



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav strojírenské technologie

**Speciální nátěrové hmoty pro letecké
aplikace**

**Special coatings for aviation
applications**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

Bc. Stanislav BENEŠ

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 3911T035 Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Michal Pakosta, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Beneš** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **382453**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Speciální nátěrové hmoty pro letecké aplikace

Název diplomové práce anglicky:

Special coatings for aviation applications

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor sledované problematiky
2. Návrh metodiky zkoušení nátěrových hmot
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Pakosta, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Jakub Svoboda, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **27.10.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **12.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **12.01.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

6.12.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování chci tímto věnovat vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Pakostovi, Ph.D. a za konzultace Ing. Jakubu Svobodovi. Jejich trpělivost, vstřícnost, poskytnuté rady a cenné připomínky při vypracování diplomové práce, byly její nedílnou součástí. Dále chci poděkovat organizacím, které na této diplomové práci participovali, především společnosti SYNPO, a.s. za možnost podílet se na tomto experimentu a za poskytnutí potřebné pomoci a zázemí.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Bc. Stanislav Beneš
Název:	Speciální nátěrové hmoty pro letecké aplikace
Anglický název:	Special Coatings for Aviation Applications
Rok:	2018
Ústav:	Ú12133 – Ústav strojírenské technologie
Obor studia:	Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí DP:	Ing. Michal Pakosta, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jakub Svoboda

BIBLIOGRAFICKÉ ÚDAJE:

Počet stran:	78
Počet obrázků:	39
Počet tabulek:	31
Počet příloh:	11

Anotace: Diplomová práce vznikla za účelem přiblížení problematiky aplikace nátěrových hmot v letectví, se zaměřením na extrémně namáhané součásti letadel jako jsou náběžné hrany, radary, antény, spojery a klapky apod.

Cílem této práce bylo testovat nátěrový systém proti mechanickému poškození a snížit tak náklady na údržbu, servis a opravy díky tomu, že budeme schopni prodloužit životnost těchto komponent. V experimentální části se práce zabývá návrhem zkoušení nátěrových hmot a podrobení testovacích vzorků jednotlivým zkouškám.

Klíčová slova: Letectví, povlaky, nátěrové hmoty, zkoušení, opotřebení, tvrdost, odolnost, eroze, abraze, adheze, ...

Annotation: The diploma thesis was developed in order to approach the problems of application of paints in aviation, focusing on extremely stressed parts of aircraft such as leading edges, radars, antennas, spoilers and flaps etc.

The aim of this work was to test the paint system against mechanical damage and thus reduce the costs of maintenance, service and repairs due to the fact that we will be able to extend the life of these components. In the experimental part the thesis deals with the design of the testing of paints and the testing of the test samples for individual tests.

Keywords: Aviation, coatings, substance, testing, wearing test, hardness, resistance, erosion, abrasion, adhesion, ...

OBSAH

1. Úvod	1
2. Letecký trh	3
3. Provozní prostředí a specifikace leteckých povlaků.....	5
4. Kontrola nátěrových systémů v leteckém průmyslu	7
5. Systémy leteckých povlaků a jejich požadavky.....	9
5.1. Vnější systémy	9
5.2. Strukturální systémy	10
5.3. Speciální povlakovací systémy	11
5.4. Požadavky a specifikace povlakovacích systémů	11
6. Systémy nátěrových hmot	13
6.1. Technologie povlakovacích systémů	13
6.2. Základní nátěrový systém.....	13
6.2.1. Epoxidové nátěry základního systému	14
6.2.2. Epoxidové pryskyřice	14
6.3. Vrchní nátěrový systém.....	15
7. Aplikace nátěrových hmot v letectví	18
7.1. Používaná zařízení	18
7.2. Postupy aplikace vnějšího nátěru	19
7.3. Trendy v aplikaci leteckého nátěru	20
8. Současný stav speciálních nátěrových hmot pro vytipované aplikace letadla.....	22
9. Návrh metodiky zkoušení nátěrových hmot	23
9.1. Tloušťka povlaků.....	23
9.2. Optické vlastnosti a jejich zkoušení	24
9.2.1. Barvy a měření barevnosti	24
9.2.2. Lesk a měření lesku.....	25
9.3. Tvrdost povlaků	26
9.3.1. Stanovení tvrdosti tužkovým testem	26
9.3.1. „Scratch test“ – zkouška proškrábnutím	27
9.3.2. Hodnocení mikrotvrdosti	28
9.4. Odolnost proti opotřebení povlaku	29
9.4.1. Abrazie	29
9.4.2. Eroze	30
9.4.3. Stanovení odolnosti vůči abrazi	32
9.5. Stanovení odolnosti povlaků proti odlétajícím kamínkům	33
9.6. Adheze a její zkoušky	34
9.6.1. Mřížková zkouška	34
9.6.2. Odtrhová zkouška	35
Praktická část	37
10. Příprava vzorků.....	37
11. Vyhodnocení experimentu	38
11.1. Vizualní hodnocení.....	38

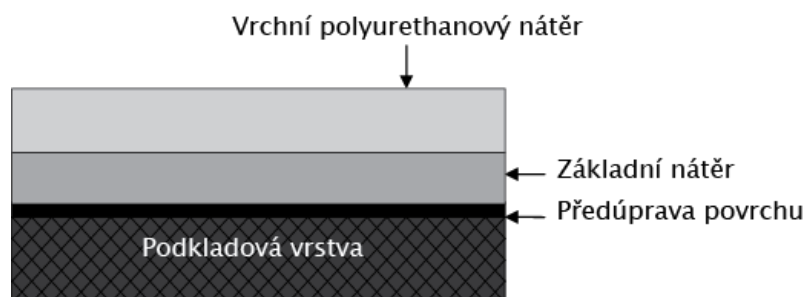
11.2.	Tloušťka povlaků.....	38
11.3.	Lesk.....	39
11.4.	Barevnost	41
11.5.	Tvrдост	42
11.5.1.	Stanovení tvrdosti povlaků tužkovým testem	42
11.5.2.	„Scratch test“ – zkouška proškrábnutím	43
11.5.3.	Hodnocení mikrotvrđosti	44
11.6.	Hodnocení abrazivních a erozivních zkoušek.....	46
11.6.1.	Zkoušky otryskáváním provedení podle ČSN.....	46
11.7.	Zkoušky přilnavosti (adheze)	48
11.7.1.	Mřížková zkouška	48
11.7.2.	Odtrhová zkouška	49
11.7.3.	Hodnocení odolnosti vůči abrazi metodou Taber – Abraser	50
12.	Závěr	54
	Seznam použité literatury	56
	Seznam použitých norem	57
	Seznam použitých zkratek, symbolů a veličin	58
	Seznam obrázků	59
	Seznam tabulek	60
	Partneři	61
	Seznam příloh.....	62

1. Úvod

Povrchová úprava hraje důležitou roli v leteckém průmyslu a konstrukci letadel samotných. Povlaky mají nejen dekorativní funkci, ale jsou i důležitou součástí aktivní ochrany všech komponent. Jsou vystavovány externím podmínkám a musí odolávat rázovým teplotním změnám. V případě letectví mohou být vyvolány mezikontinentálními přelety z pouště, kde teplota okolí dosahuje + 50 °C. Po následném vzletu do výšky 10 km nadmořem na ně působí teplota nižší než - 55 °C za působení vysoké hodnoty UV záření. Povlaky musí odolávat nárazům, kondenzaci vody, abrazi, erozi, vibracím od motoru a ohýbání komponent vlivem turbulence. V průběhu času jsou nátěrové systémy vystavovány různým tekutinám a chemikáliím, používaným například k čištění nebo odmrazování. Povrchy navíc přicházejí do styku i s leteckým palivem a hydraulickou kapalinou. Neopomenutelnou součástí jsou i environmentální vlivy např. nahromaděné nečistoty, korozní soli z pobřežních a oceánských oblastí nebo kyseliny tvořené průmyslově znečištěním ovzduším, které mají nepříznivý vliv na celistvost nátěrového systému. [1]

Letecké nátěry jsou navrhovány tak, aby řešily specifické potřeby, které v mnoha případech zahrnují výjimečné podmínky. Vliv mají různé délky letů (kontinentální, transatlantické, zaoceánské), nebo různé oblasti létání (Evropa, jihovýchodní Asie, Indie). Důležitým dělením je i typ využití letadla, cestovní letadla mohou nalétat až 4 000 hodin ročně, ale jsou i letadla dopravní, obchodní nebo vojenská, která operují jen s omezenou dobou letu. Přes všechny tyto negativní faktory a jejich dopady, musí být povrch letadla „lesklý“ a povlakový systém by měl chránit celou strukturu.

Ochranné nátěrové systémy pro letecký průmysl obvykle obsahují základní nátěr a vrchní nátěr (Obr. 1). Základní nátěr je porézní a křehký, bez větší odolnosti, ale poskytuje ochranu proti korozi a zajišťuje přilnavost povlaku na předpřipravený základní materiál. Vrchní nátěrová vrstva má pak být flexibilní, s lesklým povrchem, ten musí být omyvatelný a chemicky odolný s vhodnou životností a delší trvanlivostí. [1,3]



Obr. 1: Ochranný nátěrový systém běžně používaný v leteckém průmyslu. [7]

Kvůli vysokým požadavkům na trvanlivost, ohebnost a korozní odolnost, se používají pro vrchní nátěry 2K (dvoukomponentní) polyurethanové systémy. Pro fungování stávajících nátěrových systémů, je podmínkou udržování tohoto povlaku po celou dobu životnosti, pokud tomu tak není, mají tyto povlaky pouze omezenou funkci.

Nátěrové systémy v letectví mají specifické požadavky, aplikace může být velmi rozsáhlá, a proto se experimentálně řešená problematika bude vztahovat jen na ty části letadla, které podléhají extrémním podmínkám mechanické odolnosti. Tedy v místech, kde dochází k poškození cizími předměty, jsou poškozovány oděrem a erozí z částic ze vzduchu. Tato problematika řeší situaci okolo snižování nákladů za údržbu, servis a opravy, ale má také prodloužit životnost těchto komponent.

Mezi řešenou problematiku budou proto patřit součásti letadel jako jsou náběžné hrany, radary, antény, spojery, klapky, apod. Dále se práce zabývá návrhem metodiky zkoušení těchto extrémně namáhaných součástí a podrobení testovacích vzorků vhodným zkouškám, jak na stávajícím, tak i nově navrženém systému na kterém se sleduje jejich odolnosti vůči abrazi a erozi. Hodnotí se jejich tvrdost a kvalitativně se porovnává jejich adheze. Součástí je i měření tloušťek povlakového systému, hodnocení barevného odstínu a zrcadlového lesku.

Výsledkem se předpokládá zhodnocení stávajícího a nově navrženého systému povrchové úpravy, který bude možné aplikovat v leteckém průmyslu. Cílem práce není testovat jejich odolnost vůči enviromentálním vlivům jako jsou klimatické či korozní vlivy, ale pracovat s charakteristikou mechanické odolnosti povlaku, tedy dosáhnout zlepšení v porovnání se současným stavem.



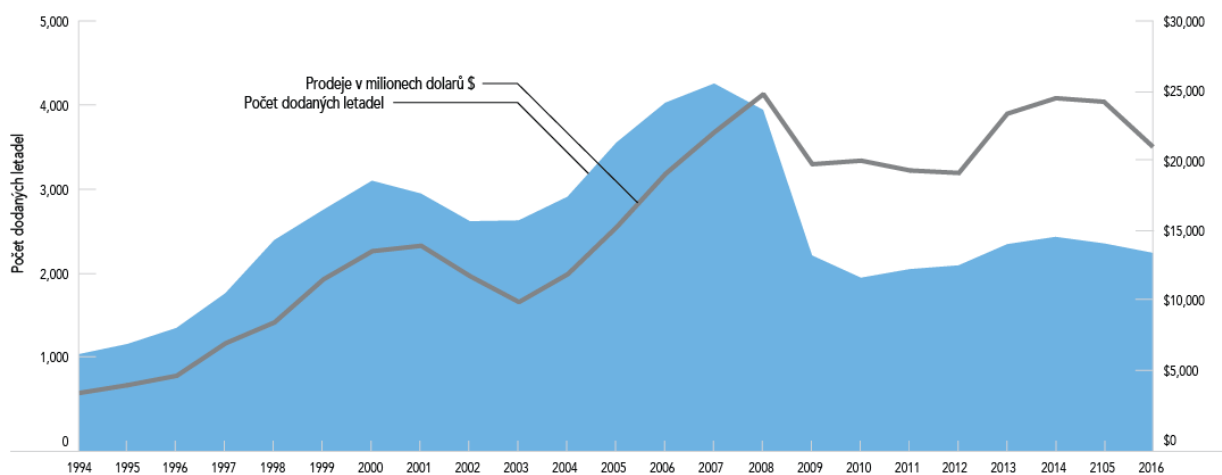
Obr. 2: Vytipovaná místa pro aplikaci laků [2].

2. Letecký trh

Letecký průmysl je považován za globální podnikání. Všechna letadla, všech typů a všechny jejich komponenty, mají svého původního výrobce (OEM), servisní středisko a generálního opravce (MRO). Společnosti, které působí v leteckém průmyslu se z nějaké části věnuje povrchovým úpravám a systémům nátěrových hmot. Proto je vhodné si tento trh s nátěrovými hmotami pro letecký průmysl rozdělit do následujících kategorií:

- Komerční letadla pro osobní přepravu,
- všeobecné letectví a vesmírný průmysl,
- letadla pro armádu a vojenský průmysl.

První dva výše uvedené trhy jsou z hlediska objemu, tak i prodeje největším trhem. Tyto trhy jsou aktuálně nejrychleji rostoucí, zatímco u vojenského průmyslu se v následujících letech očekává mírný pokles. Prodej na trhu silně závisí na ekonomické situaci. V roce 2007 se prodej letadel blížil k 4 500 prodaných kusů, poté následoval propad a v roce 2010 klesl až na polovinu, někde okolo 2 000 prodaných kusů. Od roku 2011 až do současnosti (r. 2017) se situace na trhu zlepšuje a dosahuje prodejů okolo 2 262 letadel za rok. [4]



Obr. 3: Počet prodaných komerčních letadel v letech 1994 2016 [4]

Podle dlouhodobého výhledu velkých výrobců komerčních letadel bude letecká doprava růst společně s rozšiřováním světové letecké sítě. Rostoucí požadavek na propojitelnost kontinentů a nároky na větší kapacitu přepravy mezi hlavními populačními středisky se očekává v následujících 20 letech. Produkce má vzrůst na 27 000 až 34 000 kusů komerčních letadel. Současný letový park společností čítá přibližně 20 300 letounů o kapacitě větší než 100 cestujících. Dále se očekává jejich průměrný nárůst o 3,6 % ročně, aby se zdvojnásobil jejich počet na více než 41 000 letounů do roku 2032. K tomu má přispět i růst počtu cestujících v Asii a na Středním východě [4].

Většina leteckých společností obnovuje povrch letadla každých 5 až 7 let během servisních zásahů, nebo při pravidelné údržbě, či při tzv. „rebrandingu“ (viz. Obr. 4), kde společnosti mění svoji vizuální stránku, tak aby byly více atraktivní směrem k zákazníkovi. Vzhledem k tomu, že průměrná životnost letadla je více než 20 let, objem barvy, který je aplikován na každé jednotlivé letadlo není zanedbatelný. Letecký průmysl představuje výzvu pro společnosti, které se věnují povrchovým úpravám, nátěrovým hmotám, jejich vývoji, testování a zkoušení, ale i aplikaci a výrobě příslušenství, včetně činností k tomu přidružených [9].



Obr. 4: Rebranding letounu Airbus A320 společnosti Brussels Airlines v rámci kompletní údržby [5]

3. Provozní prostředí a specifikace leteckých povlaků

Všeobecně se letový provoz dá popsat tak, že letové trati vedou do každého koutu světa. Obchodní, přepravní a vojenská letadla působí v různých částech kontinentů s různými druhy letů a ty můžeme rozdělit podle:

- Letové trati: kontinentální, transatlantické, zaoceánské.
- Zeměpisné oblasti: Evropa, jihovýchodní Asie, Indie, apod.



Obr. 5: Mapa letových tras sedmi nejvýznamnějších světových společností, které se věnují komerční letecké přepravě [6]

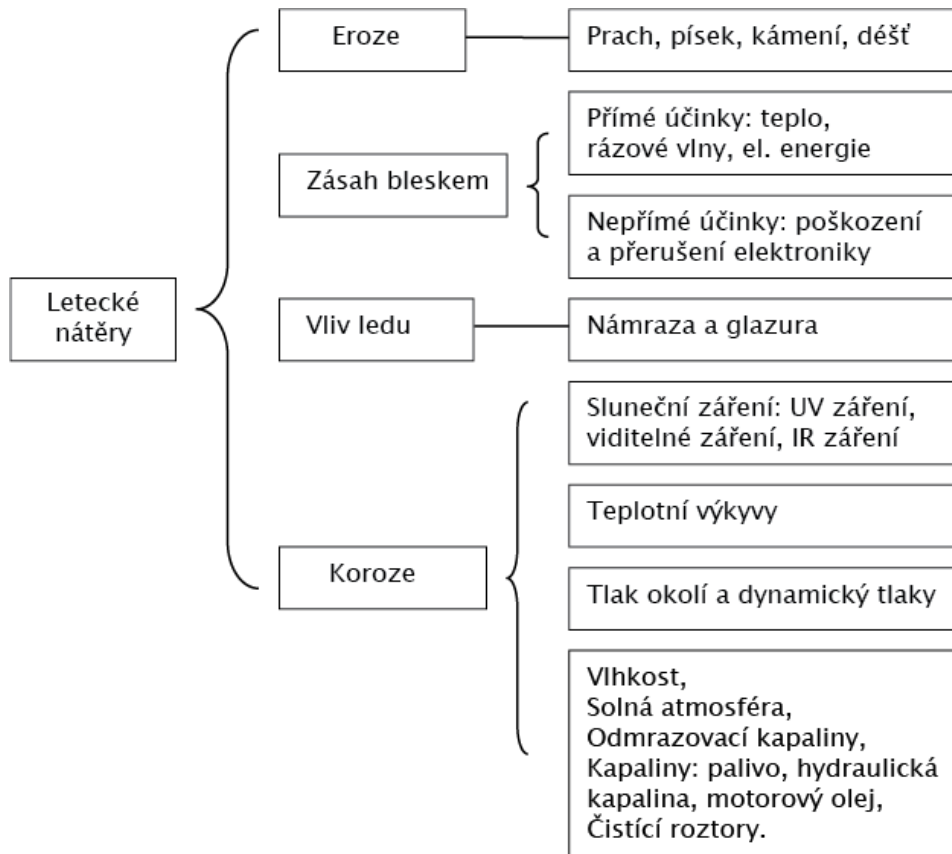
Konstrukce těchto letadel musí být navrženy tak, aby odolaly různorodým prostředím, včetně velkých změn teploty a vlhkosti, kontaktu s leteckými kapalinami, jako je tryskové palivo a hydraulické olej, nebo i údery blesků. Povlaky, které jsou aplikovány na letadla, představují výzvu pro výrobce nátěrových hmot, protože to jsou jedny z nejnáročnějších aplikací průmyslu. Musí být schopny odolat teplotním výkyvům, tak vystavení vysoké hodnotě UV záření (v 9 000 m. n. m.). Kromě toho, se musí vyrovnávat s extrémními teplotními výkyvy, musí odolat praskání a rychlým změnám tlaku vzduchu. Musí také odolávat erozi od proudění vzduchu a poškozování nárazem mechanických částic při rychlosti okolo 800 km/h. Na zemi musí nátěry letadel také odolat kontaktu s agresivními látkami, jako jsou palivo, odmrazovací zařízení a hydraulické kapaliny. [8, 9].

Návrhy nátěrových hmot pro letadla musí být sestaveny tak, aby těmto požadavkům vyhověly. To zahrnuje i požadavky na teplotní odolnost, pohlcení UV záření, elasticitu, přilnavost, odolnost vůči vodě a odolnost proti korozi.

Nátěrové systémy musí splňovat následující požadavky:

- Mechanická odolnost.
- Korozní odolnost.
- Vlastnosti zpomalující požár.
- Dobrou tepelnou odolnost.

Letadla všech druhů se potýkají s různými prostředími, je zapotřebí takováto prostředí charakterizovat a rozdělit je do skupin. Při vývojových zkouškách tyto skupiny kombinovat a blíže specifikovat co nevhodnější prostředí aplikace, tedy místa, kde nátěrové systémy budou nejlépe plnit svoji funkci.



Obr. 6: Klasifikace prostředí, s kterými se setkávají letecké povlaky. [7]

Splnění těchto požadavků podle uvedené specifikace ovlivňuje funkčnost nátěrového systému a má na něj významný vliv. [7]

4. Kontrola nátěrových systému v leteckém průmyslu

Letecká doprava hraje důležitou roli ve světových hospodářských činnostech. Bezpečnost je klíčovým prvkem mnoha programů a systémů řízení bezpečnosti, které jsou založeny na zásadách řízení rizik. Bezpečnostní výsledky se v odvětví výrazně zlepšily s rokem 2017, ten byl vyhodnocen jako nejbezpečnější rok (pokud jde o úmrtí na pravidelných letech mezinárodní letecké dopravy) [8]. Navzdory tomu zůstává kontrola nátěrových systémů velmi důležitým aspektem leteckého průmyslu. Náklady na tyto kontroly představují významné procento z celkových nákladů na údržbu letadel [1].

Již ve fázi návrhu letadla je stanovena řada požadavků (hmotnost, aerodynamika, únavová životnost konstrukce a vlastnosti paliva) a nátěrové systémy povrchů jsou její nedílnou součástí.

Opotřebením nátěrového systému je navzdory pokrokům v oblasti povrchových úprav, výpočetním, konstrukčním metodám, analýze, údržbě a simulacím, stále nedokonalý a dodnes neexistuje spolehlivý model pro předpověď těchto vlivů [9]. Letecké konstrukce jsou vystaveny řadě namáhání a podmínek v závislosti na provozním prostředí letadla. Letadla všech druhů a typů jsou kontrolovány po celou dobu životnosti podle stanoveného programu ochrany, to je nezbytné pro kontrolu na předvídatelnou, zvládnutelnou úroveň, která nedegraduje strukturu ani neohroží schopnost letounu přenášet požadované konstrukční zatížení.

Při navrhování kontroly je potřeba zohlednit sedm klíčových prvků:

- Výběr materiálů,
- systém nátěrových systémů,
- těsnící prostředky,
- antikorozi sloučeniny,
- zamezení kontaktu mezi různými kovy,
- odvodnění,
- přístup k údržbě.

Při výběru materiálu se při konstrukci zvažuje mnoho parametrů, jako je například poměr slitiny, tvar, poměr pevnosti k zatěžovací síle, odolnost a únava. Nejčastěji se používají v konstrukci letadel hliníkové slitiny s vysokou pevností a spojují se s různými materiály jako je například titan (6-AL-4 V), hořčík, nerezová ocel, nízkolegovaná ocel, vysoko pevnostní uhlíková ocel či různé kompozitní materiály.

Systém povrchových úprav je klíčovým prvkem pro ochranu vybraného materiálu v provozním prostředí. Tato bariéra je typicky složená z více vrstev, které mohou zahrnovat eloxovanou vrstvu nebo chemické konverzní povlaky, na které je aplikován základní nátěrovým systémem, tvořící bariérový efekt k ochraně proti korozi. Vnější povrchy a

některé konstrukční plochy jsou potaženy navíc odolnými vrchními laky. Aktivní ochranné nátěry jsou nedílnou součástí v ochranném systému.

Výše popsané vlastnosti musí zajistit bezpečnou a hospodárnou životnost konstrukce, musí být ale zajištěn snadný přístup ke kontrolám údržby, a také musí splňovat programy pro řízení a údržbu. Degradující povrchy není možné vyloučit, ale včasné kontroly pomohou detekovat korozi, zachycenou vlhkost, ucpané vypouštěcí otvory nebo chybějící barvy v raném stádiu.

Dalším důležitým aspektem je dopad povlaků na životní prostředí. Termíny jako ekologická účinnost, udržitelnost a uhlíková stopa jsou nedílnou součástí vývoje nových produktů pro letecký průmysl. Nejen pro výrobce povlaků, ale pro celý dodavatelský řetězec od surovin až po konečného uživatele. Ještě důležitější je, že vznikají nové právní předpisy a nařízení vládních institucí s požadavky na udržitelné produkty s nižším dopadem na životní prostředí. Právní předpisy se většinou zaměřují na zákaz všech chemických látek, které mohou být považovány za nebezpečné. V průběhu let to vedlo k nahrazení mnoha nebezpečných materiálů přijatelnějšími alternativami a ke snížení emisí rozpouštědel. V oblasti leteckého průmyslu došlo k mnoha pokrokům [3].

