21	3,45	0,32	0,261	29636							
22	3,55	0,36	0,324	31331							
23	3,55	0,27	0,296	33016							
24	3,64	0,30	0,302	52887							
25	3,52	0,23	0,270	56770							
26	3,35	0,166	0,164	58120							

27	3,52	0,046	0,071	117888							
----	------	-------	-------	--------	--	--	--	--	--	--	--

На рис. 9 в двойных логарифмических координатах нанесены различными видами символов для трёх случаев (уровней нагружения) числа циклов до зарождения трещины N образцов с КП в зависимости от относительной глубины h/t язвы, а на рис. 10 — от параметра f .

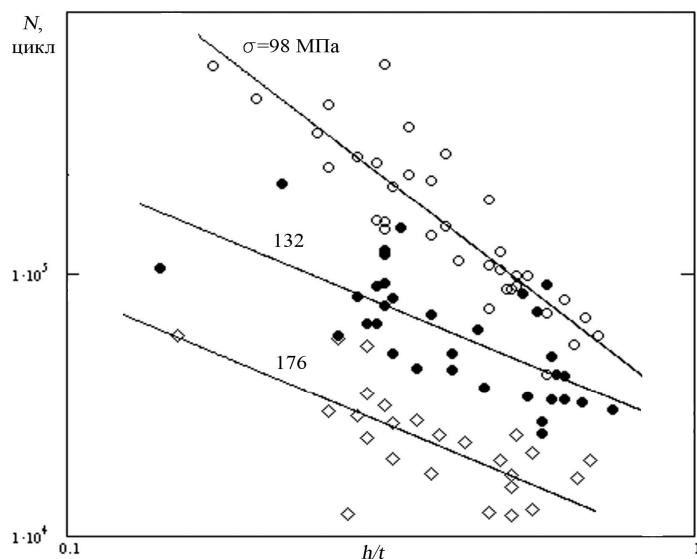


Рис. 9. Зависимости числа циклов до разрушения от относительной глубины коррозионной язвы

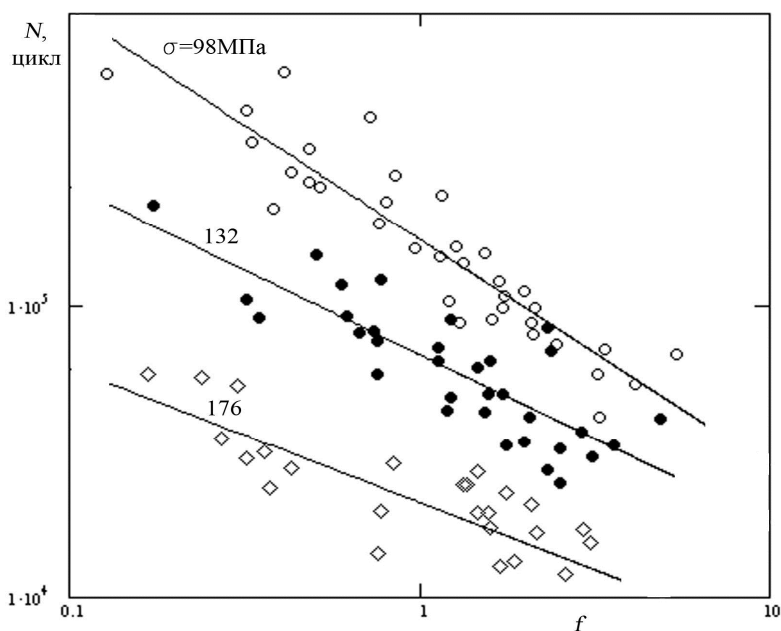


Рис. 10. Зависимости числа циклов до разрушения от относительной площади сечения коррозионной язвы

Из графиков видно, что результаты испытаний на трёх уровнях напряжений группируются в соответствующие напряжениям три полосы, причём полосы более отчётливы для зависимостей числа циклов от параметра f . С увеличением размера (или глубины) язвы усталостная долговечность монотонно снижается. Данные зависимости «в среднем» можно аппроксимировать прямыми линиями (в двойных логарифмических координатах), что выполняется методом наименьших квадратов. Суть метода состоит в том, что выполняется построение прямой линии наиболее близкой ко всем результатам, что выражается в минимальной величине суммы квадратов отклонений результатов испытаний (логарифмов чисел циклов) от этой линии [2].

