

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Hodnocení interakce lepidel využívaných v leteckém průmyslu

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Autor práce: Bc. Ondřej Anýž

Praha 2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Ondřej Anýž

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Hodnocení interakce lepidel využívaných v leteckém průmyslu

Název anglicky

Assessment of interaction of adhesives used in air industry

Cíle práce

Cílem diplomové práce je popsání vzájemné interakce lepidel a materiálů využívaných v leteckém průmyslu. Práce se především zaměřuje na hodnocení adhezních charakteristik lepidel. Mezi dílčí cíle práce patří provedení literární rešerše, na základě které bude vhodně indikován experimentální program. Řešení experimentálního programu povede k vlastnímu popsání a vyhodnocení interakce lepidel a různých druhů materiálů s odlišnou povrchovou úpravou, které se používají v konstrukcích ultralehkých letadel.

Metodika

- Současný stav řešeného problému (literární rešerše).
- Vlastní experimentální program (laboratorní experiment).
- Závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

60 s.

Klíčová slova

Adheze, pevnost ve smyku, povrchová úprava, typ porušení.

Doporučené zdroje informací

BLOCKLEY, R., SHYY, W.: Encyclopedia of aerospace engineering. 1st pub. Chichester: Wiley, 2010, s. 2056-2565.

Časopisy: Applied composite materials, Journal of Adhesion and Adhesives, Strojírenská technologie, Manufacturing Technology

EHRENSTEIN, G.W.: Polymerní kompozitní materiály, Nakladatelství Scientia 1. vydání, Praha, 2009, 351 s.

CHAWLA, KRISHAN K.: Composite Materials: Science and Engineering, 2. ed., New York: Springer, 1998, 542 s.

MATTHEWS, F.L., RAWLINGS, R.D.: Composite Materials: Engineering and Science Boca Raton: CRC, 1994, 480 s.

MOURITZ, A. P.: Introduction to aerospace materials. 1st pub. Cambridge: Woodhead, 2012, 621 s.

Nové materiály v leteckém průmyslu. 1. vyd. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1983, 80 s.

ZHANG, S., ZHAO, D.: Aerospace materials handbook. Boca Raton: CRC Press, 2013, 765 s.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 24. 1. 2016

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 05. 03. 2016

Čestné prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Hodnocení interakce lepidel využívaných v leteckém průmyslu vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 6. 4. 2017

Podpis: _____

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Petru Valáškoví, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za věcné rady, pokyny a odpovědi na mé dotazy při řešení zadaného úkolu. Dále bych chtěl poděkovat České zemědělské univerzitě za možnost řešit diplomovou práci v rámci grantu 2016:31140/1312/3109 - Výzkum mechanických vlastností vícesložkových polymerních systémů v průběhu jejich přípravy, zpracování a aplikace. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a trpělivost mě projevenou během celé doby studia.

Abstrakt: Teoretická část diplomové práce se zabývá seznámením s problematikou základů technologie lepení. Dále pak hodnocením degradačních vlivů dominantně působících v letectví. V poslední řadě také výčtem běžně používaných lepidel v letectví.

V experimentální části diplomové práce je řešeno lepení vybraných materiálů používaných v leteckém průmyslu (plátno Ceconite, ocelový plech, letecká překližka a pozinkovaný plech) s jedním jedno-komponentním lepidlem (Ekobond E610). Dále pak degradační zkouškou těchto vybraných lepených spojů. Degradace je hodnocena prostřednictvím smykové pevnosti v tahu. Tato pevnost lepených spojů je měřena univerzálním zkušebním strojem. Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny pomocí vhodně zvolených statistických metod.

Klíčová slova: Adheze, pevnost ve smyku, povrchová úprava, typ porušení.

Assessment of interaction of adhesives used in air industry

Summary: The theoretical part of the diploma thesis regards a technological bonding problem and then degradation effects which dominantly operate in aviation. The last one the diploma thesis contains of enumeration of glues which are ordinarily used in general aviation.

The Experimental part of the diploma thesis regards a bonding selected materials which are used in aviation industry (fabric Ceconite, steel plate, aircraft plywood and galvanized sheet) with one single component glue (Ekobond E610) and then degradation exams this selected bonding joints. Degradation is evaluated by lap-shear tensile strength. It is measured by using universal testing machine. Measuring values are evaluate by using appropriate choosing statistical methods.

Key words: Adhesion, Lap-shear tensile strength, surface finish, type of failure.

1. Úvod.....	3
2. Cíle diplomové práce	5
3. Technologie lepení – rozbor aktuální problematiky s ohledem na aplikaci v letectví.....	6
3.1. Adheze	6
3.2. Koheze	6
3.3. Difuzní teorie adheze	6
3.4. Elektrostatická teorie adheze	7
3.5. Chemická teorie adheze	7
3.6. Mechanická teorie adheze.....	7
3.7. Adsorpční teorie adheze.....	7
3.8. Smáčivost.....	7
3.9. Adhezní a kohezní typy poruch	8
3.10. Výhody a nevýhody lepených spojů.....	9
3.11. Vliv povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje	10
3.12. Koroze a degradace lepeného spoje.....	10
3.13. Lepidla běžně používaná v leteckém průmyslu	16
4. Experimentální část – metodika práce	19
4.1. Lepidlo EkoBond použité pro experiment.....	19
4.2. Tkanina Ceconite použitá pro experiment	20
4.3. Příprava vzorků.....	22
4.4. Univerzální zkušební stroj LABORTECH LabTest 5.50ST	25
4.5. Korozní komora BINDER MKF (E3)	27
4.6. Tryskací kabina.....	28
4.7. Elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 GMU	29
4.8. Metody statistické analýzy.....	30
5. Výsledky experimentu	35
5.1. Parametry drsnosti povrchu	35
5.2. Nedegradované vzorky	36
5.3. Degradované vzorky	42
5.4. Tkanina Ceconite	50
6. Závěr	53
7. Použité zdroje	55

8. Seznam tabulek.....	59
9. Seznam obrázků.....	60
10. Přílohy.....	62
10.1. Příloha 1 – drsnost	62
10.2. Příloha 2 (A) - vzorky bez degradace	62
10.3. Příloha 3 (A) – Degradované vzorky ocelový plech.....	63
10.4. Příloha 4 (A) – Degradované vzorky letecká překližka.....	65

1. Úvod

Technologie lepení se může mnohdy jevit jako velmi moderní technika spojování. Ovšem ve skutečnosti archeologické nálezy dokladují pravý opak. Například březová smola byla používána jako jistá forma lepidla již v době kamenné.

Podobným způsobem provází technologie lepení obor letectví. Obor letectví je relativně mladý obor, ale přesto se dokázal vypracovat mezi čelní obory používající moderní technologie a určující nové trendy. Technologie lepení provází letectví v podstatě od jeho počátků. Již první letadla byla vyráběna především z překližky a potahována plátnem. Většího průmyslového rozmachu dosáhla technologie lepení právě při výrobě překližek s pomocí syntetických lepidel. Například během druhé světové války byla velkým průkopníkem v oblasti lepených konstrukcí společnost De Havilland Aircraft Company se svým letounem Mosquito. Letoun byl vyroben z kombinace březové překližky a balzového dřeva. K lepení bylo použito kaseinové lepidlo a později již formaldehydové lepidlo. Tímto způsobem vyrobené letouny neměly, bohužel, příliš dlouhou životnost. Lepený spoj byl často degradován až za hranici použitelnosti. Problém byl ještě umocněn nasazením letounů ve válečných podmínkách. Výrobce tohoto fenomenálního letounu však ukázal, jaké možnosti tato technologie dává při stavbě letadel, kde je velmi zásadním parametrem úspora hmotnosti, které může být dosaženo právě s pomocí lepení. Po druhé světové válce firma De Havilland tuto technologii ještě vylepšila použitím fenolformalde-hydové pryskyřice, modifikované polyvinilformalem při výrobě letounu De Havilland DH.103 Hornet. Tento letoun byl přímým konstrukčním následovníkem letounu Mosquito. Vylepšením bylo použití duralového plechu lepeného jako potahu křídel.

Technologie lepení dnes zasáhla do všech možných odvětví průmyslu. V letectví je nejčastěji používána pro možnost spojovat různé materiály (případ této diplomové práce). Navíc poskytuje možnosti tvorby spojů takových tvarů a vlastností které nejsou běžnými konvenčními metodami spojování vůbec možné. Jednou z velmi důležitých vlastností je u letadel, vybavených přetlakovanou kabinou, možnost vytvořit těsné a dokonale nepropustné spoje. Další vlastnost, která je hojně využívána, je možnost tvorby průhledných a elektricky vodivých spojů. Toho je využíváno například u čelních oken dopravních letadel. Jejich okna jsou třívrstvá. Jednotlivé vrstvy kaleného skla jsou na sebe lepeny průhledným vodivým lepidlem, které tak současně zajišťuje i vyhřívání okna. Při stavbě letadel z kompozitních

materiálů nelze obvykle použít mnoho konvenčních technologií spojování materiálu. Lepení se tak výraznou měrou podílí i například na výrobě Boeingu 787. V jeho konstrukci bylo velmi často využito kompozitních materiálů. U malých letadel je nejčastěji lepen právě tkaninový potah řídicích ploch či celého trupu a také kompozitní části konstrukce letadla.

2. Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je popsání vzájemné interakce lepidel a materiálů využívaných v leteckém průmyslu. V teoretické části je práce zaměřena na popis základních principů lepení v leteckém průmyslu. Při řešení této části práce bylo čerpáno z různých dostupných vědeckých zdrojů.

Hlavní cíle experimentálního programu:

- hodnocení interakce vybraného lepidla EkoBond E610 a potahového plátna Ceconite, v závislosti na odlišné povrchové úpravě adherendu
- degradační zkouška hodnocená prostřednictvím smykové pevnosti v tahu

3. Technologie lepení – rozbor aktuální problematiky s ohledem na aplikaci v letectví

Lepení je definováno jako technologický postup, při kterém je dosaženo trvalého spojení stejných nebo rozdílných materiálů, za pomoci lepidla. Lepidlem se nazývá látka, která spojuje povrchy přilnavostí (adhezí) a vlastní soudržností (kohezí), bez významné změny struktury lepených materiálů. Hodnoty koheze jsou silně závislé na složení filmu lepidla při konečné fázi lepení. Adheze i koheze je uplatněna ve slepovaném spoji současně [1, 2].

3.1. Adheze

Adheze je definována jako schopnost přilnout. Jedná se o schopnost přenosu dvojice tečných sil ve styku dvou povrchů bez viditelného pohybu. Jde o výsledek současného působení fyzikálních sil, chemických a mezimolekulárních vazeb. Pro podrobnější popis adheze jsou často využívány čtyři základní teorie adheze [3]:

- difúzní teorie
- elektrostatická teorie
- chemická a adsorpční teorie
- mechanická teorie

3.2. Koheze

Koheze je obecně definována jako stav látky, při kterém drží pohromadě jednotlivé částice působením valenčních a mezimolekulárních sil. Její velikost vyjadřuje tzv. kohezní energie. Tato energie je popisována jako energie potřebná pro odtržení jedné částičky od zbytku plochy [4].

3.3. Difuzní teorie adheze

Difuzní teorie adheze je jedna z nejdůležitějších teorií adheze v této diplomové práci. Tato teorie popisuje adhezní vazbu jako vzájemné difuzní pronikání molekul adheziva do oblastí adherendu a opačně. Výsledná pevnost spoje pak tedy závisí nejvíce na těchto faktorech [5]:

- teplotě
- době kontaktu mezi adhezivem a adherendem
- molekulární hmotnosti polymerů
- vzájemné kompatibilitě polymerů [6]

Difuzní teorie je primárně využívána tam kde adhesivum i adherend jsou polymery s relativně dlouhým molekulovým řetězcem [7].

3.4. Elektrostatická teorie adheze

Elektrostatickou teorii adheze vypracoval B. V. Deryagin v roce 1940. Podle této teorie způsobují adhezi elektrostatické síly [7]. Lepený spoj je vlastně jakýsi kondenzátor kde adherend a film lepidla, tvoří systém u kterého, se desky s rozdílným nábojem vzájemně přitahují. Ovšem vliv elektrostatických nábojů na adhezi se, bohužel, nepodařilo dostatečně prokázat [3].

3.5. Chemická teorie adheze

U chemické teorie je pro vznik spoje potřebné vytvoření primárních kovalentních vazeb naskrz rozhraním. Tento jev je však velmi výjimečný, protože lepení většinou probíhá v takových termodynamických podmínkách, kdy je vznik chemické vazby obvykle vyloučen [1, 3].

3.6. Mechanická teorie adheze

Mechanická teorie adheze má dnes velmi omezené využití. Používá se pouze pro popis specifických případů adheze například pro adhezi ve výrobě překližek nebo pryžových směsí s textilním vláknem. Princip této teorie je založen na mikroskopických nerovnostech a trhlinách v adherendu do kterých pronikne kapalné adhezivo a po jeho zatuhnutí dojde k vytvoření lepeného spoje [7, 8].

3.7. Adsorpční teorie adheze

Pro tuto teorii je charakteristické vzájemné působení molekul adherendu a adheziva. Tudíž je absolutně nezbytné, aby oba dva typy molekul měly polární funkční skupiny schopné vzájemného působení [8]. Vznik samotného spoje je tak možno popsat ve dvou krocích:

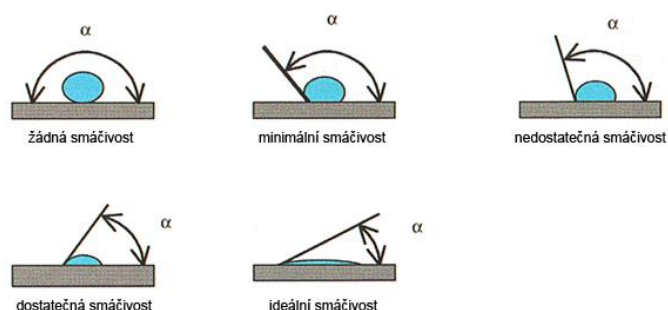
- transport molekul adheziva k povrchu adherendu
- při přiblížení pod vzdálenost menší, jak 5 nm jsou molekuly adheziva defacto absorbovány povrchem, a tak zakotveny s pomocí van der Waalsových mezimolekulárních sil [7]

3.8. Smáčivost

Smáčivost udává schopnost, s jakou kapalina přilne k povrchu adherendu. Smáčivost povrchu se určuje pomocí kontaktního úhlu. Při špatné hodnotě úhlu smáčivosti kapalina

velmi špatně ulpívá na povrchu (obr. 1.) [9]. Ideální pro hodnotu smáčivosti je stav, kdy je povrchové napětí lepidla nižší než povrchové napětí lepeného materiálu. Hodnotu smáčivosti lze příznivě ovlivnit dodatečným ošetřením povrchu (očistění, otryskání, odmaštění atd.). Jev smáčivosti je zobrazen na obr. 1.

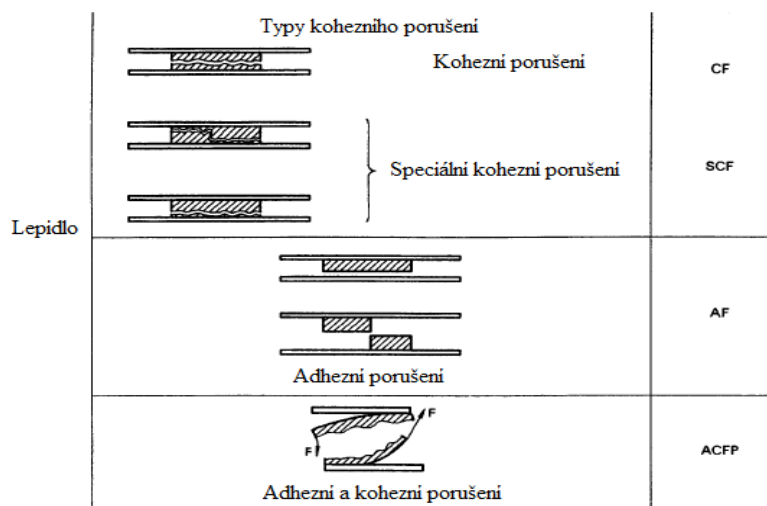
Obr. 1. Smáčivost lepidel [10]



3.9. Adhezní a kohezní typy poruch

U lepeného spoje může dojít k selhání jak adhezním typem poruchy ale i kohezním typem poruchy. Adhezní porucha je taková porucha, při které dojde k selhání vazby mezi adhezivem a adherendem [7]. Lepidlo se tedy kompletně oddělí od adherendu. Kohezní porucha je taková porucha, kdy dojde k přetržení v samotném lepidle (lepidlo zůstane na obou površích). Kohezní porucha je tak znakem vysoké adheze mezi adhezivem a adherendem. Tento typ poruchy dokazuje, že bylo dosaženo vysoké pevnosti lepeného spoje [7, 11]. Dále také mohou nastat případy speciálních poruch [11]. Jednotlivé možnosti poruch přehledně vyobrazuje obr. 2.

Obr. 2. Adhezní a kohezní porucha [11]



3.10. Výhody a nevýhody lepených spojů

Tak jako každá jiná technologie má i technologie lepení své přednosti ale i nedostatky. Pro správné a spolehlivé použití technologie lepení v průmyslu je vždy bezpodmínečně nutné zvážit všechny tyto aspekty.

Jako hlavní výhody se uvádí:

- Možnost spojování někdy velmi různorodých adherendů.
- Nedochází k narušení povrchu adherendu oproti např. nýtování apod.
- Možnost tvorby průhledných nebo různobarevných spojů. Typicky vrstvená čelní skla.
- Technologie lepení významně nezvyšuje hmotnost výsledné konstrukce.
- Útlum vibrací samotným lepeným spojem.
- V jisté míře i snadnost a rychlost tvorby spoje.
- Možnost tvorby kompletně plynotěsného a vodotěsného spoje.
- Při lepení není materiál teplotně ovlivněn.
- Do jisté míry i odolnost vůči korozi.
- Možnost tvorby el. vodivého nebo naopak nevodivého spoje [7].

Mezi hlavní nevýhody technologie lepení se řadí:

- Technologie lepení obvykle klade specifické nároky na přípravu povrchu adherendu.
- Výsledný spoj je nerozebíratelný.
- Citlivost vůči namáhání krutem a odlupování.
- Lepený spoj je také ve většině případů nevhodný při proměnlivém zatížení.
- Nevhodnost použití v případě dílů, které pracují za zvýšených teplot.
- Dosažení finální pevnosti spoje je mnohdy časově náročné.
- Nutnost dbát na ekologické předpisy při práci s lepidly.
- Životnost lepidla je někdy dobově omezená.
- Při průmyslovém použití je lepení náročnější na vybavení [5, 7].

Z výše uvedených bodů vyplývá, že většinu nedostatků lze vyřešit správným návrhem a konstrukcí lepeného spoje. Někdy je také velmi důležité lepené spoje vyzkoušet předem, jestli při dané aplikaci vyhovují.

3.11. Vliv povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje

Správná příprava povrchu je životně důležitá pro vytvoření odolného lepeného spoje [7]. Pouze správnou přípravou lepeného povrchu se dá dosáhnout maximální adheze a tím i pevnosti. Existuje mnoho metod předúpravy povrchu. Velký vliv také hraje velikost lepené plochy a její drsnost. Zásadní je tedy způsob předúpravy povrchu adherendu. Nejčastěji užívané metody předúpravy jsou mechanické, chemické a elektrochemické metody přípravy povrchu pro lepení [12, 13]. V diplomové práci byly vyzkoušeny mechanické a chemické varianty předúpravy povrchu a také jejich vzájemná kombinace.

Mezi mechanické možnosti jsou řazeny například technologie jako je: obrábění, broušení a tryskání [14]. V experimentální části této diplomové práce byly použity dvě technologie předúpravy povrchu, a to tryskáním a broušením.

Chemické možnosti jsou zastoupeny širokou škálou procesů např. různé druhy odmašťování, moření, různé primery či fosfátování [15]. Výslednou pevnost lepeného spoje výrazně ovlivňuje typ použité předúpravy. V experimentální části této diplomové práce byla použita technologie odmašťování.