5. Systémy leteckých povlaků a jejich požadavky

Hlavní důvody pro nátěrové systémy letadel jsou ochrana proti vnějším vlivům, korozi, rozlišení leteckých společností, vzhled a jejich životnost. Nátěrové systémy na letadlech chrání vnější i vnitřní konstrukci a mnohé komponenty, které jsou konstruovány na konstrukční a únavové vlastnosti. Systémy povrchové úpravy se v leteckém průmyslu musí vyrovnat s extrémními provozními podmínkami. Proto se systémy vyvíjí po stránce chemické odolnosti a odolnosti proti tekutinám, odolnosti proti korozi a odolnosti vůči vnějším vlivům. Pro ochranu různých oblastí letadel bylo vyvinuto mnoho různých systémů a obecně platí, že letecké nátěrové systémy lze rozdělit do tří hlavních skupin:

- vnější systémy,
- vnitřní konstrukční systémy,
- systémy zvláštního určení.

5.1. Vnější systémy

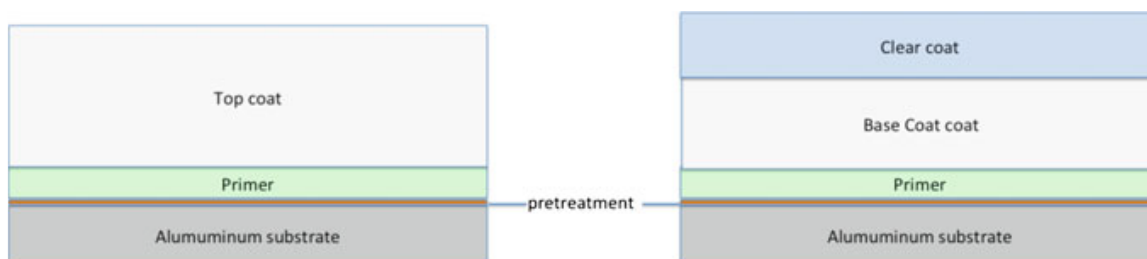
Systémy vnějšího nátěru se aplikují na trup a další vnější plochy letadla. Tyto systémy odrážejí identitu a vizibilitu leteckých společností. Historicky byly letouny převážně bílé. Dnes musí být letadla lesklá a často mají tzv. „živé“ barvy, které se používají jako marketingový nástroj (viz. Obr. 7). Exteriérové nátěrové systémy musí být schopné odolat širokému rozsahu environmentálních vlivů, jako jsou teplotní změny, vysoká hodnota UV záření, vlhkost, opotřebení a vystavení agresivním médiím, včetně paliva, odmrazovacích tekutin, hydraulických kapalin, chloridů v přímořských oblastech a kyselých aerosolů v atmosféře v důsledku erupcí sopek a průmyslového znečištění. Tato environmentální napětí spolu s vibračními účinky proudových motorů a vlivem ohybového tlaku na konstrukci trupu a turbulence způsobují, že povlaky jsou vystaveny silnému namáhání.



Obr. 7: Nový branding pro Airbus A320 s námětem ilustrací od Tintina [10]

Typický systém vnějšího povlaku je vícevrstvý systém, který se skládá z předupravené vrstvy (eloxované vrstvy nebo chemicky konverzního povlaku), ze základní vrstvy, která má tloušťku 15 - 25 μm . A z vrchní vrstvy, ta je pokryta pigmentovaným nátěrem o tloušťce 60 - 120 μm (viz. Obr. 8), ta se pro letecké linky aplikuje spolu s dekoračními barvami na vrchní vrstvě základní vrstvy.

Možný způsob je aplikovat na střední nátěr tzv. čistý nátěr (Clear Coat). Tímto způsobem je „dekorativní“ vrchní nátěr nahrazen rychleschnoucím, vysoce pigmentovaným barevným základním nátěrem, který umožňuje zkrátit dobu zpracování nátěru letadla. Jakmile jsou všechny barvy aplikovány, aplikuje se čistý nátěr, což zajišťuje vyšší lesk a trvanlivost barev, a tím i delší trvanlivost celého nátěrového systému. Cílem je vyhnout se typické degradaci vnějších systémů během provozu letadla, jako je snížení lesku, ztráta adheze, praskání a korozní napadení.



Obr. 8: Obecné schéma vnějších nátěrových systémů aplikovaných v letectví [3].

5.2. Strukturální systémy

Konstrukční lakovací systémy jsou určeny k ochraně částí konstrukce letadel. Tyto systémy se aplikují jak na malé součásti, tak i na podstavy před konečnou montáží (viz. Obr. 9). Systém se obvykle skládá z vrstvy předběžného ošetření, kterou může být chemicky konverzní povlak nebo anodický film potažený strukturálním základním nátěrem o tloušťce 15-20 μm . V některých oblastech letadla, například ve spodních částech (oblast výklenku, podvozku) a nákladových prostorách, se obvykle používá další přídavná ochranná vrstva epoxidu nebo polyurethanu o tloušťce 20 μm (viz. Obr. 9).



Obr. 9: Obecné schéma konstrukčních nátěrových systémů aplikovaných v letectví [3].



Obr. 10: Příklad aplikace vnitřního nátěrového systému letadlové konstrukce [3].

Systémy musí poskytovat jak pasivní, tak aktivní protikorozní ochranu po celou dobu životnosti letadla. Proto tyto systémy fungují jako bariéra a poskytují dlouhodobou ochranu proti korozi, spolu s vynikající přilnavostí k nejrůznějším substrátům [3].

5.3. Speciální povlakovací systémy

Kromě vnějších a konstrukčních nátěrových systémů vyžadují specifické oblasti letadla specifické povlaky. Příkladem jsou: kompozitní oblasti, palivová nádrž a křídla. Existuje i mnoho různých typů povlaků s konkrétními účely, aby byly protiskluzové, vodivé, tepelně odolné, odolné proti oděru, odražející sluneční záření, nebo jako bariéra proti výparům z paliv a kamuflážní funkcí (infračervená absorpce nebo odraz).

5.4. Požadavky a specifikace povlakovacích systémů

Požadavky na nátěrové systémy používané v leteckém průmyslu jsou řízeny velkým počtem specifikací a norem. Mohou být vzaty v úvahu různé specifikace:

- MILSpecifications vydané americkou vládou pro armádní letadla,
- OEM specifikace výrobců komerčních letadel,
- specifikace údržby definované a řízené skupinou ISO a SAE.

Specifikace popisují obecné vlastnosti a požadavky na nátěrový systém pro specifické účely, jako jsou: základní nátěr, základní nátěr palivové nádrže, systém vnějších nátěrů, systém nátěrových hmot pro kompozity nebo povlaky na křídlech. Požadavky jsou založeny na kritických vlastnostech, které musí povlaky prokázat, aby byla zajištěna jejich funkce. Jak výrobci komerčních letadel, tak výzkumné laboratoře nebo certifikované zkušební ústavy

provádějí zkoušky na experimentálních vzorcích, aby bylo zajištěno splnění požadavků a specifikací.

Specifikace jsou určeny pro každou konkrétní vrstvu povlaku. Podrobují se řadě testů, které zajišťují, že aplikace, vzhled a funkční charakteristiky povlaku odpovídají zamýšlenému použití. Zkoušky uvedené v těchto specifikacích často odpovídají normám ISO nebo ASTM. Tyto normy a specifikace popisují i způsob kontroly kvality, kterými musí nátěry projít, aby následně mohly být schváleny pro použití v průmyslu. Specifikace obsahují seznam požadavků na vlastnosti mokrého laku, aplikovatelnost, vzhled a vlastnosti suchého filmu. Zkoušky kontroly kvality popisují, které testy musí být provedeny, aby bylo zajištěno, že šarže byla vyrobena správně. [8].

6. Systémy nátěrových hmot

Nátěrové hmoty používané v leteckém průmyslu, jsou složité materiály. Tyto heterogenní materiály jsou základem protikorozní ochrany letadlových konstrukcí. Komplexní pryskyřicová matrice obsahuje pigmenty, plnidla, rozpouštědla a další přísady. Každý typ povlaku je pečlivě navržen tak, aby splňoval průmyslové standardy.

Systémy nátěrových hmot se obvykle skládají z několika různých vrstev povlaků s různými vlastnostmi a účely. V závislosti na požadovaných vlastnostech nátěrového systému mohou být jednotlivé vrstvy anorganické nebo organické [3].

6.1. Technologie povlakovacích systémů

V leteckém průmyslu existuje mnoho různých druhů povlaků. V průběhu let bylo vyvinuto mnoho technologií nátěru, především kvůli tlaku na snížení emisí z rozpouštědel. Předpisy pro těkavé organické sloučeniny (VOC) se liší po celém světě, ale obecně platí, že limity pro VOC jsou 350 g/l pro základní nátěrové systémy a 420 g/l pro vrchní nátěry. V současné době existují na trhu 4 různé typy používaných nátěrů:

- Konvenční povlaky,
- povlaky s výjimkou VOC,
- vysoce pevné nátěry,
- povlaky na bázi vody.

6.2. Základní nátěrový systém

Základní nátěrový systém se používá pro vnější a strukturální ochranu letadla. Poskytuje aktivní ochranu proti korozi k podkladu a zajišťuje přilnavost k vrchním nátěrům.

Tyto systémy musí splňovat řadu kritérií, jako např.:

- Vytvrzení při pokojové teplotě,
- vynikající přilnavost k základnímu materiálu,
- vysoká chemická odolnost,
- dostatečná flexibilita,
- dlouhodobá odolnost proti korozi,
- dobrá kompatibilita s vrchním nátěrem,
- použitelnost v různých klimatických podmínkách.

6.2.1. Epoxidové nátěry základního systému

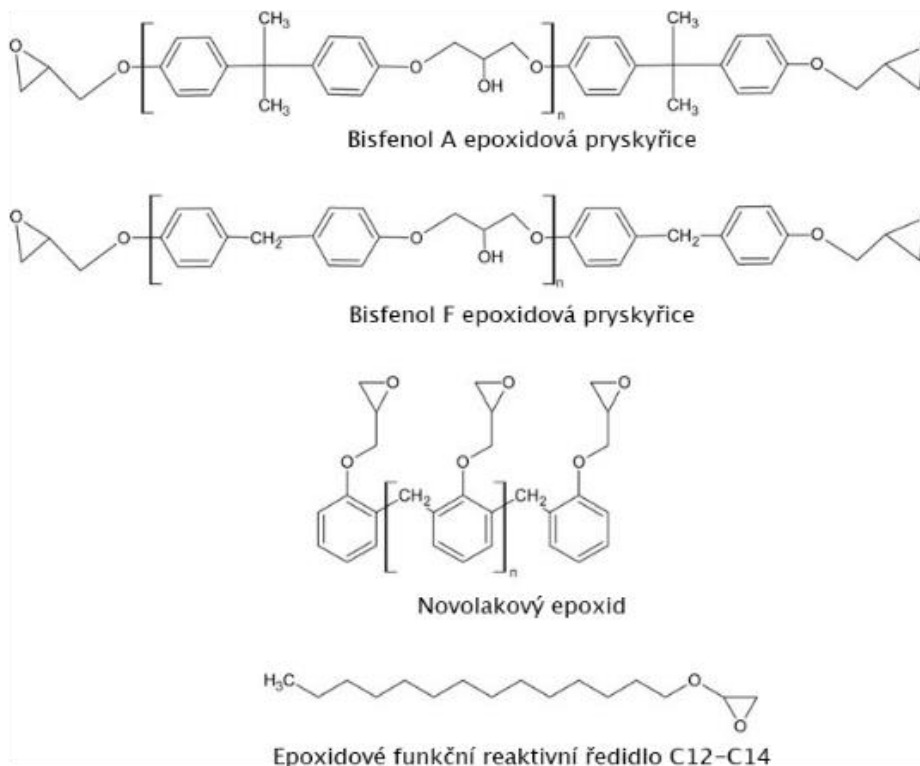
Většina základních nátěrových hmot na trhu s leteckými nátěry jsou dvoukomponentní epoxidové/aminové základní nátěrové hmoty. Základní složka obsahuje směs epoxidových pryskyřic, pigmentů, inhibitorů koroze, aditiv a rozpouštědel. Druhá složka, tvrdidlo nebo vytvrzovací roztok obsahuje vytvrzovací činidla (amin nebo polyamid) a rozpouštědla. Technologie epoxidových pryskyřic se používá díky jejich velmi všestranným vlastnostem. Mají dobrou přilnavost k mnoha substrátům, dobrou odolnost proti korozi a mohou být naformulovány tak, aby byla nalezena rovnováha mezi chemickou odolností, pružností, odolností proti rázům a požadavkům na tvrdost. Na druhé straně mají epoxidové typy základních nátěrových hmot relativně dlouhé doby schnutí a omezenou trvanlivost vůči vlivům vnějšího prostředí.

6.2.2. Epoxidové pryskyřice

K dispozici je široký sortiment epoxidových pryskyřic. Většina epoxidových pryskyřic vzniká z reakce mezi epichlorhydrinem a difenylol propanem (bisfenol A) [7].

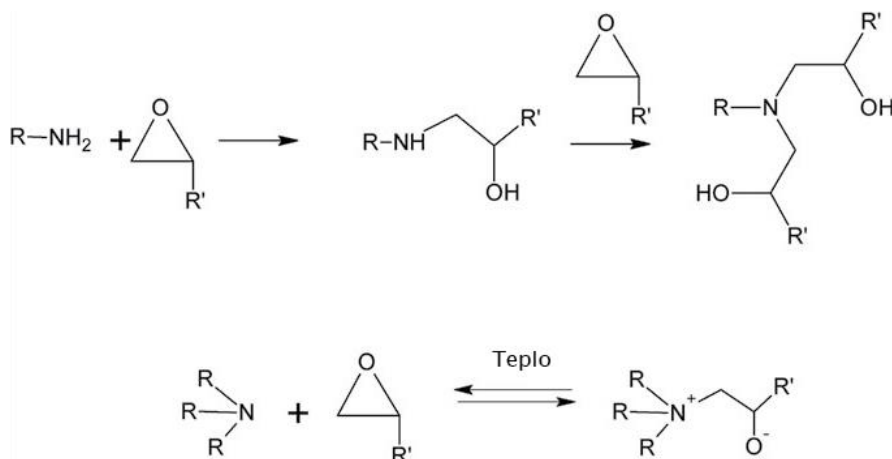
Existují převážně 4 skupiny těchto epoxidových pryskyřic (viz. Obr. 11):

- Epoxidové pryskyřice bisfenolu A,
- epoxidové pryskyřice bisfenolu F,
- epoxidové novolaky,
- epoxidové funkční ředidla a modifikátory.



Obr. 11: Typy epoxidových pryskyřic [3].

Každý typ pryskyřice má různé molekulové hmotnosti a funkčnosti. Výběr epoxidové pryskyřice závisí na tom, pro jakou specifikaci nebo aplikaci je potřeba vyvinout povlak. Mnohé produkty obsahují směsi epoxidových pryskyřic pro získání specifických povlakových vlastností, které jsou potřebné pro použití v leteckém průmyslu. Pryskyřice bisfenolu A a F jsou míchány pro požadované rychlosti vytvrzení, přidávají se k nim reaktivní ředidla s epoxidovými funkčními prvky tak, aby se snížila viskozita a zvýšila se pružnost.



Obr. 12: Reakce epoxidů při vytvrzování [3].

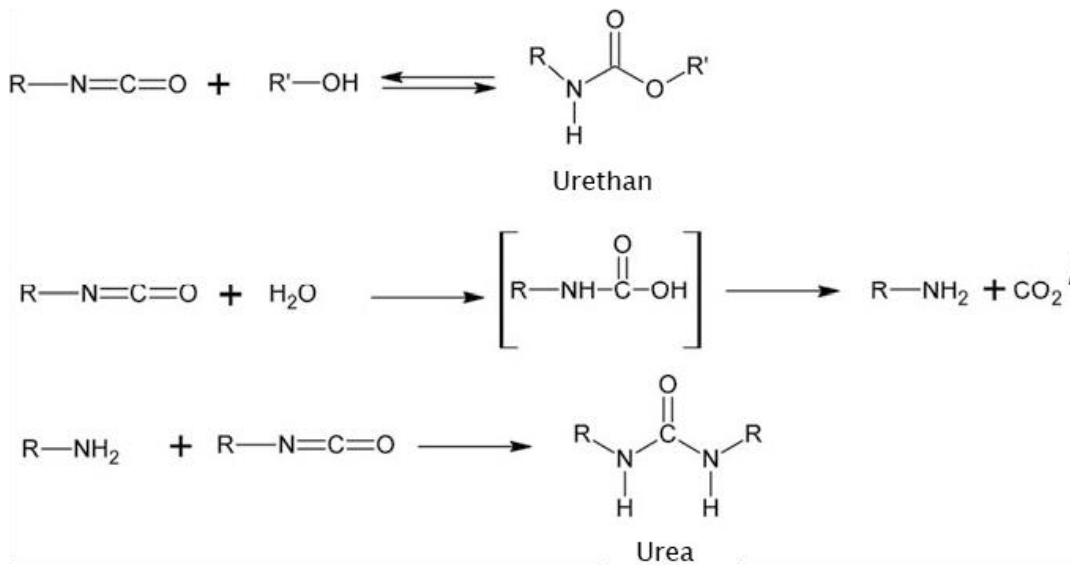
V aerosolových nátěrech je většina epoxidových základních nátěrových systémů formulována s aminovými funkčními vytvrzovacími látkami (viz. Obr. 12). Epoxidové pryskyřice potom reagují za podmínek okolí s primárními a sekundárními aminy. Rychlost reakce závisí na epoxidových a aminových strukturách.

Výběr epoxidových pryskyřic a vytvrzovacích prostředků závisí na požadovaných vlastnostech povlaku. Nejčastěji se prostředek skládá ze směsi různých reaktivních epoxidových pryskyřic, ředidel, alifatických nebo cykloalifatických aminů smíchaných s polyamidy. Jedná se tedy o různé úpravy vlastnosti povlaků adheze, pružnosti, chemické odolnosti, životnosti a rychlosti vytvrzování, která je potřebná pro specifické použití a aplikace.

6.3. Vrchní nátěrový systém

Vrchní nátěry se používají jak v interiéru na konstrukci, tak v exteriérech po celém letadle, ale oba s jiným účelem. Epoxidové vrchní nátěry se používají pro konstrukční aplikace, díky své dobré přilnavosti a vynikající odolnosti vůči tekutinám pro zajištění dobrých vlastností protikorozní ochrany. Základní chemie epoxidových vrchních laků je podobná technologii základních nátěrových systémů, ale použití epoxidového vrchního nátěru se aplikuje pouze pro konstrukční díly, protože nejsou dostatečně odolné pro použití v exteriéru.

Nejčastěji používané jsou ovšem polyurethanové nátěrové hmoty.



Obr. 13: Reakce polyurethanu při vytvrzování [3].

Od konce šedesátých let byly polyurethanové vrchní nátěry aplikovány v leteckém průmyslu kvůli jejich velmi dobré mechanické odolnosti v kombinaci s vynikající pružností a dobrou odolností proti povětrnosti. Polyurethanové vrchní nátěry jsou založeny na 2K (dvoukomponentních) formulacích, z nichž jedna část obsahuje polyol (polyesterová nebo akrylátová pryskyřice), který je vytvrzen druhou složkou, která obsahuje alifatické či aromatické isokyanáty. Někdy je přidána i třetí složka obsahující katalyzátor, která upravuje rychlost vytvrzení pro různé aplikační podmínky.

Vlastnosti polyurethanových povlaků závisí na polyolové struktuře, typu isokyanátu a stechiometrickém poměru isokyanátových a hydroxylových skupin (poměr NCO/OH). Chemická nebo kapalinová odolnost potahu závisí na hustotě zesítnění. Polyoly s vysokou hydroxylovou funkčností zvyšují hustotu zesítnění a poskytují chemicky odolnější, ale méně flexibilní filmy. Letecké úpravy jsou často formulovány s vyšším poměrem NCO/OH pro zvýšení odolnosti proti tekutinám, zejména hydraulických kapalin. Hydroxylovými skupinami zakončené polyesterové a akrylové pryskyřice jsou používány nejčastěji. Polyesterové umožňují vyšší obsah pevných látek a poskytují filmy s větší odolností vůči rozpouštědlům. Akrylát poskytuje rychlejší schnutí, vyšší lesk a lepší trvanlivost ve vnějším prostředí, jsou tedy odolné vůči UV záření.

Většina polyurethanové technologie se používá pro venkovní aplikace a to díky své vnější pevnosti. Vnější odolnost se vztahuje k odolnosti proti degračním procesům při vystavení podmínkám prostředí a ke schopnosti udržovat estetické a funkční vlastnosti povlaku. Chemické procesy, jako je hydrolýza a fotooxidace vyplývající z vystavení vlivu prostředí, potom způsobují degradaci povlaku. UV složka slunečního záření může iniciovat foto-oxidační procesy v pryskyřicových systémech. Ovlivnit je mohou i podmínky prostředí, jako jsou kyselá deště způsobené znečištěným ovzduším nebo atmosféricky rozložené látky

(například ozón), ty spolu s teplotou iniciují hydrolytické degradační procesy v povlaku. To pak vede ke ztrátě lesku, barevnosti nebo dokonce praskání a delaminaci. Dalším důležitým faktorem pro trvanlivost povrchů oproti působení vnějšího prostředí je výběr pigmentů a jejich kvalita.

Následná úprava těchto nátěrových hmot (např. lakováním) zvyšuje stabilitu barev a lesk povlaku.

7. Aplikace nátěrových hmot v letectví

Dnes se většina nátěrů aplikuje ručním pneumatickým zařízením. Velké množství dílů, které je třeba před montáží namontovat, rozměry a tvar letadla, způsobují obtížnou automatizaci. Proces lakování exteriérů je stále náročný na lidskou pracovní sílu, především z důvodu kroků, které je nutno učinit při předúpravách, maskovacích a demaskovacích procesech, před a během lakování (viz. Obr. 14). Navíc existuje několik dalších faktorů, které ovlivňují proces lakování. Podmínky, kde se lakování provádí, se v hangáru mohou měnit od 23 °C a 55 % relativní vlhkosti, až po těžké podmínky s vysokou teplotou a vysokou vlhkostí (35 °C a 90 % relativní vlhkosti) nebo nízké teploty a velmi nízké vlhkosti. Některé hangáry jsou vybaveny pohyblivými plošinami a jiné mají pevná lešení, tak aby zpřístupnění pro aplikaci nátěrových hmot bylo co nejsnazší. V těchto různých podmínkách závisí výsledná kvalita na faktorech, jako je týmová práce, zkušenosti a dovednosti techniků, kteří nátěry nanášejí a jaké používají aplikační zařízení [3].

7.1. Používaná zařízení

Existuje mnoho různých typů zařízení pro aplikaci leteckých povlaků. Nejpoužívanějším typem je rozprašování vzduchem. Tento typ stříkacích pistolí využívá vzduch k atomizaci barvy do velmi malých kapek, což vede k velmi hladkému dokončení povrchu.



Obr. 14: Aplikace vrchního nátěrového systému na cestovní letadlo [3].

Všeobecně používané zařízení není nákladné na pořízení ani provoz, snadno se čistí a udržuje. Problémem těchto zařízení je jejich nízká účinnost přibližně 20 - 30 %, nejsou tedy vhodná pro velké plochy. Existuje několik alternativních typů stříkacích pistolí s rozprašovačem vzduchu, které zvyšují efektivitu aplikace nátěrových hmot. Příkladem jsou stříkací pistole HVLP (vysoký objem nízkého tlaku). Aplikace pomocí technologie AirLess využívá k rozstříkování nátěru hydraulický tlak místo vzduchu. Barva proudí tryskou pod tlakem (100 - 150 bar), tak aby došlo k atomizaci barvy. Rychlost rozprašování je menší ve srovnání s rozprašováním pomocí vzduchu, což vede k vyšší účinnosti aplikace, takže zařízení má vysoký průtok a poskytuje rychlejší aplikační rychlost. Dalším způsobem, jak omezit nízkou účinnost rozprašování a zvýšit efektivitu nanášení, je používání elektrostatického rozprašování. Rozprašované médium je nabíjeno za použití generátoru s vysokým napětím (60 - 90 kV) ale nízkým proudem a je přitahováno k uzemněnému vodivému objektu, tímto způsobem je možné dosáhnout efektivitu až 70 %. Tato účinnost ovšem závisí na typu povlakovaného systému, který je určen k aplikaci. Jedná se o zařízení, které se nejčastěji používá v lakovnách OEM a MRO.

Multifunkční stříkací zařízení se stává stále používanějším, jak na trhu s konstrukčními nátěry, tak pro lakování vnějších ploch letadel. Zařízení vždy smíchá komponenty (základ, tvrdidlo a aktivátor) v požadovaném poměru přímo nebo těsně před vstupem do stříkací pistole. Takové zařízení je nezbytné pro velmi reaktivní systémy (s krátkou dobou zpracovatelnosti) a také se snižuje množství odpadu.

