



## POSTUP TEARDOWN ANALÝZY DRAKU LETOUNU TEARDOWN ANALYSIS PROCEDURES OF AIRFRAME

Marie BOHÁČOVÁ

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Praha  
Aerospace Research and Test Establishment, Prague  
Contact email: bohacova@vzlu.cz

### Abstrakt

*Teardown analýza je nedílnou součástí filozofie Damage Tolerance. Aplikace této filozofie na letoun vyžaduje mimo jiné stanovení detekovatelné velikosti poškození, přípustné velikosti poškození z hlediska zbytkové pevnosti, stanovení periodicity a způsobu nedestruktivních prohlídek kritických míst v konstrukci. Pro stanovení těchto požadavků je nutné znát řadu charakteristik, které se stanovují v jednotlivých dílčích krocích (materiálové vlastnosti, výpočtové metody, intervaly prohlídek, apod.). Mezi tyto jednotlivé kroky patří i verifikace nedestruktivních metod zkoušení (Non-Destructive Testing, NDT). Jedním z cílů NDT je stanovení minimální detekovatelné délky (velikosti) poškození s 90% pravděpodobností při úrovni spolehlivosti 95% v daném kritickém místě konstrukce a stanovení metodik kontrol jednotlivých kritických míst draku letounu. Aby bylo této minimální detekovatelné délky a dané pravděpodobnosti dosaženo, je třeba provést tzv. Teardown analýzu, která je nejpřesnější a nejspolehlivější metodou ověření nalezených poškození danou NDT metodou. Na základě znalosti minimální detekovatelné velikosti poškození, růstové křivky poškození a maximálního poškození, které ještě zajistí požadovanou zbytkovou pevnost konstrukce, jsou předepisovány prohlídky v provozu letounu v daných inspekčních intervalech. Obecně je tato problematika náročná na řešení, protože se v primárních oblastech konstrukce vyskytují poruchy draku detekovatelné s různým stupněm obtížnosti (vizuálně, skryté pod jednou, nebo více vrstvami, nepřístupné, apod.).*

**Klíčová slova:** Teardown analýza, Damage Tolerance, nedestruktivní zkoušení, pravděpodobnost detekce poškození, úroveň spolehlivosti

### Abstract

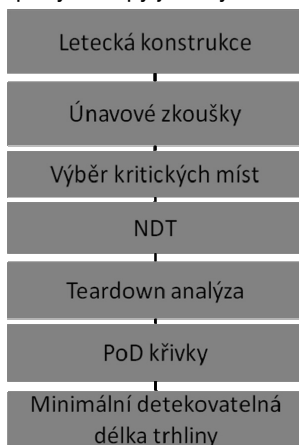
*Teardown analysis is an integral part of Damage Tolerance philosophy. The application of this philosophy for aircraft requires the determination of detectable flaw size, tolerated flaw size in term of residual strength, determining the periodicity of non-destructive inspection of principal structural elements. To determine these requirements is necessary to know a number of characteristics that are determined in the individual steps (material properties, calculation methods, inspection intervals, etc.). These steps include the verification of non-destructive testing methods (Non-Destructive Testing, NDT). One aim of NDT is to determine the minimum detectable flaw size with 90% probability at 95% confidence level in the critical part and design procedures for the inspection of the airframe critical parts. To achieve this minimum detectable flaw size and probability, it is necessary to make so-called teardown analysis, which is the most accurate and reliable method of verifying the damages detected by the NDT method. Based on the knowledge of the minimum detectable flaw size, growth curves and the maximum damage that still provides the required residual structural strength are prescribed the in-service nondestructive inspection of the aircraft in the inspection intervals. Generally, the issue is difficult to solve because there are damages with varying*

degrees of difficulty (visual, hidden under one or more layers, inaccessible, etc.) in the primary areas of airframe structures.