3.12. Koroze a degradace lepeného spoje

Koroze je výsledek destruktivní chemické reakce mezi kovem nebo jeho slitinou a okolním prostředím. Atomy kovů jsou v přírodě obvykle přítomny v chemických sloučeninách (minerálech). Stejně množství energie, které je potřebné na dobývání kovů z minerálu, je vydáno i během chemických reakcí které stojí za jevem koroze. Koroze tak vrací kovy do jejich původní formy chemické sloučeniny, která je často podobná nebo identická s minerálem, z kterého byl kov vytěžen. Mnoho nekovových materiálů jako např. keramika, se skládá z kovů, které mají svojí chemickou reaktivitu uspokojenou vazbami s jinými reaktivními ionty, jako jsou např. oxidy a křemičitany. Takovéto materiály jsou tudíž chemicky nereaktivní a degradují za vysoké teploty nebo mechanickým opotřebením či erozí. Podobně i organické polymery jsou relativně nereaktivní, protože mají velmi stabilní kovalentní vazby primárně mezi atomy uhlíku. Koroze těchto materiálů tak není definována jako koroze, ale je uváděna pod pojmem degradace [16].

3.12.1. Různé způsoby degradace lepených spojů

Znalost podmínek, za kterých dochází k degradaci polymerních spojů a dále samozřejmě možnosti ochrany proti degradaci je velmi důležitá pro správné použití. Je přitom nutné uvědomit si, že k některým nevyhovujícím změnám polymerního materiálu může dojít již při výrobě nebo zpracování. Nejčastěji vlivem mechanického nebo tepelného namáhání [17]. Chemické reakce tak neprobíhají ve stejnorodém ale ve velmi různorodém prostředí za přítomnosti mnoha různorodých degradantů. Nejčastěji se jedná o přírodní prostředí, kde je adhezivo vystaveno působení atmosférického kyslíku, UV záření, vodě, ozonů, mikroorganismům, ionizačnímu záření aj. V oboru letectví je možné najít velké množství těchto vlivů podílejících se na degradaci lepených spojů. Například střídání teplot v závislosti na zeměpisné poloze a výšce, způsobu skladování atd. Tyto faktory mají na různé druhy lepidel různé degradační účinky. Při jejich vzájemné kombinaci se účinek na lepidlo často ještě zvýší. Například působení kyslíku nebo UV záření samostatně není pro spoj tak náročné jako když obě složky působí na lepený spoj současně [13].

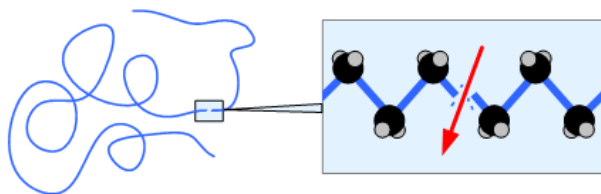
Odolnost vůči těmto jednotlivým degradantům je velmi důležité znát a předem s ní při návrhu dané konstrukce kalkulovat. Dále je zařazena kapitola pojednávající o jednotlivých degradantech.

3.12.2. Vliv působení zvýšené teploty

Vliv teplot je pro tuto diplomovou práci zásadním faktorem. Pojmem zvýšená teplota u polymerních materiálů rozumíme poměrně široké spektrum teplot. Například polystyrén (používán při stavbě kluzáků) je dlouhodobě použitelný do mezní teploty 80 °C, naopak polytetrafluoretylen je dlouhodobě použitelný do mezní teploty 250 °C [17]. Zvýšení teploty může mít v zásadě dva vlivy na polymerní materiály. První variantou je měknutí. V extrémním případě až do takové fáze, kdy se polymer chová jako tekutina.

Druhá varianta je změna struktury materiálu. Jedná se o proces často nazývaný jako depolymerizace. Makromolekulární řetězce se štěpí na nízkomolekulární řetězce, jakmile jsou polymery vystaveny teplotě větší, než je stanovená mezní teplota (viz obr. 3.). Tato teplota je samozřejmě jedinečná pro každý typ polymeru [17, 18]. Dále také nelze opomenout vliv působení snížené teploty na polymerní materiály.

Obr. 3. Štěpení polymerního řetězce za zvýšené teploty [18]



Snížená teplota vyvolává u polymerních materiálů celou řadu problémů, což platí i pro prudké změny teplot. Vliv změny teploty je jedním z dílčích cílů této diplomové práce. V prostředí letectví totiž dochází k prudkým změnám teplot během provozu. Z toho důvodu je do experimentální části této práce zařazena teplotní degradace a její působení na testované lepidlo. Teploty se mohou pohybovat v letové hladině FL330 tedy okolo 10000 metrů přibližně kolem $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naopak na sluncem rozpálené letištní stojánce může teplota dosahovat až k $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. K dalšímu zvýšení teploty na exponovaném dílu může dojít vlivem nevhodně zvoleného barevného schématu (tmavých odstínů). U velmi rychlých letadel je také důležité pamatovat na vliv aerodynamického ohřevu. Bývá obvykle vyjádřen výpočtem TAT (total air temperature – jehož je aerodynamický ohřev součástí) Teplotní rozdíly tak mohou nabývat značných hodnot.

3.12.2.1. Vliv působení zvýšené teploty – lepidla na bázi termoplastů

Lepidla na bázi termoplastů mohou vykazovat vynikající vlastnosti při pokojové teplotě. Ovšem jakmile se provozní teplota přiblíží k mezní teplotě pro dané lepidlo, dochází k jeho ztekucování, deformaci lepeného spoje a následně ke kohezní poruše [8].

3.12.2.2. Vliv působení zvýšené teploty – lepidla na bázi termosetů

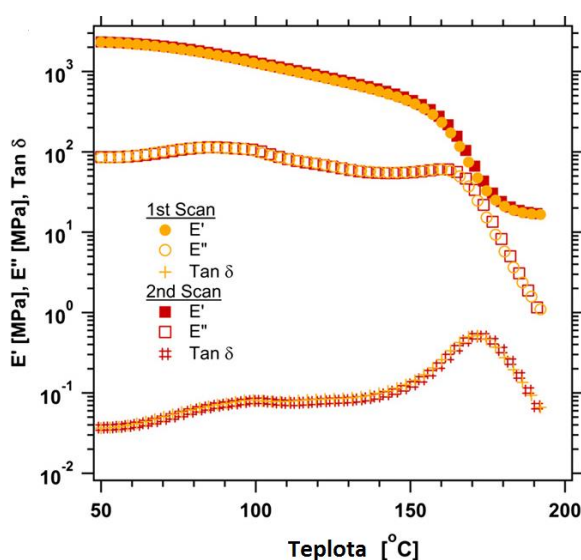
Lepidla na bázi termosetů nemají teplotu tání. Mnohé z těchto materiálů jsou vhodné pro aplikace s vysokými teplotami. Kritickým faktorem je rychlost snížení pevnosti v důsledku tepelné oxidace a pyrolýzy [8]. Některá lepidla na bázi termosetů mohou být použita dlouhodobě až kolem teploty $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

3.12.2.3. Vliv působení zvýšené teploty – epoxydová lepidla

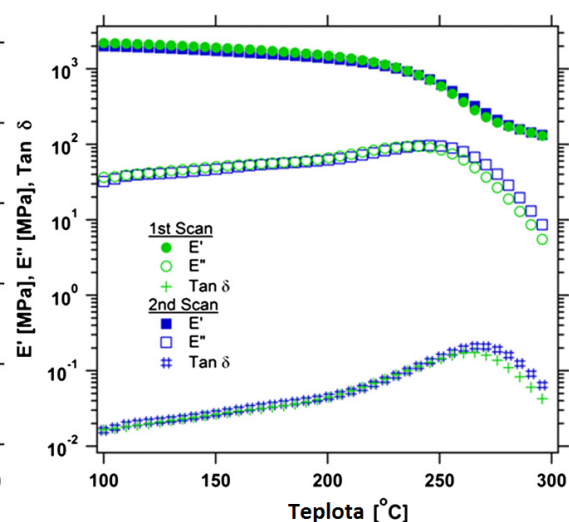
Epoxydová lepidla jsou v letectví jedna z nejčastěji používaných lepidel. Běžně bývají používány pro lepení kov – kov, voštinových struktur, či spojů kompozitních materiálů. V leteckém průmyslu použité, mnohdy jedinečné aplikace, vyžadují odolnost vysoké teplotě a zároveň odolnost proti únavě [19]. Epoxydová lepidla jsou obvykle omezena na aplikace

do teploty 120 °C [7]. Některá lepidla mohou být krátkodobě vystavena teplotě až 260 °C [8]. Vliv působení zvýšené teploty může být měřen např. pomocí termogravimetrické analýzy. Předpokladem této metody je, že současně s tím, jak jsou postupně degradovány chemické vazby (obr. 3.) uvolňují se těkavé látky což vede ke ztrátě hmotnosti. Nevýhodou této metody je měření degradace při teplotách vyšších, než je použitelný provozní rozsah lepidla [20]. Druhou možností je měření ztráty adheze. V grafu (obr. 4.) je vyobrazena změna modulu pružnosti v tahu a změna smykové pevnosti u epoxydového lepidla EPON 828 s tužidlem Ancamine 2049 v závislosti na teplotě. V grafu (obr. 5.) je pro porovnání vyobrazen vliv změny tužidla u lepidla EPON 828 + tužidlo DDS [20].

Obr. 4. EPON 828/Ancamine 2049 [20]:



Obr. 5. EPON 828/DDS [20]:



Z výše uvedeného vyplívá rozdíl mezi tepelnou stabilitou při použití různých typů tužidla [20].

3.12.3. Vliv působení vody a vodní páry

Vliv působení vody je jeden z dalších důležitých faktorů v této diplomové práci. Ztráta pevnosti a následný lom lepeného spoje je často přičítán přítomnosti vody. Předpokládá se, že určujícími faktory je prostorové rozložení vody a jeho kumulativní účinek v průběhu času. Prostorové rozložení vody se řídí časem expozice, koncentrací vody v okolí a difuzních vlastnostech lepidla při dané teplotě [21]. Voda tedy degraduje lepený spoj dvěma způsoby. Prvním způsobem je úplné nasycení vrstvy lepidla vodou. Druhý, ještě závažnější způsob, je koroze na rozhraní lepidla a lepeného materiálu (adheziva a adherendu). Oba způsoby nakonec vedou k fatální destrukci spoje. Je tedy velmi důležité nezanedbat otázku vlhkosti

pro správnou životnost lepeného spoje. První z popsaných problémů lze částečně ovlivnit správnou délkou obnažené hrany spoje. Druhý z popsaných případů zase správnou volbou úpravy povrchu [21]. V prostředí letectví se s vlhkostí setkává lepený spoj velmi často. Toto bývá způsobeno jednak střídáním klimatických podmínek (teploty a námraza) ale také samotným určením letadla (např. letadla z kategorie hydroplánů nebo letadla provozovaná v přímořských oblastech).

3.12.4. Vliv působení kyslíku

Vzdušný kyslík oxiduje polymery převážně za zvýšených teplot. Polymer absorbuje kyslík čímž většinou vzniknou hyperoxidové skupiny, které se dále později rozloží na další volné radikály. Volné radikály jsou velmi aktivní pro nastartování procesu degradace. Tato tepelně oxidační degradace je obvykle nazývána autokatalytickým procesem. Protože hyperoxidové skupiny a volné radikály jsou současně jejími katalyzátory. Pevnostně bývá uváděn údaj, že navázáním 1 % O₂ klesá pevnost mnohdy až o 50 %. Jako antioxidanty jsou používány zejména látky s obsahem síry nebo estery H₃PO₄. Tyto látky pak pohlcují volné radikály [13, 17].

3.12.5. Vliv působení ozónu

Atmosférický ozon je vytvářen ale i ničen především UV zářením. UV záření (s vlnovou délkou okolo 110 nm až 240 nm) produkované sluncem ve vyšších vrstvách atmosféry zasahuje molekuly obyčejného kyslíku O₂ a tím je rozštěpí na dva samostatné kyslíky. Volné atomy kyslíku pak mohou reagovat s molekulami kyslíku za vzniku molekuly ozonu [22]. Do nižších vrstev atmosféry pak proniká difuzí a jeho koncentrace ve vzduchu bývá okolo 10⁻⁶ objemového procenta. Tato zdánlivě malá koncentrace přesto způsobí stárnutí polymerů. Stárnutí působením ozonu se projevuje zejména u pryžových materiálů z nenasycených kaučuků [17]. Polymery jsou tedy náchylné k degradaci ozonem, důsledkem vystavení působení ozonu může být štěpení řetězce nebo porušení příčných vazeb [23]. Tomuto jevu lze velmi dobře bránit přísadami anitozonantů [24].

3.12.6. Vliv působení UV záření

Ultrafialové záření se řadí na pozici nejškodlivějšího faktoru, který se podílí na procesu stárnutí polymerních materiálů. Jedná se o tu část slunečního záření s vlnovou délkou okolo 300 nm až 400 nm. Energie tohoto záření je dostatečná k trvalé degradaci polymerů. UV záření které projde molekulou jí uvede do silně aktivovaného stavu [17]. Pro zmírnění vlivu

UV záření na materiál jsou do polymerních materiálů přidávány pohlcovače UV záření, které fungují na principu pohlcení škodlivého UV záření. Pohlcovače změny škodlivé záření na neškodné, případně na teplo, které se rozptýlí v polymerní matrici. Typickými představiteli pohlcovačů UV záření jsou Hydroxybenzofenon, Hydroxyfenyl benzotriazol [25]. Vystavení nadměrnému účinku UV záření může u polymerních materiálů vyvolat například ztrátu lesku povrchu, povrchové změny barvy, odlupování povrchu pryskyřičné matrice nebo důlkovou korozi [26]. Životnost tkaninového potahu malých letadel je silně ovlivňována působením UV záření. Ochranou proti působení UV záření je v praxi například vhodná vrstva finálního nátěru letadla s přísadou pohlcovačů UV záření.

3.12.7. Vliv působení záření s vysokou energií

Tímto zářením obvykle myslíme gama záření (γ) a další typy ionizujícího záření včetně toho kosmického. V oboru letectví se mohou výrobky s těmito typy záření snadno setkat např. kryt radaru nebo při letu ve velké výšce je letoun vystaven kosmickému záření. Toto záření vyvolává u některých polymerů destrukční reakce, při kterých dochází k odštěpování plynných produktů (H, HC, HCl atp.). Většinou se ozáření projevuje zežloutnutím barvy. Při vyšší dávce záření materiál dále tmavne ale také křehne [17]. Důležité je pamatovat na to, že každý polymer má vlastní reakci na ozáření. Výsledek závisí nejen na typu polymeru, ale také na druhu stabilizátoru a přísad obsažených v polymeru [27]. Úroveň kosmického záření se s vzrůstající výškou zvyšuje. A má tak vliv jak na materiály použité v konstrukci, tak i na osádku stroje samotného.

3.12.8. Vliv působení mikroorganismů

Jedná se o korozi biologického typu. Setkáváme se především s případy napadání plísněmi, což není záležitostí pouze tropického podnebného pásu. O náchylnosti materiálu k biologické korozi rozhoduje především jeho složení (molekulová hmotnost, chemická struktura atp.). Nejnáchylnějším jsou obecně měkčené plasty. Mikroorganismy napadají široké pole přísad ať už jsou jimi různá plniva, změkčovadla, tepelné stabilizátory či maziva. Ochrany materiálů může být dosaženo do určité míry prostřednictvím povrchové úpravy. Důležitá je zde důsledná kontrola fyzikálních, chemických a biologických podmínek. Povrch materiálu by měl být inertní, jak je to jen možné. Dříve také bylo velmi rozšířené použití biocidů, ale ukazuje se, že bakterie si umí vypracovat jakousi rezistenci na tyto prostředky [17, 28]. V oboru letectví tento problém postihuje především starší letadla dřevěná

konstrukce, které mohou být napadeny různými plísněmi. Lepený spoj je plísní degradován mnohdy až za hranici použitelnosti. Příčinou bývá téměř vždy nevhodný typ konstrukčního lepidla použitý v minulosti v kombinaci se špatným hangárováním.

3.13. Lepidla běžně používaná v leteckém průmyslu

Technologie lepení je v letectví využívána od samých počátků oboru z jednoduchého důvodu. První letadla byla z velké části vyrobená z překližky a plátna. Které nebylo do jisté míry možné spojovat tehdejšími konvenčními metodami.

Diplomová práce je zaměřena převážně na lepidla používané v oblasti General aviation (GA) v češtině tzv. všeobecného letectví. Obvykle se zde jedná o letouny kategorie sportovních letadel do maximální vzletové hmotnosti 5700 Kg. Diplomová práce je řešena v návaznosti na praxi.

3.13.1. Aerodux

Jedná se o dvou komponentní pryskyřičné lepidlo na bázi fenol-resorcinolu. Toto lepidlo je využíváno speciálně na dřevěné konstrukce, u kterých je kladen důraz na voděodolnost a tepelnou odolnost. Lepidlo je schváleno německým úřadem pro civilní letectví (LBA) pro použití při lepení dřevěných konstrukcí letadel. Lepidlo je dodáváno ve dvou oddělených baleních, jednak tekutina fenol-resorcinol a jeho druhá část, tedy tužidlo, je prášek Härter HRP 150. Pro finální použití je namícháno do medovité konzistence. Výrobce udává poměr na 100 jednotek lepidla 20 jednotek tužidla. Doba zpracování je závislá na okolní teplotě obvykle ale maximálně do 1 hodiny. Začátek tuhnutí se projeví zrosolováním lepidla. Povrchová příprava je vyžadována maximálně čistá tedy zbavená prachu a jiných nečistot. Lepené desky by měly být rovnoměrné tloušťky. Lepidlo je v Čechách s úspěchem používáno při stavbě či opravách historických letadel. V poslední době bylo s úspěchem použito například při stavbě letadel jako je Zlín XIII nebo Beta Minor Be-50 [29, 30].

3.13.2. Araldite 2010

Jedná se také o dvou komponentní rychle tuhnoucí epoxidové lepidlo. Toto lepidlo se používá pro široké rozpětí materiálů od kovů, keramiky, skla, gumy až po plasty. Obě složky lepidla jsou umístěny do dvou vytlačovacích a vzájemně mísících se kartuší. Tak je zajištěna správná ale i velmi snadná příprava. Velkou výhodou tohoto lepidla je jeho malá smrštitivost při tuhnutí. Lepidlo bylo vyvinuto Britskou společností Aero Research Limited ovšem nyní je vyráběno firmou Huntsman Advanced Materials. Příprava povrchu by měla zahrnovat

odstranění všech nečistot, olejových stop a jiné mastnoty s pomocí odmašťovacích prostředků acetonu nebo isopropanolu. V žádném případě nepoužívat na odmaštění alkohol nebo benzín či jiná ředidla. Nejdokonalejší předpříprava povrchu vyžaduje mechanické broušení nebo chemické leptání. Při aplikaci lepidla je doporučována vrstva 0,05 mm až 0,1 mm která obvykle zajišťuje maximální hodnotu pevnosti. V České republice je lepidlo používáno např. firmou Skolil Kompozit při výrobě různých dílů pro leteckou výrobu [31, 32].

3.13.3. New super seam

New super seam je lepidlo pro lepení potahové tkaniny Ceconite. Jedná se o variantu k lepidlu použitému v praktické části této diplomové práce. Toto lepidlo je založeno na vinylové bázi. Před aplikací se nijak neředí. Použije se přímo v dodaném stavu. Pouze v případě že lepidlo houstne nebo začíná schnout během použití, přidá se MEK (metyl etyl keton) pro dosažení původní viskozity. Aplikuje se přímo na čistý epoxidovým základem ošetřený povrch. Tkanina se přiloží rovnou do vlhkého lepidla a zatlačí tak aby došlo k dokonalému propojení tkaniny s lepidlem. Pracuje se na krátkých úsecích, tak aby se předešlo zasychání lepidla během aplikace. V Čechách je importérem dodáváno ve dvou baleních po 1 galonu (3,79 litrů) nebo 1 quartu (0,946 litrů). Lepidlo nesmí být během skladování a přepravy vystaveno teplotě vyšší než 38 °C a dále také mrazu. Pokud bylo lepidlo vystaveno vyšší teplotě zbarví se do karamelové barvy. Lepidlo je vysoce hořlavé, dráždí oči a kůži, při dlouhodobější inhalaci může poškodit zdraví. Jeho hlavní nevýhodou je vyšší cena a pak problematická (drahá) letecká doprava nebezpečného materiálu (extra. hořlavé atd.) z USA [33, 34, 35].

3.13.4. Loctite 270

Jedná se o klasické anaerobní lepidlo na zajišťování závitů. Jednou z jeho nejvyhledávanějších vlastností využívaných v letectví je odolnost takto zajištěného spoje proti vibracím (nejčastěji na vrtulníkové technice). Lepidlo je možné nanést na jakékoliv kovové povrchy včetně nerez oceli, hliníku či pouze pokoveného povrchu. Maximální průměr zajišťovaného závitu je do M20, použitelný pro rozsah teplot -55 °C až 180 °C. Demontáž se provádí zahřátím zajištěného dílce. Lepidlo odolává slabému znečištění olejem. Samotný povrch je ale před montáží důležité očistit od nečistot a mastnoty. Lepidlo se vyznačuje zelenou barvou. Jeho aplikace je snadná z vlastní nádoby pomocí úzkého

aplikátoru. Lepidlo dokonale vyplní mikroskopické nerovnosti v závitě, a tak závit bezpečně zajistí. Prodává se v baleních po 10 a 50 ml. [36, 37]. V České republice je používáno například při generálních opravách vrtulníku v Leteckých opravárnách Malešice.