7.2. Postupy aplikace vnějšího nátěru

Lakování letadel je náročný, víceetapový proces, který vyžaduje značné množství práce. Znázornění je rozděleno (viz. Obr. 15) do různých kroků, které je zapotřebí učinit při aplikaci vnějším lakování. Letadlo se umyje a přemístí do hangáru, všechny rizikové komponenty (kompozitní součásti) a prvky sloužící k ovládání letadla jsou buďto zakryty nebo demontovány. Při opravách se potom aplikuje chemický odstraňovač tak, aby mohlo dojít k odstranění starého nátěrového filmu. Poté se letadlo vyčistí a zkontroluje, odstraní se vady, ošetří se koroze a provedou se nezbytné opravy. Poté je letadlo očištěno alkalickým mycím prostředkem. Hliníkové plochy jsou před aplikaci chemického konverzního povlaku nebo základního nátěru leptány nebo obušovány. Na vhodných místech se použije ochranný nátěr, a pak se aplikuje barva vrchního nátěru letadla. Jsou-li předpřipraveny dekorativní obtisky, jsou rozloženy podle navržených schémat na letadlo a zbytek letadla se zamaskuje. Poté jsou aplikovány dekorativní barvy. Po dokončení lakování se provádí závěrečná kontrola a letadlo je uvolněno do provozu.



Obr. 15: Jednotlivé kroky potřebné při aplikaci nového systému povrchové úpravy letadla [3].

7.3. Trendy v aplikaci leteckého nátěru

Letecký trh je zaměřen na zvýšení efektivity, snížení nákladů na provoz a údržbu. Existují tři významné faktory, které ovlivňují inovace na trhu s leteckými nátěry. Za prvé se jedná o zvyšování šetrnosti nátěrových systémů k životnímu prostředí. Za druhé je potřeba zvýšit životnost nátěrových systémů. A za třetí je zapotřebí vyšší účinnosti při aplikaci nátěrových systémů na letadla všech velikostí.

Vliv efektivity provází vyvíjené úsilí o snížení hmotnosti, kratší dobu nanášení povlaků, delší životnost a zvýšení funkčnosti. Protože výdaje na pohonné hmoty jsou významnou součástí provozních nákladů, letecké společnosti a výrobci letadel zvažují způsoby, jak ušetřit. Jedním ze způsobů, jak toho lze dosáhnout, je snížení hmotnosti výběrem nových konstrukčních materiálů již při návrhu nebo snížením hmotnosti nátěrových systémů. Hmotnost nátěrového filmu může být snížena různými způsoby, jako je snížení měrné

hmotnosti suchého filmu povlaku, snížení tloušťky nebo použití méně vrstev nátěrového systému.

Trh se dále rozrůstá a zvyšují se sazby OEM výrobců, tak aby dokázali držet krok s poptávkou na trhu. Je tedy logické, snažit se zkrátit dobu aplikace a schnutí nátěru, aby se letadlo vrátilo do provozu rychleji a vytvořilo příjmy pro leteckou společnost. Vzhled a interiér letadla jsou součástí značky a image letecké společnosti. Čistý a lesklý vzhled se zářivými barvami je klíčovým aspektem strategie brandingu leteckých společností.

8. Současný stav speciálních nátěrových hmot pro vytipované aplikace letadla

V návaznosti na 2. etapu pod názvem „Ověření vhodnosti použití UV vytvrditelných laků pro vytipované aplikace na letadle“ v rámci projektu TE02000011 – Centrum výzkumu povrchových úprav podporovaného TA České republiky bude experimentální část této práce pokračováním výzkumu se zaměřením na sledování odolnosti vrchních (bezbarvých) laků vůči abrazi a erozi, včetně zkoušek, kterými se aplikované laky budou porovnávat a hodnotit. Je důležité podotknout, že není cílem testovat nátěrový systém proti vnějším vlivům (klimatické, korozní), ale pracovat s odolností povlaků proti mechanickému poškození.

První etapa byla cílena na ověření vhodnosti použití UV vytvrditelných laků pro vytipované aplikace umístěných na letadlech. Srovnáván byl lak vyvíjený ve společnosti Synpo, a.s. pod označením Synpo LS-1 s lakem od společnosti Lankwitzer ČR, spol. s r.o. pod názvem Lankwitzer UD-10-0000/3. Experiment probíhal na základě různých délek vytvrzování těchto UV laků. Výsledkem měření testovaných vzorků bylo zlepšení povrchové tvrdosti a odolnosti vůči abrazi, ale UV tvrditelné laky byly náchylnější k erozivnímu opotřebení. Protože odolnost proti erozi je důležitým parametrem, bylo navrženo, že se v další etapě bude vývoj zaměřovat na laky, které jsou mírně elastické.

V druhé etapě bylo ve společnosti Lankwitzer ČR, spol. s r.o., vytipováno hned několik laků, které dle jejich zkušeností vykazují elastické (flexibilní) chování. Jednalo se o polyurethanový lak Lankwitzer PD-22-0000/3 Flexibel a laky UV vytvrditelné Lankwitzer UD-70-0000/2, Lankwitzer UD-42-0000/1. Ve společnosti Synpo, a.s. byl zvolen UV vytvrditelný lak Synpo L3. Ze zkoušení, které je popsáno ve zprávě R-6647, plyne závěr, že UV laky (UD-70, UD-42, L3) mají lepší odolnosti proti abrazi, ale docházelo k většímu erozivnímu poškození než u standardního leteckého nátěru S2318 (základ) + U2054 (barevný email). Polyurethanový lak PD22 naopak vykázal až 3x vyšší odolnost proti erozi, ale v ostatních zkouškách měl horší vlastnosti. Proto je do třetí etapy zapotřebí vytvořit optimalizovaný systém, který bude vykazovat flexibilitu a zároveň bude zajištěna i vyšší odolnost proti erozi.

Třetí etapa, jejíž součástí je tato práce, navazuje na etapy předchozí. Doposavad byly laky aplikovány na LNS S2318 (základ) a lak U2054 (barevný email) vyráběný ve společnosti Colorlak, a.s., ta pro třetí fázi navrhla modifikaci tohoto systému v podobě LNS-NG pod označením S2318-NG (základ) + U2081-NG (barevný email). Společnost Lankwitzer ČR, spol. s r.o., do této etapy ponechala svůj flexibilní lak Lankwitzer PD22, jako jediný v současnosti vyvíjený lak s flexibilními vlastnostmi. A společnost Synpo, a.s., zvolila lak Synpo LV CC 250, který již komerčně vyrábí. Jejich druhým lakem v této etapě je lak, který je ve fázi vývoje, pod označením Synpo PU 186L. Systémy navržené participujícími subjekty, jsou v práci podrobovány zkoušení jejich odolnosti, především proti abrazi a erozi, tak aby co nejlépe odolávali mechanickému poškození.

9. Návrh metodiky zkoušení nátěrových hmot

Nátěrové systémy v letectví mají specifické požadavky, aplikace může být velmi rozsáhlá, proto se bude zaměřovat jen na vytipovanou část letadla. To jsou ty části, které podléhají podmínkám zvýšeného mechanického opotřebení. V místech, kde dochází k častějšímu styku s cizími předměty, jsou poškozovány oděrem a erozí prachovými částicemi ze vzduchu nebo i drobným pískem. Cílem je výrazně snížit náklady na údržbu, servis a generální opravy, tím se nám podaří prodloužit životnost těchto komponent, které jsou extrémně namáhány.

Mechanicky namáhané části letadel jsou náběžné hrany, radary, antény, spojery a klapky. Cílem není zkoušet systém proti odolnosti vůči enviromentálním vlivům jako jsou klimatické či korozní vlivy, ale pracovat s charakteristikou mechanické odolnosti povlaku, tedy jejím zlepšením nebo zhoršením v porovnání se současným stavem. Experiment byl zaměřen především na sledování odolnosti standardních nátěrových systémů používaných v letectví. A na navrženou úpravu těchto standardních systémů vrstvou laků, kterými si klademe za cíl zvýšit požadovanou mechanickou odolnost. V této práci byly navrženy vzorky laku experimentálně testovány na odolnost vůči abrazi a erozi, dále podrobeny zkouškám tvrdosti a adheze, a hodnoceny změny barevného odstínu a zrcadlového lesku.

Metody zkoušení vyplývají ze standardizovaných zkoušek, které podléhají normám a jsou v nich přesně charakterizovány. Jednotlivé zkoušky budou dále rozepsány, tak aby byly co nejvíce pochopitelné a jejich provedení včetně vyhodnocení uvedeným normám podléhá.

9.1. Tloušťka povlaků

Tloušťky povlakových systémů v letectví jsou voleny tak, aby splňovaly mezní podmínky. Rozdělení těchto tlouštěk spadá mezi velmi tenké a příliš tlusté povlaky. Pokud je povlak velmi tenký, tak nemusí splňovat požadovanou pevnost v tahu, smyku a bariérovou ochranu. V důsledku, tyto povlaky potom provází praskání a štěpení, především v oblasti spojovacích prvků a panelových švů. Naopak, tlusté povlaky postrádají pružnost a mohou vykazovat nadměrné vnitřní napětí. Navíc nadměrná hmotnost celého nátěru letadla způsobuje vyšší spotřebu paliva. Proto je důležité sledovat tyto tloušťky a provádět jejich měření.

Tloušťka vytvrzených povlaků letadel může být určena buď:

- destruktivně,
- nedestruktivně.

Destruktivní metody zahrnují vrypy nebo řezání do suchých vrstev nátěrové hmoty a následné určení tloušťky povlaku. Tento přístup je obvykle nepřijatelný pro nátěry na

letadlech, protože vazba povlaku a substrátu je znehodnocena (zničena). Lze ji ovšem použít v laboratořích při vývoji a testování povlakových systémů.

Nedestruktivní techniky zahrnují vířivý proud, magnetickou indukci a magneto-resistorový systém. Jedná se o nejžádanější způsoby stanovení tloušťky povlakového systému používaného v leteckém průmyslu, a to jak v terénu, tak v laboratoři díky své přesnosti a snadnému použití.

Problémem, který se vyskytuje u letadel je, že jsou zhotovena z několika druhů materiálů. Proto metoda určená k určení tloušťky povlaku závisí na materiálu a na nanášeném povlakovém systému, zejména pokud se použije nedestruktivní metoda. Jedna z metod měření tloušťky povlakového systému je určena normou ČSN EN ISO 2808 [III] a používá se pro nedestruktivní měření tlouštěk suchého filmu povlaků, především u aplikace na železné kovy a nemagnetické (nevodivé) povlaky aplikované na kovy neželezné.

9.2. Optické vlastnosti a jejich zkoušení

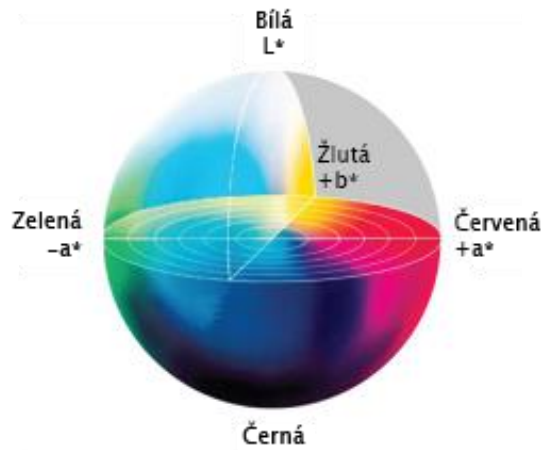
Optické vlastnosti nátěrových systémů (barva, lesk, kontrast, ...), jsou považovány v komerčním leteckém průmyslu jinak než pro letadla vojenská. U komerčních letadel optický dojem může silně ovlivňovat zákazníka, oddělovat od konkurence a zvyšovat nebo snižovat hodnotu letecké společnosti. I proto se u komerčních letadel každých 5 let přistupuje ke kompletní obnově celého nátěrového systému. U vojenských letounů optické vlastnosti ovlivňují detekovatelnost a mají vliv na potenciálně rizikové situace.

9.2.1. Barvy a měření barevnosti

Barva je považována za důležitou, jak u komerčních letadel, tak u letadel vojenských. Komerční letadla se svojí barevností odlišují od konkurence (různý design), a zvyšují ponětí o společnosti samotné, proto bývají barvy velmi „živé“. Barvy pro vojenské letouny jsou naopak vybírány tak, aby co nejlépe plnili požadavky kamufláže v různých prostředích (pouštní, lesní, arktické, mezikontinentální). V obou případech je barva letounu považována za důležitou.

Charakteristika barvy letadel se provádí vizuálním posouzením nebo kvantitativním měřením za pomoci přístrojů, ty mají výhodu v číselném vyjádření. Pro měření odstínu barevnosti kvantitativním způsobem, je zapotřebí použít spektrofotometr, ten měří světlo odražené od povrchu povlaku přes celou oblast vlnových délek. Kromě toho se spektrofotometry používají i pro nátěry vojenských letadel, protože s jejich pomocí lze určit charakteristiky, které jsou mimo viditelnou oblast (infračervené a ultrafialové).

Měřením se spektrofotometrem získáme parametr L^* , který představuje jas, a parametry a^* a b^* , jež určují barevný odstín a sytost barvy.



Obr. 16: Kalorimetrický systém *Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.*

Rozdíl barevnosti potom můžeme hodnotit z naměřených hodnot u testovaných nátěrových systémů. Pro porovnávání si zvolíme nátěrový systém, ke kterému chceme měření vztahovat a následně porovnáváme ostatní aplikované systémy k námi zvolenému výchozímu systému. Rozdíl barevnosti potom lze vypočítat z následující rovnice:

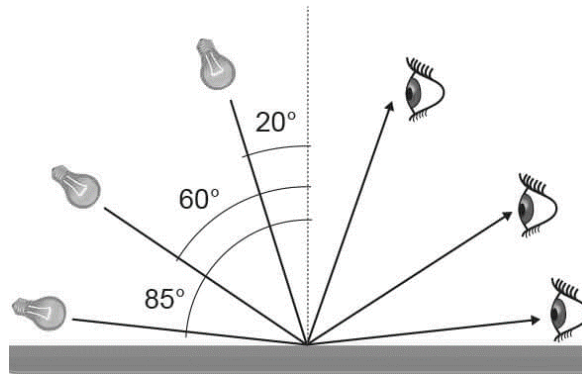
$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

kde parametr ΔE představuje rozdíl barevnosti testovaného systému. Bude-li se zvyšovat hodnota parametru ΔE , změna rozdílu barev bude tím větší. Pokud se parametr ΔE začne blížit hodnotě 1 nebo bude větší, tak je tento rozdíl rozpoznatelný i pouhým okem.

9.2.2. Lesk a měření lesku

Vysoký lesk povlaků je běžný na komerčních letadlech a je obvykle charakterizován při 60°. Naopak, letadla vojenská jsou opatřena povlaky s nízkým leskem, a to především z kamuflážních důvodů, proto se u nich měří lesk při 85° [3]. Proto lze všeobecně říci, že pro vytvoření lesklého povrchu s dobrým vzhledem, povlak nesmí obsahovat hrubé částice, to platí především pro komerční letadla. Naopak u letadel vojenských, kde je požadován extrémně nízký lesk, tak aby co nejlépe splnil kamuflážní účely, vyžadují barvy relativně velké částice, které tvoří matný povrch.

Lesk samotný potom řadíme mezi optické vlastnosti povrchu materiálu, definujeme ho jako poměr mezi intenzitou dopadajícího a odraženého světelného záření. Měření lesku je blíže popsáno v normě ČSN ISO 2813 [IV].



Obr. 17: Standardní nastavení reflektometrů *Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..*

9.3. Tvrdost povlaků

Povlaky v letectví vyžadují kompromis mezi flexibilitou povlaku a jejich tvrdostí. Nejčastěji se pro stanovení tvrdosti povlaku v letectví aplikuje tužkový test, kterým jsme do jisté míry schopni pozorovat i flexibilitu, ale hlavní funkcí je stanovit tvrdost tužky, kterou dojde k porušení povlaku. Běžně používané metody, kterými se určuje tvrdost povrchu nebo materiálu, jako jsou metody vrypové, odrazové nebo vtlačovací, se nepoužívají příliš často. Mohou být ale zvoleny jako doplňující zkouška, například měření tvrdosti vnikací metodou v podobě zkoušky mikrotvrdosti, která má pro stanovení tvrdosti povrchu nejvíce vypovídající výsledek, protože zařízení umí zaznamenat nejen sílu, ale i hloubku vtisku.

9.3.1. Stanovení tvrdosti tužkovým testem

Nejčastěji používanou a jednou z nejdostupnějších zkoušek pro měření tvrdosti povlaku na letadlech je zkouška tvrdosti tužkou. Zkouška se provádí za pomoci speciálního přípravku, do kterého jsou umísťovány tužky o různých tvrdostech od nejměkčích (9B) k nejtvrdějším (9H) a dále podle stupnice (viz. Obr. 18).



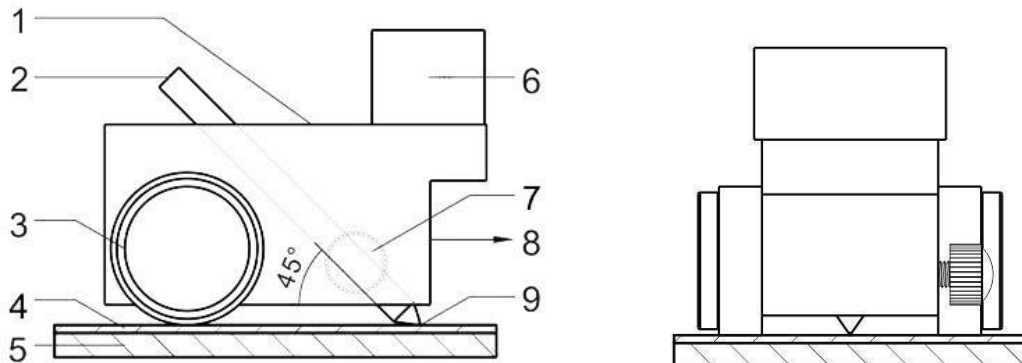
Obr. 18: Stupnice tvrdosti pro tužkový test *Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..*

Tužka svírá s povlakem úhel 45° pod kterým je posunována v přípravku po zkoušeném povlaku. Přípravek působí na normou specifikovaný hrot tuhy silou 7,5 N a při měření pozorujeme, která nejtvrďší tužka nepoškodí, nepoškrábe ani neobarví zkoušený film. Za výsledek zkoušky je považována nejvyšší tvrdost tuhy, která nezpůsobí žádné porušení. Zkoušku a její použití podrobněji popisuje norma ČSN EN ISO 15184 [XI].

Tužkový test se na povlaky letadel používá z několika níže uvedených důvodů:

1. Posouzení vytvrzení nátěrového systému.
2. Vyhodnocení maximální tvrdosti povlaku.

3. Hodnocení škod způsobených vlivem enviromentálních a provozních podmínek (například porovnáním tvrdosti povlaku před a po expozici).



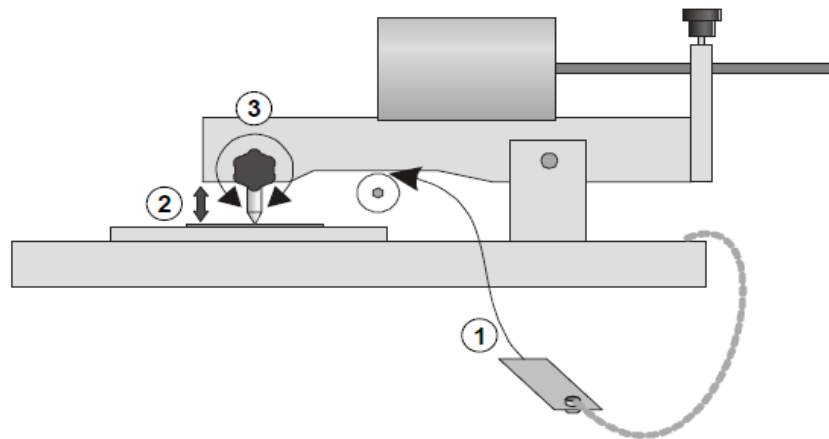
Obr. 19: Schéma umístění tužky v přípravku, pod úhlem 45° (1- tělo přípravku, 2- tužka, 3- kolo, 4- povlak, 5- základní materiál, 6- závaží, 7- utahovací šroub, 8- směr pohybu) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

9.3.1. „Scratch test“ – zkouška proškrábnutím

Jedná se o relativně rychlou a efektivní metodu, která se používá pro hodnocení povrchové tvrdosti tenkých filmů a vrstev směrem k základnímu materiálu. Při aplikaci zkoušky proškrábnutím, známá i jako „Scratch test“, zjišťujeme odolnost vrstvy proti vrypu (poškrábání), při kterém dojde k odtržení povrchového filmu. Indentor (jehla) zařízení je přiložen k povrchu vzorku a postupně se posouvá po povrchu vzorku, ten potom dle nastaveného zatížení proniká hlouběji do materiálu. Defekt se vyhodnocuje (viz. Tab. 1). Podrobnější informace, podle kterých probíhala zkouška jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 1518 [1].

Tab. 1: Popis defektu u zkoušky proškrábnutím dle normy ČSN EN ISO 1518 [1].

Označení	Popis defektu
0	Bez poškození nátěru
0/P	Počáteční poškrábání
V	Vryp (Poškození nátěru na podklad)
P	Poškrábané (Poškození na povrchu nátěru)



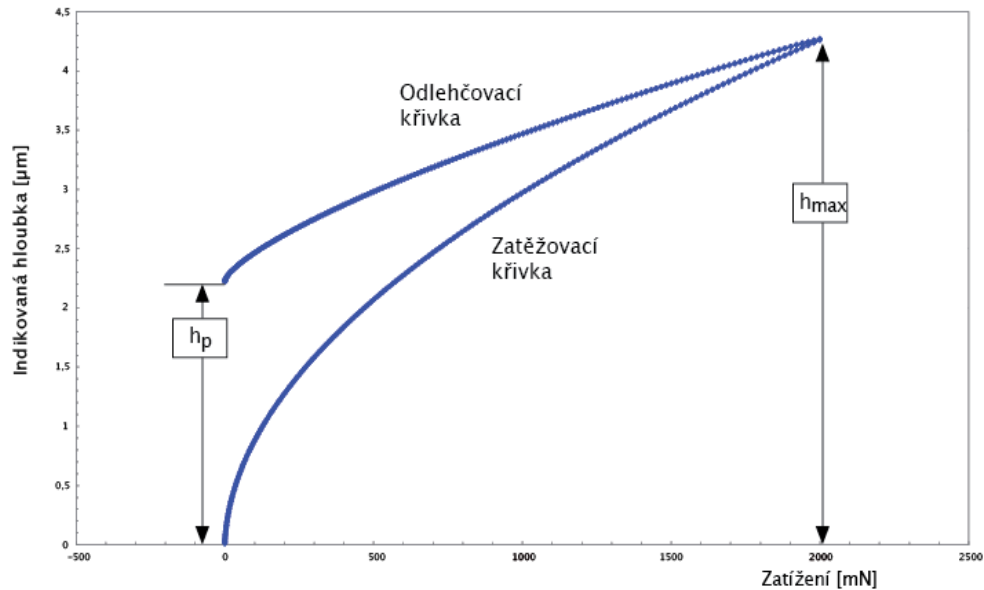
Obr. 20: Schéma zařízení pro zkoušku proškrábnutím tzv. „Scratch test“ [13]

9.3.2. Hodnocení mikrotvrlosti

Tvrdotost charakterizujeme jako odpor materiálu proti deformaci, jedná se tedy o odolnost povrchu proti vniknutí cizího tělesa. Zkouška mikrotvrdotosti se řadí mezi metody vtláčovací, které jsou v praxi nejpoužívanější. Metody měření jsou dále rozděleny podle Vickerse, Brinella a Rockwella. Při zkoušce působí speciální tělíško tzv. indentor definovanou silou po určitou dobu na povrch zkoušeného materiálu. Za výsledek je považován vtisk indentoru do materiálu, ten při hodnocení mikrotvrdotosti není pouhým okem viditelný. Podle rozměrů nebo hloubky vtisku je pak stanovena hodnota tvrdosti. Vtisků se provádí vždy několik na každém zkoušeném vzorku a následně se statisticky vyhodnocují. Mezi jednotlivými vtisky je důležité dodržovat rozestupy, protože v místě měření a jeho blízkém okolí dochází k plastické deformaci. Zkoušený povrch musí být dále rovný, hladký a čistý proto, aby byly zaručeny kvalitativní výsledky z měření.