**Key words:** Teardown analysis, Damage Tolerance, Non-Destructive Testing, Probability of Detection, Confidence level

## 1. Úvod do filozofie Damage Tolerance z hlediska NDT

Pomocí filozofie Damage Tolerance (DT) lze prodloužit efektivní životnost letounu a zajistit jeho požadovanou provozní spolehlivost. Tato filozofie umožňuje efektivní využití aktuálního stavu draku letounu, přičemž je kladen požadavek na předepsání intervalů provozních kontrol letadla a zpracování jejich postupů. Tyto provozní kontroly letadla jsou sestavovány za účelem detekce degradace materiálu, které by mohlo vést k předčasnému poškození konstrukce letounu. Je v nich zdůrazněna důležitost vysoké úrovně údržby konstrukce letounu, zejména z hlediska pozornosti na únavové poškození a korozi. Postupně se tedy zdůraznila důležitost kontrolních programů, při kterých může letoun dosáhnout dlouhé, bezpečné provozní životnosti. Takovéto programy by měly pokrýt primární konstrukci a konstrukční spoje a měla by být věnována pozornost zejména skrytým oblastem, které jsou vystaveny opakovanému cyklickému zatěžování. Princip filozofie Damage Tolerance z hlediska NDT se skládá z několika etap. Tyto etapy jsou vyobrazeny na Obrázku 1.



Obrázek 1 Základní schéma principu Damage Tolerance z hlediska NDT [2]  
Figure 1 Schematic diagram of Damage Tolerance philosophy in term of NDT [2]

Po provedení únavových zkoušek draku letounu a na základě nich stanovených kritických míst konstrukce lze přistoupit k nedestruktivnímu zkoušení draku letounu, tedy k etapě NDT. Před samotným nedestruktivním zkoušením je nutné provést nezbytné kroky k tomu, aby celá kontrola draku letounu byla provedena korektně a aby výsledky kontroly byly způsobilé pro další etapy Damage Tolerance. Základní postup, který by měl kvalifikovaný a hlavně zkušený NDT operátor vzít v úvahu, zahrnuje tyto důležité kroky:

1. seznámení s leteckou konstrukcí (výkresová a materiálová dokumentace);
2. seznámení s kritickými místy konstrukce (vlastnosti, parametry);

3. výrobu referenčních vzorků s různými rozměry simulovaných vad (případně s nacyklovanými únavovými trhlinami). Tyto vzorky by měly, co nejpřesněji, simulovat kritické místo a být ze stejného materiálu;
4. zvolení vhodné NDT metody dle povahy míst. Ověření zvolené NDT metody v provozu;
5. zvolení vhodného systému značení pro jednoznačnou identifikaci kontrolované části či celku;
6. provedení záznamu nalezených trhlin/poškození dle systému značení do výkresové dokumentace letecké konstrukce.

Celá nedestruktivní kontrola je ovlivněna několika faktory a to zejména lidským faktorem, který představuje vysoké procento úspěšnosti/neúspěšnosti celého programu Damage Tolerance z hlediska NDT. Pokud dojde k selhání etapy NDT, pak následné etapy, jako jsou Teardown analýza, stanovení tzv. křivky pravděpodobnosti detekce (*Probability of Detection, POD*) trhliny v daném kritickém místě a následné stanovení minimální detekovatelné délky trhliny s pravděpodobností 90% při úrovni spolehlivosti 95%, budou s největší pravděpodobností provedeny nesprávně a výsledky budou neuspokojivé až nepoužitelné. Pak je nutné přistoupit k různým nápravným opatřením, která jsou velmi finančně náročná a i tak může dojít k neuspokojivým celkovým výsledkům. Proto je důležité, aby byla věnována maximální pozornost kontrole draku letounu, byla zkontrolována všechna kritická místa i skryté vrstvy daného místa s maximální pečlivostí před zahájením etapy demontáže, tedy tzv. Teardown analýzou.

