



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

## LEPENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

BONDING OF COMPOSITE MATERIALS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Drkoš

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Karel Němec, Ph.D.

BRNO 2018

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	<b>Jan Drkoš</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Karel Němec, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Lepení kompozitních materiálů

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se zaměří na technologii lepení dílů z kompozitních materiálů, zejména kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny. V práci bude uvedena rešerše vhodných lepidel, přípravy materiálu, technologie lepení, základní druhy vad lepeného spoje a testovací metody. Z výše uvedeného bude zpracováno doporučení pro výběr lepidla pro danou aplikaci včetně doporučené technologie.

### **Cíle bakalářské práce:**

- charakteristika lepení a druhy lepených spojů,
- vady lepených spojů a druhý testování,
- porovnání různých lepidel,
- návrh vhodného lepidla s doporučenou technologií lepení pro vybraný spoj.

### **Seznam doporučené literatury:**

KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V. a VOJTĚCH, D. Úvod do studia materiálů. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4.

CHUNG, D. D. L. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X.

ADAMS, R. D. Adhesive Bonding - Science, Technology and Applications. Woodhead Publishing, 2005. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpABSTA002/adhesive-bonding-science/adhesive-bonding-science>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

---

## Abstrakt

Práce se zabývá rozbořem problematiky lepení kompozitních materiálů a následným výběrem lepidla pro zadaný lepený spoj skládající se ze dvou kusů uhlíkových kompozitů. V práci je stručně shrnuta teorie kompozitních materiálů a následně podrobněji vysvětlena teorie lepení společně s následným testováním lepeného spoje. Další část práce se soustředí na průzkum trhu v oblasti dostupných a vhodných lepidel a na následný výběr nového lepidla pro zadaný lepený spoj, pro který se doposud využívalo epoxidového lepidla. V této části byly podrobně testovány lepené spoje, slepené dvěma předem vybranými lepidly a následně vyvození závěru pro výběr nejvhodnějšího lepidla.

## Klíčová slova

Lepení, kompozit, JetSurf, epoxidy, metylmetakryláty

---

## Abstract

The thesis deals with the analysis of the bonding of composite materials and the subsequent selection of adhesive for the specified glued joint consisting of two pieces of carbon composites. The thesis summarizes the theory of composite materials and then explains in more detail the theory of bonding together with the subsequent testing of glued joint. Another part of the thesis focuses on the market research in the field of available and suitable adhesives and the subsequent selection of the new adhesive for the glued joint, on which the epoxy adhesive was previously used. In this part, glued joints with two pre-selected adhesives were tested and then a conclusion was drawn for the selection of the most suitable adhesive.

## Key words

Bonding, composite, JetSurf, epoxides, methylmethacrylates

---

## Bibliografická citace

DRKOŠ, Jan. *Lepení kompozitních materiálů*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Karel Němec.

---

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Karla Němce Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Jan Drkoš

---

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a cenné rady při jejím vytváření, jakožto i panu Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. za perfektní vedení ze strany firmy JetSurf s.r.o., u které jsem měl tu příležitost svou práci vytvořit. V neposlední řadě bych chtěl ještě poděkovat panu Ing. Viktoru Hladkému a panu Milanu Holému z firmy Matrix a.s., za jejich pomoc a předání zkušeností ohledně testování lepených spojů a i lepení materiálů obecně.

Velkou zásluhu na dokončení této práce má také moje rodina, které vděčím za morální podporu.

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>2</b>
2.1	CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	2
2.1.1	DRUHY VÝZTUŽÍ .....	2
2.1.2	ČÁSTICOVÁ VÝZTUŽ .....	4
2.1.3	VÝZTUŽ VLÁKNY.....	4
2.1.4	MATRICE .....	5
2.2	UHLÍKOVÉ KOMPOZITY .....	6
<b>3</b>	<b>LEPENÍ MATERIÁLU</b> .....	<b>7</b>
3.1	TEORIE LEPENÍ.....	7
3.1.1	ADHEZE, KOHEZE, SMÁČIVOST .....	8
3.2	PŘÍPRAVA POVRCHU .....	10
3.2.1	PŘÍPRAVA POVRCHU U KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	10
3.3	ROZDĚLENÍ LEPIDEL .....	12
3.3.1	EPOXIDOVÁ LEPIDLA.....	12
3.3.2	METYLMETAKRYLÁTOVÁ LEPIDLA .....	13
<b>4</b>	<b>LEPENÉ SPOJE</b> .....	<b>14</b>
4.1	TESTOVÁNÍ LEPENÉHO SPOJE .....	15
<b>5</b>	<b>REŠERŠE VHODNÝCH LEPIDEL</b> .....	<b>17</b>
5.1	TABULKA S VLASTNOSTMI JEDNOTLIVÝCH LEPIDEL.....	18
<b>6</b>	<b>ZKOUŠKY TAHEM</b> .....	<b>19</b>
6.1	ZADANÍ TESTU.....	19
6.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	20
6.3	PŘÍPRAVA POVRCHU PŘED LEPENÍM .....	20
6.4	LEPENÍ VZORKŮ.....	21
6.5	TESTOVÁNÍ.....	21
6.6	PRŮBĚH TESTOVÁNÍ.....	22
6.6.1	KLIMATICKÝ TEST .....	22
6.6.2	MECHANICKÝ TEST.....	23
6.7	VÝSLEDKY LABORATORNÍCH TESTŮ .....	24
6.7.1	VÝSLEDKY TESTŮ BEZ ZATÍŽENÍ.....	24
6.7.2	VÝSLEDKY TESTŮ PO TEPLTNÍM ZATÍŽENÍ V KLIMAKOMOŘE .....	27
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>CITACE</b> .....	<b>30</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>33</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>33</b>



## 1 Úvod

Kompozitní materiály s uhlíkovou výztuží zažívají v posledních třiceti letech obrovský rozmach, a to nejvíce v leteckém a kosmickém průmyslu. Tyto materiály jsou ale hojně využívány i v oblasti sportu. Právě v tomto odvětví začala před více než deseti lety podnikat firma MSR Engines s.r.o. se svým produktem JetSurf-motorizované surfové prkno s dvoutaktním motorem o objemu 90, respektive 100 kubických centimetrů a výkonem až okolo 14 koňských sil. Pro snadné ovládání je potřeba vytvořit lehký skelet, ke kterému se kompozity s uhlíkovou výztuží přímo nabízejí. S použitím kompozitů ale následně vyvstává i otázka spojení jednotlivých kompozitních dílů dohromady. Firma MSR Engines s.r.o. nebyla bezvýhradně spokojena se stávajícím epoxidovým lepidlem 3M DP-490 a proto mi byla nabídnuta možnost účastnit se na výběru nového, spolehlivějšího lepidla. Lepení je velmi komplexní proces závislý na spoustě faktorů, jako je například příprava povrchu před lepením, jeho smáčivost a mnoho dalších. Proto se musí pečlivě zvážit všechny aspekty vedoucí k ideálnímu spoji, především s velkým důrazem na reálný provoz.