Nejobvyklejší měření mikrotvrdotosti je metodou podle Vickerse dle normy ČSN EN ISO 6507-1 [VIII]. Metoda má za indentor pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° (viz. Obr. 21) a je považována za nejpřesnější a zároveň nejcitlivější pro postup stanovení tvrdosti. Pokud jsou měřeny tenké povrchové vrstvy (např. nátěry a povlaky) využívá se pro měření mikrotvrdotosti metod vtláčovacích a vrypových. Zatížení je potom velmi malé, do 19,8 N (přibližně 2 kg) a nesmí dojít k průniku indentoru na základní materiál a nelze ji určovat obvyklými tvrdoměry. Před měřením se nastaví požadované zatížení, které bude aplikováno po definovanou dobu a následně se odečítá z vtisku velikost úhlopříček.

K uvážení připadají metody dle Bierkoviče a Knoopova dle ČSN EN ISO 4545-1 [V]. Ostatní jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 6508-1 [IX] pro metodu Rockwell a ČSN EN ISO 6506-1 [VII] pro metodu Brinell.



Obr. 21: Křivka zatěžování a odlehčování měření tvrdosti podle Vickerse [15]

9.4. Odolnost proti opotřebení povlaku

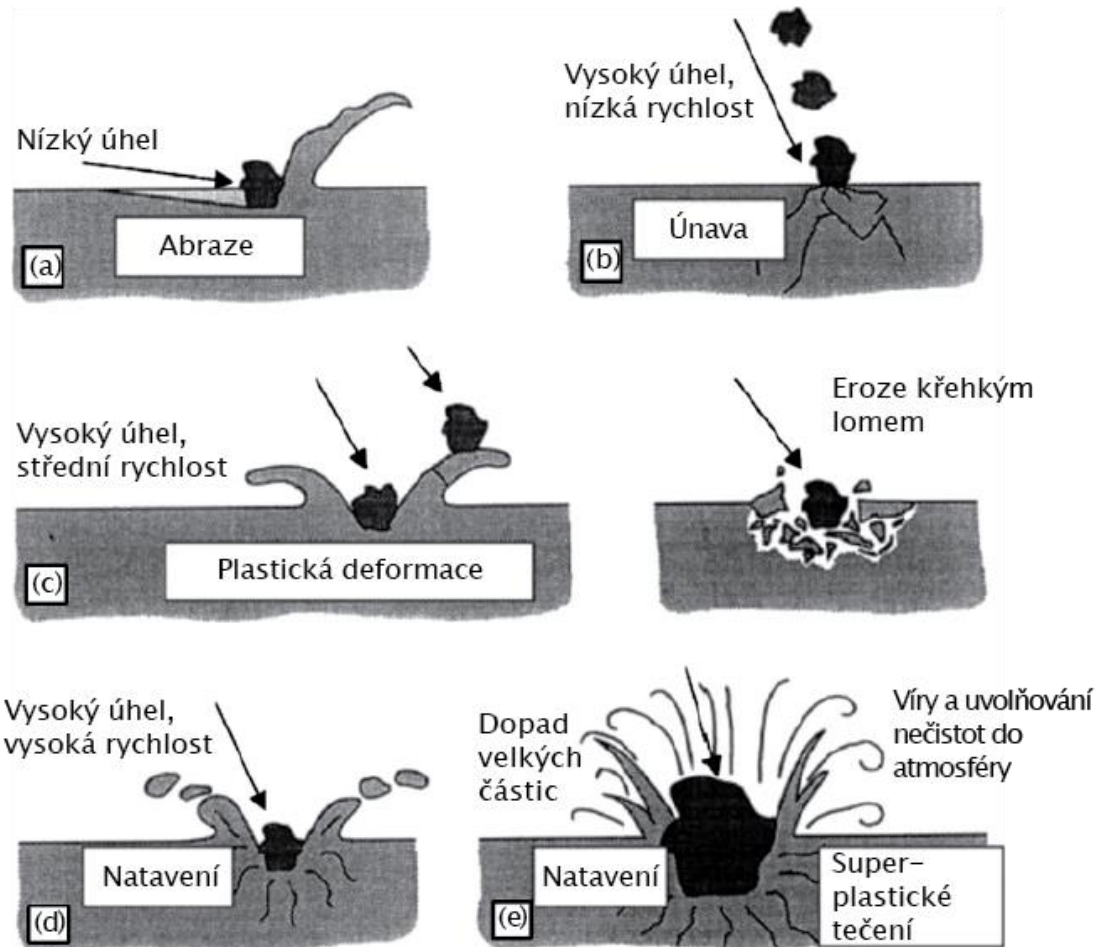
Povlaky letadel se setkávají s opotřebením v důsledku mnoha příčin. Nejčastěji dochází k oděru v místech, kde poškození způsobují cizí částice ze vzduchu, a vznikají tak poškození oděrem (abrazí) a erozí. Nejobvyklejší místa, kde k oděru dochází, jsou náběžné hrany, radary, antény, spojlerky a klapky. Vzhledem k tomu, že tyto náběžné hrany jsou rozhodující pro dynamiku letů, lze na ně aplikovat speciální ochranné vrstvy, které jsou odolné proti opotřebení a budou tak chránit základní materiál před poškozením. Všechny druhy opotřebením způsobují různé mechanismy degradace povlaku, provádí se proto řada různých zkoušek, ve kterých je snaha simulovat provozní podmínky.

9.4.1. Abrazie

Všeobecná definice se dá popsat jako trvalá nežádoucí změna povrchu, která je způsobena silovým účinkem abrazivního média a následně pak dochází k tvorbě rýh (viz. Obr. 22). Tyto částice pak mohou pronikat do povrchu materiálu.

Abrazie je vyvolávána působením tvrdých mechanických částic (např. písku, prachu) a vzniká kolmým nárazem. Po nárazu se většinou projevuje ve formě mikroporušení povrchu. Vrytí těchto částic do tzv. "jám", ale není neobvyklé u měkkých polymerních povlaků. Úhly nárazu nejsou vždy kolmé, povlaky se často setkávají s působením nárazu pod šikmými úhly. Toto chování je velmi blízké pro kombinaci technologie otryskávání a mikrořezání. Abrazi obecně odolávají velmi pružné materiály, jako je polyurethan. Pokud opotřebením povrchu mechanickými částicemi přirovnáme k otryskání pískem, potom tato technologie s sebou nese mikroskopický efekt, který nazýváme "kometa" a materiál je při něm plasticky deformován mikroúnavou. Vzniklé nerovnosti jsou pak náchylnější k dalšímu rozrušování

povrchu v důsledku vystavení povrchu další expozici. Konstrukce je potom oslabována únavovými prasklinami [41].



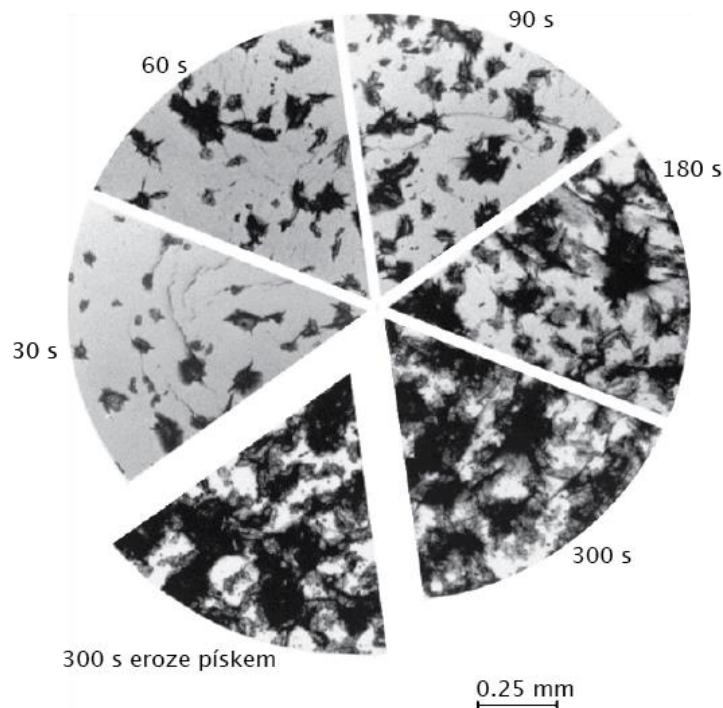
Obr. 22: Možné mechanismy eroze pevných částic: a) obrušování při malých úhlech nárazu, b) povrchová únava při nízkých rychlostech a velký úhel nárazu, c) křehké lom nebo vícenásobná plastická deformace při střední rychlosti a velký úhel nárazu, d) prostupování při vysokých nárazových rychlostech, e) makroskopická eroze se sekundárními účinky [10].

9.4.2. Eroze

Letadlo se setkává s prachem, pískem a s deštěm, jak při vzestupu, tak při sestupu. Tyto účinky eroze pak ukazuje (viz. Obr. 23), kde se jedná o erozi kapalinou a pískem v laboratorním měřítku. Pokud částice písku narazí na již existující trhlinku, tak se trhlinka snadno dále otevírá. Jsou-li povrchy vystaveny dlouhodobé expozici a nejsou-li zachyceny včas, může písek erodovat do povlaku a tím poškodit strukturální integritu. Jako ochrana proti erozi se v současnosti používají základní materiály jako je hliník, nikl nebo titan, které jsou obvykle potaženy čistým polyurethanem (PU) nebo směsí polyurethanu s jinými polymery, jako je polyetylén. Vývoj nových moderních polymerních materiálů si klade za cíl poskytnout větší ochranu než stávající povlakové systémy, s potenciálem pro mnohem jednodušší údržbu a snížení nákladů [16].

Hodnocení erozivního chování vykazuje křehké, tvárné nebo erozní změny v závislosti na teplotě a deformaci. Po dopadu jedné jediné cizí částice není na povrchu žádné viditelné

poškození. Během inkubační doby může dokonce povrch nepatrně zvýšit svou hmotnost. To je výsledkem vniknutí cizích částic do povrchu substrátu. V případě polyurethanových elastomerů se s rostoucí křehkostí a snižujícím se úhlem dopadu snižuje doba inkubace. Při pozorování nárazu dochází k největší erozi u šikmého nárazu. Poměr eroze polyurethanových ploch se potom liší podle velikosti úhlu, pod kterým dopadají, tedy mezi normálním (kolmým) nárazem a nárazem pod úhlem dopadu 30° . Důsledky, které eroze způsobí u polymerních materiálů, se hodnotí v závislosti na teplotě a rychlosti deformace, kdy se jeden a ten samý materiál může chovat převážně tvárným a potom zase křehkým způsobem [17].



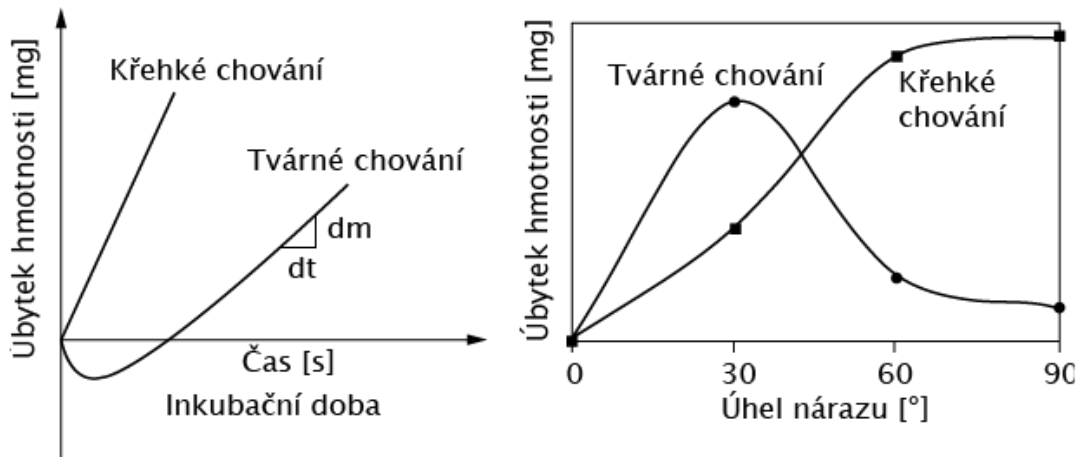
Obr. 23: Povrch po otryskání s tryskami o průměru 0,8 mm při $185 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, s následnou erozí písku při $0,15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ při $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pískem o hrubosti C25/52 [17].

Hodnocení různých materiálů z hlediska jejich erozivního opotřebení můžeme určovat, když porovnáme různé úhly nárazu v čase. Obr. 24 znázorňuje typické erozní diagramy jako funkci času a úhlu. Pokud zohledníme dobu nárazu, tak inkubační doba projeví tvárnou erozí. Pozorujeme ji nejprve nárůstem hmotnosti a potom následuje ustálení do rovnovážného stavu (viz. Obr. 24 - vlevo). Normálové nárazy (úhel nárazu $\alpha \approx 90^\circ$) se projevují počátečním vniknutím erozních písků na povrchu cílového materiálu. Obrázek (viz. Obr. 24 - vpravo) ukazuje, že maximální odstranění materiálu nastává při nízkých úhlech nárazu a při tvárném chování. Zatímco při vysokých úhlech nárazu dominuje eroze křehká. Z toho důvodu se obvykle povlaky zkouší pod úhlem 30° .

Rozdíly v chování eroze lze odvodit od mechanismu odebírání materiálu:

- trhání a opotřebení -> kaučuky,
- řezání a tvorbu třísek -> tvárné kovy a polymery,

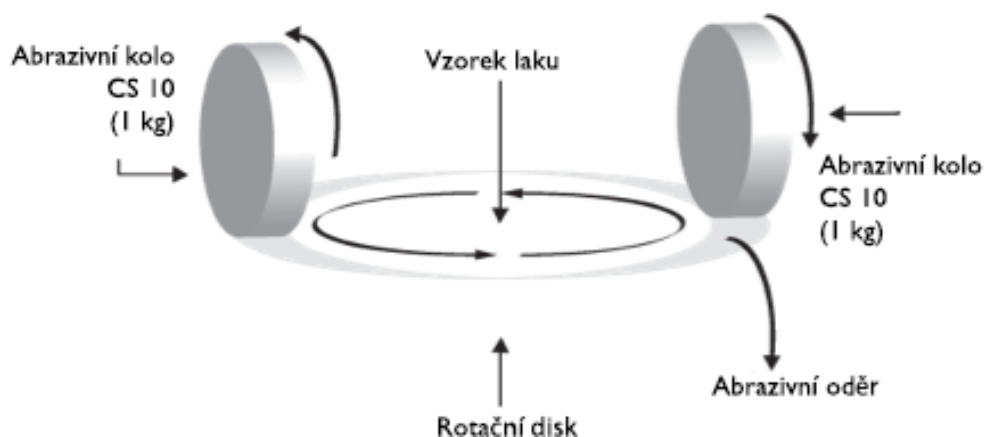
- tvorba trhlin a křehký lom -> keramika, sklo a křehké polymery [39].



Obr. 24: Schématické znázornění typického erozního chování [17].

9.4.3. Stanovení odolnosti vůči abrazi

Nejrozšířenější metoda hodnocení odolnosti povlaku proti opotřebení používá k vyvolání opotřebení brusné kotouče. Testované vzorky se uchytí na otočný stůl, poté se nastaví program, tím určíme počet cyklů, resp. otáček a dvě ramena s brusnými gumovými kotouči posuneme na testovaný vzorek. Spuštěním programu zahájíme měření, které je počítáno na display zařízení. Otáčením otočného stolu dochází k roztočení brusných kotoučů, ty se pohybují příčně po celém vzorku, tento pohyb testuje odolnost proti oděru ve všech úhlech vzhledem k soudržnosti zrna materiálu. Po dokončení cyklu se testovaný povrch očistí od vzniklých částic a přistupuje se k vyhodnocení. Obvykle se odolnost proti oděru vyjadřuje „indexem opotřebení“, což je úbytek hmotnosti za určitý počet otáček při známém zatížení (500 g, 1 000 g). Kvůli své jednoduchosti je metoda velmi rozšířena a blíže ji specifikuje norma ČSN EN ISO 7784-2 [X].

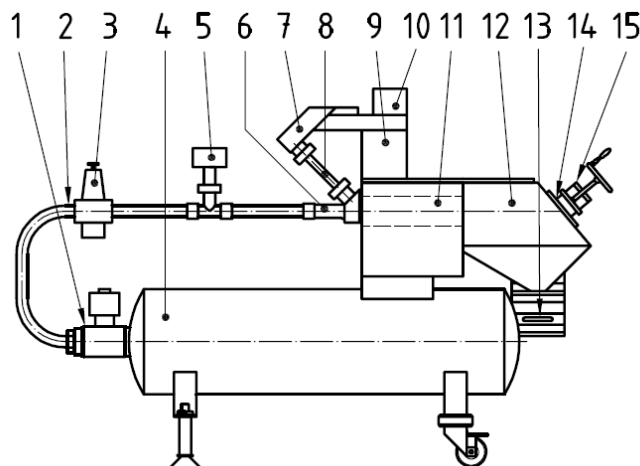


Obr. 25: Schéma zkoušky odolnosti proti oděru metodou Taber - Abraser [18]

9.5. Stanovení odolnosti povlaků proti odlétajícím kamínkům

Stanovení odolnosti povlaků proti létajícím kamínkům je prováděno pomocí velkého počtu malých kamínků s ostrými hranami, které jsou unášeny proudem vzduchu pod definovaným úhlem pouze po krátkou dobu. Tvar, zrnitost a množství kamínků, kterými je povrch otryskáván, způsobuje poškození i vzhledem k úhlu otryskávání, nastavenému tlaku, hmotnosti (množství) kamínků a délce trvání. Jistou roli může hrát i samotná konstrukce zkušebního zařízení, které je k otryskávání použito.

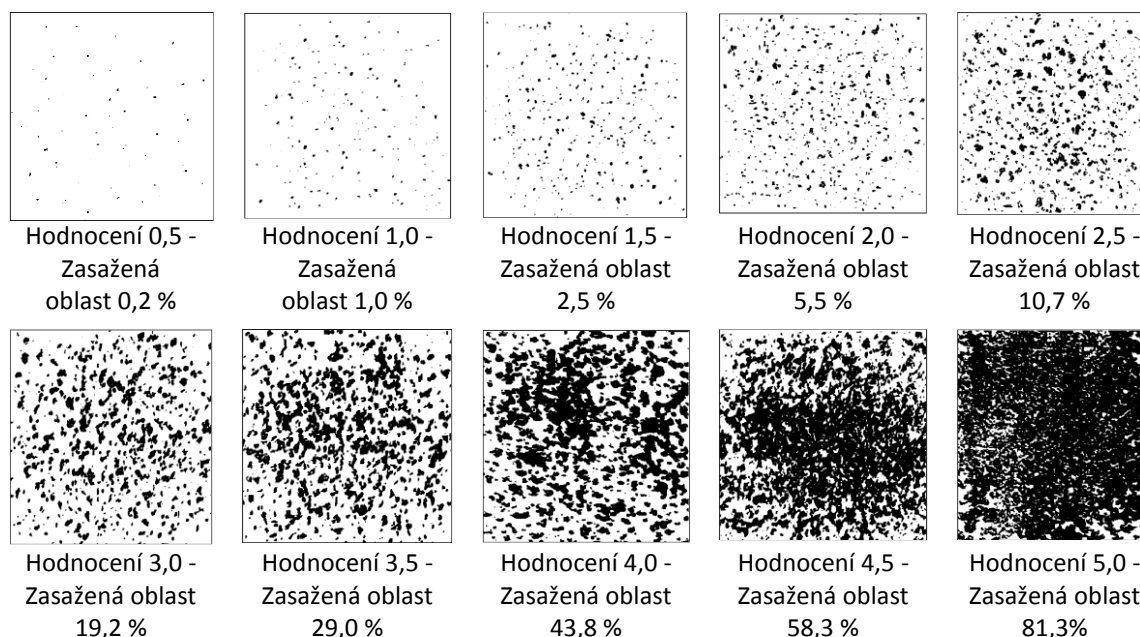
Hlavní funkcionalita zařízení spočívá v přenesení otryskávacího média z trychtýře, kam jej vsype obsluha zařízení, médium je přepravováno po vibračním dopravníku do vzduchové komory, odkud je uchylováno výstupní tryskou. Zařízení musí být kontrolováno tak, aby 500 $^{+20}_0$ g vstupního média prošlo systémem k výstupní trysce během (10 ± 2) s. Tlaková komora se navrhuje velikostně tak, aby byla dostatečně velká a umožnila zadání tlaku (200 ± 10) kPa, který je nutno udržet po dobu nejméně (10 ± 2) s, když je elektromagnetický ventil otevřen.



Obr. 26: Schéma gravelometru (1- elektromagnetický ventil, 2- potrubí stlačeného vzduchu, 3- redukční ventil, 4- tlaková komora (objem 90), 5- manometr (indikuje pracovní tlak), 6- trysky pro urychlení vzduchu, 7- skluzavka, 8- potrubí, 9- vibrační dopravník, trychtýře, 11- potrubí pro urychlení zrna, 12- ochranné pouzdro, 13- komora pro zachycování zrna, 14- testovací panel, 15- držák testovacího panelu)

Kamínky mívají velikost 4 až 5 mm, po 100 použití se médium (kamínky) musí vyměnit, protože dochází k jejich opotřebení. Povrchy se po otryskání přelepují lepicí páskou, na které po stržení při úhlu cca 40° zůstanou volné fragmenty povlakovaného materiálu.

Škody, které zkouška způsobila se určují porovnáním s normou uváděnými referenčními standardy (viz. Obr. 27). Srovnávání se provádí vizuálně pomocí bodové stupnice (od 0,5 až 5,0 s rozlišením po 0,5), kdy stupeň 0 znamená žádné poškození a stupeň 5 úplnou destrukci nátěru. Vyhodnocení je zaznamenáváno a mimo jiné se uvádí i poškození mezi jednotlivými systémy nátěrové hmoty, mezi nimiž došlo k poškození. Bližší specifikaci uvádí norma ČN EN ISO 20567-1 [XII].



Obr. 27: Referenční standard pro hodnocení zkoušky odolnosti vůči kamínkům.

9.6. Adheze a její zkoušky

Pro dosažení co nejvyšší možné ochrany povlaku letadel proti degradaci, je podmínkou dosáhnout co nejvyšší možné soudržnosti jednotlivých vrstev. Vzhledem k tomu, že adheze povlaků je považována za komplexní jev, tak může být ovlivněna řadou vlivů včetně různých podmínek prostředí. V současnosti existují různé techniky, kterými se dá adheze povlaku zkoušet. Obvykle se pro hodnocení povlaku letadel aplikují zkoušky mřížkové a odtrhové. Jiné techniky, které jsou založené na mechanické odolnosti (smykové, odlupovací) se používají pro zkoušení nátěrových hmot v letectví méně často.

9.6.1. Mřížková zkouška

Použitím mřížkové zkoušky, která je nejjednodušším a nejvšestrannějším testem adheze. Ta může být prováděna jak v laboratorních podmínkách, tak v terénu. Zkouškou určujeme přilnavosti povlaku k základnímu materiálu, nebo adhezi jednotlivých vrstev mezi sebou, tak abychom zjistili, zda má daný povlak vhodné adhezní vlastnosti. Vzdálenost jednotlivých řezů, kterou je tvořena mřížka, se určuje na základě výsledků z měření tloušťky povlaku (viz. Tab. 2) a provádí se řezáním do naneseného povlaku až na podkladní substrát. Po provedení řezu řezacím přístrojem se místo přelepí lepicí páskou, zahradí a strhává se pod úhlem cca 45°. Mřížky se potom hodnotí dle klasifikační tabulky (viz. Tab. 3) a zapisují se. Mřížková zkouška je blíže specifikována v normě ČSN EN ISO 2409 [VI].

Tab. 2: Určení rozestupu řezů vztážené k tloušťce povlaku.

Tloušťka povlaku [μm]	Rozestup řezů [mm]	Typ povrchu
0 - 60	1	pro tvrdé povlaky
0 - 60	2	pro měkké povlaky
61 - 120	2	pro tvrdé i měkké povlaky
121 - 250	3	pro tvrdé i měkké povlaky

Tab. 3: Klasifikace výsledků mřížkové zkoušky.

Klasifikace	Popis poškození
0	Řezy jsou zcela hladké, žádný čtverec není poškozen.
1	Nepatrné poškození v místech, kde se řezy kříží. Poškozená plocha nesmí přesahovat 5 %.
2	Nátěr je nepatrně poškozen podél řezu a při jejich křížení. Povrch mřížky smí být poškozen o více než 5 % a méně než 15 % celkové plochy.
3	Nátěr je částečně poškozen v rozích řezu, podél řezných hran částečně nebo celý, na různých místech mřížky. Poškození mřížky je větší než 15 %, ale menší než z 65 %.
4	Na nátěru jsou velké změny v rozích řezu a některé čtverečky jsou částečně nebo zcela poškozeny. Plocha mřížky je poškozena z více jak 35 %, ale méně než z 65 %.
5	Změny, které jsou větší než u stupně 4.