## 2. Postup Teardown analýzy

Teardown analýza neboli demontáž se sestává z detailního rozebrání konstrukce, z detailní vizuální kontroly vnitřní konstrukce (případně i jiné NDT metody) a z fraktografické analýzy podezřelých a kritických míst.

Na počátku demontáže je důležité, aby NDT operátor definoval požadavky, které jsou nezbytné pro její úspěšné provedení. Mezi tyto požadavky patří:

- zajištění adekvátní stability pracovního místa, aby nedošlo k pohybu konstrukce;
- zajištění adekvátního osvětlení;
- zbavení draku letounu všech nečistot, zejména pak nečistot v otvorech nýtových spojů;
- provedení bezpečnostních a funkčních opatření pro odstranění jednotlivých částí draku letounu z hlediska jejich velikosti a hmotnosti;
- vedení řezů dostatečně daleko od částí a komponentů, které budou podrobeny fraktografické analýze, aby nedošlo k jejich poškození;
- minimalizace řezů částí a komponentů o velkém průřezu;
- oddělení spojů, spojovacích prvků od jednotlivých částí bez poškození, případně náhodné poškození musí být vždy zaznamenáno;
- nepřevrtávání otvorů spojů;
- dokumentace a identifikace jednotlivých demontovaných částí a komponentů dle systému značení vytvořeného v etapě NDT.

Významnou skupinu v oblasti NDT a Teardown analýzy tvoří otvory spojů, jelikož jsou častým zdrojem iniciace trhlin a jejich následného šíření vlivem zatížení a koncentrace napětí. Obecně jsou tedy předkládány pečlivé kontrole. Nejběžnější a efektivní způsob kontroly otvorů je pomocí rotačních vířivoproudých sond (*Bolt-Hole Eddy Current, BHEC*). Spolehlivost této kontroly se odvíjí od kvality a čistoty otvoru. Proto je důležité všechny otvory spojů řádně očistit. Při odstraňování spojovacích prvků (šroubů, nýtů) je nutné minimalizovat náhodná poškození. Techniky, které se použijí, musí předcházet poškození povrchu otvorů spojů, tzn., že použité nástroje nesmí být v kontaktu s otvory nebo vytvořit zahлубení do povrchu otvoru a spoje by se neměly protáčet.

I přes veškerou snahu a preciznost mohou vlivem odstranění spojů vzniknout náhodná poškození, což může způsobit chybné pozitivní indikace přítomnosti trhliny a výsledkem je pak zbytečná a drahá fraktografická analýza.

Samotná demontáž draku se skládá ze čtyř hlavních kroků:

1. označení všech částí určených k demontáži;
2. hlavní demontáže daného celku draku letounu na jednotlivé části;
3. rozřezání těchto jednotlivých částí na ještě menší části;
4. rozlomení jednotlivých spojů.

Drak letounu se před demontáží rozdělí do jednotlivých zón, které jsou vybrány na základě četnosti detekovaných trhlin a jiných poškozeních v daných místech draku letounu v etapě NDT. Drak letounu se před rozřezáním na jednotlivé části kompletně popíše systémem značení dle jednotlivých zón a komponentů na draku letounu tzn., zda se jedná o část trupu, ocasních ploch či křídla (viz Obrázek 2).

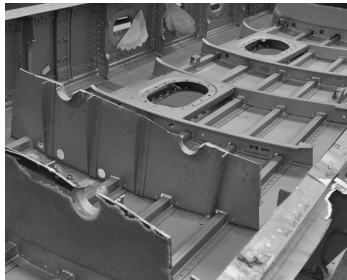


*Obrázek 2 Příklad popisu draku letounu*  
*Figure 2 Example of airframe description*

Jakmile se drak letounu označí a je k dispozici potřebné vybavení, lze započít demontáž. Vybavení pro demontáž představuje celou řadu různých typů a rozměrů pil, brusek, pomocných držáků, zdvihových strojů atd. Obecný postup demontáže je takový, že se nejdříve kompletně odstraní komponenty, které nespádají do kritických míst a brání analýze míst kritických. Následně se zajistí adekvátní stabilita draku letounu a započne proces demontáže jednotlivých částí (viz Obrázek 3). Výsledek takovéto demontáže dané části draku letounu je vyobrazen na Obrázku 4.