Vzhledem k tomu, že na JetSurfu závodím, tak mi to přišlo jako ideální téma mé bakalářské práce, poněvadž bude mít zaprvé reálný výstup, a navíc se podílím na vývoji sportovního náčiní, které budu i aktivně využívat.



Obrázek 1.1 Jetsurf Race [1]

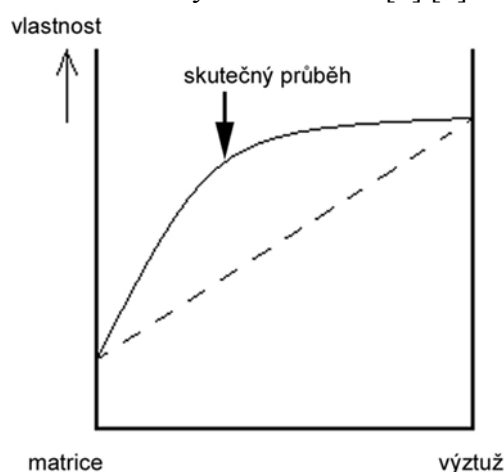
## 2 Kompozitní materiály

### 2.1 Charakteristika kompozitních materiálů

Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály, složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Spojení těchto materiálů dohromady přináší lepší vlastnosti, než kdybychom dané materiály použili odděleně. Obvykle je jedna fáze v kompozitu spojitá, takovou fázi nazýváme matrice. Fází, která je nespojitá, nazýváme výztuž. V porovnání s matricí má výztuž obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.). Hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností. Nejznámějším přírodním kompozitem je bezesporu dřevo, složené z celulózových vláken uložených v ligninu.

Pro umělé kompozitní materiály je charakteristické, že se vyrábějí postupy mechanického mísení nebo spojování jednotlivých složek. Tím se liší např. od slitin, které jsou rovněž heterogenní. U slitin však jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami např. při tunutí a jsou tedy blízko termodynamické rovnováhy.

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek (viz obrázek 2.1). Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [2] [3]



Obrázek 2.1 Synergické chování složek kompozitu [2]

#### 2.1.1 Druhy výztuží

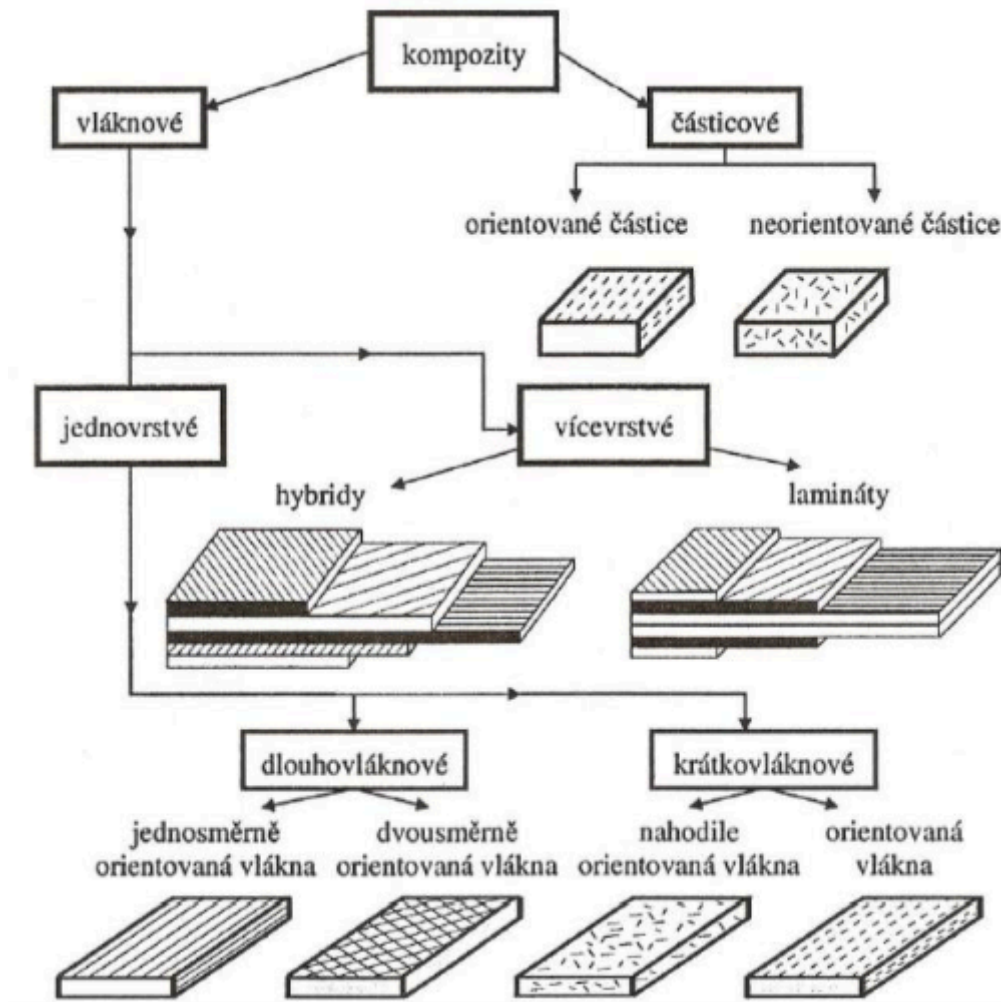
Typická výztuž obsahuje částice (orientované či neorientované) nebo vlákna, která mohou být buď spojitá nebo nespojitá.

U částicových kompozitů nepřesahuje jeden rozměr útvarů výztuže výrazně rozměry ostatní. Vyztužující částice pak mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný.

Naproti tomu u kompozitů vláknových jsou útvary výztuže (vlákna) v jednom směru výrazně rozměrnější než ve směrech ostatních. Vláknové kompozity dále dělíme podle délky

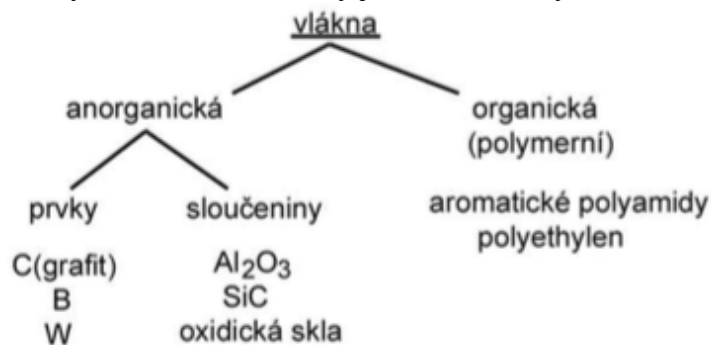
vyztužujících vláken na kompozity s krátkými vlákny, u nichž je délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku, a na kompozity s dlouhými (kontinuálními) vlákny, u nichž je délka srovnatelná s velikostí výrobku. Uspořádání kontinuálních vláken v kompozitech má řadu variant, z nichž tři jsou ukázány na obrázku 2.4. [2] [3]

Následující schéma popisuje základní rozdělení kompozitů.