Обозначим для каждого уровня напряжений в испытаниях (с $\sigma = 98; 132; 176$ МПа) результат i -ого испытания y_i , соответствующий величине повреждения x_i .

Уравнение каждой линии (регрессии) можно записать в общем виде прямой линии:

$$\begin{cases} Y(x) = a + b \cdot x \\ x_i = \lg p_i \\ y_i = \lg N_i \end{cases},$$

где p_i — параметр повреждения соответствующего образца (f или h/t).

Для каждого значения аргумента x_i (значения логарифма параметра повреждения в эксперименте) соответствуют результат эксперимента y_i и расчётное по линии регрессии значение Y_i .

Сумма квадратов отклонений результатов испытаний от линии регрессии:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^2,$$

где n — число испытанных образцов на уровне.

Условие минимума суммы квадратов отклонений запишется:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i) \cdot x_i = 0 \end{aligned}$$

Решением системы будут:

$$b = \frac{\sum y_i \cdot x_i - \frac{\sum y_i \cdot \sum x_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}},$$

$$a = \frac{\sum y_i - b \cdot \sum x_i}{n}.$$

Для расчётов данных коэффициентов разработана программа и сделаны расчёты по данным таблиц 1 - 3.

Результаты расчётов для обоих параметров повреждений представлены в соответствующих таблицах (1 — 3), по этим данным построены прямые регрессии на рис. 9-10.

Видно, что результаты испытаний более тесно группируются около прямых регрессий, если в качестве параметра повреждения брать относительную площадь сечения. Но это может быть субъективная оценка. Нужна оценка объективная.

Угловой коэффициент уравнений регрессии b показывает, на сколько единиц в среднем изменяется Y , когда x увеличивается на одну единицу. Чем больше (по модулю) данный коэффициент, тем более значительно изменение среднего Y соответствующее тому же изменению x . Такой смысл углового коэффициента делает его на первый взгляд подходящим измерителем силы зависимости y от x .

Однако численное значение коэффициента b зависит от того, что принято за единицу измерения по x и y . Поэтому в математической статистике используется безразмерная, независимая от систем измерения обеих величин характеристика силы (тесноты) связи между двумя величинами — коэффициент корреляции:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = b \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \\ \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)^2} \end{array} \right.$$

где σ_x и σ_y - средние квадратичные отклонения данных величин.

В таблицах 1-3 расчётные значения σ_x и σ_y обозначены соответственно рассматриваемым параметрам повреждения (f или h) и числу циклов до разрушения (N), имея в виду, что обозначения “ x ” и “ y ” относятся к логарифмам данных величин.

В таблице 4 представлены расчётные величины коэффициентов корреляции между рассматриваемыми параметрами коррозионного повреждения и циклической долговечностью.

Аналогичные измерения и расчёты выполнялись и для результатов испытаний образцов с кромочными КП.

Коэффициенты корреляции для поверхностных и кромочных язв в плоских образцах сплава В95пчТ2

σ_{max} , МПа	поверхностная язва		язва на кромке	
	f	h/t	f	h/t
98	– 0,92	–0,88	–0,85	–0,70
132	–0,83	–0,69	–0,70	–0,23
176	–0,86	–0,82	–0,72	–0,64

Близость модуля величины коэффициента корреляции к единице определяет интегральную оценку отклонений наблюдаемых в эксперименте усталостных долговечностей от функциональной зависимости с определяющим параметром повреждения. Для функциональной зависимости модуль коэффициента равен единице. Из данных таблицы следует, что параметр f имеет в сравнении с h/t существенно более тесную связь с долговечностью и потому более пригоден для оценки влияния коррозии на усталостную прочность конструкции.

Применение определяющего усталостную долговечность параметра позволяет интерполяцией получить стандартные кривые усталости материала с коррозионными язвами произвольных размеров [3]. Схема перехода представлена на рис. 11.