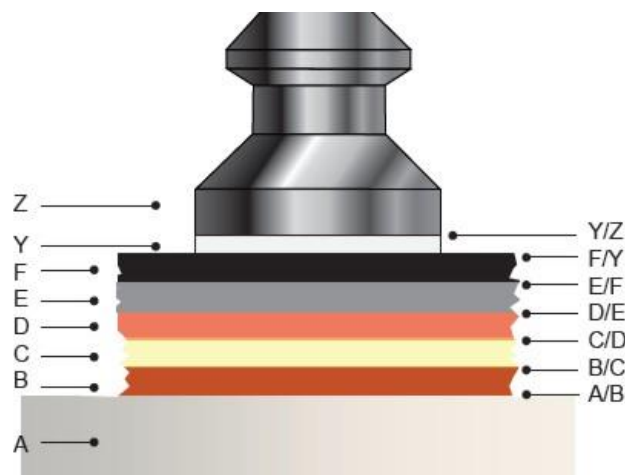
9.6.2. Odtrhová zkouška

Měření přilnavosti odtrhovou zkouškou dle normy ČSN EN ISO 4624 [VI] se provádí pomocí mechanického odtrhoměru, který slouží k měření odtrhové pevnosti (adheze či koroze) povrchových úprav. Zařízení využívá tzv. panenky s definovanou plochou základny, která se lepí na zkoušený materiál. Každý zkoušený materiál, se musí nejprve zdrsnit brusným papírem, pak být ometen štětečkem a očištěn lihem, tak aby došlo k odstranění všech nečistot. Po provedení přípravy zkoušeného materiálu se za laboratorních podmínek lepí zkušební tělísko, které musí být očištěné a odmaštěné. Jako spojovací materiál mezi zkoušeným materiálem a tělískem se používá lepidlo různých složení, tak aby co nejlépe odpovídalo předpokládanému použití a nedocházelo k porušení mezi tělískem a lepidlem. Lepení vyžaduje vytvrzení sestavy a to minimálně po dobu jedné hodiny. Následuje oříznutí lepidla a nátěrové hmoty po obvodu panenky až na substrát.

Samotné měření přilnavosti potom spočívá v aplikaci kolmé tažné síly na přilepené tělísko. Mezní lomová hodnota je zaznamenána a vzniklý lom se ještě následně vizuálně charakterizuje (viz. Tab. 4).

Tab. 4: Charakteristiky lomu u odtrhové zkoušky.

Typ	Popis
A	Kohezní porušení v podkladu.
A/B	adhezní potušení mezi podkladem a povlakem
B	kohezní porušení povlaku
B/Y	adhezní porušení mezi povlakem a lepidlem
B/C	adhezní porušení mezi vrstvami povlaků
C	kohezní porušení povlaku
C/Y	adhezní porušení mezi povlakem a lepidlem
Y	kohezní porušení v lepidle
Y/Z	adhezní porušení mezi lepidlem a tělískem



Obr. 28: Schéma odtrhové zkoušky[20]

Praktická část

10. Příprava vzorků

Výchozím vzorkem je standardní letecký nátěrový systém, ve složení základ a barevný email. Pro porovnání byly zvoleny tři typy laků, které mají zvýšenou flexibilitu. K ověření vlivu pružnosti povrchu na odolnost nátěrového systému při abrazi a byly použity vzorky nátěrových systémů na hliníkovém plechu, který se používá na plášť letadel. Pro zkoušku bylo připraveno celkem 120 kusů, o rozměrech 100 x 150 x 1 mm a byly opatřené dvěma variantami leteckých nátěrových systémů. První varianta je stávající generace, pod označením: S2318 + U2054 / RAL7005 a druhá je nová generace leteckého nátěrového systému: S2318-NG + U2081 / RAL9003. Tyto vzorky byly zhotoveny ve společnosti Aircraft Industries, a. s., aplikace nátěrového systému probíhala stříkáním při 23 °C a 70 % relativní vlhkosti, podle požadavku technického listu. Laky pak byly aplikovány ve společnosti SYNPO, a.s. dle specifikačních podmínek. Pro přehlednost (viz. níže) byly použity následující nátěrové systémy.

Standardní letecký nátěrový systém:

- Stávající generace (LNS): S2318 + U2054 / RAL7005
- Nová generace (LNS-NG): S2318-NG + U2081 / RAL9003

Aplikované laky pro zvýšení mechanické odolnosti:

- Synpo LV CC 250 (LV)
- Synpo PU 186L (PU)
- Lankwitzer PD22 (PD22)

Standardní letecký nátěrový systém a systém nové generace v kombinaci s vrchními laky pro zvýšení mechanické odolnosti vznikly níže uvedené sady vzorků určené k dalšímu zkoušení a testování:

- LNS
 - LNS + LV
 - LNS + PU
 - LNS + PD22
- LNS-NG
 - LNS-NG + LV
 - LNS-NG + PU
 - LNS-NG + PD22

11. Vyhodnocení experimentu

11.1. Vizuální hodnocení

Dodané vzorky LNS a LNS-NG včetně navržených variant s laky (LV, PU, PD22) určené k dalšímu experimentálnímu zkoušení byly vizuálně kontrolovány, kontrola probíhala po kondicionování v čase minimálně 24 h v klimatických podmínkách, při teplotě okolí (25 ± 3) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50 ± 5) %.

Za nejčastěji pozorovaný defekt se dá považovat nestejnomyšlnost nástřiku se zvýšeným nástřikem. Proto všechny zkoušky, které na vzorcích byly provedeny, směřovaly do středu vzorku min. 15 mm od okrajů, kde povlak byl v ideálním rozložení. U některých vzorků byly pozorovány zatřené vměstky a na povrchu drobná vlákna, a to v míře, která byla vyhodnocena jako zanedbatelná. S největší pravděpodobností tyto vměstky vznikly při nanášení na základní materiál. Při reálné aplikaci je třeba tento defekt kontrolovat, protože je hodnocen na jakémkoliv letadle jako nepřijatelný.

11.2. Tloušťka povlaků

Pro zkoušený povlakový systém je nejvhodnější postupovat v souladu s normou ČSN ISO EN 2808 [III] a k provedení měření použít nedestruktivní magnetickou metodu. V našem případě bylo měření provedeno pomocí tloušťkoměru (viz. Tab. 5). Přístroj byl před měřením kalibrován pomocí standardizované fólie 125 μm.

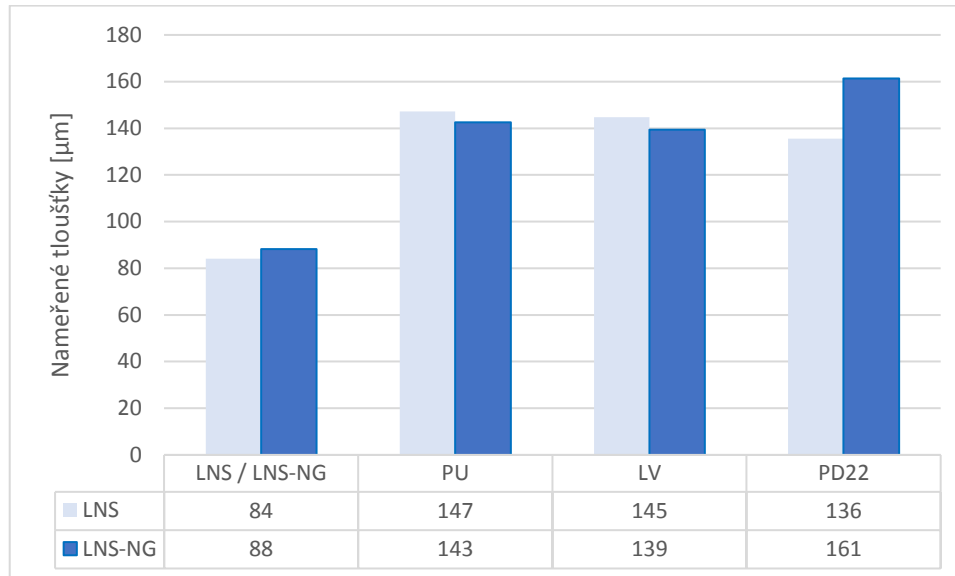
Tab. 5.: Zařízení použité k měření tlouštěk povlaků.

Výrobce	ElektroPhysik, Pasteurstr. 15, D-50735 Köln
Zařízení	MiniTest 4100

Tloušťky jednotlivých vzorků byly určeny vždy z 8 měření (viz. Příloha 8, Příloha 9) na každém ze dvou plechů (stejných povlakových systémech). V níže uvedené tabulce jsou pro každou sérii vzorků uvedeny průměrné tloušťky a směrodatná odchylka. V níže uvedených tabulkách (viz. Tab. 6, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) jsou vyhodnoceny celkové tloušťky pro LNS a LNS-NG dvou vrstev (základ + email) a pro laky (PU, LV, PD22) tří vrstev nátěrových hmot.

Tab. 6: Průměrné tloušťky z naměřených hodnot (LNS a LNS-NG) a jejich úpravy (PU, LV, PD22).

	LNS	PU	LV	PD22	LNS-NG	PU	LV	PD22
Tloušťky [μm]	84 ± 10	147 ± 6	145 ± 9	136 ± 1	88 ± 13	143 ± 5	139 ± 10	161 ± 16



Obr. 29: Graf porovnání měřených tloušťek pro zkoumané série vzorků.

Hodnocení z hlediska tloušťky nanesené vrstvy na dodaném materiálu (vzorku) ve složení základ a barevný email, můžeme pro LNS a LNS-NG konstatovat, že všechny vzorky mají dobrý výsledek. Po nanesení laku pro zvýšení mechanické odolnosti (PU, LV, PD22) je naměřená tloušťka stále dobrá. U varianty LNS-NG s PD22 můžeme konstatovat, že se pohybuje nad průměrnými hodnotami (161 ± 16) μm , jedná se ovšem stále o akceptovatelný výsledek.

11.3. Lesk

Při měření lesku bylo postupováno v souladu v normou ČN ISO 2813 [IV] a použito zařízení pro měření lesku (viz. Tab. 7). Samotné měření pomocí leskoměru bylo provedeno pod úhly 20°, 60° a 85° v rozsahu (0 - 2000) GU. Před použitím bylo zařízení kalibrováno dle požadavků výrobce. Lesk byl naměřen na vzorcích uvedených v tabulce (viz. Příloha 7), kde na každém vzorku bylo provedeno 6 měření v různých místech. Zpracované hodnoty (viz. Tab. 8) jsou zprůměrovány a byla vypočtena jejich odchylka. Graf (viz. Obr. 30) ilustruje porovnání lesku jednotlivých povrchových úprav při úhlu 60°.

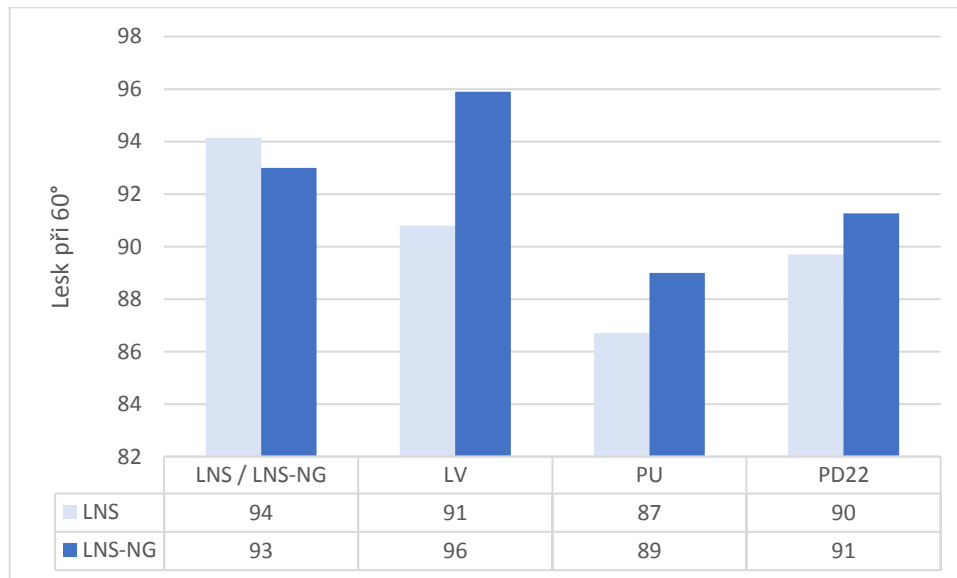
Tab. 7: Zařízení použité k měření lesku povlaků.

Výrobce	Sheen Instruments Limited, 29 Central Avenue, West Molesey, Surrey. KT8 2RF, UK, A subsidiary of Elektron Technology UK Limited
Zařízení	Tri-Glossmaster 20°/60°/85°, Multi-angle Glossmeter (SH260C)

Tab. 8: Průměrné hodnoty lesku (LNS a LNS-NG) a nanesené laky (PU, LV, PD22).

	20°	60°	85°
LNS	90 ± 3	94 ± 0	98 ± 0
LV	86 ± 2	91 ± 1	97 ± 1
PU	80 ± 0	87 ± 1	96 ± 1
PD22	87 ± 2	90 ± 1	98 ± 1

	20°	60°	85°
LNS-NG	88 ± 1	93 ± 1	98 ± 0
LV	93 ± 1	96 ± 1	98 ± 0
PU	83 ± 1	89 ± 1	97 ± 1
PD22	86 ± 1	91 ± 1	98 ± 1



Obr. 30: Graf pro porovnání lesku při 60° u standardního leteckého (LNS) a systému nové generace (LNS-NG) včetně aplikovaných laků (PU, LV, PD22) pro zkoumané série vzorků.

Při porovnání naměřených hodnot standardní letecký nátěrový systém (LNS) i systém nové generace (LNS-NG) vykazují vysokou hodnotu lesku, se kterou se může srovnávat pouze lak Synpo LV. Tento lak po aplikaci na LNS-NG zachovává vysokou hodnotu lesku, která je požadována. Ostatní kombinace jsou hodnoceny jako akceptovatelné, až na kombinaci s lakem Synpo PU, který dosahuje nejnižší hodnoty lesku. Tento stav je pravděpodobně způsoben obsahem mikrobublinek ve hmotě laku, jejichž vznik byl nejspíše zapříčiněn způsobem stříkání a použitím velmi těkavého rozpouštědla ve vývojovém vzorku.

11.4. Barevnost

Po spuštění PC a spektrofotometru (viz. Tab. 9), bylo prvním krokem provést kalibraci, a to na kalibrační destičce, která je součástí zařízení. Kalibrace tohoto zařízení je vždy platná po 24 hodin, potom je obsluha vyzvána ke znovu provedení kalibrace.

Tab. 9: Zařízení použité k měření barevnosti povlaků.

Výrobce	X-Rite, Incorporated, 4300 44th Street SE, Grand Rapids, Michigan 49512, US
Zařízení	Ci62

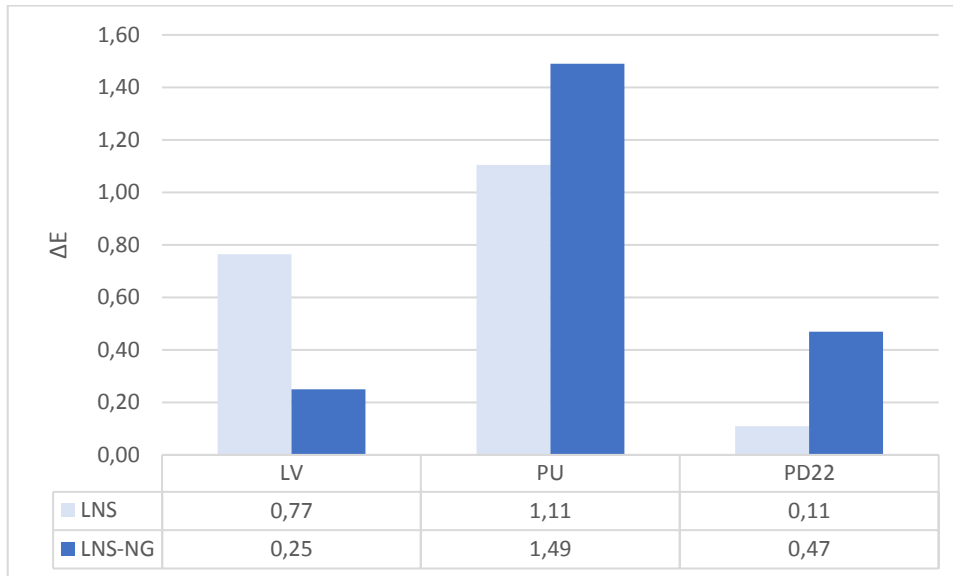
Měření bylo provedeno na náhodně vybraných vzorcích po 2 kusech z každé série nátěrového systému. Nastavení bylo provedeno k výchozímu vzorku (LNS nebo LNS-NG), ke kterému se měření barevnosti následně provádělo, tak abychom byli schopni pozorovat barevnosti odchylky oproti výchozímu stavu (tj. k barevnosti emailu). V našem případě byla první série vztažena ke standardnímu leteckému nátěru (LNS), a rozdíl barevnosti uváděný jako ΔE jsme dostali z průměru 5 měření na vybraném vzorku. Obdobně bylo postupováno i u standardního nátěrového systému nové generace (LNS-NG).

V níže uvedených tabulkách (viz. Tab. 10) jsou vypočteny průměrné hodnoty L, a, b a vypočítaný parametr ΔE vztažený k výchozímu vzorku. Všechny naměřené hodnoty z měřicího přístroje jsou potom v tabulce (viz. Příloha 5).

Tab. 10: Barevnost (LNS a LNS-NG) a úpravy lakem (PU, LV, PD22).

	L*	a*	b*	ΔE
LNS	44,66	-1,86	1,44	-
LV	44,56	-2,20	2,12	0,77
PU	45,29	-2,14	2,29	1,11
PD22	44,72	-1,89	1,53	0,11

	L*	a*	b*	ΔE
LNS-NG	94,22	-1,05	0,22	-
LV	94,07	-1,07	0,35	0,25
PU	94,00	-1,27	1,68	1,49
PD22	94,39	-1,16	0,65	0,47



Obr. 31: Graf orovnění změny barevnosti u LNS, LNS-NG na aplikaci PU, LV, PD22 pro zkoumané série vzorků.

Naměřené hodnoty vyšší než 1,0 bylo dosaženo u kombinace LNS + PU a LNS-NG + PU. Zvýšení hodnoty parametru b^* (viz. Tab. 10) znamená posun odstínu do žluta. To se projevuje na hodnotě ΔE na čistě bílém emailu LNS-NG + PU. I zde je ale hodnota ΔE 1,49 relativně nízká a změna odstínu pro neškolené oko stěží postřehnutelná. U barevného emailu se změna odstínu neprojevuje. Ostatní kombinace po přidání laku na standardní systém LNS a LNS-NG nevykazují pozorovatelnou změnu barevnosti.

11.5. Tvrdost

11.5.1. Stanovení tvrdosti povlaků tužkovým testem

Stanovení tvrdosti povlaku tužkovým testem bylo provedeno na vybraných vzorcích, pro zkoušku byl vybrán jeden vzorek z každé série a postupováno bylo v souladu s ČSN EN ISO 15184 [XI] na zařízení, které společnost (viz. Tab. 11) vyrábí dle požadavků výše uvedené normy.

Tab. 11: Použité zařízení ke stanovení tvrdosti povlaku tužkovým testem.

Výrobce	Zehntner GmbH Testing Instruments, Gewerbestrasse 4, CH-4450 Sissach, Switzerland
Zařízení	ZSH 2090 Pencil Hardness Tester

Před upevněním tužky do přípravku předchází kontrola tvaru a velikosti hrotu tuhy. Po smontování byl přípravek přemístěn na zkušební vzorek a byl posouván po povrchu vzorku. Tento způsob byl aplikován od nejměkčí tužky 9B k nejtvrdějším 9H na všech zvolených vzorcích. Pokud se na vzorku objevilo poškození delší jak 7 mm, bylo toto poškození vyhodnoceno jako:

- A) Plastická deformace: trvalé porušení povlaku bez kohezivního praskání.
- B) Kohezivní porušení: viditelné popraskání nebo narušení povrchu a struktury povlaku.
- C) Kombinace předchozích defektů.

Tužka, která toto poškození způsobila byla zaznamenána (viz. Tab. 12, Tab. 13) a ty, které nepoškodily povrch nejsou ve výsledku měření zahrnuty.

Tab. 12: Naměření tvrdosti tužkovým testem u LNS a PU, LV, PD22.

	5H	6H	7H	8H	9H
LNS		A	A	A	A
LV	A	A	A	A	A
PU				B	B
PD22	A	A	A	A	A

Tab. 13: Naměření tvrdosti tužkovým testem u LNS-NG a PU, LV, PD22.

	4H	5H	6H	7H	8H	9H
LNS-NG	A	A	A	B	B	C
LV		A	A	B	C	B/C
PU					B	B
PD22		A	A	A	B/C	A

Podle normy je považován za platný výsledek vždy ten, který u dané použité tvrdosti nepůsobí poškození, pro lepší orientaci jsou uvedeny oba výsledky (viz. Tab. 14).

Tab. 14: Hodnocení naměřených tvrdostí tužkovým testem.

	Tužka			Tužka	
	Prvotní poškození nátěru	Poslední bez poškození nátěru		Prvotní poškození nátěru	Poslední bez poškození nátěru
LNS	6H	5H	LNS-NG	4H	3H
LV	5H	4H	LV	5H	4H
PU	8H	7H	PU	8H	7H
PD22	5H	5H	PD22	5H	4H

Hodnocení bylo prováděno při vhodném osvětlení, tak aby bylo možno co nejlépe pozorovat způsobená poškození. Poškození nejlépe odolal lak Synpo PU na obou standardních leteckých systémech (LNS i LNS-NG). Je důležité podotknout, že tento lak jako jediný vykazoval „samoregenerační/samoobnovující“ efekt, kdy ihned po provedení zkoušky povlak sice vykazoval rýhu avšak do 10 s došlo v dané oblasti k zacelení povrchu do původního stavu. To až do použité tvrdosti 7H, protože vyšší tvrdosti způsobily trvalejší a nevratná mechanická poškození. Ostatní kombinace vykazovaly tvrdosti nižší (viz. Tab. 14).

11.5.2. „Scratch test“ – zkouška poškrábnutím

Sledováním vývoje poškrabatelnosti v jednotlivých cyklech zatěžování od 1 do 20 N pro všechny typy povlaku pomocí zařízení (viz. Tab. 15), docházelo vždy za stejných podmínek kvůli možnosti vzájemného porovnání. A to na zvolených vzorcích po jednom kusu každé série a jejím následným zaznamenáním (viz. Tab. 16, Tab. 17).

Tab. 15: Zařízení pro zkoušku poškrábnutím.

Výrobce	Elcometer Limited, Edge Lane, Manchester M43 6BU, UK
Zařízení	Elcometer 3000

V testu byl proveden zkušební vryp, kterým se určuje vhodná velikost maximálního zatížení s nastavením na 20 N. V zaznamenaných hodnotách (viz. Tab. 16, Tab. 17) se vyskytuje označení pomlčkou (-), to značí přeskočení daného zatížení. Při nižších zatíženích jsme pozorovali, že vrchní systém nátěrové hmoty nebyl poškozen - 0, počáteční poškození - 0/P, které bylo nejčastějším poškozením. Pokud došlo k poškození poškrábáním - P, tak se projevilo porušením vrchní vrstvy nátěru. Porušení vrypem - V, kdy se jedná o poškození nátěru až na podklad.

Tab. 16: Zaznamenané poškození při daném zatížení u LNS a PU, LV, PD22.

	Zatížení [N]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	20
LNS	-	0	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	-	P
LV	-	0	0	0	0		0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	P
PU	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	-	P
PD22	-	0	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	-	P

Tab. 17: Zaznamenané poškození při daném zatížení u LNS-NG a PU, LV, PD22.

	Zatížení [N]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	20
LNS-NG	-	0	0	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	P	P
LV	-	0	0	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	P	P
PU	-	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	V
PD22	-	0	0	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P		P	P

Pro kvalitativní hodnocení tohoto testu je vhodné se na výsledky podívat od prvních stop poškození (poškrábání) ke stopám trvalým. Z tohoto úhlu nejlépe odolal systém LNS-NG + PU, protože k poškození došlo až při zatížení ($F = 13$ N), nadruhou stranu byl tento systém porušen vrypem při nejvyšším možném zatížení ($F = 20$ N) a to kvůli jeho nízké tvrdosti. Je důležité podotknout, že tento systém při nižších zatíženích vykazoval samoregenerační efekt. Akceptovatelný výsledek dosáhl systém LNS + LV, u kterého došlo k poškození poškrábáním při ($F = 11$ N) a můžeme ho hodnotit jako druhý nejlepší výsledek.