Obrázek 3 Provedení řezu při demontáži potahového plechu a podélníku  
Figure 3 Performance of cut at teardown analysis of metal sheet and runner



Obrázek 4 Výsledek demontáže  
Figure 4 Result of teardown analysis

Součástí Teardown analýzy je fraktografická analýza, která představuje nejprůkaznější způsob ověření přítomnosti trhliny. Každá část proto musí být po hlavní demontáži křídla opět rozřezána ještě na menší části, aby bylo možné provést lomy jednotlivých nýtových spojů. Řez musí být veden ve směru kolmém na směr šíření trhlin. Následně se provede rozlomení jednotlivých spojů. S cílem stanovení tzv. křivky pravděpodobnosti detekce (*Probability of Detection, POD*) a následně minimální detekovatelné délky trhliny v kritických místech se porovná soubor nalezených poškození operátorem v etapě NDT, který provedl kontrolu, se souborem nalezených poškození zjištěných fraktografií.

### 3. Shrnutí

U filozofie Damage Tolerance lze vytvořit vysoce účinný systém údržby draku letounu, připustit a předpokládat vznik trhliny v kritických místech konstrukce vlivem provozu, vytvořit objektivní podmínky pro posouzení skutečného vlivu provozu na daný letoun a v neposlední řadě provoz letounu není omezován počtem letových hodin.

Jednotlivé etapy této filozofie z hlediska NDT představují její nedílnou součást a je velmi důležité, aby tyto etapy, zejména pak etapa NDT a Teardown analýza, byly provedeny korektně s maximálním důrazem na odbornost, zkušenost a pečlivost.

Teardown analýza tedy spočívá v komplexní demontáži a rozřezání draku letounu s následnou fraktografickou analýzou konstrukce na základě četnosti detekovaných trhlin a jiných poškození (vměstky, koroze atd.) Je nutné postupovat tak, aby se zabránilo náhodným poškozením, zejména pak otvorů při demontování nýtových spojů. Mohlo by tak dojít nejen k odstranění případných malých trhlin, ale tyto

náhodná poškození mohou způsobit chybné pozitivní indikace přítomnosti trhliny. Též je žádoucí, aby jednotlivé řezy byly vedeny s dostatečnou vzdáleností od částí, které se budou podrobovat fraktografické analýze. Před demontáží je důležité vytvoření systému značení, dle kterého lze v budoucnu jednoznačně identifikovat i tu nejmenší rozlomenou část draku letounu.

Z hlediska organizační struktury je nutné zajistit bezpečnost pracovníků a NDT operátorů a řídit se tak předpisy o bezpečnosti práce. Zajistit očištění draku letounu a potřebné vybavení pro demontáž. Variace vybavení by měla být velmi pestrá a zahrnovat různé typy a rozměry strojů a nástrojů vzhledem k proměnlivosti rozměrů a tvaru draku letounu.

#### **4. Použitá literatura**

[1] BOHÁČOVÁ, M., ŠEDEK, J., PAVLAS, J.: Probability of Detection and Prediction of Fatigue Crack Growth in Aircraft Structures. *Czech aerospace proceedings*. October 2010, 2010, 3, s. 2-5. ISSN 1211-877X.

[2] BOHÁČOVÁ, M.: Presentace Damage Tolerance, Teardown analýza, Pravděpodobnost detekce, Kurz Damage Tolerance – metody, aplikace, Česká společnost pro mechaniku a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2011.

[3] BOS, Marcel J.: *ICAF 2009, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice*. 1. Rotterdam, The Netherlands : Springer, 2009. 1368 s. ISBN 978-90-481-2745-0.