Obrázek 2.2 Rozdělení kompozitních materiálů [4]

Dnes nejvyužívanější materiály výztuží jsou vlákna, která mohou být anorganické nebo organické (polymerní) povahy, konkrétní materiály jsou znázorněny na obrázku 2.3.[3]



Obrázek 2.3 Materiály výztuží kompozitních materiálů [2]

### 2.1.2 Částicová výztuž

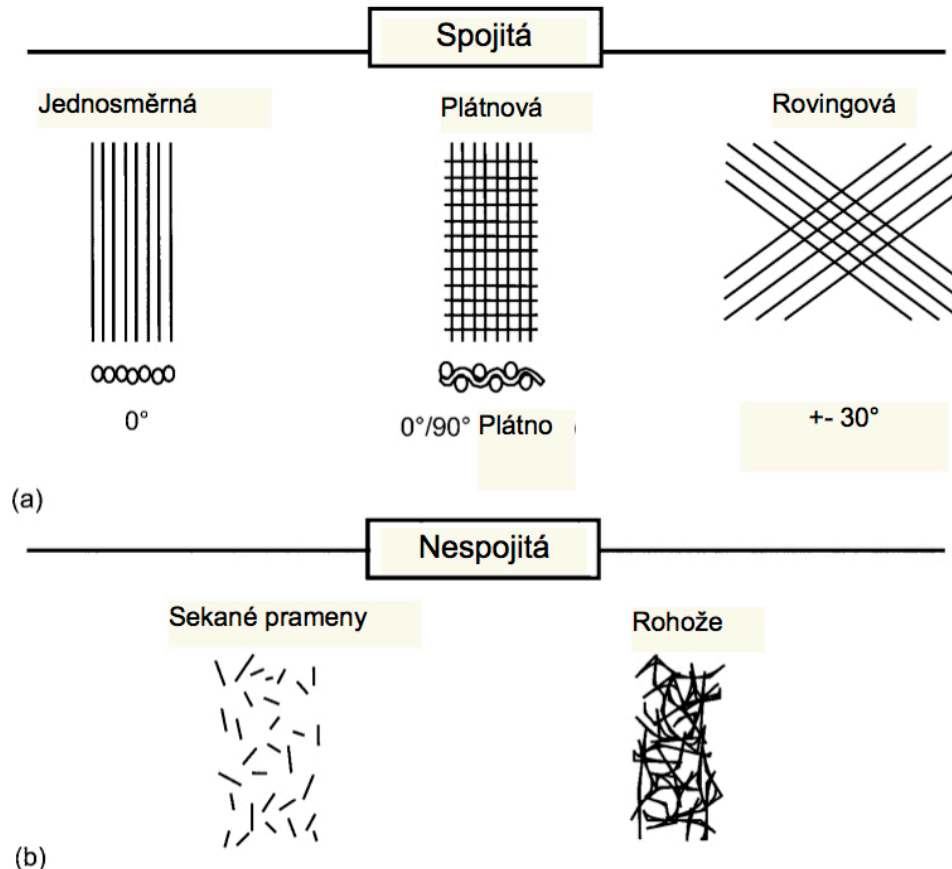
Částice mají zhruba stejné vlastnosti ve všech směrech (jsou izotropní) a mohou mít kulovitý, destičkovitý nebo jakýkoliv jiný, pravidelný, či nepravidelný tvar. Tyto částice jsou obvykle minerálního původu nebo jsou vyráběny i průmyslově, od čehož se potom odvíjí jejich výsledný tvar.

Částicová výztuž je využívána zejména pro zvýšení tvrdosti, ořezuvzdornosti a odolnosti při zvýšených teplotách. Jsou poměrně rozšířené s kovovými matricemi (slitiny Al, Cu, Ni, Co), u nichž jsou nejčastějšími materiály výztuží SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WC atd. Například kompozity SiC/Al s vysokou odolností proti otěru a se zvýšenou tepelnou stabilitou jsou využívány u brzdových obložení.

Částicové kompozity jsou mnohem méně tuhé a pevné než kompozity vláknové (ve směru vláken), ale za to jsou mnohonásobně levnější. Také obsahují méně výztuže než vláknové kompozity a to okolo 40-50 objemových procent, kvůli obtížně zpracovatelnému materiálu. [2] [5]

### 2.1.3 Výztuž vlákna

Geometrie vlákna je taková, že jeho průměr je mnohonásobně menší než jeho délka. Tento výsledný poměr (l/d) se může měnit – u spojitých výztuží je velký, zatímco u nespojitých menší. Spojité vláknové výztuže mají obvykle uspořádanou orientaci, zatímco výztuže nespojité mají orientaci čistě náhodnou. [3] [5]

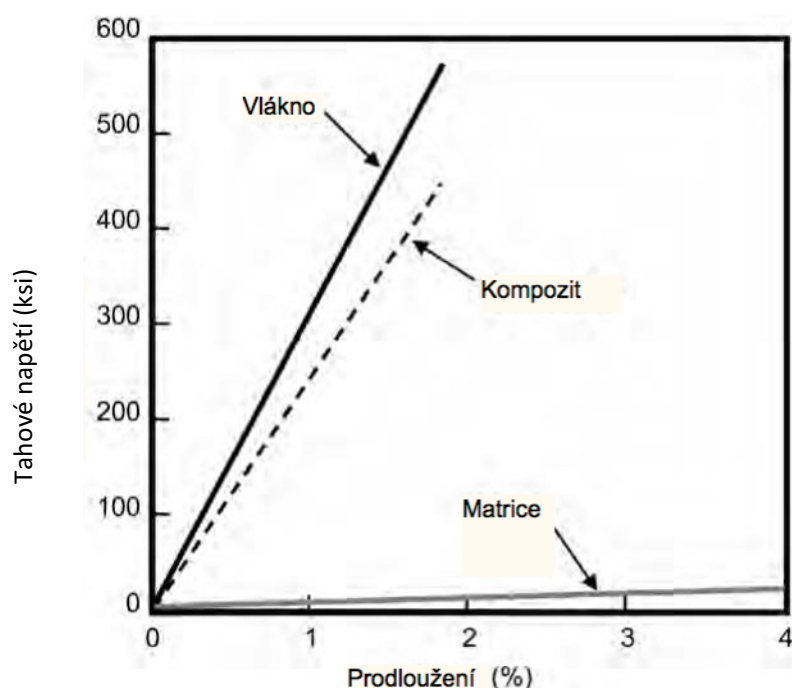


Obrázek 2.4 Druhy vláknitých výztuží, přeloženo do čj [3]

Spojité vláknové kompozity jsou často vyráběny jako lamináty – vrstvení jednotlivých plátů spojených vláken s rozdílným natočením, čímž získávají lepší tuhostní a pevnostní charakteristiky materiálu-jednotlivé pláty jsou velmi anizotropní a tímto vrstvením anizotropii omezíme. U vláknových kompozitů se používá zhruba 60-70 % vláken (výztuže), zbytek je matrice. Největší výhodou vláken je v jejich malé poruchovosti oproti ostatním materiálům s větším objemem. Obecně platí, že čím menší průměr dané vlákno má, tím vyšší je pevnost, ale bohužel většinou i cena výsledného kompozitu. [3] [5]

#### 2.1.4 Matrice

Matrice má několik velmi důležitých funkcí, sice kompozitu nevyšlepšuje tuhostní charakteristiky a mechanické vlastnosti, ale slouží k udržení vláken ve správné orientaci a udržuje mezery mezi nimi, chrání je před abrazí (otěrem) a vlivy okolního prostředí. [3] [5]



Obrázek 2.5 Porovnání vlastností vlákna, matrice a kompozitu při namáhání tahem, přeloženo do čj [5]

Podle povahy matrice dělíme kompozity do tří následujících skupin:

- s kovovou maticí (metal matrix composites – MMCs)
- s polymerní maticí (polymer matrix composites – PMCs)
- s keramickou maticí (ceramic matrix composites – CMCs)

Do skupiny kompozitů s keramickou maticí jsou rovněž obvykle řazeny kompozity se skleněnými a uhlíkovými maticemi.