11.5.3. Hodnocení mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti na zařízení (viz. Tab. 18) probíhalo při laboratorních podmínkách o teplotě $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$, relativní vlhkosti vzduchu $(50 \pm 5) \%$ v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 [VIII]. K měření byly z daných sérií zvoleny vždy minimálně dva vzorky a na každém z nich bylo provedeno minimálně 6 měření. Nastavením programu na obslužném PC, které řídí uvedený mikrotvrdoměr bylo použito zatěžovací schéma: působící síla $F = 20.000 \text{ mN}$ během 20 s, s výdrží 5 s po dosažení maximální síly, s následným poklesem tlaku rovněž 20 s a další 5 s výdrží po odlehčení.

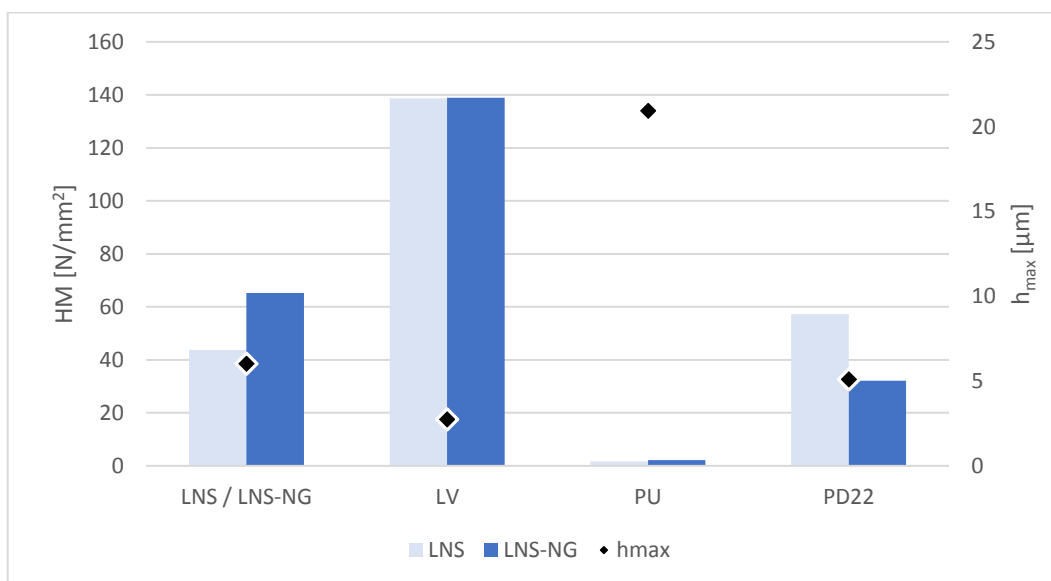
Tab. 18: Použité zařízení k měření mikrotvrdosti povlaku.

Výrobce	Fischer Technology Inc., 750 Marshall Phelps Rd. , CT 06095 Windsor, US
Zařízení	Fischerscope HM2000 S
Zatížení	$F = 20.000 \text{ mN}/20 \text{ s}$

Všechny hodnoty byly zaznamenány a jejich průměrné hodnoty zpracovány do tabulky (viz. Tab. 19), kde je uvedena průměrná tvrdost a průměrná hloubka vtisku indentoru do zkoušeného materiálu. Záznamy z jednotlivých měření jsou umístěny v tabulce (viz. Příloha 10).

Tab. 19: Naměřené tvrdosti a hloubky vpichu na mikrotvrdoměru.

	HM [N/mm ²]	h_{max} [μm]		HM [N/mm ²]	h_{max} [μm]
LNS	$43,8 \pm 1,5$	$6,0 \pm 0,2$	LNS-NG	$65,2 \pm 4,6$	$4,6 \pm 0,2$
LV	$138,6 \pm 3,6$	$2,7 \pm 0,1$	LV	$138,9 \pm 2,1$	$2,7 \pm 0,1$
PU	$1,7 \pm 0,1$	$20,9 \pm 0,6$	PU	$2,1 \pm 0,3$	$19,1 \pm 1,1$
PD22	$57,3 \pm 5,0$	$5,1 \pm 0,3$	PD22	$32,1 \pm 6,9$	$8,2 \pm 1,8$



Obr. 32: Srovnání naměřených tvrdostí proložené hloubkou vtisku.

Pro hodnocení je důležité vycházet ze základního poznatku, že povlaky v letectví vyžadují jistý kompromis mezi pružností/flexibilitou a tvrdostí. Možný kompromis z naměřených hodnot reprezentuje standardní letecký nátěr LNS a LNS-NG. Proto při dalším hodnocení vycházíme z faktu, že nanášené laky (LV, PU, PD22) by měly být jakýmsi vylepšením LNS a LNS-NG. Lak LV je poměrně tvrdý a hloubka vtisku je minimální, indentor v tomto případě vyčerpá zatěžovací sílu dřívě, než mohl prostoupit hlouběji do materiálu a proto můžeme říct, že lak LV je méně pružný. Naopak lak Synpo PU vykazoval velmi nízkou tvrdost a indentor se do povrchu zkoušeného materiálu „bořil“ velmi hluboko, což ukazuje pružnost povrchu. Lankwitzer PD22 si obdobně jako LNS a LNS-NG zachoval poměr tvrdosti k hloubce vtisku. Laky PU a PD22 hodnotím jako vhodné varianty pro úpravu jak LNS, tak LNS-NG.

11.6. Hodnocení abrazivních a erozivních zkoušek

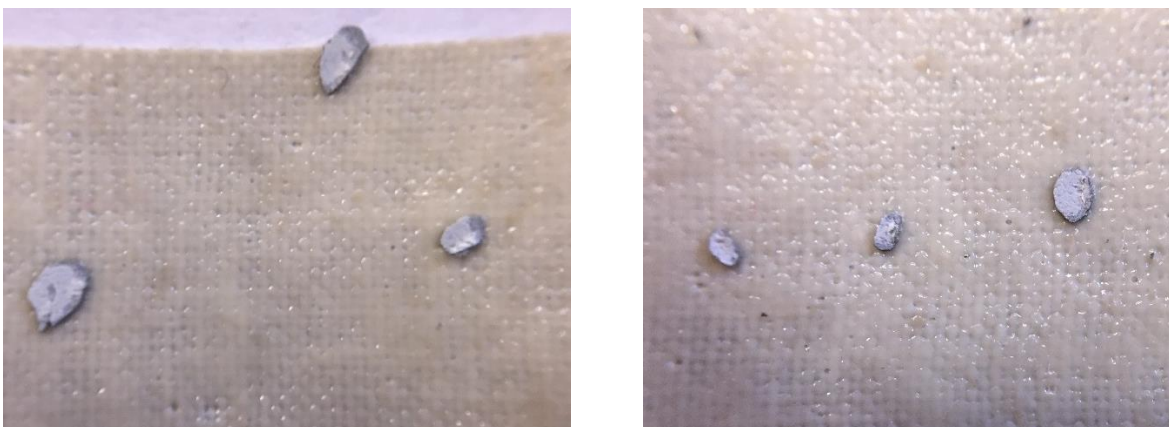
11.6.1. Zkoušky otryskáváním provedení podle ČSN

Zkouška byla provedena podle postupu B (viz. Tab. 1) standardu ČSN EN ISO 20567-1 [XII] při pracovním tlaku vzduchu v zásobníku (200 ± 10) kPa. Pro každý jednotlivý test bylo použito tryskací médium v podobě ocelového granulátu o zrnitosti 4 až 5 mm v množství ($1\ 000 \pm 20$) g. Otryskávání bylo provedeno po dobu (20 ± 1) s pod úhlem dopadu na vzorek 45° .

Tab. 20: Použité zařízení k otryskávání povlaku.

Výrobce	Q-LAB Corp., 800 Canterbury Road, Westlake, OH 44145-1419 US
Zařízení	Multi-test Gravelometr
Médium	G-9652-X: 4 až 5 mm
Lepicí páska	Tesa® 4657

Po otryskání všech vzorků byla použita lepicí páska (viz. Tab. 20) k přelepení vzorku a následovalo její stržení pod úhlem 40° . Tímto postupem se provádí odstranění slabě držících elementů nátěru (viz. Obr. 33) na místech, kde při zkoušce došlo k proražení.



Obr. 33: Ukázka zachycení slabě držících elementů odtržených pomocí lepicí pásky

Vizuálně je pak každý vzorek porovnáván s obrazovými schémata (viz. Obr. 27) nebo z přílohy výše uvedené normy. Zaznamenání poškození vzorků bylo rozděleno na porušení až k základnímu materiálu a na porušení mezi jednotlivými systémy nátěrové hmoty (viz. Tab. 21 a Tab. 22).

Tab. 21: Hodnocení zkoušky otryskáním u LNS a PU, LV, PD22.

Typ	#	Typ a popis poškození	
		Na základní materiál	Mezi vrstvami
LNS	A	Bez porušení.	C Porušení vrchní vrstvy k základové.
	B	Místy porušení až na kov.	D Rýhy ve vrchním vrstvě, místy zasahující do základu.
LV	B	Místy došlo k průniku až na základní materiál.	C Ve vrchním laku LV jsou viditelné otřepy od nárazu.
	A	Proražení až na základní materiál.	D Po celé ploše rýhy od nárazu.
PU	A	Bez známek průniku abraziva k základnímu materiálu.	B Mírné proražení vrchního laku do emailu.
	A	Bez známek průniku abraziva k základnímu materiálu.	B Mírné známky proražení UV laku s prostupem do emailu.
PD22	B	Místy proražení až na základní mat., dále pak odloupení laku i s vrchním nátěrem.	C Po celé ploše známky porušení laku nárazem abraziva.
	B	Proražení k základnímu materiálu, v okolí viditelné stopy základního nátěru.	C Viditelné otřepy od nárazu abraziva po celé ploše.

Tab. 22: Hodnocení zkoušky otryskáním u LNS-NG a PU, LV, PD22

Typ	#	Typ a popis poškození	
		Na základní materiál	Mezi vrstvami
LNS-NG	D	Porušení k základnímu materiálu od působení abraziva	B V emailu znatelné otřepy přestupující do základního nátěru
	B	Porušení k základnímu materiálu od působení abraziva	C V emailu znatelné otřepy přestupující do základního nátěru
LV	B	Proražení k základnímu materiálu, v okolí viditelné stopy základního nátěru	C Viditelné otřepy od nárazu abraziva po celé ploše.
	A	Menší výskyt míst proražení než u stejného předchozího vzorku.	B Otřepy od abraziva procházející lakem do emailu.
PU	A	Bez větších známek průniku abraziva k základnímu materiálu	B Poškození UV laku formou otřep, které místy přechází od nárazu abraziva do emailu.
	A	Bez větších známek průniku abraziva k základnímu materiálu	B Poškození UV laku formou otřep, které místy přechází od nárazu abraziva do emailu.
PD22	A	Bez větších známek průniku abraziva k základnímu materiálu	D Porušení laku, stržením po celé délce, při strhávání lepicí páskou, porušení vrchního UV laku abrazivem, místy pronikající do vrchního emailu.
	A	Nepatrné poškození až do základního materiálu.	D Znatelné otřepy od UV laku, přesahující do emailu.

Srovnání (viz. Tab. 23) pomocí bodové stupnice je hodnoceno na 10-ti bodové stupnici (0 až 5, s rozlišením po 0,5), kdy stupeň 0 znamená žádné poškození a stupeň 5 úplnou destrukci nátěru, toho ale nebylo dosaženo. Pozorované poškození se pohybovalo od 0,5 do 2,0 hodnotících bodů, to odpovídá poškození od 0,2 do 5,5 % z plochy vzorku.

Tab. 23: Klasifikace pomocí bodové stupnice

Série vzorků		Na základní materiál		Mezi vrstvami		Série vzorků		Na základní materiál		Mezi vrstvami	
LNS	-	0,5	1,0	1,5	2,0	LNS - NG	-	2,0	1,0	1,0	1,5
	LV	1,0	0,5	1,5	2,0		LV	1,0	0,5	1,5	1,0
	PU	0,5	0,5	1,0	1,0		PU	0,5	0,5	1,0	1,0
	PD22	1,0	1,0	1,5	1,5		PD22	0,5	0,5	2,0	2,0

Hodnocení porovnávací metodou a metodou bodové stupnice jednoznačně nejlépe odolal lak Synpo PU a to na LNS i LNS-NG. Vyšší odolnost vykazoval i lak Lankwitzer PD22 a Synpo LV, nejméně odolný abrazi byl standardní nátěrový letecký systém LNS i LNS-NG.

11.7. Zkoušky přilnavosti (adheze)

11.7.1. Mřížková zkouška

Zkouška byla provedena pomocí řezů mřížkové zkoušky za pomoci příslušné masky, kdy maska je volena s přihlédnutím k naměřeným tloušťkám nátěrového systému. Použité zařízení (viz. Tab. 24) a zaznamenáním výsledků, které jsou klasifikovány podle normy (viz. Tab. 2). Níže jsou uvedeny výsledky klasifikace (viz. Tab. 25).

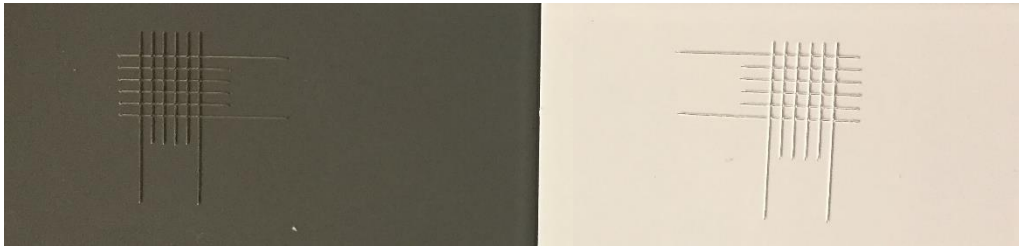
Tab. 24: Použité zařízení k mřížkové zkoušce.

Výrobce	Zehntner GmbH Testing Instruments, Gewerbestrasse 4, CH-4450 Sissach, Switzerland
Zařízení	ZCT 2160 Cross-cut Templet
Lepící páska	Tesa® 4657

Tab. 25: Zvolená šířka mřížky a klasifikace po jejím provedení.

Série vzorků	Klasifikace	Mřížka [mm]	Série vzorků	Klasifikace	Mřížka [mm]
LNS	-	1	LNS-NG	-	1
	LV	0		LV	0
	PU	0		PU	0
	PD22	0		PD22	0

Přilnavosti k základnímu materiálu po provedení mřížkové zkoušky, pro LNS a LNS-NG (viz. Obr. 34), výsledky odpovídají klasifikaci 1, protože bylo způsobeno nepatrné poškození v místech, kde se řezy kříží. Vrchní systémy (PU, LV, PD22) byly klasifikovány číslem 0, protože provedené řezy byly zcela hladké a žádný ze čtverců nebyl poškozen. Z toho důvodu je níže ukázka jen pro kombinaci LNS+PU a LNS-NG+ PU, protože další varianty jsou totožné.



Obr. 34: Mřížková zkouška pro LNS (šedivá vlevo) a LNG-NG (bílá vpravo) s mřížkou 2mm.



Obr. 35: Mřížková zkouška pro LNS+PU (šedivá vlevo) a LNG-NG+PU (bílá vpravo) s mřížkou 3mm.

Všechny systémy povrchové úpravy si zachovaly velmi dobrou adhezi k základovému materiálu (Al plechu). Mřížková zkouška vycházela „nejhůře“ pro standardní nátěrový letecký systém LNS i LNS-NG, oba systémy byly hodnoceny stupněm 1. Všechny ostatní aplikované laky vykazovaly výbornou přilnavost.

11.7.2. Odtrhová zkouška

Odtrhová zkouška probíhala na náhodně zvolených vzorcích příslušného nátěrového systému. Vždy na jednom vzorku z každé série bylo pak provedeno šest odtrhů. Měření probíhalo na zařízení (viz. Tab. 26) a byly dodrženy laboratorní podmínky. Na zařízení je možno měřit odtrhové napětí až do 19,9 MPa a využívá k tomu odtrhové panenky o průměru 20 mm. Všechny vzorky před měřením prošly požadovanou předúpravou, zdrsněním, očištěním od nečistot. Potom byly přilepeny panenky dvousložkovým epoxidovým lepidlem (viz. Tab. 26), které bylo ponecháno dotvrdit 24 h při laboratorní teplotě. Poté bylo po obvodu panenky pomocí frézy odstraněno přebytečné lepidlo i nátěrový systém až na kov. Přístroj, odtrhávající mechanicky panenku od plechu, průběžně zobrazuje hodnotu vyvíjeného tahu (přepočtenou na pevnost v MPa) a maximální hodnotu v okamžiku odtrhu zaznamená.

Tab. 26: Použité zařízení pro odtrhovou zkoušku.

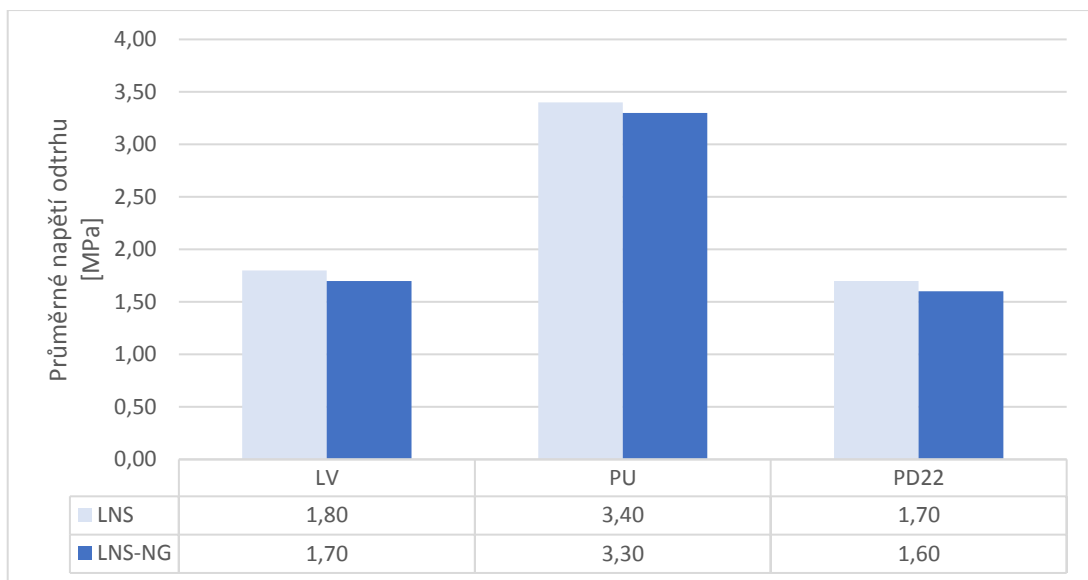
Výrobce	Coming Plus a.s., Nad Kamínkou 1267, 156 00 Praha 5 - Zbraslav
Zařízení	COMTEST® OP3/4-P
Lepidlo	CHS-Epodur 520 – 2608 (Spolchemie, a.s.; Ústí n./L.)

Výsledky jsou uvedeny (viz. Tab. 27). Charakter porušení v oblasti lomu (adhezivní mezi vrstvami, či kohezní v dané vrstvě) byl určován vizuálně a odhadován s přesností na 10 %.

Tab. 27: Průměrné napětí odtrhu pro LNS, LNS-NG a jejich úpravy LV, PU, PD22.

LNS	Průměrné napětí odtrhu [MPa]	Hodnocení odtrhu	LNS- NG	Průměrné napětí odtrhu [MPa]	Hodnocení odtrhu
LV	1,8 ± 0,2	100% B	LV	1,7 ± 0,3	100% -/Y
PU	3,4 ± 0,2	100% B	PU	3,3 ± 0,3	100% -/Y
PD22	1,7 ± 0,2	100% B	PD22	1,6 ± 0,4	20% A/B / 80% -/Y

Jednotlivé naměřené napětí u všech odtrhů a jejich vyhodnocení (viz. Obr. 36) je umístěno tabulce (viz. Příloha 3).



Obr. 36: Graf průměrných hodnot napětí odtrhu pro zkoušené vzorky.

Nejvyšší odtrhové síly bylo dosaženo u systému LNS+PU a LNS-NG+PU (viz. Obr. 36), při porovnání s ostatními systémy šlo o skoro dvojnásobnou sílu. Hodnocení odtrhu (viz. Tab. 27) ukazuje nejčastěji se vyskytující druh porušení u každého ze 6-ti provedených odtrhu konkrétního systému.

11.7.3. Hodnocení odolnosti vůči abrazi metodou Taber – Abraser

Dva vzorky z každé série (plechy 100 x 150 mm) bylo třeba nejprve upravit na rozměry pro přístroj Taber-Abraser (100 x 100 mm s otvorem o průměru 6 mm uprostřed). Ve společnosti SYNPO, a.s. byl použit programovatelný přístroj pro řezání vysokotlakým vodním paprskem. Zkouška byla provedena na zařízení s použitým příslušenstvím (viz. Tab. 28).

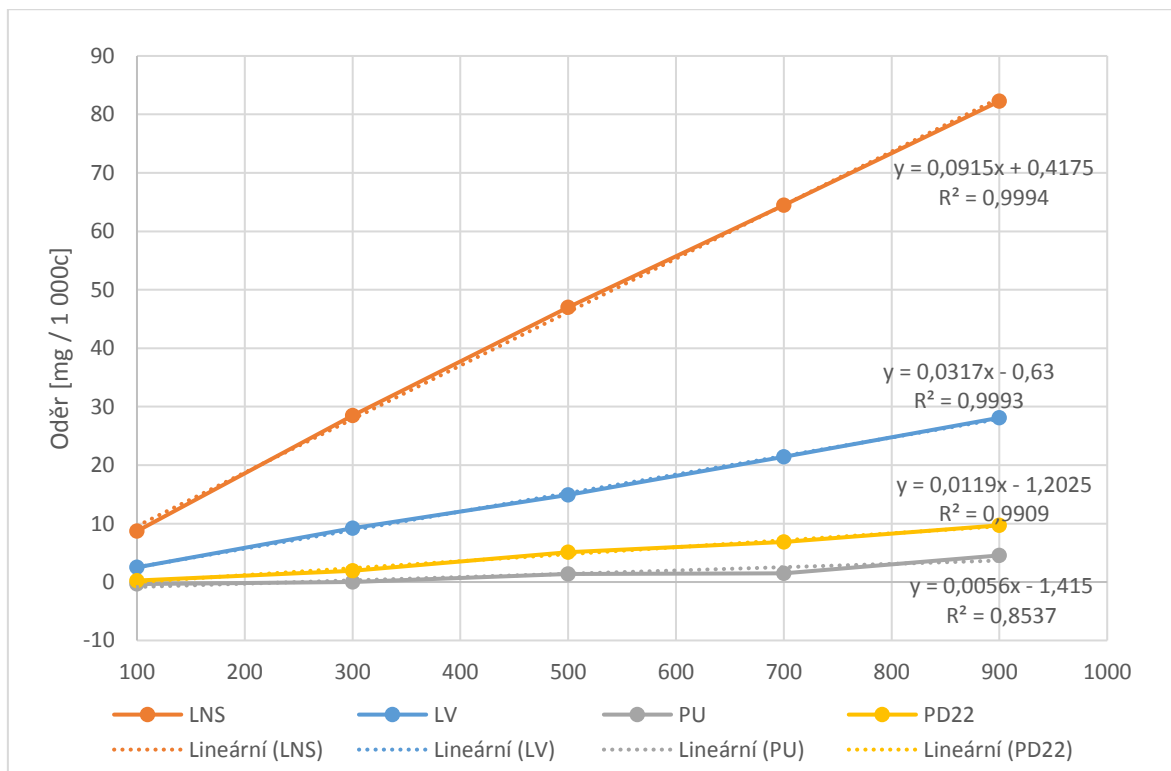
Tab. 28: Použité zařízení na kterém bylo hodnoceno opotřebení.

Výrobce	TABER® Industries, Materials Test & Measurement Division, 455 Bryant Street, North Tonawanda, New York 14120 - USA
Zařízení	S130 Abraser
Brusné kotouče	CS-10
Závaží	1000 GR

Vzorky byly nejdříve obroušovány 50 cykly pro výchozí srovnání povrchu zkoušeného vzorku a zváženy (výchozí hmotnost). Vyhodnocení hmotnostních úbytků bylo prováděno po 100, 300, 500, 700 a 900 cyklech. Metodou lineární regrese byla potom určena extrapolace úbytku hmoty lakového filmu pro 1 000 oděrových cyklů. Hodnoty oděru pro daný vzorek jsou uváděny v [mg/1 000c] ve spojení s druhem brusného kotouče (CS 10) a zatížením ramene (1 000 g). Naměřené hodnoty úbytku jsou uvedeny v tabulce (viz. Příloha 6) a přepočtené absolutní hodnoty níže (viz. Tab. 29, Tab. 30), ty jsou níže zpracovány (viz. Obr. 37 a Obr. 38).

Tab. 29: Přepočtené hodnoty oděru brusnými kotouči pro LNS a jejich úpravy LV, PU, PD22.