3.13.5. Hysol 9309.3 NA

Hysol je dvou komponentní epoxidové lepidlo s příměsí skleněných částic o velikosti cca 0,13 mm pro udržení rovnoměrné tloušťky lepeného spoje. Používá se pro vlepení kovových dílů do kompozitní voštiny. Lepený spoj je velmi odolný proti vlhkosti a nejběžněji používaným tekutinám. Jeho hlavní výhodou je vysoká pevnost ve stříhu a dobrá adheze k hliníku. Směšovací poměr je 100 jednotek složky A (růžová barva) na 22 jednotek složky B (modrá barva) reakce během míchání uvolňuje teplo. Proto není doporučeno rozmíchávat najednou více jak 450 gramů lepidla. Zahřátí by mohlo způsobit rozklad chemické struktury lepidla. Před samotnou aplikací musí být povrch čistý a suchý. Po aplikaci lepidla by měly být lepené díly zafixovány s pomocí svorek minimálně po dobu 12 hodin při 25 °C. Během míchání a také samotné aplikace je důležité zajistit intenzivní ventilaci. Výpary z lepidla jsou zdraví škodlivé. Lepidlo je dodáváno v obalech o velikosti 1 quart (0,946 litrů) viz obr. 6. [38, 39].

Obr. 6. Běžně používaná lepidla [29, 31, 34, 37, 38]



4. Experimentální část – metodika práce

V této kapitole je popsána metodika experimentální části práce, tj. příprava zkušebních vzorků, u kterých byly testovány různé povrchové úpravy, různé druhy materiálů a jejich interakce s vybraným lepidlem. Dále použité zkušební vybavení a metody. Včetně použitých norem pro experimentální část.

4.1. Lepidlo EkoBond použité pro experiment

Všechny série vzorků byly lepeny lepidlem EkoBond E610 od amerického výrobce Stewart Systems. Jedná se o speciální, americkým úřadem pro civilní letectví (FAA) schválené, lepidlo pro lepení potahové tkaniny. Lepidlo je primárně určeno pro lepení potahové tkaniny Ceconite na kovový podklad nebo dřevěný podklad. Jedná se o lepidlo na bázi polychloroprenu a vody. Lepidlo se před použitím ani později nijak neředí. Způsob aplikace je dle návodu výrobce mírně odlišný pro aplikaci na kovový a dřevěný podklad.

Aplikace na kovový podklad: Lepidlo se nanese ručně štětcem tam, kde má být tkanina přichycena, a nechá se lehce odvětrat tak, aby bylo lepivé na dotek, přibližně po dobu 5 minut (záleží také na okolní teplotě a vlhkosti). Poté se tkanina ručně přitlačí na natřenou oblast a vyhladí do roviny. Když je tkanina správně umístěna, použije se úzká obyčejná žehlička, kalibrovaná na 135 až 149 °C, k aktivaci lepidla. Lepená oblast je přežehlena jedním tahem se silným přitlakem. Lepidlo se tak teplem aktivuje a tkanina bude držet na místě. Poté již stačí tkaninu prosytit lepidlem i z vrchní části a přebytečné lepidlo otřít. Čas zaschnutí závisí na teplotě a vlhkosti. Lepená plocha by měla vykazovat barvu indikující kompletní vazbu s podkladem [40].

Aplikace na dřevěný podklad: Lepidlo se nanese na podklad štětcem a tkanina přiloží do lepené oblasti. Tkanina se znovu prosytí a poté otře přebytečné lepidlo a současně vyhladí do roviny. Pro lepší vlastnosti spoje možno lehce přežehlit [40].

Životnost lepidla, která je výrobcem garantována, je při dodržení správných skladovacích podmínek 1 rok. Při aplikaci je nutné dodržovat základní bezpečnostní pravidla. Jinak může lepidlo způsobit různé alergické reakce a podráždění očí a kůže případně dýchacího ústrojí [41].

Lepidlo bylo dodáno firmou L D Aviation Prague v balení 1 quart (0,946 litrů) viz obr. 7. Na očištění pracovního náčiní od přebytečného lepidla se nejlépe osvědčilo ředidlo C6000.

V České republice je lepidlo v průmyslu požíváno například firmou Aircraft Industries Kunovice při výrobě letadel L-410 Turbolet, dále také Leteckými opravami Malešice při generálních opravách vrtulníkové techniky a mnoha dalšími servisními organizacemi.

Obr. 7. Lepidlo EkoBond E610



4.2. Tkanina Ceconite použitá pro experiment

Ceconite je speciální polyesterová tkanina použitelná ve většině náročných provozních podmínek i u letadel s velmi vysokým plošným zatížením. Používá se jak na akrobatických, tak velmi rychlých letadlech (kat. warbird), ale i zemědělských letadlech [42].

V dřívějších dobách byla letecká technika potahována různými tkaninami převážně na bavlněné či lněné bázi. Hlavní nevýhodou těchto materiálů byla nutnost při instalaci důkladně několikrát prosytit lakem, tak aby došlo k dokonalému napnutí tkaniny. Dále také životnost (UV záření) a vysoká hořlavost v důsledku prosycení [43].

U Ceconitu se dokonalého napnutí tkaniny dosahuje mnohem jednodušeji. Tkanina se dokonale napne za pomoci tepla. Obyčejnou, přesně kalibrovanou, žehličkou na teplotu 115,5 °C stačí přežehlit přilepenou tkaninu. U větších ploch je nutné žehličku nadlehčovat [44].

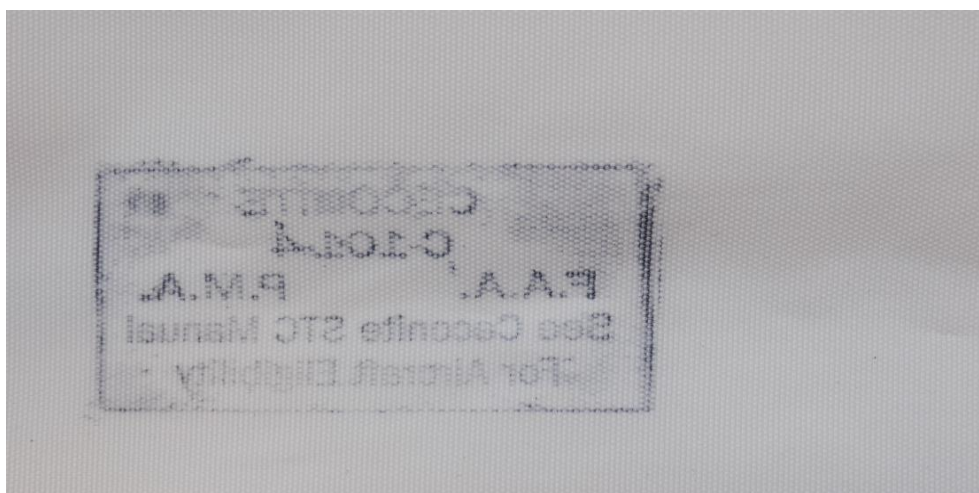
Tkanina je vyráběna ve třech variantách, které se liší ve svých vlastnostech. Obchodně je označována jako Ceconite 101, 102 a uncertified light. V experimentální části práce bylo v návaznosti na praxi použito pouze tkaniny Ceconite 101.

Tkanina Ceconite 101 je doporučena pro většinu vysoce zatěžovaných letadel. Má vysokou odolnost proti roztržení, dlouhou životnost a nízkou hodnotu prodloužení. Je dodávána v rolích o šířce 1,8 metrů a délce cca 91,5 metrů +/- 4,5 metrů. Číslo typového osvědčení tkaniny vydaného americkým úřadem civilního letectví je SA4503NM [42]. Samotná tkanina je zobrazena na obr. 8. Pro ilustraci možné velikosti potahovaných ploch je zařazen obr. 9. Znázorňuje tkaninu aplikovanou na křídle hornoplošníku American Champion Citabria.

Výrobce tkaniny deklaruje tyto hodnoty, (bez uvedení zkušebních norem a postupů):

- počet svazků vláken 57 + 22 na 1 cm², znázornění výpočtu svazků viz obr. 10.
- hmotnost – 115,2 gramu na čtvereční metr
- mez pevnosti – okolo 0,783 MPa
- odolnost proti protržení – 1,924 MPa
- pevnost v roztržení v podélném směru – 484 N, v příčném směru – 529 N [42, 45, 46].

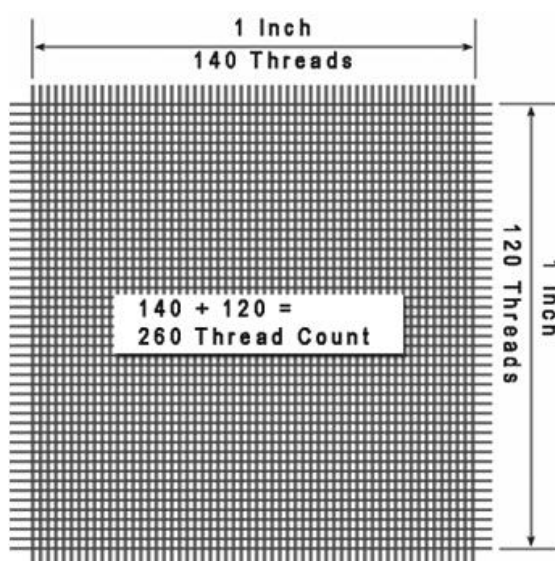
Obr. 8. Potahová tkanina Ceconite 101



Obr. 9. Křídlo hornoplošníku Citabria potažené tkaninou Ceconite 101 [47]



Obr. 10. Popis výpočtu svazků u tkanin [46]



4.3. Příprava vzorků

Vzorky byly připravovány s ohledem na normu použitou pro tahovou zkoušku (ČSN EN 1465). Rozměry připravených vzorků byly, délka 100 mm, šířka 25 mm a tloušťka 1,5 mm s přeplátováním 12,5 mm. Minimální počet vzorků připravených pro každý materiál a každou povrchovou úpravu byl vždy 6 referenčních vzorků. Samotná příprava vzorků probíhala v laboratořích Katedry materiálu a strojírenské technologie. Jednotlivé typy předúprav povrchu byly voleny s ohledem na možnosti, které mohou vzniknout v běžné praxi, s ohledem na kombinace používaných materiálů při technologii potahování letadel plátnem. V návaznosti na praxi bylo také nutné vyzkoušet změnu smykové pevnosti při zjednodušení pracovního postupu vypuštěním kroku aktivace lepidla teplem. Tento krok byl

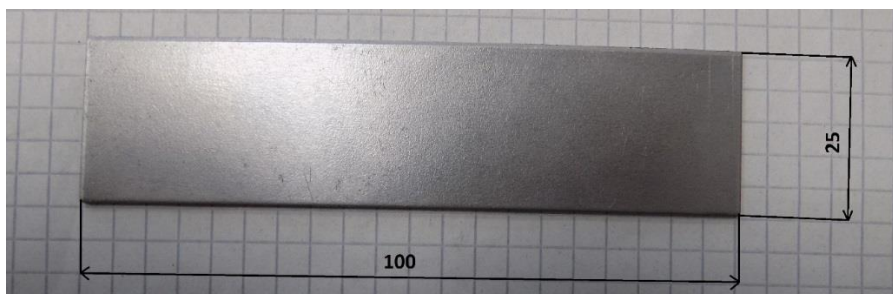
vyzkoušen hned na jedné z prvních sérií vzorků tryskaných ocelových plechů. V diplomové práci byly použity tyto následující druhy vzorků:

- ocelový plech S235J0 pouze odmaštěný
- ocelový plech S235J0 upravený otryskáním a následně odmaštěný
- ocelový plech s povrchovou úpravou žárovým zinkováním
- březová 3 vrstvá letecká překližka, tloušťka 1 mm

4.3.1. Příprava vzorků – ocelový plech odmaštěný

Jako první byla připravena série ocelových plechů pouze odmaštěných ředidlem Aceton. Materiál, ocelových plech S235J0, dodaný v tabulích o tloušťce 1,5 mm byl nastříhán na rozměry 100 x 25 mm viz obr. 11. Následně byly nastříhané plechy odmaštěny ředidlem Aceton a dále již rovnou použity na výrobu vzorků. Tato varianta byla vybrána pro ověření adhezních vlastností v porovnání s druhou souběžně připravovanou variantou.

Obr. 11. Ocelový plech pouze odmaštěný

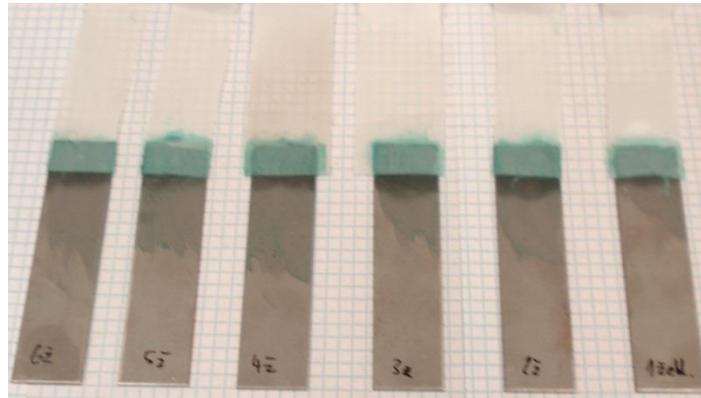


4.3.2. Příprava vzorků – ocelový plech upravený otryskáním

Druhou připravenou variantou vzorků byla série zkušebních těles se stejným výchozím materiálem (S235J0) a identickými rozměry. Předúprava povrchu byla provedena tryskáním v tryskací komoře viz kapitola 4.6. Před samotným nalepením tkaniny byl povrch ještě znovu odmaštěn ředidlem Aceton. Jak již bylo naznačeno výše u této povrchové úpravy byly vyzkoušeny dva pracovní postupy lepení tkaniny.

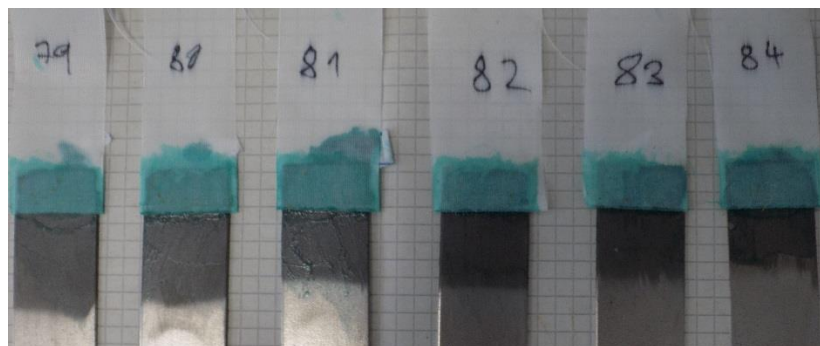
- série vzorků připravená přesně dle návodu výrobce lepidla viz obr. 12.
- série vzorků s modifikací návodu výrobce vypuštěním aktivace teplem v návaznosti na předchozí praxi viz obr. 13.

Obr. 12. Zkušební tělesa – lepidlo aktivováno teplem



Aktivace teplem proběhla v souladu s návodem výrobce, žehličkou kalibrovanou na teplotu cca 140 °C.

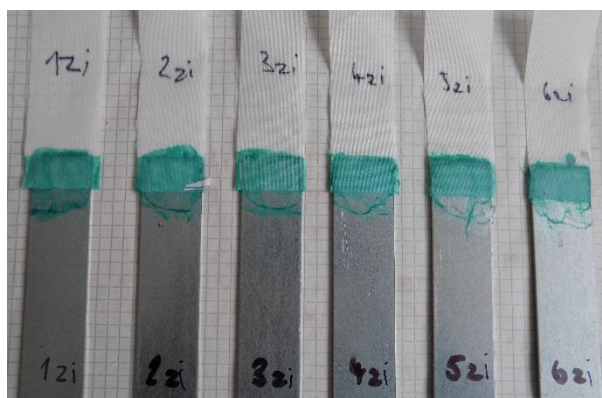
Obr. 13. Zkušební tělesa – modifikace vypuštěním aktivace teplem



4.3.3. Příprava vzorků – ocelový plech pozinkovaný

Dále byla připravena série vzorků, ocelový plech s povrchovou úpravou žárovým zinkováním. Tento povrch byl před samotným lepením pouze odmaštěn ředidlem Aceton. Tato varianta byla vybrána z důvodu většího reprezentativního vzorku testovaných povrchů a také pro ověření adhezních vlastností lepidla. Připravená zkušební tělesa jsou vyobrazena na obr. 14.

Obr. 14. Zkušební tělesa – ocelových plech pozinkovaný



4.3.4. Příprava vzorků – překližka

Poslední připravenou variantou byla série vzorků plátna lepeného na speciální březovou leteckou překližku. Překližka s tloušťkou 1 mm byla nařezána na rozměry o délce 100 mm a šířce 25 mm. Povrch byl zbaven nečistot před lepením obroušením smirkovým plátnem s číslem zrnitosti 120. Následně byla aplikována tkanina přesně dle návodu výrobce lepidla. Připravená zkušební tělesa jsou zobrazena na obr. 15. Tento typ materiálu byl vybrán z důvodu otestování obvykle používaného materiálu při výrobě nebo opravách nejčastěji historických letadel. Překližka tloušťky 1 mm se obvykle používá právě při potahování konstrukce dřevěných letadel. Celá konstrukce bývá ještě potažena tkaninou z důvodu zajištění lepší odolnosti a aplikace nátěru.

Obr. 15. Zkušební tělesa – letecká překližka

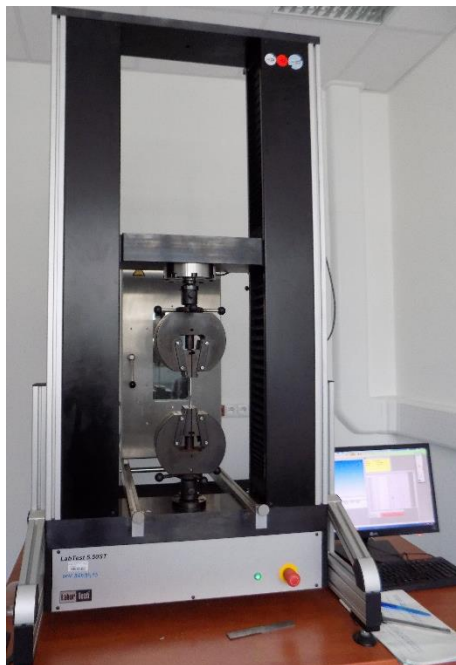


4.4. Univerzální zkušební stroj LABORTECH LabTest 5.50ST

Vzorky byly podrobeny v laboratoři Katedry materiálu a strojírenské technologie tahové zkoušce na univerzálním zkušebním stroji LabTest 5.50ST (obr. 16.) výrobní číslo: 46/12. Stroj je osazen snímací jednotkou AST typ KAF. Maximální možná zatěžující síla je

výrobce stroje stanovena na 50 kN. Pro vyhodnocení naměřených hodnot byl použit software Test & Motion stejného výrobce. Program zajišťuje přenos dat, řízení stroje, grafický záznam o provedené zkoušce dále je výstupem také tabulka naměřených hodnot a statistický výpočet. Jedná se o víceúčelový zkušební stroj. Stroj je vybaven dvěma sadami upínacích čelistí, teplotní komorou a počítačem s obslužným softwarem [48].

Obr. 16. Univerzální zkušební stroj LabTest



4.4.1. Stanovení smykové pevnosti v tahu

Stanovení smykové pevnosti v tahu bylo provedeno dle normy ČSN EN 1465 – Stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech. Za pomoci výše uvedeného univerzálního zkušebního stroje byly vzorky podrobeny tahové zkoušce. Její výsledek je vyjádřen jako aritmetický průměr a variační koeficient síly při přetržení v newtonech nebo jako napětí při přetržení v megapascalch. Pevnost ve smyku při tahovém namáhání je tedy vyjádřena jako podíl síly při přetržení a smykové plochy viz následující vzorec (1) dle [49]:

$$\delta = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Kde:

- δ ... [MPa] - pevnost ve smyku při tahovém namáhání

- $F... [N]$ - maximální hodnota síly při přetržení změřená zkušebním strojem
- $S... [mm^2]$ - plocha vypočtená jako součin šíře vzorku a délky přeplátování, změřeno posuvným měřítkem

4.4.2. Popis typu porušení dle ČSN ISO 10365

Pro popis jednotlivých typů porušení byla použita norma ČSN ISO 10365. Předmětem této normy jsou hlavní typy porušení u lepených spojů. Norma definuje hlavní typy poruch a ilustrativní způsobem zobrazuje typy porušení. K jednotlivým typům porušení jsou dále přiřazeny zkratky viz obr. 2 kapitola 3.9. [11]. V samotné experimentální části byl zaznamenán pouze typ Adhezního porušení (AF).