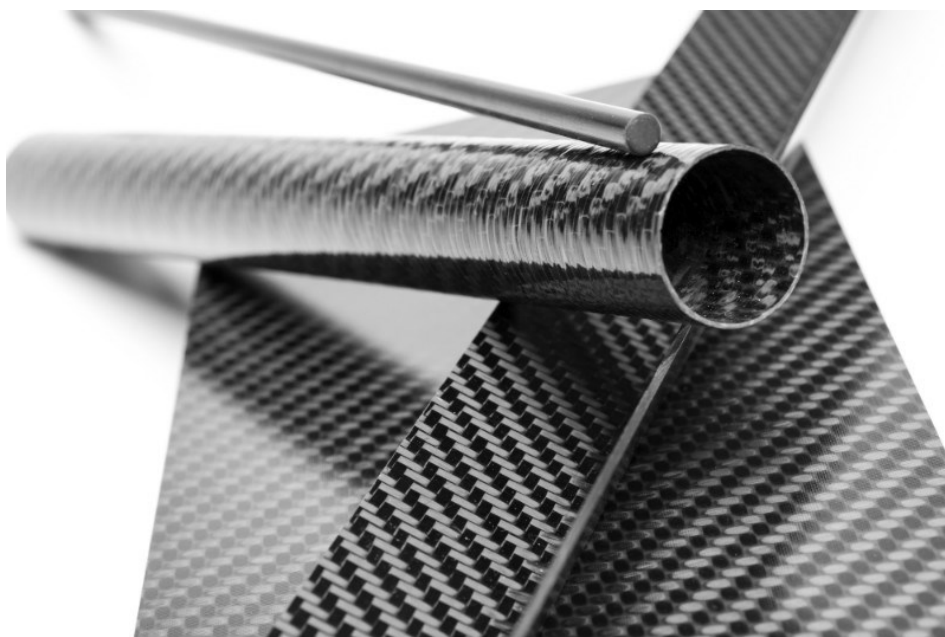
Kovové matrice jsou většinou tvárné a houževnaté. Nejvýznamnějšími zástupci jsou lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Pro velmi vysoké teploty jsou vyráběny kompozity s maticemi z niklových slitin a pro elektrotechnické účely kompozity s měděnými, případně se stříbrnými maticemi.

Hlavní výhodou polymerních matic v kompozitech je nízká hustota. Proto je jednou z hlavních oblastí jejich využití konstrukce letadel. Jistou nevýhodou je nízká tepelná stabilita polymerů. Nejvýznamnější kompozity mají matrice z reaktoplastů (polyesterové, epoxidové pryskyřice).

Keramické matrice bývají lehké a většinou velmi tvrdé, avšak poměrně křehké. Kompozity s keramickými matricemi patří mezi vysokoteplotní materiály. Keramické matrice mohou být oxidické povahy ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , oxidická skla atd.) i neoxidické povahy ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , C atd.). [2]

## 2.2 Uhlíkové kompozity

Uhlíkové výztuže jsou dnes nejvyužívanější a zároveň i nejperspektivnější forma vláken v kompozitních konstrukcích s vysokými nároky na následné použití, jako je například kosmonautika, letectví nebo různé vrcholové sporty. Mohou být vyrobeny s velmi širokou škálou vlastností. Jsou využívány především pro jejich nízkou váhu a vysokou pevnost v tahu a tlaku, mají vysoký modul pružnosti, vynikající únavové vlastnosti, vysokou tepelnou stabilitu a nekorodují. Použití matic je prakticky neomezené, můžeme je používat jak s polymerními (pryskyřice), kovovými (Al), tak i keramickými (C) matricemi. Uplatňují se hlavně v leteckém a kosmickém průmyslu. Prakticky jedinou nevýhodou je poměrně vysoká cena těchto kompozitů. [3] [5]



Obrázek 2.6 Uhlíkové kompozity [6]

Uhlíkové vlákno ve své struktuře obsahuje 93-95 % uhlíku a je extrémně anizotropní-kovalentně vázané bazální roviny jsou drženy pohromadě spíše slabými Van der Waalsovými silami ( $\approx 10$  kJ / mol), příčná pevnost a modul pružnosti vláken jsou mnohonásobně menší, než jejich podélné hodnoty. Například, podélný modul pružnosti může být až 1000 GPa, přičemž příčný modul pružnosti je pouze cca 35 GPa.

Vysoce kvalitní uhlíková vlákna C-PAN jsou vyráběna až při teplotách 2000 °C, při procesu zvaném pyrolýza – tepelný rozklad organických vláken v inertní atmosféře z  $\text{N}_2$  nebo Ar. Při pyrolýze prochází organické vlákno z polyakrylonitrilu reaktorem s inertním plynem a karbonizací (odstraněním všech heteroatomů) se z něj na výstupu stává uhlíkové vlákno. Čím

vyšší je teplota žíhání, tím má výsledné uhlíkové vlákno vyšší modul pružnosti, ale zároveň i nižší pevnost. Nejoptimálnější teplota žíhání v reaktoru je okolo 1500°C.

Další, finančně méně zatěžující proces výroby uhlíkových vláken, je pyrolýza zbytků po destilaci ropy, smol, dehtu atd., tento způsob výroby ale vytváří méně kvalitní uhlíková vlákna (nižší modul pružnosti a pevnost), což omezuje výsledný okruh možností využití při náročnějším namáhání. [1] [2] [3]

### 3 Lepení materiálu

Lepení je široce používaný průmyslový proces spojování, ve kterém polymerní materiál (lepidlo) slouží ke spojení dvou samostatných kusů výrobků. Existuje mnoho typů lepidel, některé se vytvrzují, zatímco jiné ne. U některých jsou spoje po vytvrzení pevné a tuhé, zatímco jiné spoje mohou být slabší a houževnaté. Lepidla používaná pro lepení kompozitních struktur jsou vždy vytvrzována buď při pokojové teplotě nebo při teplotě zvýšené a musí mít dostatečnou pevnost pro přenos zatížení přes spoj. Existuje mnoho druhů konstrukčních lepidel, nicméně, epoxidové pryskyřice, nitril-fenolické a bismaleinimidové (BMI) jsou nejčastější. Mimo výrobu velkých, spojených kompozitních komponentů, se lepení často používá i pro opravy poškozených kompozitních dílů.