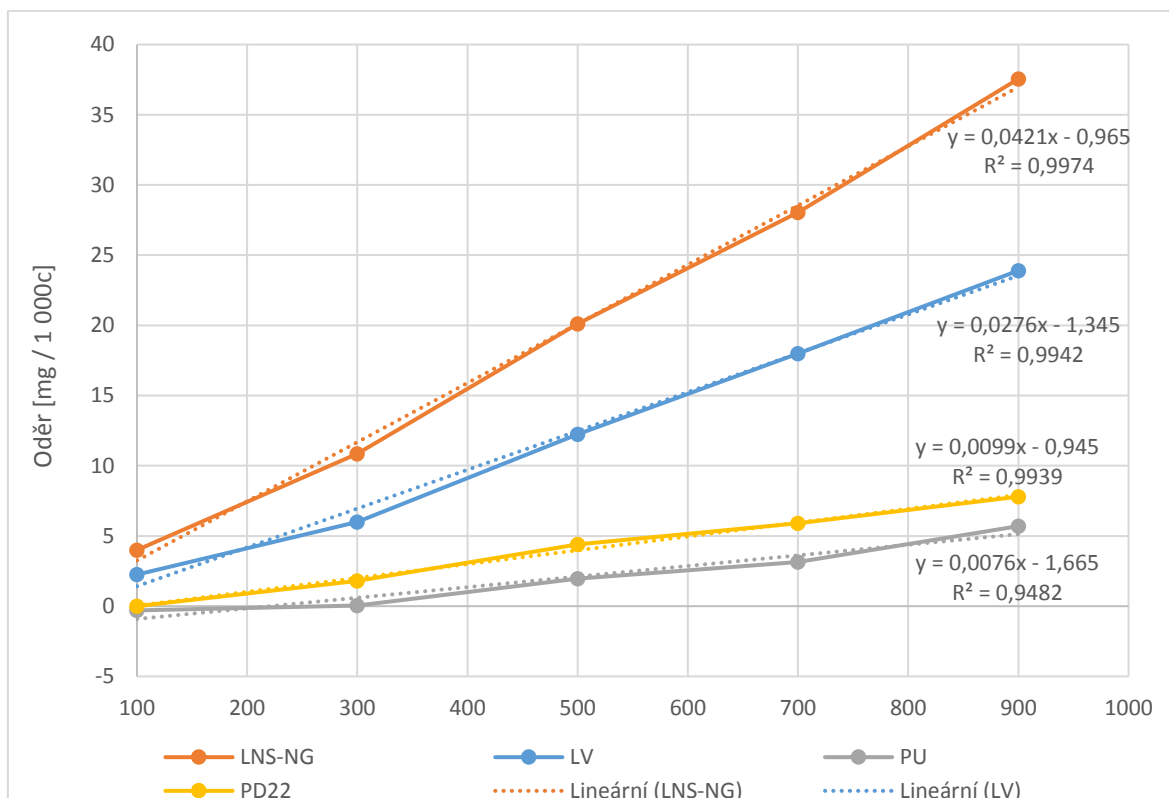
	Oděr [mg / 1 000c]					
	100	300	500	700	900	1000 (extrapolace)
LNS	8,70	28,50	47,00	64,45	82,25	91,92
LV	2,50	9,20	14,90	21,40	28,10	31,07
PU	-0,35	-3,55	1,35	1,50	4,55	4,19
PD22	0,25	1,90	5,10	6,85	9,70	10,70



Obr. 37: Oděr brusnými kotouči CS 10 pro 1 kg u LNS

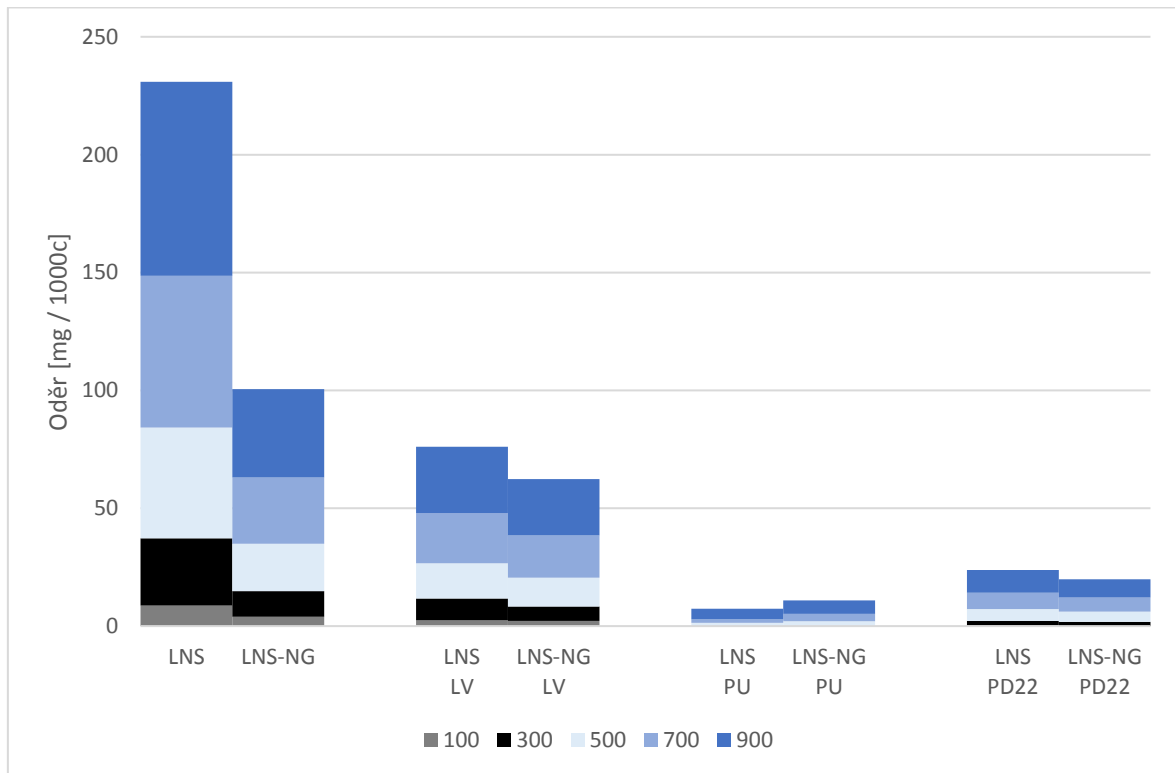
Tab. 30: Přepočtené hodnoty oděru brusnými kotouči pro LNS-NG a jejich úpravy LV, PU, PD22.

Oděr [mg / 1 000c]						
	100	300	500	700	900	1000 (extrapolace)
LNS-NG	4,00	10,85	20,10	28,05	37,55	41,14
LV	2,25	6,00	12,25	18,00	23,90	26,26
PU	-0,30	0,05	1,95	3,15	5,70	5,94
PD22	0	1,80	4,40	5,90	7,80	8,96



Obr. 38: Oděr brusnými kotouči CS 10 pro 1 kg u LNS-NG

Nejvyšší opotřebení, tedy nejmenší odolnost proti abrazi, prokázal standardní letecký nátěrový systém LNS i nové generace LNS-NG. Tímto ověřením jsme prokázali, že je nutné chránit povrchy proti opotřebení a v námi řešené části toho bylo dosaženo různými laky (LV, PU, PD22). Lak Synpo LV na LNS i LNS-NG potvrdil svoji tvrdost a relativní „křehkost“ a proto docházelo brusnými kotouči k vyššímu opotřebení (stále však menšímu než u základní emailové vrstvy). V dílčím požadavku na opotřebení je proto hodnocen jako méně účinný než PU a PD22. Lankwitzer PD22 odolával opotřebení dostatečně. Chování laku Synpo PU při 100 a 300 cyklech dokonce vykazovalo hmotnostní nárůst, jako jediný ze zkoušených laků. To bylo způsobeno vmačkáváním mechanických částic, které se z gumových kotoučů s abrasivem uvolňují a prostupovali do povlaku. Lak PU má nejnižší povrchovou tvrdost při 100 a 300 cyklech, při vyšších cyklech potom u laku PU docházelo jen k minimálním úbytkům.



Obr. 39: Porovnání hmotnostních úbytku LNS, LNS-NG a jejich kombinaci s LV, PU a PD22.

12. Závěr

Cílem práce bylo v teoretické části přiblížit problematiku aplikace leteckých nátěrů. Shrnout prostředí, ve kterém je pro letadla charakteristické fungovat a s jakými vlivy přichází do styku, rozdělit a charakterizovat systémy nátěrových hmot používané v interiérech na struktury a v exteriérech na trup, křídla, podvozek, náběžné hrany a další. Poslední přiblíženou problematikou je samotná aplikace nátěrových hmot na letadla, která se používá u nových letadel nebo u letadel, které prochází pravidelnou servisní údržbou po pěti letech provozu. Stejný postup se používá i u letadel, které prochází tzv. „rebrandingem“.

V praktické části práce shrnuji současný řešený stav speciálních nátěrových hmot pro konkrétní vytipované aplikace na letadle, které jsou řešené v rámci projektu TE02000011 – Centrum výzkumu povrchových úprav podporovaného TA České republiky. Pro tyto aplikace je součástí práce navržení metodiky zkoušení extrémně namáhaných součástí a podrobení zkušebních vzorků vhodným zkouškám, a to jak na stávajícím, tak i nově navrženém systému.

Dále v experimentální části byly aplikovány laky na LNS S2318 (základ) + U2054 (barevný email) a na modifikovaný systém v podobě LNS-NG pod označením S2318-NG (základ) + U2081-NG (barevný email), vyráběny ve společnosti Colorlak, a.s., která má s výrobou nátěrových hmot pro letectví bohaté zkušenosti. Navržené laky pro zvýšení odolnosti dodali společnosti Lankwitzer ČR, spol. s r.o., která zvolila flexibilní lak Lankwitzer PD22, jako jediný v současnosti vyvíjený lak s flexibilními vlastnostmi, a společnost Synpo, a.s., která zvolila lak Synpo LV CC 250, který již komerčně vyrábí a dodala takové druhý lak, který je ve fázi vývoje, pod označením Synpo PU 186L.

Závěry vyplývající z experimentální části jsou stručně shrnuty (viz. Tab. 31), tak aby bylo možné určit lak, který nejlépe vyhovuje aplikovaným zkouškám.

Tab. 31: Hodnocení jednotlivých zkoušek a jejich závěry.

Aplikovaná zkouška	Závěr k odolnosti laku
Oděr brusnými kotouči (Taber-Abraser)	Metodě úbytku váhy nejlépe odolaly měkké laky PU (LNS i LNS-NG).
Tloušťky povlaků	Všechny varianty jsou vyhovující.
Mikrotvrдость povlaku a hloubka vtisku indentoru	Nejlepší výsledek byl naměřen u laku PD22 (LNS i LNS-NG), protože jako jediný vykazoval požadovaný poměr mezi tvrdostí a hloubkou vtisku.
Lesk	Nejvyšší hodnoty lesku dosáhl lak LNS-NG+LV.
Mřížková zkouška	Všechny varianty jsou vyhovující.
Barevnost	Nejmenší barevnostní odchylka byla naměřena u laku LNS+PD22.
Odolnost proti kamínkové zkoušce	Nejlépe odolal lak PU (LNS i LNS-NG).
Odrthová zkouška	Nejvyššího průměrného napětí bylo zapotřebí u LNS+PU.
Zkouška tvrdosti tužkou	Dopadla nejlépe u laku PU (LNS i LNS-NG).
Odolnost proti poškrábání	Nejlépe odolal lak PU (LNS i LNS-NG), který vykazoval samoregenerační vlastnosti.

Z dílčích závěrů plyne, že nejlépe odolával aplikovaný lak od společnosti Synpo, a.s., pod označením Synpo PU 186L, a to jak na standartním leteckém nátěru (LNS), tak i na standartním leteckém nátěru nové generace (LNS-NG). Lak velmi dobře odolával ve zkoušce proti poškrábání (tzv. Scratch test) a po provedení zkoušky vykazoval samoregenerační vlastnosti. Ty byly viditelné i pouhým okem, od provedení zkoušky (do 20 s) bylo poškrábání laku skoro zanedbatelné. U zkoušky oděru brusnými kotouči při vyšších cyklech u laků PU docházelo jen k minimálním úbytkům. I v dalších zkouškách vykazoval PU lak vynikající výsledky. Jediné, co může být na tomto laku hodnoceno negativně, je jeho poměrně nízká tvrdost, tento lak je spíše měkký, a proto ve zkoušce mikrotvrdosti vykazoval nejnižší hodnoty. To ale do jisté míry řeší systém, na který je tento lak nanášen (LNS i LNS-NG). Protože cílem je navrhnout takový systém, který bude mechanicky odolný vůči částicím písku a prachu, je lak Synpo PU 186L ideální volbou.

Je důležité podotknout, že se jedná o vývojový vzorek, který není v současné chvíli dostupný pro komerční účely. Proto by měl být před jeho uvedením na trh znovu testován, tak aby došlo k ověření, že jeho dosažené vlastnosti byly zachovány. Dalším krokem, může být i rozšíření charakteru testovaných vzorků, protože prostředí provozu letadel je pro povlaky velmi specifické a povlaky mají odolávat různým tekutinám a chemikáliím, které se používají například k čištění nebo odmrazování. Povrchy přicházejí také do styku i s leteckým palivem, hydraulickou kapalinou a neopomenutelnou součástí jsou i environmentální vlivy např. nahromaděné nečistoty, korozní soli z pobřežních a oceánských oblastí nebo kyseliny tvořené průmyslově znečištěním ovzduším, které mají nepříznivý vliv na celistvost nátěrového systému.

Navázáním na tuto diplomovou práci je pokračovat v dalším vývoji a provádět testování před a po vystavení zrychleným testům, např. ponořením do vody, nebo při zvýšené či snížené teplotě.

Seznam použité literatury

- [1] O. Guseva, S. Brunner, P. Richner, *Analysis of the environmental parameters for aircraft coatings*. Macromol. Symp. 187, 883–893 (2002). doi: 10.1002/1521-3900(200209)187: 1
- [2] *Erosion Aircraft* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [Http://www.libellulemonde.com/images/revo-slider/eros2.png](http://www.libellulemonde.com/images/revo-slider/eros2.png)
- [3] VISSER, Peter, Herman TERRYN a Johannes M.C. MOL. *Aerospace Coatings. Active protective coatings: New Generation Coatings for Metals*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016, 315 - 372. ISBN 9789401775380.
- [4] *General Aviation Manufacturers Association* [online]. [cit. 2018-04-10]. DOI: General Aviation Statistical Databook & 2017 Industry Outlook. Dostupné z: [7] https://gama.aero/wp-content/uploads/2016-GAMA-Databook_forWeb.pdf
- [5] *Brussels Airlines* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [Http://www.experientheskies.com/brussels-airlines-deepens-partnership-with-tomorrowland/](http://www.experientheskies.com/brussels-airlines-deepens-partnership-with-tomorrowland/)
- [6] *Flights Maps* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [Http://spatial.ly/wp-content/uploads/2012/06/flights_sml.jpg](http://spatial.ly/wp-content/uploads/2012/06/flights_sml.jpg)
- [7] PENG, Hua-Xin. *Polyurethane Nanocomposite Coatings for Aeronautical Applications. Multifunctional polymer nanocomposites*. Boca Raton: CRC Press, c2011, 338 - 379. ISBN 1439816824.
- [8] SPADAFORA, Stephen J. a David F. PULLEY. *Specific Product Testing, Aerospace and Aircraft Coatings*. KOLESKE, Joseph V. *Paint and Coating Testing Manual: 15th Edition of the Gardner-Sward Handbook*. Bridgeport, NJ: ASTM International, 2012, 739 - 750. ISBN 978-0-8031-7017-9.
- [9] GOUDA, G. *Paints for Aerospace Applications*. PRASAD, N. Eswara a R. J. H. WANHILL. *Aerospace materials and material technologies: Aerospace Materials*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016, 539 - 562. ISBN 9789811021428.
- [10] *Brussels Airlines* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: https://static.brusselsairlines.com/_custom_js/livery/images/facebook_rackham.jpg
- [11] *Colour Sensors* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [Http://www.mdpi.com/sensors/sensors-14-11943/article_deploy/html/images/sensors-14-11943f2.png](http://www.mdpi.com/sensors/sensors-14-11943/article_deploy/html/images/sensors-14-11943f2.png)
- [12] *Gloss* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.elcometer.com/images/stories/Articles/Appearance/Understanding-gloss.jpg>
- [13] *Hardness Scale* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://lotusrock.com/wp-content/uploads/2015/05/Pencil-Hardness-Scale.jpg>
- [14] *Pencil Hardness Tester* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://drawinglics.com/view/1202841/pencil-hardness-tester-9-pencil-core.jpg>
- [15] *Nanoindentation Measuring System* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [Http://www.fischerindia.net/pdf/hm-2000-s.pdf](http://www.fischerindia.net/pdf/hm-2000-s.pdf)

- [16] BARKOULA, N. -M a J. KARGER-KOCSIS. Review Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites. *Journal of Materials Science*. 2002, vol. 37, no. 18, s. 3807-3820. ISSN 0022-2461.
- [17] JILBERT, G. H. a J. E. FIELD. Synergistic effects of rain and sand erosion. *Wear*. 2000, vol. 243, no. 1, s. 6-17. ISSN 0043-1648.
- [18] *Taber-Abraser* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: [Https://www.finitec-inc.com/Design/Layout/Taber.png](https://www.finitec-inc.com/Design/Layout/Taber.png)
- [19] *Wet Film Combs and Wheel* [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/112_115_154_3230_3236_3238.pdf
- [20] *Adhesion Test*. [online]. In: . [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.elcometerusa.com/510_sub_14.jpg

Seznam použitých norem

- [I] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 1518 *Nátěrové hmoty: zkouška vrypem (Scratch test: zkouška vrypem)*.
- [II] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 2409 *Nátěrové hmoty: mřížková zkouška*.
- [III] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 2808 *Nátěrové hmoty: stanovení tloušťky nátěru*.
- [IV] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN ISO 2813 *Nátěrové hmoty - Stanovení zrcadlového lesku nátěrů bez obsahu kovových pigmentů při úhlu 20°, 60° a 85°*.
- [V] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 4545-1 *Kovové materiály: zkouška tvrdosti podle Knoop. Část 1: Zkušební metoda*.
- [VI] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 4624 *Nátěrové hmoty: odtrhová zkouška přilnavosti*.
- [VII] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 6506-1 *Kovové materiály: zkouška tvrdosti podle Brinella. Část 1: Zkušební metoda*.
- [VIII] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 6507-1 *Kovové materiály: zkouška tvrdosti podle Vickerse. Část 1: Zkušební metoda*.
- [IX] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 6508-1 *Kovové materiály: zkouška tvrdosti podle Rockwella. Část 1: Zkušební metoda*.
- [X] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 7784-2 *Nátěrové hmoty: stanovení odolnosti proti abrazi. Část 2: Metoda s rotujícím brusným gumovým kotoučem*.
- [XI] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 15184 *Nátěrové hmoty - Stanovení tvrdosti nátěru zkouškou tužkami*.
- [XII] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 20567-1 *Nátěrové hmoty: stanovení odolnosti povlaků proti odlétajícím kamínkům. Část 1: Zkouška vícenásobným úderem*.

Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin

°C	Stupně Celsia - jednotka teploty
2K	Dvoukomponentní
ASTM	Americká společnost pro zkoušení a materiály (American Society for Testing and Materials)
B	Tvrdost tužky (black = černý)
bar	Tlak (1 bar = 0,1 Mpa)
F	Tvrdost tužky (firm = pevný)
g	Gram - jednotka hmotnosti
g/l	Gram na litr - hmotnostní koncentrace
GU	Jednotka lesku (gloss units)
H	Tvrdost tužky (hard = tvrdý)
h	Hodina - jednotka času
HVLP	Stříkací pistole s použitím nižšího tlaku vzduchu pro nanesení většího množství laku = menší úlet (prostřík) materiálu (High Volume Low Pressure)
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci (International Organization for Standardization)
kg	Kilogram - jednotka hmotnosti
km	Kilometr - jednotka vzdálenosti
km/h	Kilometr za hodinu
kPa	Kilopascal - jednotka tlaku
kV	kilovolt - jednotka elektrického napětí
L3	Synpo L3
LNS	Letecký nátěrový systém (S2318+U2054, RAL7005, UVCA)
LNS-NG	Letecký nátěrový systém - Nové Generace (S2318-NG + U2081-NG, RAL9003, UVCB)
LV	Synpo LV CC 250
mg / 1000c	Hmotnostní úbytek na 1000 cyklů
mm	Milimetr - jednotka vzdálenosti
mN	Milnewton - jednotka síly
MPa	Megapascal - jednotka tlaku
MRO	Hlavní servisní opravce (Maintenance, Repair and Operation)
N	Newton - jednotka síly
OEM	Druhovýrobce (Original Equipment Manufacturer)
PC	Počítač (Personal computer)
PD22	Lankwitzer PD-22-0000/3
PU	Synpo PU 186L
s	Sekunda - jednotka času
SAE	Sdružení pro automobilové inženýrství (Society of Automotive Engineers)
SCC	Koroze za napětí (Stress Corrosion Cracking)
UD-42	Lankwitzer UD-42-0000/1
UD-70	Lankwitzer UD-70-0000/2
UV	Ultrafialové záření (Ultra Violet)
VOC	Těkavé organické látky (volatile organic compounds)
ΔE	Diference barevnosti
μm	Mikrometr - jednotka vzdálenosti

Seznam obrázků

Obr. 1: Ochranný nátěrový systém běžně používaný v leteckém průmyslu. [1]	1
Obr. 2: Vytipovaná místa pro aplikace laků [2].....	2
Obr. 3: Počet prodaných komerčních letadel v letech 1994 – 2016 [4].	3
Obr. 4: Rebranding letounu Airbus A320 společnosti Brussels Airlines v rámci kompletní údržby. [5] ...	4
Obr. 5: Mapa letových tras sedmi nejvýznamnějších světových společností, které se věnují komerční letecké přepravě [6].	5
Obr. 6: Klasifikace prostředí, s kterými se setkávají letecké povlaky. [7].....	6
Obr. 7: Nový branding pro Airbus A320 s námětem ilustrací od Tintita [10].	9
Obr. 8: Obecné schéma vnějších nátěrových systémů aplikovaných v letectví [3].	10
Obr. 9: Obecné schéma konstrukčních nátěrových systémů aplikovaných v letectví [3].....	10
Obr. 10: Příklad aplikace vnitřního nátěrového systému letadlové konstrukce [3].	11
Obr. 11: Typy epoxidových pryskyřic [3].....	14
Obr. 12: Reakce epoxidů při vytvrzování [2].	15
Obr. 13: Reakce polyurethanu při vytvrzování [3].	16
Obr. 14: Aplikace vrchního nátěrového systému na cestovní letadlo [3].	18
Obr. 15: Jednotlivé kroky potřebné při aplikaci nového systému povrchové úpravy letadla [3].	20
Obr. 16: Kalorimetrický systém [11].	25
Obr. 17: Standardní nastavení reflektometrů [12].	26
Obr. 18: Stupnice tvrdosti pro tužkový test [13].	26
Obr. 19: Schéma umístění tužky v přípravku, pod úhlem 45° [14].	27
Obr. 20: Schéma zařízení pro zkoušku proškrábnutím tzv. - „Scratch test“ [15].	27
Obr. 21: Křivka zatěžování a odlehčování u měření tvrdosti podle Vickerse [16].	28
Obr. 22: Možné mechanismy eroze pevných částic [16].	30
Obr. 23: Povrch po otryskání s tryskami o průměru 0,8 mm při 185 m.s ⁻¹ , s následnou erozí písku při 0,15 kg.m ⁻² .s ⁻¹ při 20 m.s ⁻¹ pískem o hrubosti C25/52 [17].	31
Obr. 24: Schématické znázornění typického erozního chování [17].	32
Obr. 25: Schéma zkoušky odolnost proti oděru metodou Taber - Abraser [19].	32
Obr. 26: Schéma gravelometru [20].	33
Obr. 27: Referenční standard pro hodnocení zkoušky odolnosti vůči kamínkům.	34
Obr. 28: Schéma odtrhové zkoušky [20].	36
Obr. 29: Graf porovnání měřených tloušťek pro zkoumané série vzorků.	39
Obr. 30: Graf pro porovnání lesku při 60° u standardního leteckého (LNS) a systému nové generace (LNS-NG) včetně aplikovaných laků (PU, LV, PD22) pro zkoumané série vzorků.	40
Obr. 31: Graf o rovnání změny barevnosti u LNS, LNS-NG na aplikaci PU, LV, PD22 pro zkoumané série vzorků.	41
Obr. 32: Srovnání naměřených tvrdostí proložené hloubkou vtisku.	45
Obr. 33: Ukázka zachycení slabě držících elementů odtržených pomocí lepicí pásky.....	46
Obr. 34: Mřížková zkouška pro LNS (šedivá vlevo) a LNG-NG (bílá vpravo) s mřížkou 2mm.....	49
Obr. 35: Mřížková zkouška pro LNS+PU (šedivá vlevo) a LNG-NG+PU (bílá vpravo) s mřížkou 3mm.....	49
Obr. 36: Graf průměrných hodnot napětí odthru pro zkoušené vzorky.	50
Obr. 37: Oděr brusnými kotouči CS 10 pro 1 kg u LNS	51
Obr. 38: Oděr brusnými kotouči CS 10 pro 1 kg u LNS-NG	52
Obr. 39: Porovnání hmotnostních úbytku LNS, LNS-NG a jejich kombinaci s LV, PU a PD22.	53