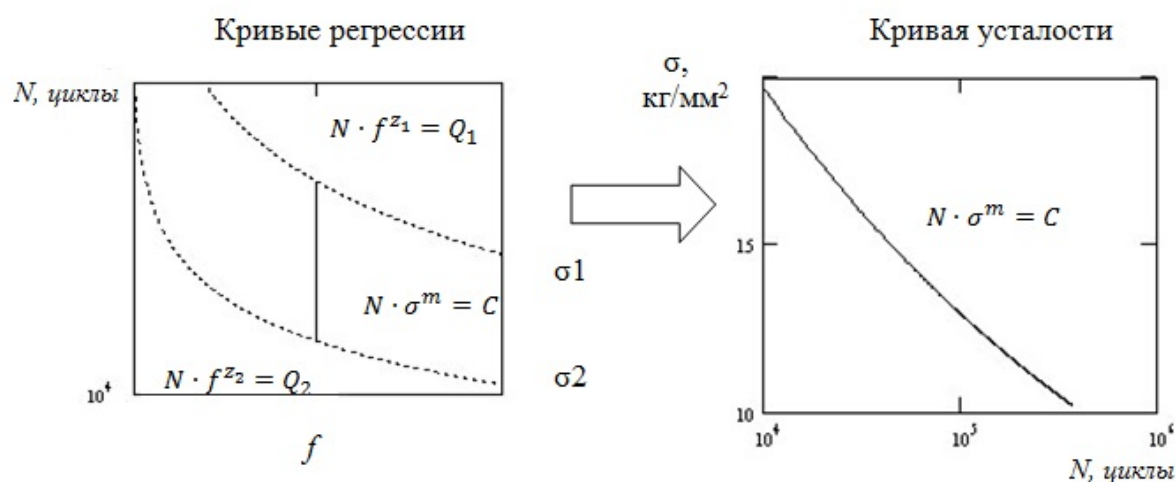


Рис. 11. Схема перехода от кривых регрессии к кривой усталости для заданного параметром f размера коррозионного повреждения

Имеем две полученные в эксперименте на двух уровнях отнулевого циклического растяжения кривые (прямые в двойных логарифмических координатах) регрессии:

$N \cdot f^{z_1} = Q_1$ — первая кривая, полученная при максимальных напряжениях цикла σ_1 ,

$N \cdot f^{z_2} = Q_2$ — вторая кривая, полученная при максимальных напряжениях цикла σ_2 .

Кривая усталости для случая язвы с размерами, определяемыми параметром f , ищется в стандартном для кривых усталости алюминиевых сплавов виде:

$$N \cdot \sigma^m = C,$$

где m и C — параметры кривой.

При одном и том же значении параметра f первая кривая регрессии и искомая кривая усталости должны соответствовать одной и той же долговечности (числу циклов) N , что даёт первую систему двух уравнений:

$$N \cdot f^{z_1} = Q_1$$

$$N \cdot \sigma_1^m = C$$

Устранение N (делением) даёт:

$$\frac{Q_1}{f^{z_1}} = \frac{C}{\sigma_1^m}.$$

Аналогично из пересечения искомой кривой усталости со второй кривой регрессии, полученной при напряжениях цикла σ_2 получим:

$$\frac{Q_2}{f^{z_2}} = \frac{C}{\sigma_2^m}.$$

Решением данной системы двух уравнений являются значения параметров кривой усталости зоны повреждения размером f :

$$C = \frac{Q_1}{f^{z_1}} \cdot \sigma_1^m, \text{ где}$$

$$m = \frac{\log \frac{Q_2 \cdot f^{z_1}}{Q_1 \cdot f^{z_2}}}{\log \frac{\sigma_1}{\sigma_2}},$$

Полученную кривую усталости по моменту зарождения трещины усталости на КП далее можно использовать для оценки остаточной усталостной долговечности элемента конструкции с коррозией.

Заключение

Выполнены металлографические исследования характера коррозионного повреждения штампованного лонжерона крыла самолёта. Показано, что технология изготовления лонжерона обеспечивает текстуру материала полок, обеспечивающую не только повышение прочности в направлении действия основных нагрузок, но и лучшее

сопротивление усталости при коррозионном повреждении за счёт отсутствия опасного коррозионного растрескивания корродированной поверхности.

Проведены измерения параметров коррозионных повреждений, методом статистического анализа показано преимущество параметра повреждения на основе относительной площади сечения перед традиционным параметром — относительной глубиной - для оценки остаточной усталостной долговечности элемента конструкции с повреждением.

Список литературы

1. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1968. 407с.
2. Лукомский Я.И. Теория корреляции и её применение к анализу производства. М.: Госстатиздат, 1958. 385 с.
3. Тимофеев А.Н., Корелина О.В. Резервы работоспособности конструкций авиационной техники с коррозионными повреждениями // Авиационная промышленность. 2010. № 3. С. 43 —48.