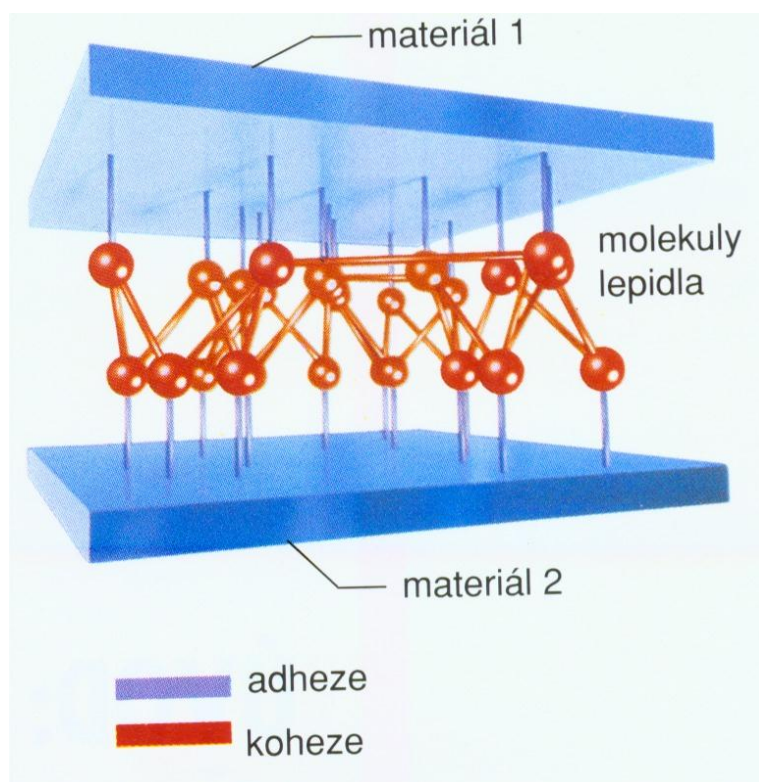
Spojování kompozitních struktur pomocí lepení odstraňuje většinu nebo všechny finanční náklady a hmotnost mechanických spojovacích prostředků. Existují dva hlavní způsoby lepení kompozitních struktur, a těmi jsou sekundární lepení a co-curing. Při sekundárním lepení, jsou vytvrzené kompozity přilepeny k jinému vytvrzenému kompozitu, voštině, pěnovému jádru nebo kovové části. Co-curing je proces, při kterém se nevytvrzené kompozitní vrstvy vytvrdí a současně během tohoto cyklu vytvrzování slepí buď daný materiál nebo ho slepí s jiným kompozitním dílcem. Možností vyrábění velkých spojených struktur formou co-curingu lze eliminovat významnou část nákladů na montáž.

Lepené spoje jsou výhodnější, pokud mají být spojeny tenké kompozitové úseky s nepříjemně vysokým napětím ve šroubových spojích nebo pokud je hmotnost mechanických spojovacích prostředků příliš vysoká. Obecně lze říci, že tenké konstrukce s dobře definovanými průběhy zatížení jsou vhodné pro lepení, zatímco konstrukce s větší tloušťkou a se složitými průběhy zatížení jsou lepšími kandidáty pro mechanické spojení. [3] [5]

#### 3.1 Teorie Lepení

Pevnost lepeného spoje závisí na čtyřech faktorech. Těmito faktory jsou adheze (přilnavost lepidla k lepenému povrchu), koheze (vnitřní pevnost lepidla), smáčivost povrchu (při použití kapalného lepidla) a pevnost lepeného materiálu. [3] [5]

## 3.1.1 Adheze, koheze, smáčivost



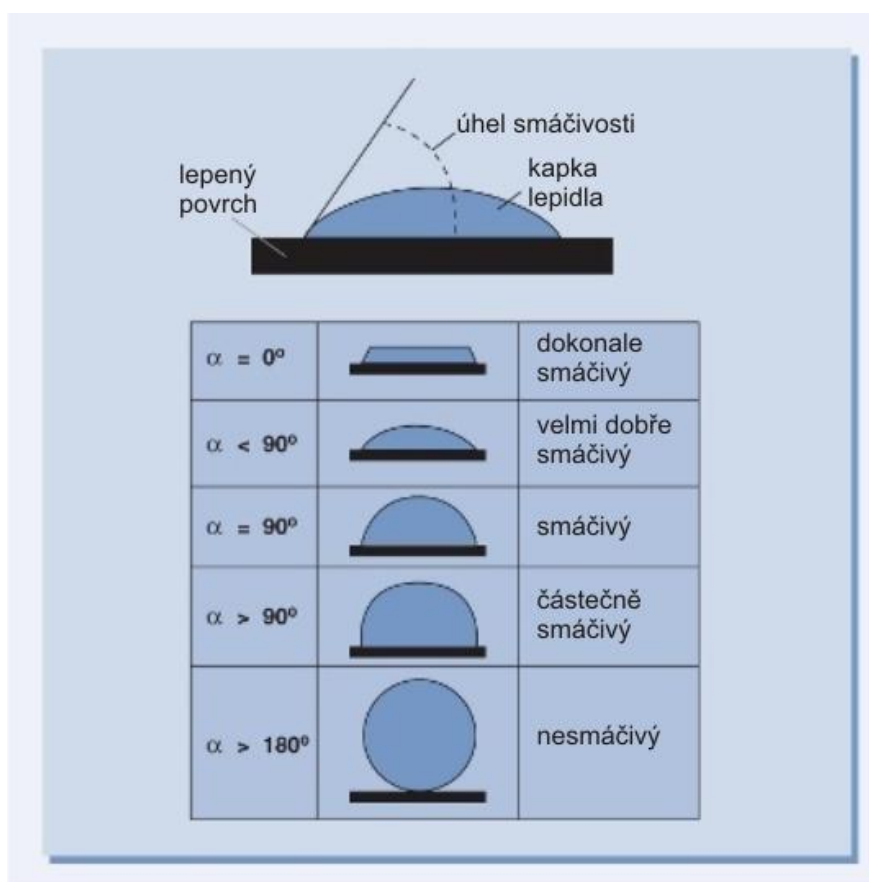
Obrázek 3.1 Znárodnění vnitřních sil v lepeném spoji [7]

I když existuje řada teorií o povaze adheze při lepení, panuje všeobecná shoda o tom, co vede k dobrému lepenému spoji.

Hlavním faktorem je drsnost povrchu—čím hrubší povrch, tím větší plocha je k dispozici pro lepidlo, k proniknutí a sjednocení se s lepeným povrchem. Tekuté lepidlo zde proniká do pórů a nerovností lepeného materiálu a po jeho zatuhnutí se vytvoří pevná vazba. Tento typ vazby se nazývá vazba mechanická a uplatňuje se hlavně u členitých a porézních povrchů, jako je dřevo, papír, keramika nebo pěnové plasty. Při lepení hladkých, leštěných ploch je tato vazba tak malá, že ji můžeme zanedbávat.