Seznam tabulek

Tab. 1: Popis defektu u zkoušky proškrábnutím dle normy ČSN EN ISO 1518 [I].	27
Tab. 2: Určení rozestupu řezů vztažené k tloušťce povlaku.	35
Tab. 3: Klasifikace výsledků mřížkové zkoušky.	35
Tab. 4: Charakteristiky lomu u odtrhové zkoušky.	36
Tab. 5: Zařízení použité k měření tlouštěk povlaků.	38
Tab. 6: Průměrné tloušťky z naměřených hodnot (LNS a LNS-NG) a jejich úpravy (PU, LV, PD22).	38
Tab. 7: Zařízení použité k měření lesku povlaků.	39
Tab. 8: Průměrné hodnoty lesku (LNS a LNS-NG) a nanesené laky (PU, LV, PD22).	40
Tab. 9: Zařízení použité k měření barevnosti povlaků.	41
Tab. 10: Barevnost (LNS a LNS-NG) a úpravy lakem (PU, LV, PD22).	41
Tab. 11: Použité zařízení ke stanovení tvrdosti povlaku tužkovým testem.	42
Tab. 12: Naměření tvrdosti tužkovým testem u LNS a PU, LV, PD22.	42
Tab. 13: Naměření tvrdosti tužkovým testem u LNS-NG a PU, LV, PD22.	43
Tab. 14: Hodnocení naměřených tvrdostí tužkovým testem.	43
Tab. 15: Zařízení pro zkoušku proškrábnutím.	43
Tab. 16: Zaznamenané poškození při daném zatížení u LNS a PU, LV, PD22.	44
Tab. 17: Zaznamenané poškození při daném zatížení u LNS-NG a PU, LV, PD22.	44
Tab. 18: Použité zařízení k měření mikrotvrdosti povlaku.	44
Tab. 19: Naměřené tvrdosti a hloubky vpichu na mikrotvrdoměru.	45
Tab. 20: Použité zařízení k otryskávání povlaku.	46
Tab. 21: Hodnocení zkoušky otryskáním u LNS a PU, LV, PD22.	47
Tab. 22: Hodnocení zkoušky otryskáním u LNS-NG a PU, LV, PD22.	47
Tab. 23: Klasifikace pomocí bodové stupnice.	48
Tab. 24: Použité zařízení k mřížkové zkoušce.	48
Tab. 25: Zvolená šířka mřížky a klasifikace po jejím provedení.	48
Tab. 26: Použité zařízení pro odtrhovou zkoušku.	49
Tab. 27: Průměrné napětí odtrhu pro LNS, LNS-NG a jejich úpravy LV, PU, PD22.	50
Tab. 28: Použité zařízení na kterém bylo hodnoceno opotřebení.	51
Tab. 29: Přepočtené hodnoty oděru brusnými kotouči pro LNS a jejich úpravy LV, PU, PD22.	51
Tab. 30: Přepočtené hodnoty oděru brusnými kotouči pro LNS-NG a jejich úpravy LV, PU, PD22.	52
Tab. 31: Hodnocení jednotlivých zkoušek a jejich závěry.	54

PARTNEŘI



Program **Centra kompetence**





Seznam příloh

Příloha 1: Záznam z měření zkouškou – „Scratch test“	63
Příloha 2: Záznam z měření tvrdosti povlaků tužkovým testem.....	63
Příloha 3: Záznam z měření odrhové zkoušky, její hodnocení a průměrné napětí.....	64
Příloha 4: Hodnocení zkušebních vzorků po provedení zkoušky na Gravelometru.....	65
Příloha 5: Záznam z měření na spektrometrickém zařízení.....	66
Příloha 6: Záznam hmotnostních úbytků od 0 až 900 cyklech na zařízení Taber – Abraser.	66
Příloha 7: Záznam a vyhodnocení naměřených hodnot při měření lesku.....	67
Příloha 8: Záznam a vyhodnocení naměřených tloušťek povlaků pro LNS.....	67
Příloha 9: Záznam a vyhodnocení naměřených tloušťek povlaků pro LNS-NG.....	67
Příloha 10: Záznam a vyhodnocení naměřených mikrotvrdostí a hloubky vtisku do povlaků pro LNS a LNS-NG.....	67
Příloha 11: Oděr brusnými kotouči CS 10, pro 1 kg u LNS a LNS-NG	67

Přílohy

Příloha 1: Záznam z měření zkouškou – „Scratch test“.

		Zatížení [N]														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	20
LNS	-	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	-	P
LV	-	0	0	0	0	0	0	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	P
PU	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	-	P
PD22	-	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	-	P

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	20
LNS-NG	-	0	0	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	P	P
LV	-	0	0	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	-	-	-	P	-	P	P
PU	-	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P	P	V
PD22	-	0	0	0	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	0/P	P		P	P

Příloha 2: Záznam z měření tvrdosti povlaků tužkovým testem.

		3B	B	F	2H	4H	5H	6H	7H	8H	9H
UVCB08	LNS-NG			A	A	A	A	A	B	B	C
UVCB46	LV					A	A	A	B	C	B/C
UVCB34	PU									B	B
UVCB21	PD22					A	A	A	A	B/C	A

		3B	B	F	2H	4H	5H	6H	7H	8H	9H
UVCA06	LNS			A	A	A	A	A	A	A	A
UVCA55	PU									B	B
UVCA23	PD22			A	A	A	A	A	A	A	A
UVCA33	LV			A	A	A	A	A	A	A	A

Příloha 3: Záznam z měření odrhové zkoušky, její hodnocení a průměrné napětí.

LNS	Vzorek	Odrh	Napětí odtrhu [MPa]	Hodnocení odtrhu	Průměrné napětí odtrhu [MPa]	
PU	UVCA37 (172411)	1	3.3	100% B	3,4	± 0,2
		2	3.7	100% B		
		3	3.2	100% B		
		4	3.4	100% B		
		5	3.5	100% B		
		6	3.1	100% B		

LV	UVCA48 (172412)	1	2	100% B	1,8	± 0,2
		2	1.7	100% B		
		3	1.6	100% B		
		4	1.6	100% B		
		5	2	100% B		
		6	1.8	100% B		

PD22	UVCA	1	1.7	100% B	1,7	± 0,2
		2	1.5	100% B		
		3	1.6	100% B		
		4	1.8	100% B		
		5	1.7	100% B		
		6	2.0	100% B		

LNS-NG	Vzorek	Odrh	Napětí odtrhu [MPa]	Hodnocení odtrhu	Průměrné napětí odtrhu [MPa]	
PD22	UVCB	1	2.0	30% A/B / 70% -/Y	1,6	± 0,4
		2	1.7	10% A/B / 90% -/Y		
		3	0.9	100% -/Y		
		4	1.9	10% A/B / 90% -/Y		
		5	1.9	20% A/B / 80% -/Y		
		6	1.4	20% A/B / 80% -/Y		

LV	UVCB59 (172414)	1	1.7	100% B	1,7	± 0,3
		2	1.9	10% B; 90% -/Y		
		3	1.7	100% B		
		4	2.1	100% -/Y		
		5	1.4	90% B; 10% -/Y		
		6	1.4	100% -/Y		

PU	UVCB44 (172413)	1	3.3	10% B; 90% -/Y	3,3	± 0,3
		2	3.3	10% B; 90% -/Y		
		3	3.2	100% -/Y		
		4	3.1	100% -/Y		
		5	3.4	100% -/Y		
		6	2.9	100% -/Y		

Příloha 4: Hodnocení zkušebních vzorků po provedení zkoušky na Gravelometru.

Typ	#	Typ a popis poškození	
		Na základní materiál	Mezi vrstvami
LNS	A	Bez porušení.	Porušení vrchní vrstvy k základové.
	B	Místy porušení až na kov.	Rýhy ve vrchním vrstvě, místy zasahující do základu.
LV	B	Místy došlo k průniku až na základní materiál.	Ve vrchním laku LV jsou viditelné otřepy od nárazu.
	A	Proražení až na základní materiál.	Po celé ploše rýhy od nárazu.
PU	A	Bez známek průniku abraziva k základnímu materiálu.	Mírné proražení vrchního laku do emailu.
	A	Bez známek průniku abraziva k základnímu materiálu.	Mírné známky proražení UV laku s prostupem do emailu.
PD22	B	Místy proražení až na základní mat., dále pak odloupenutí laku i s vrchním nátěrem.	Po celé ploše známky porušení laku nárazem abraziva.
	B	Proražení k základnímu materiálu, v okolí viditelné stopy základního nátěru.	Viditelné otřepy od nárazu abraziva po celé ploše.

Typ	#	Typ a popis poškození	
		Na základní materiál	Mezi vrstvami
LNS- NG	D	Porušení k základnímu materiálu od působení abraziva	V emailu znatelné otřepy přestupující do základního nátěru
	B	Porušení k základnímu materiálu od působení abraziva	V emailu znatelné otřepy přestupující do základního nátěru
LV	B	Proražení k základnímu materiálu, v okolí viditelné stopy základního nátěru	Viditelné otřepy od nárazu abraziva po celé ploše.
	A	Menší výskyt míst proražení než u stejného předchozího vzorku.	Otřepy od abraziva procházející lakem do emailu.
PU	A	Bez větších známek průniku abraziva k základnímu materiálu	Poškození UV laku formou otřep, které místy přechází od nárazu abraziva do emailu.
	A	Bez větších známek průniku abraziva k základnímu materiálu	Poškození UV laku formou otřep, které místy přechází od nárazu abraziva do emailu.
PD22	A	Bez větších známek průniku abraziva k základnímu materiálu	Porušení laku, stržením po celé délce, při strhávání lepící páskou, porušení vrchního UV laku abrazivem, místy pronikající do vrchního emailu.
	A	Nepatrné poškození až do základního materiálu.	Znatelné otřepy od UV laku, přesahující do emailu.

Příloha 5: Záznam z měření na spektrometrickém zařízení.

	L*	a*	b*	C*	h°		
UVCA	44.66	-1.86	1.44	2.36	142.26		
	L*	a*	b*	DL*	Da*	Db*	DE*
LV-1	44.48	-2.16	2.01	-0.18 D	-0.29 G	0.56 Y	0.66
LV-2	44.63	-2.24	2.23	-0.04 D	-0.38 G	0.79 Y	0.87
PU-1	45.03	-2.15	2.28	0.36 L	-0.29 G	0.84 Y	0.96
PU-2	45.55	-2.13	2.29	0.88 L	-0.27 G	0.85 Y	1.25
PD22-1	44.68	-1.89	1.5	0.02	-0.02 G	0.06 Y	0.07
PD22-2	44.76	-1.89	1.55	0.09 L	-0.02 G	0.11 Y	0.15

	L*	a*	b*	C*	h°		
UVCB	94.22	-1.05	0.22	1.07	168.31		
	L*	a*	b*	DL*	Da*	Db*	DE*
LV-2	93.93	-1.07	0.27	-0.29 D	-0.02 G	0.05 Y	0.3
LV-1	94.21	-1.06	0.42	-0.02	-0.01	0.20 Y	0.2
PD22-2	94.38	-1.15	0.6	0.16 L	-0.10 G	0.39 Y	0.43
PD22-1	94.4	-1.16	0.69	0.18 L	-0.11 G	0.47 Y	0.51
PU-2	93.9	-1.31	1.88	-0.32 D	-0.27 G	1.66 Y	1.71
PU-1	94.1	-1.23	1.47	-0.12 D	-0.18 G	1.25 Y	1.27

Příloha 6: Záznam hmotnostních úbytků od 0 až 900 cyklech na zařízení Taber – Abraser.

		Oděr [mg]					
		0	100	300	500	700	900
UVCA07	LNS	27.481	27.4708	27.4508	27.4321	27.4143	27.3963
UVCA15	LNS	26.062	26.0548	26.0352	26.0169	25.9998	25.9822
UVCA50	LV	28.0012	27.9984	27.9918	27.9855	27.9793	27.9724
UVCA59	LV	28.1203	28.1181	28.1113	28.1062	28.0994	28.0929
UVCA40	PU	28.4258	28.4262	28.4257	28.424	28.4227	28.4207
UVCA45	PU	28.0663	28.0666	28.0664	28.0654	28.0664	28.0623
UVCA27	PD22	28.1016	28.1013	28.0995	28.0969	28.0946	28.0918
UVCA18	PD22	27.732	27.7318	27.7303	27.7265	27.7253	27.7224

		0	100	300	500	700	900
UVCB03	LNS-NG	28.1293	28.1254	28.1165	28.1076	28.0997	28.0899
UVCB12	LNS-NG	28.1541	28.15	28.1452	28.1356	28.1276	28.1184
UVCB57	LV	28.1405	28.1398	28.1349	28.1294	28.1237	28.1174
UVCB32	LV	27.6931	27.6893	27.6867	27.6797	27.6739	27.6684
UVCB51	PU	28.6382	28.6384	28.6377	28.6355	28.6345	28.6318
UVCB36	PU	27.9714	27.9718	27.9718	27.9702	27.9688	27.9664
UVCB22	PD22	28.2848	28.2848	28.283	28.2804	28.2789	28.277

Příloha 7: Záznam a vyhodnocení naměřených hodnot při měření lesku.

Vzorek	n	20°			60°			85°					
		Value	X	stdev	(X ± Y)	Value	X	stdev	(X ± Y)	Value	X	stdev	(X ± Y)
UVCB05	6	89	88.3	2	88.3 ± 2	93.9	93.7	0.5	94 ± 1	97.9	98	0.4	98 ± 0
UVCB04	6	87	86.8	0.4	87 ± 0	92.9	92.3	0.7	92 ± 1	97.7	97.3	0.5	97 ± 1
UVCB43	6	82.9	82.6	0.9	83 ± 1	89.1	89	0.6	89 ± 1	95.1	96.7	0.9	97 ± 1
UVCB24	6	81.3	81.5	1.1	82 ± 1	88.6	88.4	1.3	88 ± 1	97	96.7	1.1	97 ± 1
UVCB29	6	88.5	88.7	0.2	89 ± 0	92.9	92.7	0.5	93 ± 1	98.8	98.5	0.4	99 ± 0
UVCB30	6	88.1	88.4	0.2	88 ± 0	91.2	92.7	0.7	93 ± 1	97.2	98.7	0.4	99 ± 0
UVCB48	6	93.3	93.3	1.2	93 ± 1	95.7	95.9	0.8	96 ± 1	97.4	97.9	0.5	98 ± 1
UVCB58	6	94.2	93.2	0.9	93 ± 1	96.2	95.9	0.4	96 ± 0	98.5	98.1	0.3	98 ± 0
UVCA02	6	89.3	87.7	4.3	88 ± 4	93.8	93.9	0.3	94 ± 0	98	97.6	0.6	98 ± 1
UVCA03	6	91.7	91.6	1	92 ± 1	94.5	94.4	0.2	94 ± 0	98.6	98.5	0.2	99 ± 0
UVCA44	6	92.5	90.7	2.7	91 ± 3	94.2	93.2	1.4	93 ± 1	99.2	98.4	0.5	98 ± 1
UVCA43	6	92.3	91.5	0.9	92 ± 1	93.9	93.5	0.4	94 ± 0	98.4	98	0.4	98 ± 0
UVCA54	6	74.5	75.6	2.3	76 ± 2	84.2	85.7	0.7	86 ± 1	93.9	96	0.9	96 ± 1
UVCA56	6	79.9	80	0.4	80 ± 0	86.8	86.7	0.5	87 ± 1	97.4	96.3	1.3	96 ± 1
UVCA16	6	87.3	86.4	2.4	86 ± 2	90.1	89.2	2.1	89 ± 2	98.3	97.3	1.2	97 ± 1
UVCA17	6	88	86.8	1.4	87 ± 1	90.4	90.2	0.6	90 ± 1	99.1	99.1	0.1	99 ± 0

Příloha 8: Záznam a vyhodnocení naměřených tlouštěk povlaků pro LNS.

Vzorek	Typ	1	2	3	4	5	6	TI. [μm] ($X \pm Y$)	MAX.	MIN.
UVCA06	LNS	101	94	93	91	100	92	95 \pm 4	101	91
UVCA07	LNS	93	103	97.5	98.5	99.5	90.5	97 \pm 5	103	91
UVCA18	PD22	130	135	142	134	139	128	135 \pm 5	142	128
UVCA19	PD22	128	137	139	138	140	136	136 \pm 4	140	128
UVCA31	LNS	91	83.5	92.5	91	85.5	93.5	90 \pm 4	94	84
UVCA32	LNS	85.4	79.3	88.8	81.6	74.4	80.9	82 \pm 5	89	74
UVCA32	LV	125	141	142	130	140	130	135 \pm 7	142	125
UVCA35	LNS	90.1	87.3	91.5	86.6	93.7	87.9	90 \pm 3	94	87
UVCA35	PU	149	159	149	151	157	145	152 \pm 5	159	145
UVCA38	LNS	98.5	97	86.5	101	89	99.5	95 \pm 6	101	87
UVCA39	LNS	74.1	82.8	84.4	77.2	81.6	70.7	78 \pm 5	84	71
UVCA39	PU	138	146	143	148	146	135	143 \pm 5	148	135
UVCA42	LNS	74.4	72.1	84.4	86.9	70.8	78.2	78 \pm 7	87	71
UVCA42	LV	116	133	121	135	116	137	126 \pm 10	137	116
UVCA47	LNS	87.9	77.4	70.8	64.4	78.5	72.7	75 \pm 8	88	64
UVCA47	PU	161	160	156	154	144	143	153 \pm 8	161	143
UVCA53	LNS	88.6	94.2	81.5	90.9	84.6	93.5	89 \pm 5	94	82
UVCA53	PU	142	143	135	145	140	145	142 \pm 4	145	135
UVCA54	LNS	61.4	70.9	72.2	62.5	66.1	73.2	68 \pm 5	73	61
UVCA54	LV	154	154	157	156	147	149	153 \pm 4	157	147
UVCA57	LNS	79.9	73.2	56.8	78.6	70.2	74.9	72 \pm 8	80	57
UVCA57	LV	143	126	130	124	130	129	130 \pm 7	143	124

Příloha 9: Záznam a vyhodnocení naměřených tloušťek povlaků pro LNS-NG.

Vzorek	Typ	1	2	3	4	5	6	Tl. [μm] ($X \pm Y$)	MAX.	MIN.
UVCB03	LNS-NG	101	106	101	110	109	101	105 \pm 4	110	101
UVCB12	LNS-NG	94.5	99.5	99	96	106	99.5	99 \pm 4	106	95
UVCB16	PD22	135	134	148	157	146	148	145 \pm 9	157	134
UVCB20	PD22	163	174	164	168	163	152	164 \pm 7	174	152
UVCB22	PD22	174	171	173	182	174	178	175 \pm 4	182	171
UVCB35	LNS-NG	107	86.4	84.5	103	122	111	102 \pm 15	122	85
UVCB35	PU	121	119	142	141	170	167	143 \pm 22	170	119
UVCB39	LNS-NG	91.9	92.7	88.3	80.5	98.6	94.1	91 \pm 6	99	81
UVCB39	LV	161	149	143	151	163	141	151 \pm 9	163	141
UVCB42	LNS-NG	87.2	80.4	66.7	73.8	63.7	74.2	74 \pm 9	87	64
UVCB42	PU	139	145	154	149	145	149	147 \pm 5	154	139
UVCB47	LNS-NG	73.8	77.4	80.2	87.6	57.4	56.5	72 \pm 13	88	57
UVCB47	LV	131	135	133	131	135	129	132 \pm 2	135	129
UVCB53	LNS-NG	95.3	79.7	85.8	81.2	88.6	73.4	84 \pm 8	95	73
UVCB53	PU	132	138	144	139	133	139	138 \pm 4	144	132
UVCB60	LNS-NG	72.3	63.4	74.8	80.6	96.2	84.7	79 \pm 11	96	63
UVCB60	LV	135	142	145	129	133	122	134 \pm 8	145	122

Příloha 10: Záznam a vyhodnocení naměřených mikrotvrdostí a hloubky vtisku do povlaků pro LNS a LNS-NG.

	1	2	3	HM [N/mm ²] (X ± Y)	MAX.	MIN.	1	2	3	h _{max} [μm] (X ± Y)	MAX.	MIN.
UVCA07	36.6225	36.5421	-	36.6 ± 0.1	36.6	36.5	6.90891	6.95056	-	6.9 ± 0	7.0	6.9
UVCA18 PD22	55.673	50.359	55.2856	53.8 ± 3	55.7	50.4	5.17621	5.59831	5.22482	5.3 ± 0.2	5.6	5.2
UVCA19	44.8285	42.6894	-	43.8 ± 1.5	44.8	42.7	5.91428	6.14129	-	6 ± 0.2	6.1	5.9
UVCA27 PD22	60.3216	57.5367	64.614	60.8 ± 3.6	64.6	57.5	4.87643	5.04362	4.64676	4.9 ± 0.2	5.0	4.6
UVCA32 LV	133.626	136.754	136.989	135.8 ± 1.9	137.0	133.6	2.79749	2.767	2.75965	2.8 ± 0	2.8	2.8
UVCA35 PU	1.69159	1.74439	1.67626	1.7 ± 0	1.7	1.7	21.0735	20.8067	21.1903	21 ± 0.2	21.2	20.8
UVCA39 PU	1.62349	1.70398	1.90999	1.7 ± 0.1	1.9	1.6	21.4874	21.0099	19.8654	20.8 ± 0.8	21.5	19.9
UVCA42 LV	137.901	137.327	135.61	136.9 ± 1.2	137.9	135.6	2.74653	2.75684	2.78347	2.8 ± 0	2.8	2.7
UVCA47 PU	1.53992	1.69443	1.59876	1.6 ± 0.1	1.7	1.5	22.1142	21.1185	21.7028	21.6 ± 0.5	22.1	21.1
UVCA53 PU	1.76064	1.87008	1.90895	1.8 ± 0.1	1.9	1.8	20.7909	20.1877	19.9432	20.3 ± 0.4	20.8	19.9
UVCA54 LV	166.955	135.811	136.509	146.4 ± 17.8	167.0	135.8	2.43377	2.77582	2.76738	2.7 ± 0.2	2.8	2.4
UVCA57 LV	138.252	138.073	137.393	137.9 ± 0.5	138.3	137.4	2.74304	2.74664	2.75688	2.7 ± 0	2.8	2.7

	1	2	3	HM [N/mm ²] (X ± Y)	MAX.	MIN.	1	2	3	h _{max} [μm] (X ± Y)	MAX.	MIN.
UVCB03	67.0952	68.2906	69.9812	68.5 ± 1.5	70.0	67.1	4.52955	4.48397	4.39767	4.5 ± 0.1	4.5	4.4
UVCB12	63.8782	61.4218	60.6043	62 ± 1.7	63.9	60.6	4.68296	4.80486	4.85664	4.8 ± 0.1	4.9	4.7
UVCB16 PD22	36.8568	37.0333	-	36.9 ± 0.1	37.0	36.9	6.96015	6.9295	-	6.9 ± 0	7.0	6.9
UVCB22 PD22	26.6725	27.7207	-	27.2 ± 0.7	27.7	26.7	9.74773	9.21908	-	9.5 ± 0.4	9.7	9.2
UVCB35 PU	2.56289	2.19101	2.42769	2.4 ± 0.2	2.6	2.2	17.3436	18.6995	17.7245	17.9 ± 0.7	18.7	17.3
UVCB39 LV	138.284	138.173	138.117	138.2 ± 0.1	138.3	138.1	2.74329	2.74402	2.74591	2.7 ± 0	2.7	2.7
UVCB42PU	1.90988	1.83321	1.95723	1.9 ± 0.1	2.0	1.8	20.1835	20.5571	19.8627	20.2 ± 0.3	20.6	19.9
UVCB47 LV	136.666	137.723	137.243	137.2 ± 0.5	137.7	136.7	2.76467	2.75301	2.75719	2.8 ± 0	2.8	2.8
UVCB53 PU	2.02581	2.09491	2.01922	2 ± 0	2.1	2.0	19.3264	19.0073	19.3583	19.2 ± 0.2	19.4	19.0
UVCB60 LV	146.369	138.323	139.132	141.3 ± 4.4	146.4	138.3	2.64632	2.74145	2.73296	2.7 ± 0.1	2.7	2.6

Příloha 11: Oděr brusnými kotouči CS 10, pro 1 kg u LNS a LNS-NG