4.5. Korozní komora BINDER MKF (E3)

Hlavním cílem diplomové práce bylo ověřit dlouhodobé vlastnosti testovaného lepidla. Za tímto účelem byly připravené vzorky vloženy do korozní komory BINDER MKF (E3) viz obr. 17 a obr. 18. Tato komora umožňuje nastavit provozní rozsah teplot na -40 °C až 180 °C . Nastavitelný rozsah relativní vlhkosti je od 10 % do 98 %. Komora je řízena programovatelným regulátorem MB 1 [50]. Testované korozní prostředí bylo zvoleno v souladu se zkušební normou ČSN EN ISO 9142 ale také s ohledem na oblast použití zkoušených materiálů. Vzorky byly z komory vyjmuty vždy s týdenní periodicitou. Vytemperovány na laboratorní teplotu 23 °C a podrobeny tahové zkoušce.

Obr. 17. Korozní komora



Obr. 18. Vzorky v korozní komoře



4.5.1. Korozní prostředí dle ČSN EN ISO 9142

Z normy ČSN EN ISO 9142 byl vybrán zkušební cyklus D2. Tento cyklus byl vybrán s ohledem na praktické podmínky, které mohou nastat v leteckém provozu. Zkušební cyklus

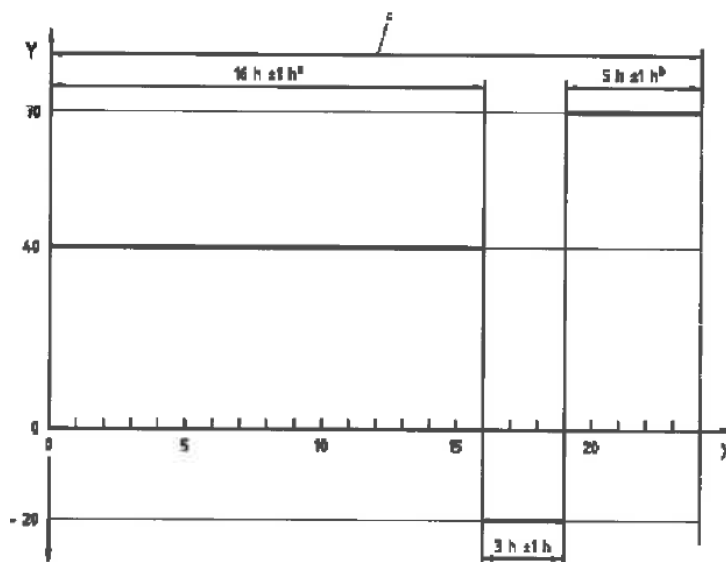
D2 zahrnuje rozsah teplot $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [51]. Teplota $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ zhruba odpovídá letové výšce 9000 m. Na tuto výšku jsou schopna dostoupat některá letadla s tkaninovým potahem řídicích ploch. Zkušební teploty $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ by bylo možné v praxi dosáhnout, například nevhodně zvoleným barevným odstínem povrchu. Výrobci dopravních letadel (Airbus, Boeing) v provozních příručkách uvádějí hodnoty povrchové teploty nad $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro výpočty vzletových parametrů. Střídání těchto teplot také může mít velmi prudký charakter.

Cyklus probíhá v těchto krocích:

- expozice na teplotě $70 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti $\geq 90\%$ po dobu 16 ± 1 hod.
- změna teploty na teplotu $-40 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a expozice na této teplotě po dobu 3 ± 1 hod.
- změna teploty na teplotu $70 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ při relativní vlhkosti $50 \pm 5\%$ a expozice na této teplotě po dobu 5 ± 1 hod. [51].

Průběh celého cyklu je graficky znázorněn na obr. 19.

Obr. 19. Průběh zkušebního cyklu D2 [51]



4.6. Tryskací kabina

Ocelové plechy použité na výrobu zkušebních vzorků byly tryskány v tryskací kabině ITB 65 (obr. 20). Použitým abrazivem byl Granát 80 (obr. 21). Jedná o sloučeninu SiO_2 a Fe_2O_3 a dalších oxidů. Tato technologie se používá v praxi leteckého opravárenství nejčastěji při generálních opravách příhradových konstrukcí trupů letadel.

Obr. 20. Tryskací kabina ITB 65



Obr. 21. Abrazivo granát 80



4.6.1. Měření parametrů drsnosti povrchu

Pro vyhodnocení drsnosti povrchu připravených materiálů byl použit drsnoměr výrobce Mitutoyo typ SurfTest 301 (obr. 22). Jedná se o přenosný drsnoměr s displejem, integrovanou tiskárnou a vlastní pamětí [52]. Byla změřena drsnost povrchu u obou variant ocelových plechů. Jak u varianty pouze odmaštěného plechu ale i u tryskaných vzorku. Získané parametry drsnosti Rz – hodnota výšky nerovnosti profilu a Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu byly změřeny na osmi bodech materiálu. Hodnota cutoff (zdvih měřicího hrotu) byla vždy 0,8 mm. Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulky a jsou součástí přílohy 1.

Obr. 22. Drsnoměr surfTest 301



4.7. Elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 GMU

Pro popis morfologie použité tkaniny a její interakce s povrchem byl použit rastrovací elektronový mikroskop – SEM, výrobce: TESCAN, typ: MIRA3 GMU (obr. 23). Mikroskop je vybaven Shottkyho autoemisní katodou. Umožňuje práci jak s vysokým, tak nízkým

vakuem v komoře mikroskopu a snímáním vodivých i nevodivých preparátů ve vysokém rozlišení [53]. Pro pohyb se vzorky je v komoře zabudován pěti-osý plně pohyblivý počítačově řízený stůl.

Obr. 23. Elektronový mikroskop Tescan



4.8. Metody statistické analýzy

Pro vyhodnocení dat, která byla získána během experimentu, byly použity vybrané metody statistické analýzy. Tyto metody umožňují posoudit vztahy mezi jednotlivými výsledky, které byly zjištěny experimentálně. Data byla analyzována s pomocí statistického softwaru Eviews Enterprise Edition 7.0.0.1. a MS Excel 2016. Výsledky celé analýzy jsou shrnuty v kapitole 5.

Pro statistickou analýzu byly vybrány vhodné statistické metody. Pro základní popisnou statistiku byl vypočten aritmetický průměr, medián, směrodatná odchylka, variační koeficient. Pro podrobnější statistické posuzování byl zvolen T – test, F – test a ANOVA.

4.8.1. Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je nezákladnější a nejčastěji používanou charakteristikou úrovně (polohy) rozdělení. Průměry jsou založeny na všech jednotkách statistického souboru. Vůbec nejpoužívanějším druhem průměru je průměr prostý aritmetický, který byl použit pro výpočet dílčích průměrů jednotlivých podsouborů. Vypočten byl podle následujícího vzorce (2) [54]:

$$\tilde{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

- x_i – naměřené hodnoty
- n_i – počet pozorování

Vlastnosti aritmetického průměru jsou významné nejen v teorii, ale také při jeho výpočtu. Mezi tyto vlastnosti patří například nulový součet odchylek od průměru, zvýšení naměřených hodnot o konstantu navýší o tuto konstantu aritmetický průměr apod. Pro účel této diplomové práce je však důležitá vlastnost, že pokud je datový soubor rozdělený do k dílčích podsouborů a jejich jednotlivé průměry a počty pozorování jsou známy, je možné vypočítat celkový průměr souboru podle vzorce (3), dle [54]:

$$\tilde{x} = \frac{\sum_{i=1}^k \tilde{x}_i n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (3)$$

- \tilde{x}_i - jednotlivé dílčí průměry
- n_i – počet pozorování v jednotlivých podsouborech

4.8.2. Medián

Medián patří do druhé skupiny charakteristik polohy rozdělení. Od průměru se liší tím, že je založen pouze na vybraných hodnotách souboru. Jedná se o hodnotu, která se po seřazení datového souboru nalézá přesně uprostřed [54]. Výpočet mediánu byl zařazen z důvodu velké citlivosti průměru na extrémní hodnoty a udává tak konkrétnější obraz o charakteristikách polohy rozdělení statistického souboru.

4.8.3. Směrodatná odchylka

Míry variability zjišťujeme zejména proto, abychom byli schopni posoudit vypovídací schopnosti aritmetického průměru. Obecně je možné konstatovat, že čím je variabilita souboru nižší, tím má aritmetický průměr lepší vypovídací schopnost [54].

Směrodatná odchylka je jednou ze základních měr variability. Řadí se mezi takzvané absolutní míry variability, které vyjadřují proměnlivost statistického souboru, a to v absolutní velikosti. Směrodatná odchylka je odmocnina z takzvaného rozptylu, který měří variabilitu hodnot kolem aritmetického průměru a zároveň vzájemné odchylky od jednotlivých hodnot znaku. Jeho značnou interpretační nevýhodou je fakt, že je vyjádřen ve čtvercích použité jednotky. Právě díky svým interpretačním vlastnostem je směrodatná odchylka pro použití v této diplomové práci vhodnější, než rozptyl. Směrodatná odchylka je vypočtena dle vzorce (4) [54]:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

- x_i – naměřené hodnoty
- \bar{x} – jednotlivé dílčí průměry
- n – počet pozorování v jednotlivých podsouborech

4.8.4. Variační koeficient

Pomocí relativních měr variability je možné srovnávat variabilitu statistického znaku u minimálně dvou souborů. Tyto soubory se mohou výrazně lišit úrovní i variabilitou statistických znaků [54].

Variační koeficient je nejčastěji používanou mírou relativní variability. Jedná se o poměr směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Přestože je možné jej vyjádřit v procentech, jeho hodnoty se pohybují v neomezeném intervalu, avšak obecně je možné říci, že pokud je variační koeficient vyšší než 50 %, indikuje různorodost statistického souboru. Variační koeficient je vypočten podle následujícího vzorce (5) [54]:

$$V_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (5)$$

- \bar{x} – aritmetický průměr
- s_x – směrodatná odchylka

4.8.5. T – test

T – test, neboli test o shodě dvou středních hodnot, patří mezi nejčastěji používané testy v různých oblastech lidské činnosti. Ať už se jedná o průmysl, marketingový průzkum nebo

vědu. Umožňuje porovnávat různé situace, kdy jsou porovnávány mezi sebou dva nezávislé výběry. Někdy se také nazývá jako dvou výběrový T – test. Tento test je možné použít, při dodržení následujících předpokladů – výběry musí být nezávislé a mají normální rozdělení [54, 55]. Pro účel experimentu této diplomové práce byly tyto podmínky splněny. Test je možné provádět za těchto třech předpokladů:

- známe rozptyly obou souborů
- neznáme rozptyly obou souborů, ale předpokládáme, že jsou shodné
- neznáme rozptyly obou souborů a předpokládáme, že jsou různé [54, 55].

Pro každý T – test v této diplomové práci bylo předpokládáno, že nulová hypotéza říká, že střední hodnoty obou souborů jsou stejné ($H_0: \mu_1 = \mu_2$). Oproti tomu byla postavena alternativní hypotéza, že střední hodnoty obou souborů se liší ($H_1: \mu_1 \neq \mu_2$). Protože T – test byl počítán pomocí statistického softwaru, vyhodnocení hypotézy bylo provedeno na základě tzv. p – hodnoty, hladiny významnosti a pravděpodobnosti chyby prvního druhu α . P – hodnota je pravděpodobnost, se kterou platí nulová hypotéza. Obecně platí, že pokud $\alpha > P$ - hodnota, zamítáme nulovou hypotézu na dané hladině významnosti. Hladina významnosti byla zvolena pro každý test 95 %, tudíž $\alpha = 0,05$.

4.8.6. Jednofaktorová analýza rozptylu a F – test

Jednofaktorová analýza rozptylu, neboli ANOVA, se obecně používá v případě potřeby ověřit závislost kvalitativní a kvantitativní proměnné. Pomocí ANOVY je možné ověřit významnost rozdílu mezi výběrovými průměry většího počtu výběrů, porovnávání středních hodnot v několika skupinách, zjištění závislosti číselné proměnné na slovní [56].

V praktické části této diplomové práce představovala slovní proměnnou doba degradace a číselnou proměnnou pevnost ve smyku vyjádřená v MPa. Bylo testováno, zda je pevnost ve smyku závislá na době degradace.

ANOVA, stejně jako většina statistických testů, má několik předpokladů, které musí být dodrženy. Prvním předpokladem je, že musí být k dispozici 2 a více nezávislých výběrů (zajištěno konstrukcí experimentu) z normálního rozdělení, kde střední hodnota a rozptyl jsou neznámé parametry základního souboru. Rozptyly jednotlivých skupin jsou shodné [56]. Tyto předpoklady je nezbytné ověřit, aby mohla být ANOVA použita.

Shodu rozptylů bylo třeba otestovat pomocí Bartlettova testu, který je zároveň citlivý na odchylky od normality. Samotná ANOVA je vůči odchýlkám od normálního rozdělení relativně odolná [56].

Pro posouzení závislosti pevnosti ve smyku na době degradace byla vyslovena následující hypotéza (v obecném zápisu):

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$ Tato nulová hypotéza říká, že pevnost ve smyku není závislá na době degradace, tj. efekty jednotlivých úrovní faktoru jsou zanedbatelné.

$H_1: \text{non } H_0$ Naproti tomu alternativní hypotéza říká, že alespoň jedna z úrovní se liší, tudíž pevnost ve smyku je závislá na době degradace.

Dále bylo vypočteno testové kritérium F, které vychází z F – testu. F – test se také označuje jako test hypotézy o shodě dvou rozptylů, neboť je nejčastěji využíván pro ověření tohoto předpokladu u jiných testů. Vycházíme z předpokladu, že jsou k dispozici dva nezávislé náhodné výběry o rozsahu n_1 a n_2 a bylo vypočteny (případně jsou známé) výběrové rozptyly obou výběrů [54, 55].

Testy byly, stejně jako v předchozím případě, vyhodnoceny na základě P – hodnoty, hladiny významnosti a pravděpodobnosti chyby prvního druhu α . P – hodnota byla vypočítána softwarem, hladina významnosti byla zvolena na 95 % a tudíž pravděpodobnost chyby prvního druhu je 5 %. Výsledky jsou uvedeny a vyhodnoceny v kapitole číslo 5.

5. Výsledky experimentu

V následující kapitole jsou vyobrazeny a analyzovány výsledky experimentální části této diplomové práce. Jde o popis naměřených výsledků smykové pevnosti jak vzorků z počáteční fáze (bez degradace) tak i vzorků z hlavní fáze tedy degradační zkoušky.

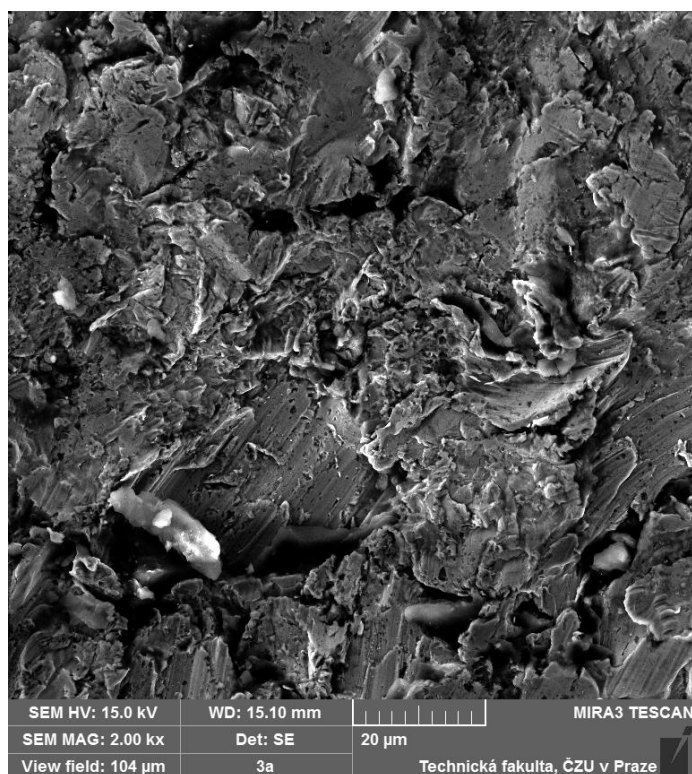
5.1. Parametry drsnosti povrchu

Před samotným procesem lepení byl nejdříve analyzován povrch ocelových adherendů z hlediska parametru drsnosti povrchu. Za tímto účelem bylo použito profilometru SurfTest 301, kterým byly změřeny základní parametry drsnosti povrchu Ra a Rz viz tab. 1. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v příloze 1. Na obr. 24 je zobrazen ocelový plech, upravený tryskáním před procesem lepení, který byl nasnímán na elektronovém mikroskopu.

Tab. 1 Hodnoty parametrů drsnosti

	Pouze odmaštěno		Odmaštěno a tryskáno	
	Ra	Rz	Ra	Rz
Průměr [μm]	0,91 \pm 0,1	5,30 \pm 0,83	1,95 \pm 0,23	10,06 \pm 0,46
Variační koeficient	0,11	0,16	0,12	0,05

Obr. 24. Povrch ocelového adherendu upravený tryskáním



5.2. Nedegradované vzorky

V prvotní fázi experimentu bylo nejdříve důležité ověřit samotný pracovní postup pro aplikaci lepidla. Za tímto účelem byly nachystány následující typy vzorků.

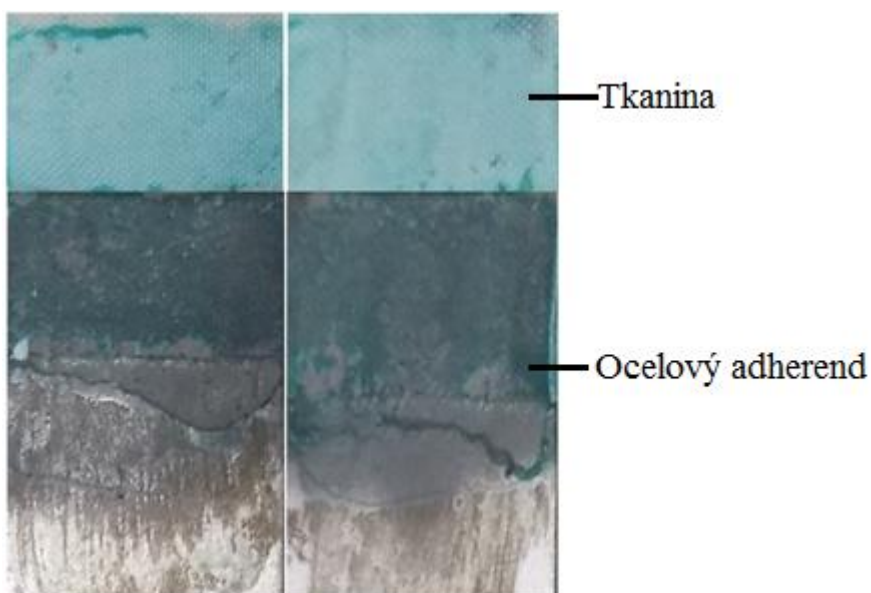
- ocelový plech S235J0 pouze odmaštěný
- ocelový plech S235J0 upravený otryskáním a následně odmaštěný
- ocelový plech s povrchovou úpravou žárovým zinkováním
- březová 3 vrstvá letecká překližka, tloušťka 1 mm

Na výsledku této části byla dále založena výroba série vzorků pro degrační zkoušku. S povrchovou úpravou tryskáním tak byly připraveny dvě série vzorků (lepidlo aktivováno teplem – modifikace vypuštěním aktivace teplem).

5.2.1. Vzorky připravené přesně dle návodu výrobce lepidla

Byla připravena série vzorků přesně dle návodu výrobce lepidla, tj. aktivace lepidla teplem během procesu lepení. Tato série byla připravena z důvodu ověření praktických zkušeností s lepidlem, dále také pro výběr varianty určené k degradaci. Vzorky byly lepeny na tryskaný ocelový plech S235J0. Průměrná hodnota smykové pevnosti v tahu byla určena na $0,626 \pm 0,187$ MPa, variační koeficient 29,4 %. Naměřené hodnoty a statistický výpočet je uveden v příloze 2 (A) této práce. U všech dvanácti vzorků došlo vždy ke stejnému typu adhezního porušení (AF), viz obr. 25.