Chemická vazba se uplatňuje jak u porézních, tak i u zcela hladkých povrchů. V chemické vazbě jde zejména o chemické působení lepidla na lepený povrch a také zde působí slabé Van der Waalovy elektrické přitažlivé síly mezi molekulami lepidla a lepeného materiálu. Díky těmto vlastnostem se lépe lepí materiály s reaktivním povrchem nebo s povrchem upraveným tak, aby povrch lepeného spoje umožňoval vznik chemické reakce mezi lepidlem a povrchem, zapříčiňující vznik kovalentní vazby. Výborně se tedy lepí oxidované povrchy, jako jsou kovy (ty se ještě leptají/eloxují) a oxidované plasty, dále pak povrchy přírodních polymerů (dřevo, papír, celulóza) s volnými chemickými skupinami oxy-, hydroxy-, karbonyl-, karboxymethyl-, amino- ( $-O$ ,  $-OH$ ,  $-CO$ ,  $-COCH_3$ ,  $-NH_2$ ) a dalšími. Těmto skupinám musí odpovídat i zvolené lepidlo, které má volné skupiny schopné reakce s povrchem materiálu. Vysoce reaktivní skupiny u lepidel jsou například skupiny epoxy-, hydroxy-, karboxy-, isokyanáto- a další.

Aby bylo proniknutí lepidla účinné, lepidlo musí smáčet povrch. Jestliže se lepidlo nedokáže rovnoměrně rozprostřít po lepeném povrchu, žádná adheze nevzniká a spoj se stává nefunkčním. Smáčivost je funkcí čistoty lepeného povrchu, viskozity lepidla, polarity a povrchového napětí lepidla a lepeného povrchu. Význam čistoty povrchu by se měl zdůraznit asi nejvíce, je to prakticky základní kámen každého lepeného spoje. Lepidla obsahují spoustu reakce schopných chemických skupin, a proto jsou molekuly lepidla polární (jednostranně elektricky orientované), to znamená, že dobře smáčí polární povrchy (molekuly se „přitahují“), jako je například dřevo, papír a jiné deriváty celulózy, mírně povrchově oxidované kovy, přírodní textilie a například i sklo a mnohé další. Nepolární povrchy (mnohé plasty, syntetické textilie) je nutné upravovat tak, aby se staly polárnějšími a aby se na něm vyskytovaly reakce schopné chemické skupiny. To je docíleno například povrchovou oxidací, ke které se používá například ošlehnutí plamenem nebo působení silných oxidačních činidel (peroxid vodíku s kyselinou sírovou nebo kyselina chromsírová), nebo častěji koronizací elektrickým jiskrovým výbojem. [3] [5] [8]



Obrázek 3.2 Smáčivost povrchu [7]

Povrchové napětí je funkcí polarity. Čím vyšší je hodnota povrchového napětí, tím je i vyšší polarita daného materiálu. Je-li povrchové napětí lepidla nižší než povrchové napětí materiálu, kapka lepidla se nerozlije a drží na povrchu jako kulička-povrch nesmáčí a tím pádem bude výsledný lepený spoj nefunkční díky slabé adhezi. Pro povrchové napětí se užívá jednotka mN.m .

Koheze vyjadřuje vlastní pevnost daného lepidla. Ta by měla být o trochu nižší nebo podobně silná, jako koheze lepeného materiálu, abychom docílili ideálního lepeného spoje. Kohezní pevnost závisí na charakteru lepidla (dvousložkové epoxidy mají vysokou kohezní pevnost, měkké akryláty zase nízkou-na lepení samolepících etiket) a na tepelném namáhání

lepeného spoje, kdy většina jednosložkových lepidel jsou termoplasty–měknou při zvyšující se teplotě.

Pro co nejlepší lepený spoj, musí být splněny následující podmínky: Povrch musí být čistý, měl by mít co nejvyšší drsnost, lepidlo musí smáčet a důkladně navlhčit povrch a povrchové napětí/polarita lepidla musí být vyšší než polarita lepeného povrchu, aby došlo ke smáčení povrchu lepidlem. [3] [5] [8]

## 3.2 Příprava povrchu

Příprava povrchu materiálu před lepením je základem lepeného spoje. Rozsáhlé pole zkušeností z provozu se strukturálními lepenými spoji opakovaně prokázaly, že trvanlivost lepeného spoje závisí na stabilitě a přilnavosti k povrchu lepeného materiálu.

Vysoce výkonné konstrukční lepidlo vyžaduje vysokou úroveň péče během celého procesu spojování, pro zajištění kvality lepeného výrobku. Chemická kontrola složení lepidla, přísná kontrola přípravy povrchů materiálů a parametrů procesu, kontrola správného rozprostření lepidla a přesný proces vytvrzování jsou potřebné k výrobě trvanlivé lepené sestavy. [3]

### 3.2.1 Příprava povrchu u kompozitních materiálů

Technik pro přípravu povrchu kompozitů se v současné době používá mnoho.

Úspěch jakékoliv techniky závisí na zavedení komplexního materiálu, zpracování a kontroly kvality, která musí být přísně monitorována. Způsob, který získal široké využití, je použití strhávací tkaniny. Při tomto procesu je hustě tkaná nylonová nebo polyesterová tkanina použita jako vnější vrstva kompozitu a následně odstraněna. Tato vrstva se odtrhává nebo odlupuje od povrchu těsně před lepením nebo lakováním. To způsobuje, že odtrhnutí/odlup naruší matici a odhaluje čistý a zároveň zdrsňený povrch pro proces lepení.

Požadované drsnosti povrchu můžeme do jisté míry dosáhnout díky vazebním charakteristikám strhávací tkaniny. [3] [5]



Obrázek 3.3 Nylonová strhávací tkanina [8]

Někteří výrobci uvádějí, že samotné odtržení strhávací tkaniny je dostačující, zatímco jiní tvrdí, že je nezbytné dodatečné ruční broušení nebo otryskávání, aby se povrch odpovídajícím způsobem připravil na následné lepení. Broušení zvyšuje povrch plochy ke spojování a může odstranit zbytkové znečištění, jakož i pryskyřici, které zbyly po odlupu strhávací tkaniny. Nicméně, tyto operace by měly být prováděny velmi opatrně, aby výztužná vlákna v blízkosti povrchu nebyly odkryty nebo dokonce přetrženy.

Použití strhávacích tkanin na strukturálně lepených kompozitních površích je potřeba pečlivě zvážit. Mezi nejdůležitější faktory na zvážení se řadí chemické složení odlupovací vrstvy, jako je nylon vs. polyester, jakožto i jejich slučitelnost s kompozitní maticí pryskyřice; povrchová úprava použitá na odlupovací vrstvu obsahuje silikonové povlaky, kvůli jejímu snadnějšímu odstranění, které mohou také zanechat zbytky na povrchu, znehodnocující strukturální lepený spoj. V neposlední řadě se musí zvážit konečná příprava povrchu-například ruční broušení vs. otryskávání.

Přes všechny tyto zmíněné skutečnosti, je použití strhávací tkaniny velmi účinné při prevenci hrubého povrchového znečištění, ke kterému by mohlo dojít mezi laminováním a sekundárním lepením.

Nejlepším prostředkem je odstranit strhávací tkaninu a pak lehce zdrsnit povrch otryskáním při tlaku přibližně 140 kPa. Po otryskání mohou být všechny nečistoty z povrchu odstraněny suchým vysáváním, nebo i setřením suchým, čistým hadrem. I když ruční broušení brusným papírem se zrnitostí 120 až 240 zr. z karbidu křemíku může také nahradit otryskávání, není tak účinné v odstranění zbytků strhávací tkaniny. Kromě toho je zde poměrně velké riziko odstranění příliš velkého množství pryskyřice a odkrytí nebo dokonce porušení uhlíkových vláken oproti otryskání.

V případech, kdy není možné použít strhávací tkaninu na přípravu povrchu před lepením, může být povrch předčištěný rozpouštědlem, jako je methylethylketon (neboli butanon) k odstranění hrubých organických nečistot. Další možností je použití světelného otěru následované setřením suchým ubrouskem (nebo vysáváním) k rozbití glazované struktury na povrchu pryskyřičné matrice. Použití rozpouštědel pro odstranění zbytků po ručním broušení nebo otryskáváním jeví jako nevhodné, vzhledem k možnosti opětovné kontaminace povrchu.

Nejmodernější, plasmatické ošetření kompozitních materiálů má potenciál na to, aby se zabránilo mnoha současným problémům s metodami přípravy povrchu, a tím pádem vede i k posílení vazeb a konzistentnosti spoje. Proces zpracování atmosférickou plazmou je bezkontaktní, vyžaduje minimální zásah obsluhy, a může být aplikován i na složité tvary. Navíc je ověřeno, že sekundární kontaminace je srovnatelná jako při broušení. Na polymerních površích zahrnuje úprava plazmou interakci volných radikálů a iontů s ošetřeným vzorkem. To umožňuje modifikovat morfologii povrchu a chemii upravovaných polymerních materiálů v závislosti na konkrétních podmínkách a plynu použitým pro ošetření. Důležitým aspektem při této přípravě povrchu je, že materiálové změny jsou omezeny pouze na hloubku několika nanometrů, což výrazně snižuje nebo prakticky zamezuje možnosti poškození výztužných vrstev. Při ošetření plazmou může dojít k řadě fyzikálních procesů: k ablaci (čištění odstraněním nízkomolekulárních organických kontaminantů); leptání (ovlivňuje morfologii povrchu substrátu); zesítnění (propojení molekul s dlouhým řetězcem) a k aktivaci povrchu (chemická vazba molekul reaktivní se substrátem). Úprava povrchu pomocí atmosférického plazmatu nevyžaduje speciální komory a plasma může být aplikována na konkrétní oblasti substrátu, které se mají lepit, a ošetření se tím pádem nemusí provádět na celé konstrukci.

Všechny kompozitní povrchové úpravy by měly mít společné následující principy:

- povrch by měl být čistý před opracováním, aby se zabránilo následné kontaminaci výsledného povrchu
- glazura na povrchu matrice by měla být zdrsňena, aniž by došlo k poškození výztužných vláken nebo ke vzniku podpovrchových trhlin v pryskyřičné matrici
- všechny zbytky by měly být z obroušeného povrchu odstraněny suchým procesem bez rozpouštědla
- připravené povrchy by měl být lepeny co nejdříve po přípravě.

[3] [5] [9]

### 3.3 Rozdělení lepidel

Vhodné lepidlo se volí podle chemického druhu lepených materiálů i s ohledem na fyzikální vlastnosti lepených materiálů. Dále podle požadavku na kvalitu a technologii spoje – to znamená, jakým stylem se bude lepidlo nanášet a jaké se od lepidla očekávají vlastnosti.

- **Lepidla kapalná:**

- 1) Reaktivní dvousložková (vytvrzují chemickou reakcí dvou složek): epoxidy, polyuretany, metylmetakrylátová lepidla, močovino formaldehydová, fenol formaldehydová a další
- 2) Reaktivní jednosložková (vytvrzují vulkanizací vzdušnou vlhkostí): polyuretany, kyanoakryláty, silikony
- 3) Rozpouštědlová (vytvrzují odpařením rozpouštědel): kaučuková, polyuretanová, nitrocelulózoá aj.
- 4) Vodná roztoková (vytvrzují odpařením vody): škrobová, dextrinová, kaseinová, deriváty celulózy aj.
- 5) Vodná disperzní (vytvrzují odpařením vody a spojením jednotlivých částíček polymeru do souvislého filmu)

- **Lepidla pevná:**

- 1) Tavná (do lepidelného stavu se přivedou roztavením, vytvrzují ochlazením)
- 2) Redispergovatelné prášky (rozmícháním ve vodě vznikne disperze, která vytvrzuje odpařením vody a spojením částic polymerů za vzniku souvislého filmu)

Z uvedených skutečností vyplývá, že také pevná lepidla musejí být před lepením převedena do kapalného stavu, aby bylo umožněno smáčení lepených povrchů. [10]

#### 3.3.1 Epoxidová lepidla

Lepidla na bázi epoxidů jsou zdaleka nejpoužívanější pro lepení nebo opravy leteckých konstrukcí. Epoxidová lepidla vytvářejí vazbu s vysokou pevností a vykazují dlouhodobou spolehlivost v širokém spektru teplot a prostředí. Jednoduchost, s jakou mohou být epoxidová lepidla modifikována, umožňuje výrobcům epoxidového lepidla použít různé materiály pro řízení specifických vlastností, jako je hustota, houževnatost, poměr směsi, doba zpracovatelnosti, respektive trvanlivost, charakteristiky manipulace se spojím, doba/teplota vytvrzování a provozní teplota.

Výhody epoxidových lepidel zahrnují vynikající přilnavost, vysokou pevnost, nízký nebo žádný obsah těkavých látek během vytvrzování, malé smrštění a dobrou chemickou odolnost. Nevýhody jsou naopak poměrně vysoká cena, křehkost, absorpce vlhkosti, která nepříznivě ovlivňuje vlastnosti a poměrně dlouhé časy vytvrzování. K dispozici je široký sortiment jedno a dvousložkových epoxidových lepidel. Některá lepidla se vytvrzují při pokojové teplotě, zatímco jiné vyžadují zvýšené teploty.

Epoxidové pryskyřice používané jako lepidla jsou obecně dodávány jako kapaliny nebo pevné látky s nízkou teplotou tání. Rychlost reakce může být upravena přidáním urychlovačů k formulaci nebo zvýšením teploty vytvrzování. Pro zlepšení strukturálních vlastností, zvláště při zvýšených teplotách, je běžné používat vytvrzovací teploty blízko (nebo vhodněji nad) maximální pracovní teploty. Systémy epoxidových pryskyřic jsou obvykle modifikovány širokou škálou přísad, které řídí konkrétní vlastnosti, včetně urychlovačů, modifikátorů viskozity a jiných aditiv pro kontrolu toku, plniv a pigmentu, flexibilizátorů a tvrdidel. Lepidla na bázi epoxidové pryskyřice jsou k dispozici ve dvou základních chemických podmínkách vytvrzování: vytvrzování při pokojové teplotě a vytvrzování při zvýšené teplotě.