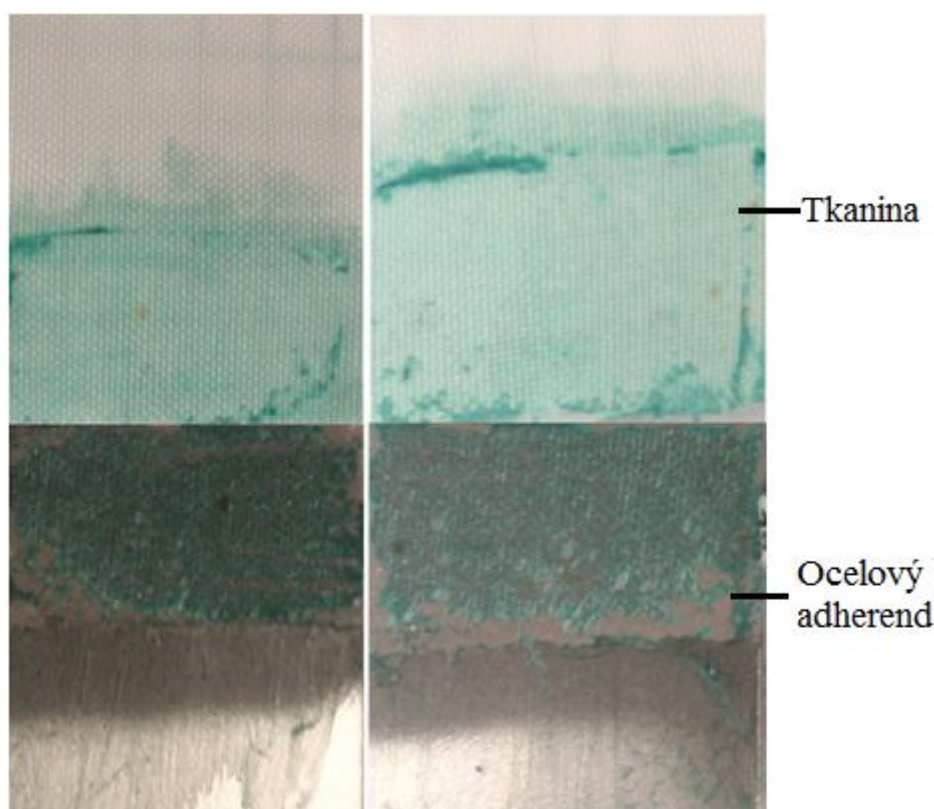
Obr. 25. Typické adhezní porušení u vzorků s lepidlem aktivovaným teplem



5.2.2. Vzorky s modifikací pracovního postupu

Jak již bylo popsáno výše, bylo nutné v návaznosti na předchozí praxi a teoretické znalosti lepidel na bázi polychloroprenu, ověřit vliv vypuštění kroku aktivace teplem na smykovou pevnost. Proto byla připravena ověřovací série vzorků bez aktivace teplem. Hlavním předpokladem byla minimální změna pevnosti v porovnání s vzorky aktivovanými teplem. Tento předpoklad byl potvrzen výsledky zkoušky smykové pevnosti v tahu (viz tab. 2), s průměrnou hodnotou smykové pevnosti $0,774 \pm 0,084$ MPa, variační koeficient 10,9 %. U všech šesti vzorků došlo ke stejnému typu adhezního porušení (AF) viz obr. 26. Z výsledků statistické analýzy vyplývá významná závislost pevnosti na zvolené povrchové úpravě, nikoliv na aktivaci teplem, viz příloha 2 (C). Rozdíl průměrů mezi vzorky bez aktivace teplem a vzorky aktivovanými teplem činí 0,148 MPa ve prospěch zjednodušeného postupu bez aktivace teplem.

Obr. 26. Adhezní porušení u vzorků s modifikací výrobního postupu

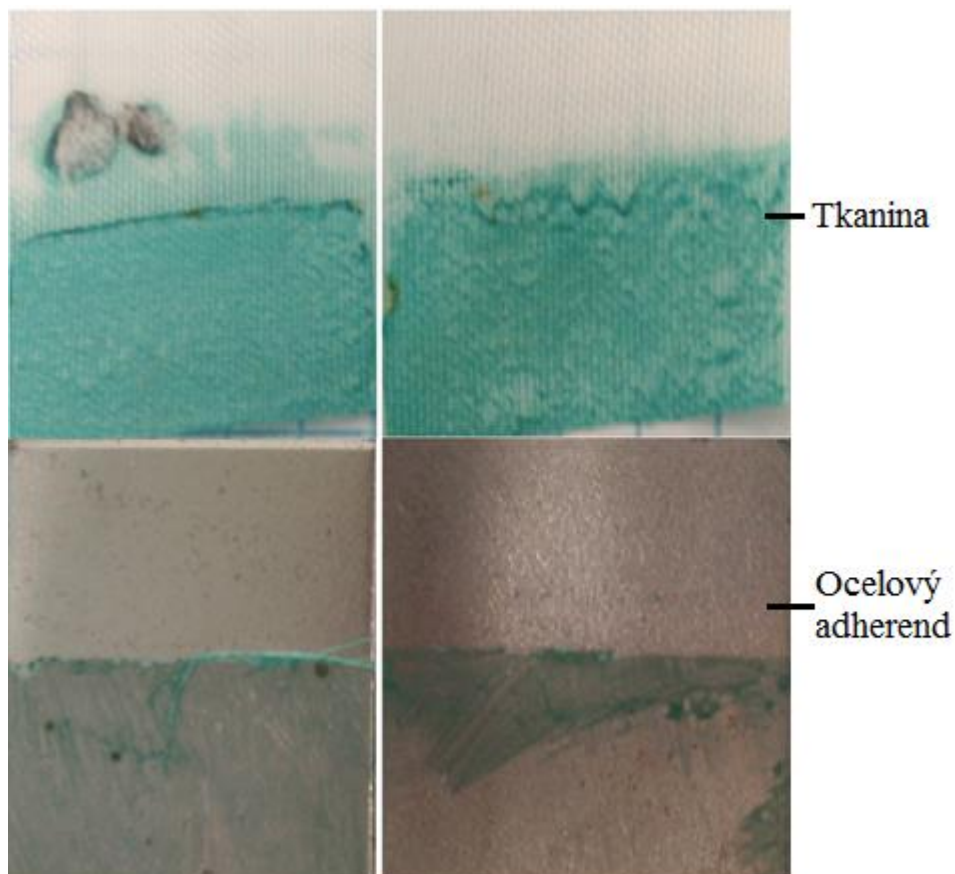


5.2.3. Tkanina lepená na pouze odmaštěný ocelový plech

Samotný pracovní postup byl již popsán v předchozích částech práce. Průměrná hodnota smykové pevnosti v tahu u této varianty byla určena na $0,710 \pm 0,102$ MPa, variační

koeficient 14,3 %. Naměřené hodnoty a statistický výpočet je uveden v příloze 2 (A). U všech šesti vzorků došlo vždy ke stejnému typu adhezního porušení (AF), viz obr. 27.

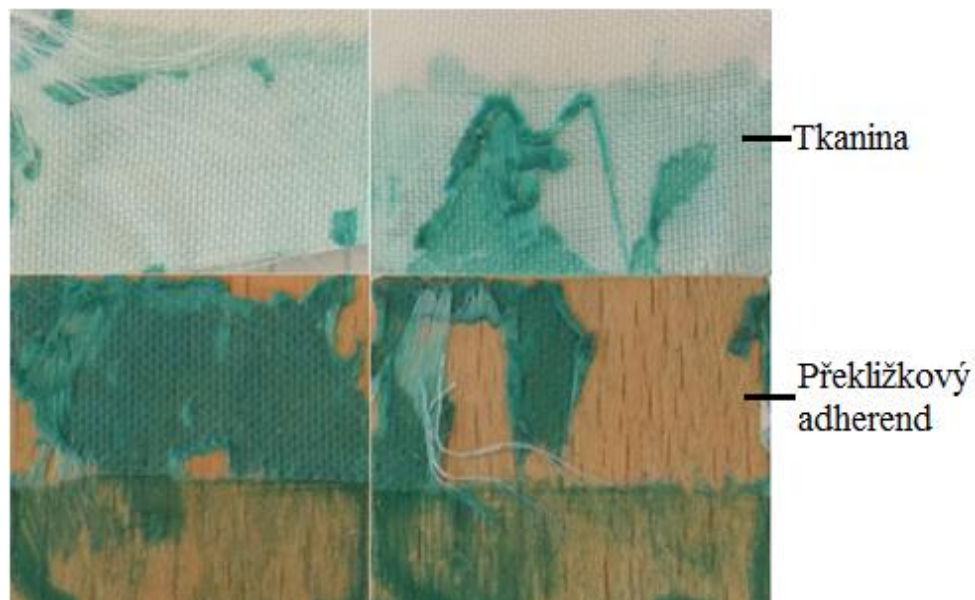
Obr. 27. Adhezní porušení u vzorků lepených pouze na odmaštěný plech



5.2.4. Vzorky lepené na překližkový povrch

Z důvodu ověření vlastností lepidla v interakci s dalším, v praxi často používaným povrchem, byla testována varianta tkaniny lepené na leteckou březovou překližku. Výroba těchto vzorků proběhla přesně dle postupu výrobce lepidla pro aplikaci na dřevěný podklad. Průměrná hodnota smykové pevnosti v tahu dosahovala hodnoty $1,126 \pm 0,092$ MPa. Hodnota variačního koeficientu byla 8,2 %. Naměřené hodnoty a statistický výpočet je uveden v příloze 2 (A). U vzorků lepených na leteckou překližku došlo k adheznímu porušení (AF) viz obr. 28.

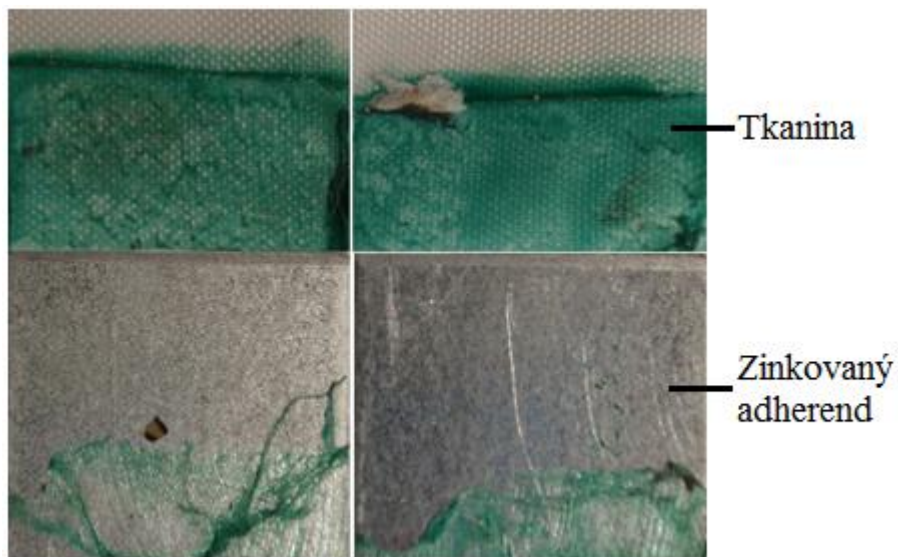
Obr. 28. Adhezní porušení u vzorků lepených na překližkový povrch



5.2.5. Vzorky lepené na ocelový plech s povrchovou úpravou žárovým zinkováním

Série vzorků lepených na zinkovaný plech byla vyrobena pouze za účelem ověření interakce adhesiva s tímto druhem adherendu. V praxi při výrobě letadel nebývá využívána. Výroba těchto vzorků proběhla také se zjednodušením výrobního postupu, vypuštěním aktivace teplem. Průměrná hodnota smykové pevnosti v tahu dosahovala hodnoty $1,203 \pm 0,257$ MPa. Hodnota variačního koeficientu byla 21,3 %. Naměřené hodnoty a statistický výpočet je uveden v příloze 2 (A). U vzorků lepených na ocelový žárově zinkovaný plech došlo vždy čistě adheznímu porušení (obr. 29).

Obr. 29. Adhezní porušení u vzorků lepených na žárově zinkovaný plech



5.2.6. Vyhodnocení výsledků naměřených u nedegradovaných vzorků

Smyslem této části experimentu bylo v největší míře vyhodnotit, které z testovaných povrchů použít pro degrační zkoušku. Dále pak také ověřit interakci lepidla s různými povrchy.

Základní statistické ukazatele jsou zobrazeny v následující tabulce (tab. 2)

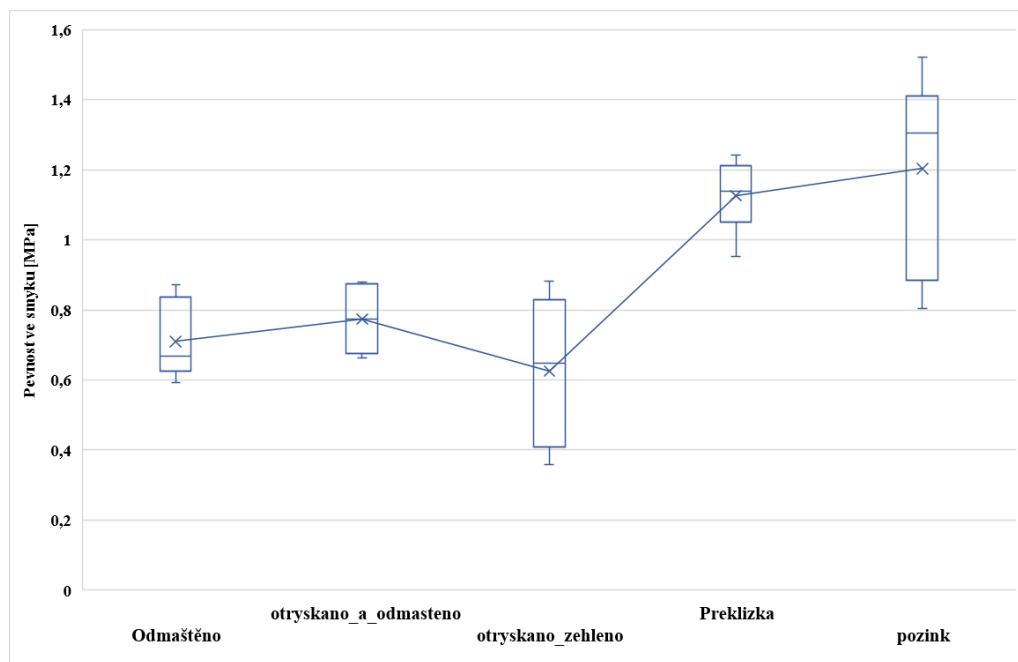
Tab. 2 Základní statistické ukazatele

Vzorky bez degradace					
	Pouze odmaštěno	Tryskáno a odmaštěno	Tryskáno žehleno	Překližka	Zinkovaný plech
Průměr [MPa]	0,710	0,774	0,626	1,126	1,203
Medián [MPa]	0,668	0,774	0,647	1,138	1,304
Minimum [MPa]	0,592	0,663	0,360	0,953	0,804
Maximum [MPa]	0,871	0,879	0,881	1,241	1,521
Směrodatná odchylka [MPa]	0,102	0,084	0,187	0,092	0,257
Variační koef.	0,143	0,109	0,299	0,082	0,213

Hodnoty průměru se pohybují v relativně těsném intervalu od 0,626 MPa do 1,2 MPa. Z naměřených dat vyplývá, že výrobcův postup (žehleno) vykázal nejmenší průměrnou hodnotu smykového napětí v tahu. Z toho důvodu byly pro degrační zkoušku vybrány vzorky tryskaného a odmaštěného plechu a překližky (jako nejobvyklejší povrchy používané ve všeobecném letectví). V tomto případě lze považovat průměrnou hodnotu za poměrně vypovídající, neboť hodnoty mediánu se výrazně neodchylují od průměru nebo jsou stejné. Největší variabilita dat byla pozorována u povrchu zinkovaného plechu. Směrodatná odchylka pro zinkovaný plech vyšla 0,257 MPa. To značí, že většina sil se neodchyluje od průměru o více jak 0,257 MPa. Zinkovaný plech také vykázal vůbec nejvyšší hodnotu smykové pevnosti během měření. Důvodem byla skutečnost, že oxid zinečnatý u lepidel na bázi polychloroprenu způsobuje při pokojové teplotě vytvrzení [13]. Ovšem z důvodu malého praktického využití tento povrch nebyl dále analyzován. Nejmenší směrodatnou odchylku vykazuje povrch tryskaný a odmaštěný plech 0,084 MPa. Na značnou homogenitu dat poukazují i hodnoty variačního koeficientu, který se pohybuje pod hranicí 0,5. Pro větší

přehlednost jsou naměřené výsledky zobrazeny graficky na následujícím obr. 30, včetně základních statistických ukazatelů (minimum, maximum, medián a průměr).

Obr. 30. Naměřené výsledky nedegradovaných vzorků



V následující tabulce (tab. 3) jsou uvedeny výsledky statistické analýzy nedegradovaných povrchů.

Tab. 3 Vyhodnocení Bartlettova testu a ANOVA pro povrchy bez degradace

	Pouze odmaštěno	Tryskáno a odmaštěno	Tryskáno žehleno	Překližka
Bartlett hodnota	5,231	5,231	5,231	5,231
P – hodnota	0,156	0,156	0,156	0,156
α	0,05	0,05	0,05	0,05
ANOVA hodnota	15,481	15,481	15,481	15,481
P – hodnota	0,000	0,000	0,000	0,000
α	0,05	0,05	0,05	0,05

Bartlettovým testem byla ověřena shodnost rozptylů dílčích statistických souborů. Porovnáním P – hodnoty se zvolenou hodnotou α je možné konstatovat, že na 95% hladině významnosti nezamítáme testovanou hypotézu H_0 o konstantnosti rozptylu. Testem bylo

ověřeno splnění podmínek pro použití ANOVY. Z výše uvedených výsledků pro jednofaktorovou analýzu rozptylu vyplývá, že na 95% hladině významnosti zamítáme testovanou hypotézu H_0 o shodě středních hodnot (P – hodnota konverguje k nule). V případě vzorků testovaných bez degradace byla nulová hypotéza definována jako shodnost středních hodnot testovaných povrchů. Alternativní hypotéza H_1 byla definována jako odlišnost minimálně jedné hodnoty. Těmito testy bylo ověřeno, že hodnota smykové pevnosti v tahu závisí především na povrchové úpravě materiálu a také samotném materiálu. Například překližka vlivem své nasákavosti vykazala hodnoty cca. o 70 % lepší než ocelové vzorky. Kompletní výsledky statistické analýzy viz příloha 2 (B), (C).

5.3. Degradované vzorky

Na základě výsledků předchozí kapitoly byly pro degradační zkoušku vybrány dva typy vzorků:

- ocelový plech S235J0 upravený otryskáním + odmaštěný, lepeno bez aktivace teplem
- březová 3 vrstvá letecká překližka, tloušťka 1 mm

Pro degradační zkoušku byla připravena již pouze jedna velká série dvou typů vzorků (viz výše), která byla vložena do korozní komory BINDER MKF.

Smyslem degradační zkoušky bylo ověřit interakci vybraného adhesiva s těmito vybranými povrchy a samotný postup lepení. Samotný průběh degradační zkoušky (zvoleného cyklu a prostředí) byl již popsán v předchozích kapitolách.

5.3.1. Degradované vzorky – ocelový plech S235J0 upravený tryskáním a odmaštěný

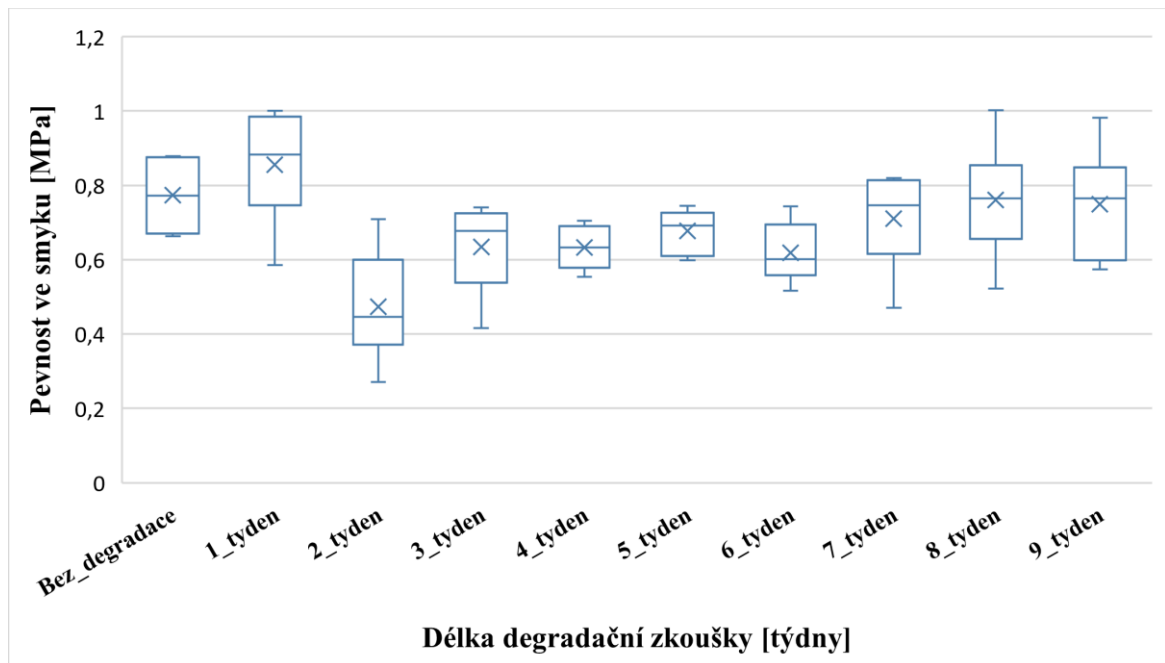
Degradační zkouška proběhla v celkové délce 9 týdnů. Série degradovaných vzorků byly po vyjmutí z degradační komory (vždy s týdenní periodicitou) vytemperovány na zkušební teplotu okolí 23 °C a podrobeny tahové zkoušce. Základní statistické ukazatele smykové pevnosti v tahu pro jednotlivé týdny degradace byly zachyceny v tabulce 4 (tab. 4.).

Tab. 4 Základní statistické ukazatele vzorky ocelový tryskaný plech

Ocelový tryskaný plech									
Týdny degradace	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Průměr [MPa]	0,856	0,474	0,635	0,633	0,677	0,619	0,710	0,760	0,750
Medián [MPa]	0,884	0,446	0,677	0,632	0,692	0,601	0,747	0,766	0,765
Minimum [MPa]	0,585	0,272	0,416	0,554	0,598	0,516	0,471	0,523	0,574
Maximum [MPa]	1,000	0,710	0,741	0,705	0,745	0,743	0,820	1,002	0,982
Směrodatná odchylka [MPa]	0,139	0,137	0,112	0,053	0,055	0,074	0,119	0,142	0,135
Variační koef.	0,162	0,289	0,176	0,083	0,081	0,120	0,168	0,187	0,180

Nejvyšší průměrné hodnoty bylo dosaženo v prvním týdnu degradace. Došlo k průměrnému nárůstu smykové pevnosti v tahu o 0,082 MPa proti nedegradovaným vzorkům. Příčinou tohoto nárůstu bylo do určité míry vytvrzení lepidla teplem. Po druhém týdnu degradace došlo u testovaných vzorků k významnému snížení smykové pevnosti v tahu na průměrnou hodnotu 0,474 MPa ± 0,137 MPa. Příčinou tohoto významného snížení byla extrémně nízká hodnota smykové pevnosti jednoho z testovaných vzorků, zapříčiněná chybou měření. V dalších následujících týdnech byla hodnota smykové pevnosti již konstantní kolem hodnoty 0,683 ± 0,053 MPa. Toto značí drobný pokles smykové pevnosti proti nedegradovaným vzorkům, ale zároveň ukazuje na jistou odolnost lepidla vůči působení korozního prostředí. Na následujícím obr. 31 jsou zobrazeny naměřené výsledky, včetně základních statistických ukazatelů (minimum, maximum, medián a průměr) pro degradované vzorky ocelového tryskaného plechu. Jednotlivé naměřené hodnoty a statistický výpočet pro jednotlivé týdny degradace jsou obsahem přílohy 3 (A), (B).

Obr. 31. Naměřené výsledky degradovaných vzorků tryskaný plech



Tab. 5 Vyhodnocení Bartlettova testu a ANOVA pro jednotlivé týdny degradace

Ocelový tryskaný plech	
Bartlett hodnota	9,910
P – hodnota	0,358
α	0,05
ANOVA hodnota	4,498
P – hodnota	0,002
α	0,05

Pro porovnání konstantnosti rozptylů v týdnu bez degradace a degračních týdnech byl vypočten Bartlettův test viz tab. 5. P – hodnota je větší než α , tudíž nezamítáme testovanou hypotézu H_0 a je možné říci, že v jednotlivých týdnech mají na 95% hladině významnosti konstantní rozptyl. Podmínka pro použití ANOVY tak byla splněna. Pro ANOVU vyšla P – hodnota menší než α viz tab. 5. Je tedy možné konstatovat, že na 95% hladině významnosti zamítáme testovanou hypotézu H_0 o shodě středních hodnot. Z toho vyplývá, že alespoň jedna střední hodnota smykové pevnosti v tahu je jiná a je zde závislost mezi touto pevností a dobou degradace. Jednalo se o hodnoty ve druhém, čtvrtém a šestém degračním týdnu viz tab. 6.

Tab. 6 Vyhodnocení dílčích T – testů

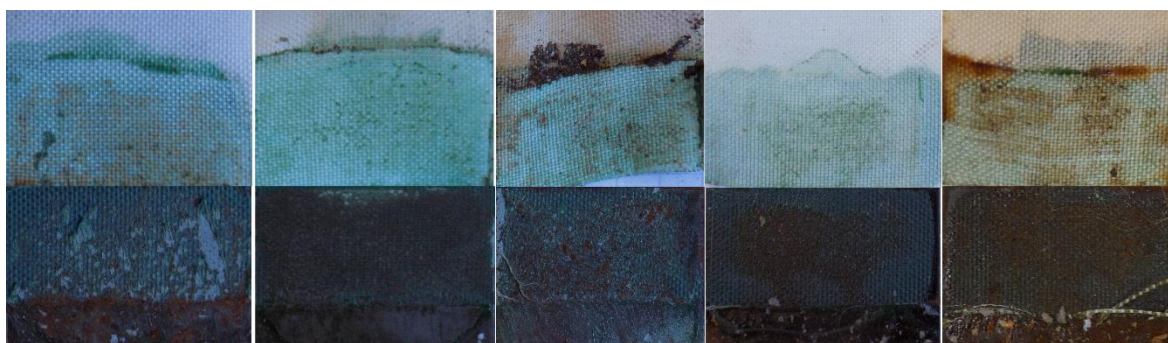
Týdny degradace	T – test		
	P – hodnota	α	Vyhodnocení T – test
1	0,2839	0,05	Nezamítáme H_0
2	0,0019	0,05	Zamítáme H_0
3	0,0507	0,05	Nezamítáme H_0
4	0,0098	0,05	Zamítáme H_0
5	0,0561	0,05	Nezamítáme H_0
6	0,0114	0,05	Zamítáme H_0
7	0,3539	0,05	Nezamítáme H_0
8	0,8616	0,05	Nezamítáme H_0
9	0,7440	0,05	Nezamítáme H_0

V případě, že vyšla P – hodnota větší než α , došlo na 95% hladině významnosti k nezamítnutí nulové hypotézy H_0 o shodě středních hodnot bez degradačního týdne a příslušného týdne degradace. V opačném případě, kdy P – hodnota $< \alpha$ byla zamítnuta nulová hypotéza H_0 .

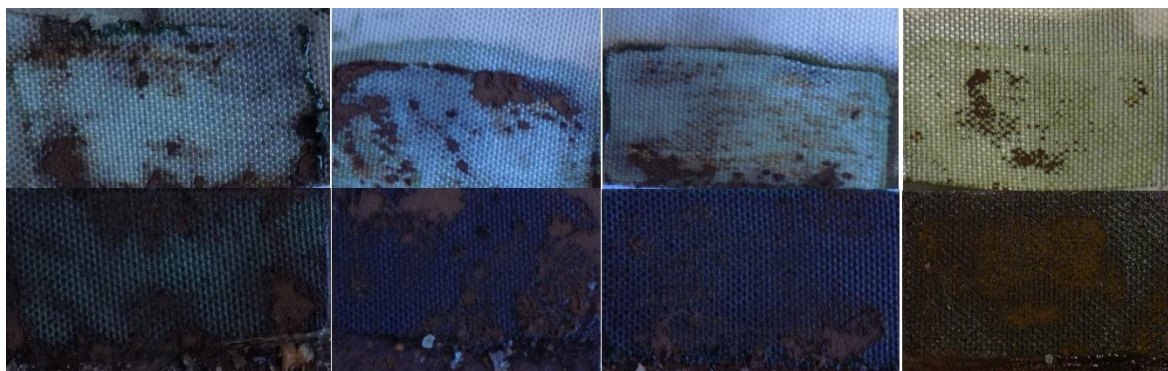
5.3.1.1. Typy porušení u ocelových degradovaných vzorků

Po provedení tahové zkoušky byly vzorky vždy nasnímány v oblasti lepeného spoje a analyzován druh porušení dle normy ČSN ISO 10365. U všech degradovaných vzorků ocelového plechu se vždy jednalo o porušení adheze, viz obr. 32. a obr. 33. U vzorků od třetího týdne degradace a dále, již byla pozorována narůstající koroze povrchu rozhraní kovového adherendu a adhesiva v oblasti lepeného spoje viz obr. 32 a obr. 33. (v horní části obrázku je vždy zobrazena tkanina a na spodní části adherend).

Obr. 32. Adhezní porušení zkušebních ocelových vzorků (zleva: 1. až 5. týden)



Obr. 33. Adhezní porušení zkušebních ocelových vzorků (zleva: 6. až 9. týden)



5.3.2. Degradované vzorky – letecká překližka

Stejně jako v předchozím případě degradační zkoušky byly z korozní komory překližkové vzorky vyjmuty vždy s týdenní periodicitou. Degradační zkouška překližkových vzorků proběhla v celkové délce 8 týdnů. Vzorky byly po vyjmutí z degradační komory vytemperovány na zkušební teplotu okolí 23 °C a podrobeny tahové zkoušce. Základní statistické ukazatele smykové pevnosti v tahu pro jednotlivé týdny degradace jsou zobrazeny v tabulce viz tab. 7.

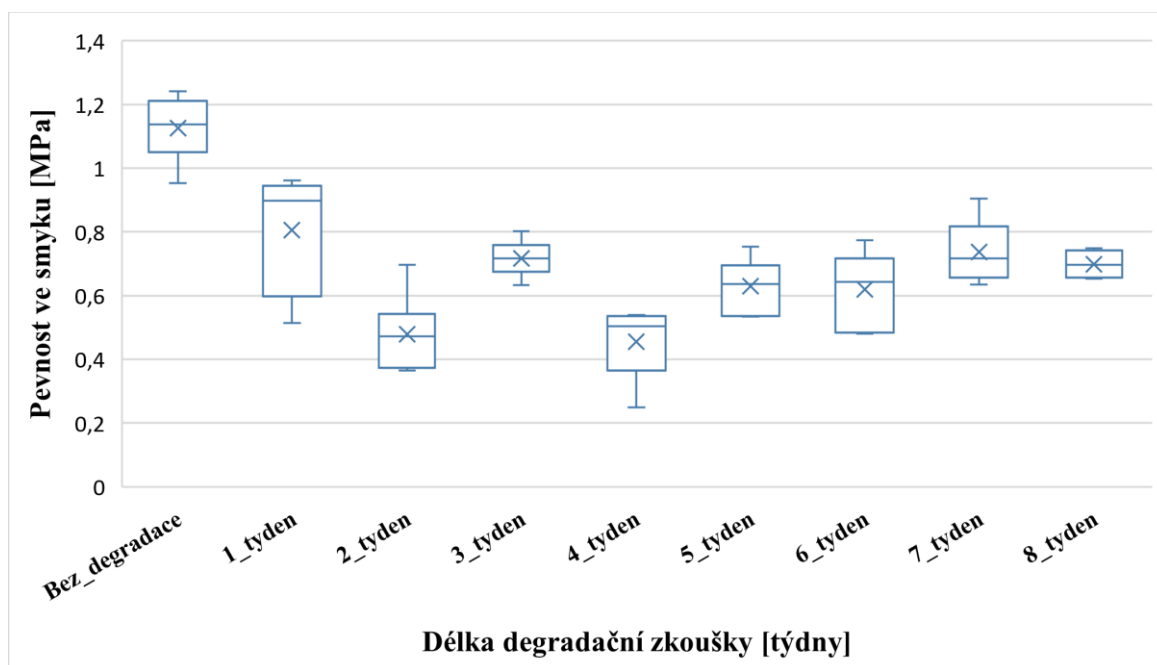
Tab. 7 Základní statistické ukazatele – vzorky překližka

Překližka								
Týdny degradace	1	2	3	4	5	6	7	8
Průměr [MPa]	0,806	0,479	0,717	0,456	0,629	0,620	0,737	0,698
Medián [MPa]	0,898	0,471	0,717	0,504	0,637	0,643	0,717	0,696
Minimum [MPa]	0,514	0,366	0,634	0,250	0,533	0,481	0,635	0,653
Maximum [MPa]	0,962	0,697	0,802	0,538	0,754	0,774	0,904	0,748
Směrodatná odchylka [MPa]	0,172	0,110	0,053	0,103	0,078	0,108	0,089	0,039
Variační koef.	0,214	0,229	0,073	0,225	0,124	0,175	0,121	0,056

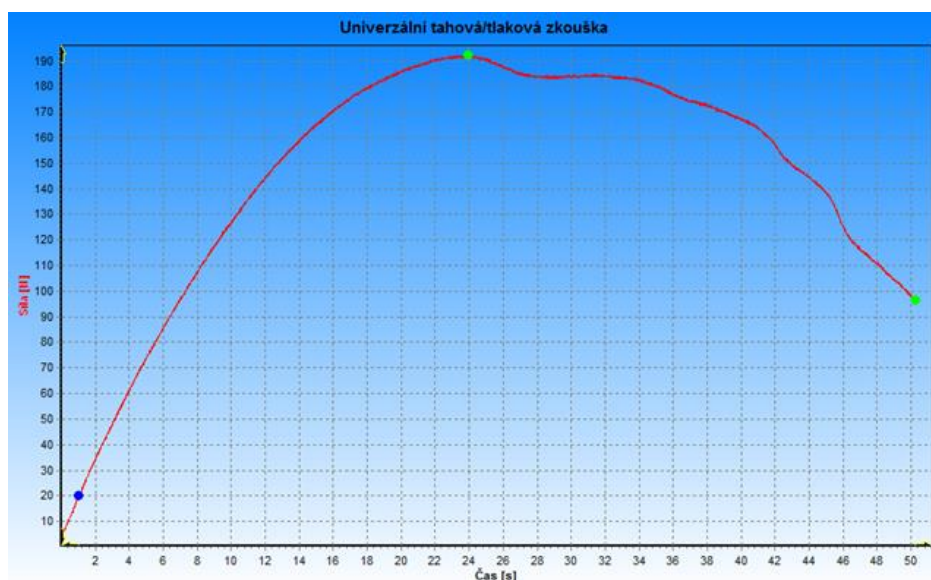
U vzorků lepených na leteckou překližku došlo k výraznému poklesu smykové pevnosti. U nedegradované překližky bylo dosaženo průměrné hodnoty $1,126 \pm 0,092$ MPa. U vzorků překližky po 1 týdnu degradace došlo k poklesu smykové pevnosti na hodnotu $0,806 \pm 0,172$ MPa. Došlo tedy k poklesu pevnosti o 28,5 % proti výchozímu stavu. Tento pokles

byl způsoben určitou schopností překližky vázat vlhkost. U vzorků po druhém týdnu degradace byl pokles ještě výraznější až na hodnotu $0,479 \pm 0,11$ MPa. V ostatních týdnech se hodnoty průměru pohybovaly okolo $0,523 \pm 0,096$ MPa. Na následujícím obrázku (obr. 34) jsou zobrazeny naměřené výsledky degradovaných vzorků letecké překližky. Obvyklý průběh zatěžující síly v závislosti na čase při zkoušce smykové pevnosti je zobrazen na obr. 35.

Obr. 34. Naměřené výsledky degradovaných vzorků překližka



Obr. 35. Průběh zatěžující síly v závislosti na čase



Tab. 8 Vyhodnocení Bartlettova testu a ANOVA pro jednotlivé týdny degradace

Překližka	
Bartlett hodnota	10,054
P – hodnota	0,261
α	0,05
ANOVA hodnota	18,697
P – hodnota	0,000
α	0,05

Z výše uvedené tabulky (tab. 8) vyplynulo, že stejně jako v předchozím případě tryskaného a odmaštěného plechu, nezamítáme testovanou hypotézu H_0 na 95% hladině významnosti. Pro překližku tedy platí, že byla splněna podmínka konstantního rozptylu a normality, díky čemuž bylo možné použít jednofaktorovou analýzu rozptylu. Výše uvedená tabulka (tab. 8) zahrnuje i tyto výsledky. Z těchto výsledků bylo možné konstatovat, že na 95% hladině významnosti zamítáme testovanou hypotézu H_0 o shodě středních hodnot smykové pevnosti lepených spojů v tahu. Z toho vyplývá, že smyková pevnost lepených spojů v tahu je závislá na počtu týdnů, po které na jednotlivé vzorky působila degradace.

Tab. 9 Vyhodnocení dílčích T – testů

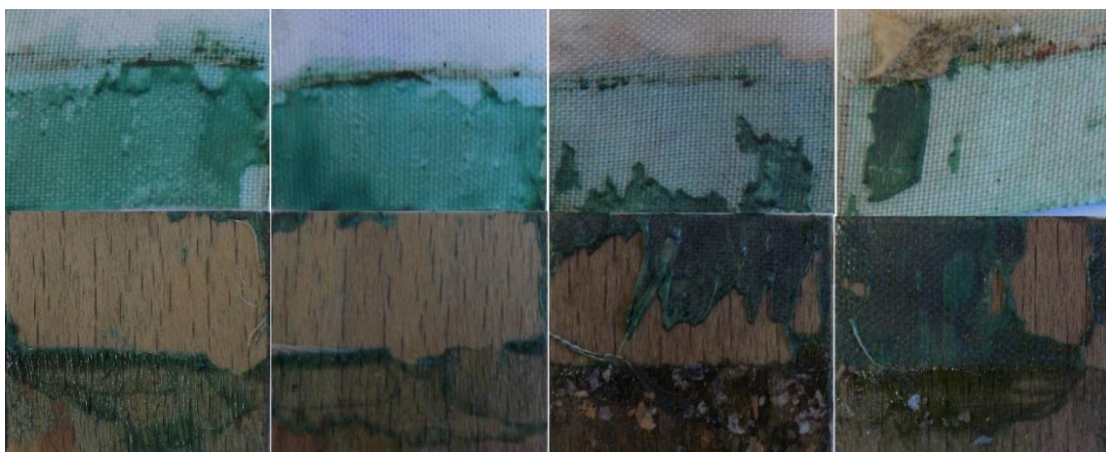
Týdny degradace	T – test		
	P – hodnota	α	Vyhodnocení T – test
1	0,0044	0,05	Zamítáme H_0
2	0,0000	0,05	Zamítáme H_0
3	0,0000	0,05	Zamítáme H_0
4	0,0000	0,05	Zamítáme H_0
5	0,0000	0,05	Zamítáme H_0
6	0,0000	0,05	Zamítáme H_0
7	0,0000	0,05	Zamítáme H_0
8	0,0001	0,05	Zamítáme H_0

Na rozdíl od povrchu tryskaného a odmaštěného plechu byly výsledky dílčích T – testů pro překližku naprosto jednoznačné. Výsledky byly shrnuty v tabulce výše (tab. 9). Pro všechny týdny na 95% hladině významnosti zamítáme testovanou hypotézu H_0 o shodě dvou středních hodnot. Je tedy patrné, že u povrchu překližky je značná závislost smykové pevnosti lepených spojů v tahu na průběhu degradace. Stanovené hodnoty meze pevnosti a detailní statistický výpočet pro jednotlivé týdny degradace jsou obsahem přílohy 4 (A), (B).

5.3.2.1. Typy porušení u vzorků degradované letecké překližky

Po provedení tahové zkoušky byly vzorky vždy nasnímány v oblasti lepeného spoje a analyzován druh porušení dle normy ČSN ISO 10365. U vzorků z prvního a druhého týdne degradační zkoušky došlo k adhezní poruše, viz obr. 36. V následujících týdnech degradace (třetí až osmý týden) se u vzorků také vyskytovala pouze adhezní porucha (k poruše došlo vždy na rozhraní adhesiva a adherendu) viz obr. 36 a obr. 37. (horní část obrázku zobrazuje tkaninu na spodní části je vždy zobrazen adherend).

Obr. 36. Adhezní porušení překližkových vzorků (zleva: 1. až 4. týden)



Obr. 37. Adhezní porušení překližkových vzorků (zleva: 5. až 8. týden)



5.4. Tkanina Ceconite

V poslední fázi experimentu byla také otestována samotná tkanina. Testování tkaniny bylo zaměřeno především na ověření její pevnosti a popis její morfologie.

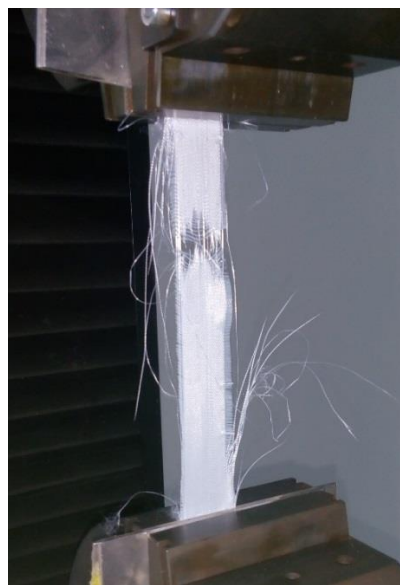
5.4.1. Ověření pevnosti tkaniny Ceconite

Pro ověření pevnosti byly vyrobeny zkušební tělesa s rozměry tkaniny o šířce 25 mm a délce 100 mm zafixované mezi ocelové plechy (z důvodu zamezení prokluzu v čelistech univerzálního zkušebního stroje) viz obr. 38. Výrobce tkaniny Ceconite deklaruje hodnotu meze pevnosti okolo hodnoty 0,783 MPa. Tato hodnota je deklarována bez popisu zkušební normy použité pro testování. V průběhu tahové zkoušky docházelo se vzrůstající zatěžující silou k iniciaci porušení jednotlivých vláken tkaniny v kolmém směru se zatěžující silou (obr. 38). Tato iniciace měla dále za následek úplné porušení. Při dosažení maximální zatěžující síly došlo vždy k významnému porušení struktury zkušební vzorku viz obr. 39. Základní statistické údaje získané v této části experimentu jsou uvedeny v tabulce (tab. 10).

Obr. 38. Tahová zkouška tkaniny Ceconite



Obr. 39. Typické porušení tkaniny Ceconite



Tab. 10 Základní statistické ukazatele vzorků tkaniny Ceconite

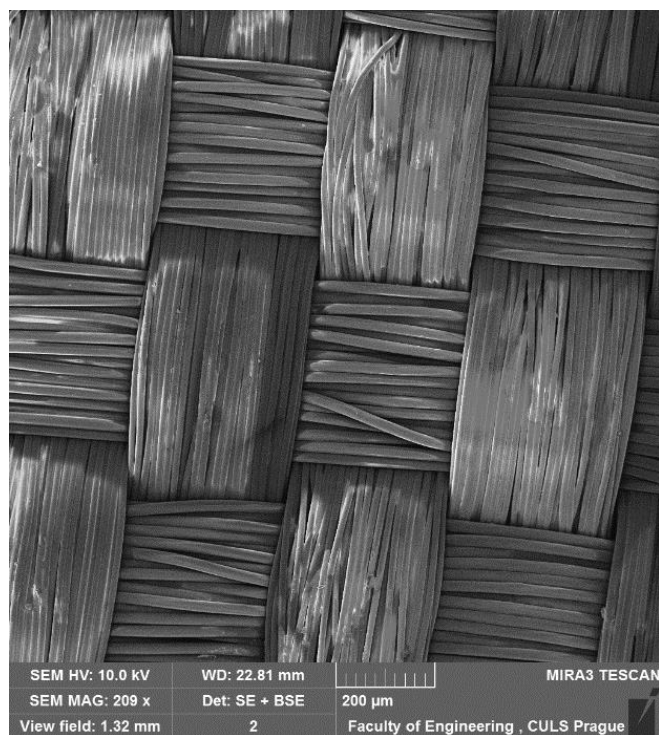
Tkanina Ceconite	
Průměr [MPa]	0,632
Medián [MPa]	0,636
Minimum [MPa]	0,559
Maximum [MPa]	0,695
Směrodatná odchylka [MPa]	0,056
Variační koef.	0,089

Z údajů v tabulce (tab. 10) vyplývá, že naměřené hodnoty byly v těsném intervalu od 0,559 do 0,695 MPa. Směrodatná odchylka vyšla $\pm 0,056$ MPa a variační koeficient 9 %. Stanovené parametry se s výrobcem deklarovanou hodnotou neshodují. Důvodem je nemožnost ověřit výrobcův zkušební postup použitý při testování. Důležitým aspektem při tahovém zatěžování byla také délka a kvalita stříhu zkušebního vzorku tkaniny.

5.4.2. Popis morfologie tkaniny

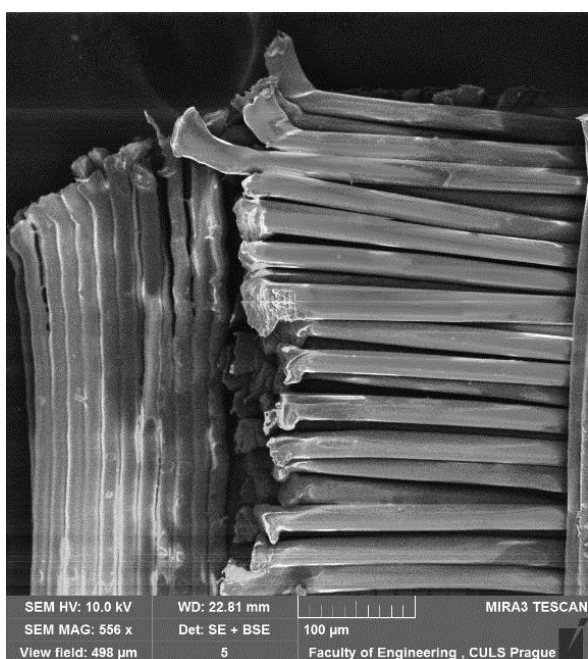
Za účelem popisu morfologie tkaniny byl její připravený vzorek nasnímán na elektronovém mikroskopu TESCAN, MIRA3 GMU. Ze snímků pořízených na elektronovém mikroskopu byl odečten počet svazků vláken na 1 cm^2 tkaniny (dopočtem z hodnoty zobrazeného měřítka). Měřením bylo zjištěno, že tkanina je nesymetrická. Tedy počet svazků vláken v hlavním a vedlejším směru je rozdílný. Byl stanoven výsledek, v hlavním směru 30 ± 1 svazek, vedlejší směr 23 ± 1 svazek viz obr. 40. Stanovený počet vláken souhlasí s výrobcem deklarovanou hodnotou pouze v jednom směru.

Obr. 40. Tkanina Ceconite na snímku z elektronového mikroskopu



Na následujícím obrázku (obr. 41) je zobrazeno místo porušení samotného svazku jednotlivých vláken.

Obr. 41. Místo porušení svazku tkaniny



6. Závěr

Diplomová práce se zabývá hodnocením interakce lepidla EkoBond E610 s obvykle používanými materiály v leteckém průmyslu. Hlavním cílem práce bylo popsání degradačního procesu lepidla používaného při technologii potahování povrchu tkaninou Ceconite v letecké praxi. Hlavním cílem teoretické části práce bylo popsání jednotlivých degradačních vlivů na polymerní materiály se zaměřením na specifickou oblast letectví. Dílčím dosaženým cílem teoretické části práce byl také popis lepidel používaných v současnosti při výrobě a opravách menších typů letadel.

Hlavní cíl experimentální části byl naplněn provedením dlouhodobé degradační zkoušky dvou vybraných materiálů s lepidlem běžně používaným v praxi. Pro tento experiment byla vhodně vymezena metodika samotné degradační zkoušky tak, aby bylo dosaženo obdobných provozních podmínek, které mohou vzniknout během životního cyklu tkaninového potahu během provozu letadla.

U nedegradovaných vzorků byl ověřen předpoklad nesnížení smykové pevnosti při modifikaci pracovního postupu. Stanovená hodnota pro nedegradované vzorky s modifikací pracovního postupu byla v průměru o 0,148 MPa vyšší, než u vzorků připravených dle návodu výrobce lepidla ($0,774 > 0,626$ MPa). Aplikací tohoto poznatku by mohlo v praxi dojít k významnému snížení pracnosti a tím i servisních nákladů.

U degradovaných vzorků ocelových plechů byla potvrzena schopnost lepidla odolávat působení vlhkosti a teploty. Výrobce tuto schopnost deklaruje a pro použití v praxi je velmi důležitá. Hodnoty smykové pevnosti u ocelových degradovaných vzorků se během celé zkoušky pohybovaly kolem průměrné hodnoty 0,679 MPa. Tento výsledek ukázal na důležitost volby správné povrchové ochrany adherendu tak, aby nedocházelo ke korozi na rozhraní adherendu a adhesiva. S poznatkem bude v praxi nadále pracováno pro dokonalejší výběr primeru na ošetření příhradových konstrukcí trupů letadel.

V případě vzorků lepených na neošetřenou leteckou překližku byla zjištěna silná závislost na době degradace. U nedegradovaných vzorků letecké překližky byla stanovena průměrná hodnota smykové pevnosti 1,126 MPa. V průběhu degradační zkoušky došlo k významnému snížení smykové pevnosti na průměrnou hodnotu 0,643 MPa. Tento poznatek v praxi povede k důslednější ochraně překližkového povrchu před působením vlhkosti, aplikací laku.

V závěru práce byla otestována použitá tkanina Ceconite. Tkanina byla nasnímana na elektronovém mikroskopu. Vyhodnocením bylo zjištěno, že tkanina je nesymetrická. Z výsledků provedené tahové zkoušky tkaniny porovnaných s výrobcem deklarovanými hodnotami byla určena průměrná pevnost v tahu o 0,151 MPa nižší než výrobcem deklarovaná hodnota. Výrobce tkaniny neudává zkušební normy použité při stanovení parametrů, což znesnadňuje výsledné porovnání parametrů.

Experimentální část práce ověřila odolnost samotného lepidla vůči degradačním vlivům teploty a vlhkosti. Důležitým poznatkem pro další praxi s těmito materiály v oboru letectví je nutnost věnovat se důsledné ochraně povrchů konstrukcí letadel. Jako nejdůležitější se tento poznatek jeví pro překližkové konstrukce.

7. Použité zdroje

- [1] Osten M., *Práce s lepidly a tmely*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1982. 283 s.
- [2] Čada O., *Lepení plastických hmot a pryže*. Gottwaldov: VÚGPT, 1964. 60 s.
- [3] Kovačič L., *Lepenie kovov a plastov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1980. 389 s.
- [4] Maliar V., *Cohesion Properties of Bitumen of Different Structures*. 9th International Scientific Conference Transbaltica 2015; Procedia Engineering. 2016. s. 121-127.
- [5] Adamson Arthur W. Gast Alice P., *Physical Chemistry of Surfaces*. 6th edition, New York: Wiley, 1997. 808 s. ISBN 978-0-471-14873-9.
- [6] Langmaier F., *Adhese a adhesiva*. 1. vyd. Zlín: FT VUT, 1999. 106 s. ISBN 8021413735.
- [7] Ebnesajjad Sina, Ebnesajjad Cyrus, *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*, 2nd edition. Norwich: William Andrew, 2013. 360 s. ISBN 9780323264358.
- [8] Petrie, M. Edward, *Handbook of Adhesives and Sealants*, New York: McGraw-Hill, 2007. 1048 s. ISBN 9780071479165.
- [9] Tantec Česká republika, *Technologie předúpravy – Základní pojmy* [online]. [cit. 2017-1-15]. URL: <<http://www.tantec.cz/technologie>>.
- [10] Doplnkové technologie pro zpracování plastů, *Lepení* [online]. [cit. 2017-1-15]. URL: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm>
- [11] ČSN ISO 10365. *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Praha: Český normalizační institut, 1995. 8 s.
- [12] Rudawska A. et al., *The effect of sandblasting on surface properties for adhesion*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. s. 176-190.
- [13] Robert D. Adams, *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2005. 560 s. ISBN 1855737418.
- [14] Harris A.F., Beevers A. *The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999. s. 445-452.
- [15] Sina Ebnesajjad, *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing*, Norwich: William Andrew, 2010. 450 s. ISBN 9781437744613.
- [16] Denny A. Jones, *Principles and prevention of corrosion*, 2nd editon, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996, 572 s. ISBN 9780133599930.

- [17] Ducháček V. *Polymery, výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [18] Corrosion of polymers, [online]. [cit. 2017-1-17]. URL: <<http://xapps.xyleminc.com/Crest.Grindex/help/grindex/contents/corrosionPolymer.htm>>.
- [19] Petrie M. Edward, *Epoxy Adhesive Formulations*, New York: McGraw Hill, 2005. 535 s. ISBN 0071455442.
- [20] Anderson B. J., *Thermal stability of high temperature epoxy adhesives by thermogravimetric and adhesive strength measurements*, *Polymer Degradation and Stability*, 2011. 1874-1881 s.
- [21] Yijun Tu, *WATER ABSORPTION AND DEGRADATION IN ADHESIVE JOINTS*, Ottawa: National Library of Canada, 1999. 184 s.
- [22] National Aeronautics and Space Administration, *Ozone Production and Destruction*, [online]. [cit. 2017-1-18]. URL: <https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/ozone/additional/science-focus/about-ozone/ozone_cycle.shtml>.
- [23] Middleton J. et al., *The effect of ozone and high temperature on polymer degradation in polymer core composite conductors*, *Polymer Degradation and Stability*, 2013. s. 2282-2290.
- [24] Huntink N. M., *DURABILITY OF RUBBER PRODUCT*, Enschede: Twente University Press, 2003. 215 s. ISBN 90 365 1946 2.
- [25] Gerard Katie, *The Top 3 Plastic Additives for UV Stabilization*, [online]. [cit. 2017-1-18]. URL: <<http://info.craftechind.com/blog/bid/383570/The-Top-3-Plastic-Additives-for-UV-Stabilization>>.
- [26] Tianyi Lu et al., *Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites*, *Polymer Degradation and Stability*, 2016. s. 1-8.
- [27] International Atomic Energy Agency, *Controlling of Degradation Effects in Radiation Processing of Polymers*, Vienna, 2009. 232 s. ISBN 9789201051097.
- [28] Ji-Dong Gu, *Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances*, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003. s. 69-91.
- [29] Aerodux, *Technical data sheet, safety data sheet*, [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <www.cpadhesives.com/LiteratureRetrieve.aspx?ID=124231>.

- [30] Sezemský M. *Stavba repliky Zlin-XII*, [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<http://avia.vyrobce.cz/doc/2index.htm>>.
- [31] Araldite 2010, *Technical data sheet, safety data sheet*, [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<http://www.intertronics.co.uk/wp-content/uploads/2016/10/Araldite-2010-1.pdf>>.
- [32] Skolil Kompozit, *Araldite 2000- základní vlastnosti a použití*, [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<http://www.skolil.cz/lepidla/araldit-2000>>.
- [33] New Super Seam Cement, *Description* [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<http://conaircraft.com/products/ceconite/cement.php>>.
- [34] Goldenbaum J. *Ceconite manual* [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<http://www.conaircraft.com/ceconite-manual.pdf>>.
- [35] New Super Seam, *Safety data sheet* [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<http://www.univair.com/content/sds-superseam.pdf>>.
- [36] Loctite Threadlocking Adhesives, [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<https://www.lasaero.com/site/products/article?id=M02774ZVF>>.
- [37] Henkel Česká republika. *Loctite 270 - Technické informace* [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <http://www.loctite.cz/Loctite-6700.htm?nodeid=8802623619073&msdsLanguage=CS_CZ&selectedTab=document>.
- [38] Loctite Hysol EA 9309.3NA, *Product details* [online]. [cit. 2017-1-25]. URL: <<https://www.ellsworth.com/products/adhesives/epoxy/henkel-loctite-hysol-ea-9309.3na-epoxy-adhesive-1-qt-kit/>>.
- [39] Loctite Hysol EA 9309.3NA, *Technical data sheet* [online]. [cit. 2017-1-26]. URL: <<http://www.mtpinc-exporter.com/chemicals/tds/Hysol%20EA%209309.3NA.pdf>>
- [40] Stewart systems. *Application of EkoBond cement – procedures manual* [online]. [cit. 2017-1-28]. URL: <<http://www.aircraftspruce.com/catalog/pdf/EkoBond%20Application.pdf>>.
- [41] Stewart systems. *EkoBond E610 – Material safety data sheet*, [online]. [cit. 2017-1-28]. URL: <<http://www.westav.ca/pdf/EkoBond%20MSDS%202010.pdf>>.
- [42] Ceconite 101, *Přehled – specifikace*, [online]. [cit. 2017-1-29]. URL: <<http://www.aircraftspruce.com/catalog/cspages/ceconitefabric.php>>.

- [43] Federal Aviation Administration. *AMT – Aircraft Fabric Covering*, [online]. [cit. 2017-1-29]. URL: <https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_Ch03.pdf>.
- [44] Goldenbaum J. *Ceconite Aircraft Covering Process procedure manual 101*, Riverside: Consolidated Aircraft Coatings, 2008. 146 s.
- [45] Přepočítání jednotek, [online]. [cit. 2017-2-28]. URL: <<http://www.schiessl.cz/soubor-prepocet-jednotek-6118-.pdf>>.
- [46] Understanding Thread Count. [online]. [cit. 2017-2-28]. URL: <<http://kidszipsheets.com.au/understanding-thread-count/>>.
- [47] Aplikace Ceconite 101, [online]. [cit. 2017-2-28]. URL: <<https://cz.pinterest.com/pin/326651779192213668/>>.
- [48] LABORTECH. *Test & Motion – zkušební testovací software*, [online]. [cit. 2017-2-2]. URL: <<http://www.laborotech.cz/uploaded/pdf/test-motion-2016.pdf>>.
- [49] ČSN EN 1465. *Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. Praha: Český normalizační institut, 2009. 12 s.
- [50] BINDER. Testovací klimatická komora Binder MKF, [online]. [cit. 2017-2-21]. URL: <<https://www.binder-world.com/en/Products/Dynamic-climate-chambers/Series-MKF>>.
- [51] ČSN EN ISO 9142. *Lepidla – Směrnice k výběru laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů*. Praha: Český normalizační institut, 2004. 28 s.
- [52] Mitutoyo SurfTest 301. [online]. [cit. 2017-2-28]. URL: <<http://www.mbcCalibri.cz/prodej-produkt-735-pristroj-na-mereni-drsnosti-povrchu-surfTest-sj-301.html>>.
- [53] Laboratoř elektronové mikroskopie. *Rastrovací elektronový mikroskop MIRA3 GMU*, [online]. [cit. 2017-3-1]. URL: <<https://katedry.czu.cz/kmst/laborator-elektronove-mikroskopie/>>.
- [54] Hindls R. a kol. *Statistika pro ekonomy*. 8. vyd. Praha: Professional Publishing, 2007. 415 s. ISBN 978-80-86946-43-6.
- [55] Pecáková I. *Statistika v terénních průzkumech*. 2. vyd. Praha: Professional Publishing, 2011. 236 s. ISBN 978-80-7431-039-3.
- [56] Arltová M. a kol. *Základy statistiky v příkladech*. 1. vyd. Brno: Tribun EU, 2014. 192 s. ISBN: 9788026307563.

8. Seznam tabulek

Tab. 1. Hodnoty parametrů drsnosti.	str. 35
Tab. 2 Základní statistické ukazatele	str. 40
Tab. 3 Vyhodnocení Bartlettova testu a ANOVA pro povrchy bez degradace	str. 41
Tab. 4 Základní statistické ukazatele vzorky ocelový tryskaný plech	str. 43
Tab. 5 Vyhodnocení Bartlettova testu a ANOVA pro jednotlivé týdny degradace	str. 44
Tab. 6 Vyhodnocení dílčích T – testů	str. 45
Tab. 7 Základní statistické ukazatele – vzorky překližka	str. 46
Tab. 8 Vyhodnocení Bartlettova testu a ANOVA pro jednotlivé týdny degradace	str. 48
Tab. 9 Vyhodnocení dílčích T – testů	str. 48
Tab. 10 Základní statistické ukazatele vzorků tkaniny Ceconite	str. 51

9. Seznam obrázků

Obr. 1. Smáčivost lepidel [10]	str. 8
Obr. 2. Adhezní a kohezní porucha [11]	str. 8
Obr. 3. Štěpení polymerního řetězce za zvýšené teploty [18]	str. 12
Obr. 4. EPON 828/Ancamine 2049 [20]:	str. 13
Obr. 5. EPON 828/DDS [20]:	str. 13
Obr. 6. Běžně používaná lepidla [29, 31, 34, 37, 38]	str. 18
Obr. 7. Lepidlo EkoBond E610	str. 20
Obr. 8. Potahová tkanina Ceconite 101	str. 21
Obr. 9. Křídlo hornoplošníku Citabria potažené tkaninou Ceconite 101 [47]	str. 22
Obr. 10. Popis výpočtu svazků u tkanin [46]	str. 22
Obr. 11. Ocelový plech pouze odmaštěný	str. 23
Obr. 12. Zkušební tělesa – lepidlo aktivováno teplem	str. 24
Obr. 13. Zkušební tělesa – modifikace vypuštěním aktivace teplem	str. 24
Obr. 14. Zkušební tělesa – ocelových plech pozinkovaný	str. 25
Obr. 15. Zkušební tělesa – letecká překližka	str. 25
Obr. 16. Univerzální zkušební stroj LabTest	str. 26
Obr. 17. Korozní komora	str. 27
Obr. 18. Vzorky v korozní komoře	str. 27
Obr. 19. Průběh zkušebního cyklu D2 [51]	str. 28
Obr. 20. Tryskací kabina ITB 65	str. 29
Obr. 21. Abrazivo granát 80	str. 29
Obr. 22. Drsnoměr surftest 301	str. 29

Obr. 23. Elektronový mikroskop Tescan	str. 30
Obr. 24. Povrch ocelového adherendu upravený tryskáním	str. 35
Obr. 25. Typické adhezní porušení u vzorků s lepidlem aktivovaným teplem	str. 36
Obr. 26. Adhezní porušení u vzorků s modifikací výrobního postupu	str. 37
Obr. 27. Adhezní porušení u vzorků lepených pouze na odmaštěný plech	str. 38
Obr. 28. Adhezní porušení u vzorků lepených na překližkový povrch	str. 39
Obr. 29. Adhezní porušení u vzorků lepených na žárově zinkovaný plech	str. 39
Obr. 30. Naměřené výsledky nedegradovaných vzorků	str. 41
Obr. 31. Naměřené výsledky degradovaných vzorků tryskaný plech	str. 44
Obr. 32. Adhezní porušení zkušebních ocelových vzorků (zleva: 1. až 5. týden)	str. 45
Obr. 33. Adhezní porušení zkušebních ocelových vzorků (zleva: 6. až 9. týden)	str. 46
Obr. 34. Naměřené výsledky degradovaných vzorků překližka	str. 47
Obr. 35. Průběh zatěžující síly v závislosti na čase	str. 47
Obr. 36. Adhezní porušení překližkových vzorků (zleva: 1. až 4. týden)	str. 49
Obr. 37. Adhezní porušení překližkových vzorků (zleva: 5. až 8. týden)	str. 49
Obr. 38. Tahová zkouška tkaniny Ceconite	str. 50
Obr. 39. Typické porušení tkaniny Ceconite	str. 50
Obr. 40. Tkanina Ceconite na snímku z elektronového mikroskopu	str. 52
Obr. 41. Místo porušení svazku tkaniny	str. 52

10. Přílohy

10.1. Příloha 1 – drsnost

	Pouze odmaštěno		Odmaštěno a tryskáno	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
	1,11	7,2	1,9	9,1
	0,86	5,0	1,8	10,1
	0,84	4,2	1,9	10,3
	0,76	4,8	2,0	10,5
	0,90	5,3	2,2	9,8
	1,01	5,6	1,8	10,3
	0,88	4,8	2,4	10,6
	0,95	5,5	1,6	9,8
Průměr	0,91±0,1	5,30±0,83	1,95±0,23	10,06±0,46

10.2. Příloha 2 (A) - vzorky bez degradace

	Pevnost [MPa]				
	Pouze odmaštěno	Tryskáno a odmaštěno	Tryskáno žehleno	Překližka	Zinkovaný plech
1	0,662	0,773	0,414	1,241	1,303
2	0,673	0,663	0,852	1,083	1,306
3	0,636	0,679	0,566	0,953	1,521
4	0,825	0,879	0,871	1,128	1,373
5	0,871	0,873	0,360	1,148	0,910
6	0,592	0,775	0,400	1,200	0,804
7			0,683		
8			0,757		
9			0,881		
10			0,610		
11			0,708		
12			0,408		
Průměr	0,710	0,774	0,626	1,126	1,203
Směrodatná odchylka	0,102	0,084	0,187	0,092	0,257
Variační koeficient	0,143	0,109	0,299	0,082	0,213

Příloha 2 (B) – Bartlettův test

Test for Equality of Variances of SILA Categorized by values of POVRCH Date: 03/11/17 Time: 19:54 Sample: 1 30 Included observations: 30			
Method	df	Value	Probability
Bartlett	3	5.231360	0.1556
Levene	(3, 26)	3.742006	0.0233
Brown-Forsythe	(3, 26)	3.281024	0.0367

Category Statistics				
POVRCH	Count	Std. Dev.	Mean Abs. Mean Diff.	Mean Abs. Median Diff.
otryskano_a	6	0.091943	0.068711	0.068711
otryskano_ze	12	0.195720	0.166097	0.166097
pouze_odma	6	0.111371	0.091933	0.079614
Preklizka	6	0.100822	0.071511	0.070765
All	30	0.235346	0.112870	0.110257

Bartlett weighted standard deviation: 0.148904

Příloha 2 (C) - Jednofaktorová analýza rozptylu – ANOVA

Test for Equality of Means of SILA Categorized by values of POVRCH Date: 03/11/17 Time: 19:57 Sample: 1 30 Included observations: 30			
Method	df	Value	Probability
Anova F-test	(3, 26)	15.48126	0.0000
Welch F-test*	(3, 13.3358)	22.36189	0.0000

*Test allows for unequal cell variances

Analysis of Variance			
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.
Between	3	1.029764	0.343255
Within	26	0.576479	0.022172
Total	29	1.606243	0.055388

Category Statistics				
POVRCH	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean
otryskano_a	6	0.773538	0.091943	0.037535
otryskano_ze	12	0.625752	0.195720	0.056499
pouze_odma	6	0.709889	0.111371	0.045467
Preklizka	6	1.125539	0.100822	0.041160
All	30	0.772094	0.235346	0.042968

10.3. Příloha 3 (A) – Degradované vzorky ocelový plech

Týdny degradace	Pevnost [MPa]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vzorek	0,801	0,710	0,719	0,619	0,670	0,572	0,664	0,805	0,574
Vzorek	1,000	0,564	0,741	0,587	0,598	0,679	0,471	0,701	0,982
Vzorek	0,980	0,477	0,580	0,705	0,720	0,616	0,820	1,002	0,747
Vzorek	0,904	0,416	0,647	0,646	0,714	0,587	0,811	0,787	0,607
Vzorek	0,863	0,406	0,707	0,554	0,615	0,516	0,773	0,523	0,784
Vzorek	0,585	0,272	0,416	0,685	0,745	0,743	0,722	0,744	0,804
Průměr [MPa]	0,856	0,474	0,635	0,633	0,677	0,619	0,710	0,760	0,750

Příloha 3 (B) Statistické výpočty degradovaných vzorků ocel

Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:28 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:30 Sample: 1 12 Included observations: 12					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	1.132314	0.2839	t-test	10	-4.169329	0.0019		
Satterthwaite-Welch t-test*	8.235181	1.132314	0.2894	Satterthwaite-Welch t-test*	8.290033	-4.169329	0.0029		
Anova F-test	(1, 10)	1.282136	0.2839	Anova F-test	(1, 10)	17.38330	0.0019		
Welch F-test*	(1, 8.23518)	1.282136	0.2894	Welch F-test*	(1, 8.29003)	17.38330	0.0029		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.020181	0.020181	Between	1	0.269220	0.269220		
Within	10	0.157399	0.015740	Within	10	0.154873	0.015487		
Total	11	0.177580	0.016144	Total	11	0.424093	0.038554		
Category Statistics				Category Statistics					
TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err.	TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err.
1_tyden	6	0.855556	0.151744	0.061949	2_tyden	6	0.473972	0.150070	0.061266
Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535	Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535
All	12	0.814547	0.127058	0.036678	All	12	0.623755	0.196352	0.056682
Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:32 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:33 Sample: 1 12 Included observations: 12					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-2.220443	0.0507	t-test	10	-3.178957	0.0098		
Satterthwaite-Welch t-test*	9.286466	-2.220443	0.0526	Satterthwaite-Welch t-test*	8.418485	-3.178957	0.0122		
Anova F-test	(1, 10)	4.930369	0.0507	Anova F-test	(1, 10)	10.10576	0.0098		
Welch F-test*	(1, 9.28647)	4.930369	0.0526	Welch F-test*	(1, 8.41848)	10.10576	0.0122		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.057662	0.057662	Between	1	0.059597	0.059597		
Within	10	0.116953	0.011695	Within	10	0.058974	0.005897		
Total	11	0.174616	0.015874	Total	11	0.118571	0.010779		
Category Statistics				Category Statistics					
TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err.	TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err.
3_tyden	6	0.634899	0.122218	0.049895	4_tyden	6	0.632592	0.057804	0.023598
Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535	Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535
All	12	0.704219	0.125993	0.036371	All	12	0.703065	0.103823	0.029971
Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:35 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:37 Sample: 1 12 Included observations: 12					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-2.160251	0.0561	t-test	10	-3.093035	0.0114		
Satterthwaite-Welch t-test*	8.589261	-2.160251	0.0605	Satterthwaite-Welch t-test*	9.844980	-3.093035	0.0116		
Anova F-test	(1, 10)	4.666684	0.0561	Anova F-test	(1, 10)	9.566864	0.0114		
Welch F-test*	(1, 8.58926)	4.666684	0.0605	Welch F-test*	(1, 9.84498)	9.566864	0.0116		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.028073	0.028073	Between	1	0.071856	0.071856		
Within	10	0.060155	0.006016	Within	10	0.075110	0.007511		
Total	11	0.088228	0.008021	Total	11	0.146966	0.013361		
Category Statistics				Category Statistics					
TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err.	TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err.
5_tyden	6	0.676804	0.059813	0.024419	6_tyden	6	0.618773	0.081046	0.033087
Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535	Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535
All	12	0.725171	0.089559	0.025853	All	12	0.696156	0.115588	0.033367

Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:39 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:40 Sample: 1 12 Included observations: 12					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-0.972164	0.3539	t-test	10	-0.178873	0.8616		
Satterthwaite-Welch t-test*	8.972077	-0.972164	0.3564	Satterthwaite-Welch t-test*	8.108790	-0.178873	0.8624		
Anova F-test	(1, 10)	0.945102	0.3539	Anova F-test	(1, 10)	0.031996	0.8616		
Welch F-test*	(1, 8.97208)	0.945102	0.3564	Welch F-test*	(1, 8.10879)	0.031996	0.8624		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.012077	0.012077	Between	1	0.000523	0.000523		
Within	10	0.127789	0.012779	Within	10	0.163491	0.016349		
Total	11	0.139866	0.012715	Total	11	0.164014	0.014910		
Category Statistics				Category Statistics					
TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean
7_tyden	6	0.710089	0.130783	0.053392	8_tyden	6	0.760333	0.155707	0.063567
Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535	Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535
All	12	0.741814	0.112761	0.032551	All	12	0.766936	0.122108	0.035250
Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:42 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of SILA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 20:04 Sample: 1 59 Included observations: 59					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-0.335811	0.7440	Anova F-test	(9, 49)	4.498004	0.0002		
Satterthwaite-Welch t-test*	8.363358	-0.335811	0.7453	Welch F-test*	(9, 19.6703)	2.975322	0.0207		
Anova F-test	(1, 10)	0.112769	0.7440	*Test allows for unequal cell variances					
Welch F-test*	(1, 8.36336)	0.112769	0.7453	Analysis of Variance					
*Test allows for unequal cell variances				Source of Variation					
Analysis of Variance				df	Sum of Sq.	Mean Sq.			
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Between	9	0.601613	0.066846		
Between	1	0.001710	0.001710	Within	49	0.728200	0.014861		
Within	10	0.151597	0.015160	Total	58	1.329812	0.022928		
Total	11	0.153306	0.013937	Category Statistics					
Category Statistics				TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	
TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	1_tyden	6	0.855556	0.151744	0.061949
9_tyden	6	0.749667	0.147871	0.060368	2_tyden	6	0.473972	0.150070	0.061266
Bez_degrada	6	0.773538	0.091943	0.037535	3_tyden	6	0.634899	0.122218	0.049895
All	12	0.761602	0.118055	0.034079	4_tyden	6	0.632592	0.057804	0.023598
					5_tyden	6	0.676804	0.059813	0.024419
					6_tyden	6	0.618773	0.081046	0.033087
					7_tyden	6	0.710089	0.130783	0.053392
					8_tyden	6	0.760333	0.155707	0.063567
					9_tyden	6	0.749667	0.147871	0.060368
					Bez_degrada	5	0.773292	0.102793	0.045970
					All	59	0.687162	0.151419	0.019713

10.4. Příloha 4 (A) – Degradované vzorky letecká překližka

Týdny degradace	Pevnost [MPa]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Vzorek	0,869	0,491	0,695	0,535	0,533	0,676	0,788	0,748
Vzorek	0,626	0,452	0,802	0,404	0,675	0,485	0,703	0,668
Vzorek	0,938	0,491	0,744	0,538	0,754	0,609	0,730	0,653
Vzorek	0,927	0,366	0,690	0,513	0,656	0,774	0,635	0,725
Vzorek	0,514	0,376	0,740	0,250	0,537	0,697	0,664	
Vzorek	0,962	0,697	0,634	0,496	0,618	0,481	0,904	

Průměr [MPa]	0,806	0,479	0,718	0,456	0,629	0,620	0,737	0,699
---------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Příloha 4 (B) Statistické výpočty degradovaných vzorků letecká překližka

Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:06 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:09 Sample: 1 12 Included observations: 12					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-3.658448	0.0044	t-test	10	-10.10158	0.0000		
Satterthwaite-Welch t-test*	7.640879	-3.658448	0.0069	Satterthwaite-Welch t-test*	9.708034	-10.10158	0.0000		
Anova F-test	(1, 10)	13.38424	0.0044	Anova F-test	(1, 10)	102.0418	0.0000		
Welch F-test*	(1, 7.64088)	13.38424	0.0069	Welch F-test*	(1, 9.70803)	102.0418	0.0000		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.306184	0.306184	Between	1	1.254889	1.254889		
Within	10	0.228765	0.022876	Within	10	0.122978	0.012298		
Total	11	0.534949	0.048632	Total	11	1.377866	0.125261		
Category Statistics				Category Statistics					
DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean
1_tyden	6	0.806069	0.188647	0.077015	2_tyden	6	0.478781	0.120127	0.049042
Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160	Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160
All	12	0.965804	0.220526	0.063660	All	12	0.802160	0.353922	0.102168
Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:10 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:12 Sample: 1 12 Included observations: 12					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-8.609682	0.0000	t-test	10	-10.85929	0.0000		
Satterthwaite-Welch t-test*	7.955409	-8.609682	0.0000	Satterthwaite-Welch t-test*	9.883507	-10.85929	0.0000		
Anova F-test	(1, 10)	74.12663	0.0000	Anova F-test	(1, 10)	117.9242	0.0000		
Welch F-test*	(1, 7.95541)	74.12663	0.0000	Welch F-test*	(1, 9.88351)	117.9242	0.0000		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.500017	0.500017	Between	1	1.344699	1.344699		
Within	10	0.067454	0.006745	Within	10	0.114031	0.011403		
Total	11	0.567471	0.051588	Total	11	1.458730	0.132612		
Category Statistics				Category Statistics					
DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean
3_tyden	6	0.717284	0.057670	0.023544	4_tyden	6	0.456037	0.112433	0.045900
Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160	Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160
All	12	0.921412	0.227131	0.065567	All	12	0.790788	0.364159	0.105124
Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:14 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:16 Sample: 1 12 Included observations: 12					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-9.219461	0.0000	t-test	10	-7.943481	0.0000		
Satterthwaite-Welch t-test*	9.728859	-9.219461	0.0000	Satterthwaite-Welch t-test*	9.742496	-7.943481	0.0000		
Anova F-test	(1, 10)	84.99846	0.0000	Anova F-test	(1, 10)	63.09889	0.0000		
Welch F-test*	(1, 9.72886)	84.99846	0.0000	Welch F-test*	(1, 9.7425)	63.09889	0.0000		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.740412	0.740412	Between	1	0.765928	0.765928		
Within	10	0.087109	0.008711	Within	10	0.121385	0.012139		
Total	11	0.827521	0.075229	Total	11	0.887314	0.080665		
Category Statistics				Category Statistics					
DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean
5_tyden	6	0.628746	0.085186	0.034777	6_tyden	6	0.620258	0.118794	0.048497
Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160	Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160
All	12	0.877143	0.274279	0.079178	All	12	0.872899	0.284016	0.081988

Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:18 Sample: 1 12 Included observations: 12				Test for Equality of Means of ANALYZA Categorized by values of DEGRADACE Date: 03/11/17 Time: 21:21 Sample: 1 10 Included observations: 10					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
t-test	10	-6.781810	0.0000	t-test	8	-7.839045	0.0001		
Satterthwaite-Welch t-test*	9.988698	-6.781810	0.0000	Satterthwaite-Welch t-test*	7.360792	-9.090200	0.0000		
Anova F-test	(1, 10)	45.99295	0.0000	Anova F-test	(1, 8)	61.45063	0.0001		
Welch F-test*	(1, 9.9887)	45.99295	0.0000	Welch F-test*	(1, 7.36079)	82.63174	0.0000		
*Test allows for unequal cell variances				*Test allows for unequal cell variances					
Analysis of Variance				Analysis of Variance					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.		
Between	1	0.452309	0.452309	Between	1	0.437671	0.437671		
Within	10	0.098343	0.009834	Within	8	0.056978	0.007122		
Total	11	0.550652	0.050059	Total	9	0.494649	0.054961		
Category Statistics				Category Statistics					
DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	DEGRADAC	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean
7_tyden	6	0.737249	0.097486	0.039798	8_tyden	4	0.698500	0.045288	0.022644
Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160	Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160
All	12	0.931394	0.223739	0.064588	All	10	0.954724	0.234438	0.074136
Test for Equality of Means of SILA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 21:01 Sample: 1 52 Included observations: 52				Test for Equality of Variances of SILA Categorized by values of TYDEN Date: 03/11/17 Time: 21:02 Sample: 1 52 Included observations: 52					
Method	df	Value	Probability	Method	df	Value	Probability		
Anova F-test	(8, 43)	18.69718	0.0000	Bartlett	8	10.05354	0.2613		
Welch F-test*	(8, 17.7096)	16.38732	0.0000	Levene	(8, 43)	1.961979	0.0749		
*Test allows for unequal cell variances				Brown-Forsythe					
Analysis of Variance				(8, 43) 0.728320 0.6658					
Source of Variation	df	Sum of Sq.	Mean Sq.	Category Statistics					
Between	8	1.882815	0.235352	TYDEN	Count	Std. Dev.	Mean Abs. Mean Diff.	Mean Abs. Median Diff.	
Within	43	0.541265	0.012588	1_tyden	6	0.188647	0.157307	0.136222	
Total	51	2.424080	0.047531	2_tyden	6	0.120127	0.081031	0.081031	
Category Statistics				3_tyden	6	0.057670	0.044496	0.044496	
TYDEN	Count	Mean	Std. Dev.	Std. Err. of Mean	4_tyden	6	0.112433	0.086085	0.072764
1_tyden	6	0.806069	0.188647	0.077015	5_tyden	6	0.085186	0.066070	0.066070
2_tyden	6	0.478781	0.120127	0.049042	6_tyden	6	0.118794	0.095534	0.095534
3_tyden	6	0.717284	0.057670	0.023544	7_tyden	6	0.097486	0.072512	0.070223
4_tyden	6	0.456037	0.112433	0.045900	8_tyden	4	0.045288	0.038000	0.038000
5_tyden	6	0.628746	0.085186	0.034777	Bez_degrada	6	0.100822	0.071511	0.070765
6_tyden	6	0.620258	0.118794	0.048497	All	52	0.218016	0.080755	0.076435
7_tyden	6	0.737249	0.097486	0.039798	Bartlett weighted standard deviation: 0.112194				
8_tyden	4	0.698500	0.045288	0.022644					
Bez_degrada	6	1.125539	0.100822	0.041160					
All	52	0.696419	0.218016	0.030233					