Dvousložkové lepicí systémy vyžadují smíchání části A (pryskyřice a plnicí části) s částí B (část vytvrzovacího činidla) v předem stanoveném stechiometrickém poměru. Dvojdílná epoxidová lepidla obvykle vyžadují míchání v přesném poměru, aby se zamezilo významné ztrátě vytvrzujících vlastností a stabilitě vůči prostředí. Množství materiálu, které má být smícháno, by mělo být omezeno na to, co je nutně potřebné pro splnění daného úkolu. Obecně totiž platí, že čím větší hmotnost namíchaného lepidla, tím kratší je doba zpracovatelnosti nebo pracovní doba materiálu. Doba zpracovatelnosti je definována jako doba mezi smícháním pryskyřice s vytvrzovacím činidlem a časem, kdy se viskozita zvýší natolik, že se lepidlo již nemůže úspěšně aplikovat. Pokus o použití adheziva mimo dobu jeho životnosti může mít za následek tak vysokou viskozitu, že lepidlo nedokáže řádně smáčet povrch, což vede k vazbám s nedostatečnou pevností.

Dvousložkové systémy se často používají k opravě poškozených letadlových sestav. Varianta s nižší viskozitou může být použita k impregnaci suché uhlíkové tkaniny pro opravy náplastí nebo vstřikování do trhlin lepených linií nebo delaminací. Viskóznější pasty se používají k opravám, kde je nutná větší regulace průtoku. [3] [5]

### 3.3.2 Metylmetakrylátová lepidla

Metylmetakrylátová (MMA) lepidla mají jiný mechanismus vytvrzování než ostatní dvousložkové reaktivní lepidla. Poměr pryskyřice k tvrdidlu se může měnit od 100: 3 do 1: 1. MMA lepidla jsou typicky méně citlivá na změny v poměru směsi a kolísání míry míšení.

Profil vytvrzování lepidel MMA lze nastavit snadněji než jiné typy dvousložkových lepidel. To umožňuje vytvářet lepidla, která mají nižší reakční rychlost ihned po míchání, což poskytuje více času pro aplikaci lepidla a montáž dílů, tj. delší pracovní dobu. Po krátkém časovém úseku (indukční doba) se rychlost reakce zvyšuje, aby se dosáhlo rychlejšího zpevnění. Tím se zkracuje doba potřebná k tomu, aby součásti byly upevněny před tím, než mohou být lepené sestavy dále zpracovávány.

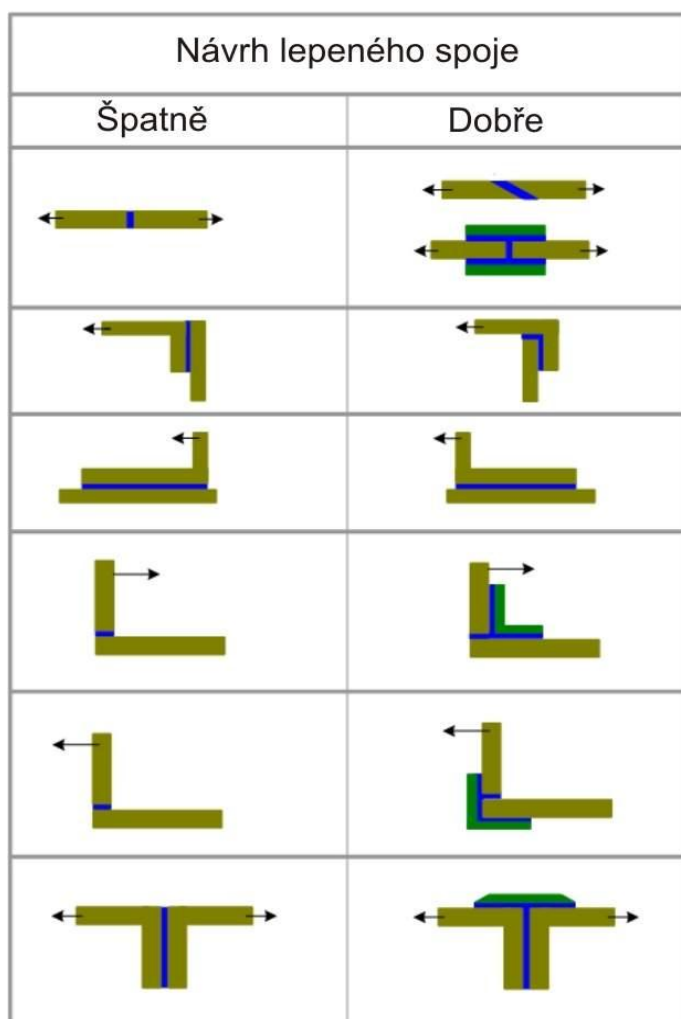
Neupravené MMA lepidla vytvrzují tvrdé, křehké fólie. Většina MMA lepidel je formulována s modifikátory, které poskytují tuhé vazby, jež odolávají odlupování a odštěpení, jakož i nárazům. Zvýšení vytvrzovací teploty zrychluje proces, ale konečná pevnost je

nepříznivě ovlivněna. Běžně se MMA lepidla vytvrzují při pokojové teplotě a mohou odolávat teplotám mezi cca.  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mají dobré vazebné vlastnosti na mnoha různých površích a jsou relativně málo citlivé na povrchy, které obsahují určité množství oleje nebo maziva.

Zajímavým rysem jsou různé podmínky zpracování používané pro MMA lepidla. Kromě technik, které se běžně používají pro dvousložková lepidla (aplikace lepidla pomocí dvojitých kazet, přímé přidání tvrdidla na pryskyřici), mohou být obě složky MMA lepidla aplikovány samostatně na jeden ze substrátů. Skutečná vytvrzovací reakce se pak uskutečňuje pouze v spojeném kloubu po přivedení substrátů dohromady. Tento postup napomáhá tomu, aby se nemusely míchat obtížné míchací poměry (například pryskyřice: tvrdidlo 100: 3) a umožňuje použití rychle vytvrzených lepidel, které by měly příliš krátkou dobu zpracovatelnosti, pokud by se pryskyřice a tvrdidlo míchaly před aplikací. [11]

## 4 Lepené spoje

Ve strukturálním lepeném spoji se zatížení z jedné součásti přenáší pomocí adhesivní vrstvy do součásti druhé. Účinnost přenosu zatížení závisí na spáře, adhezních vlastnostech a na rozhraní lepidla a substrátu. Pro efektivní přenos zatížení přes lepidlo, se substráty (spojované povrchy) překrývají tak, že lepidlo je namáháno ve smyku. Typické provedení základních spár je uvedeno na obrázku 4.1. [3] [5]



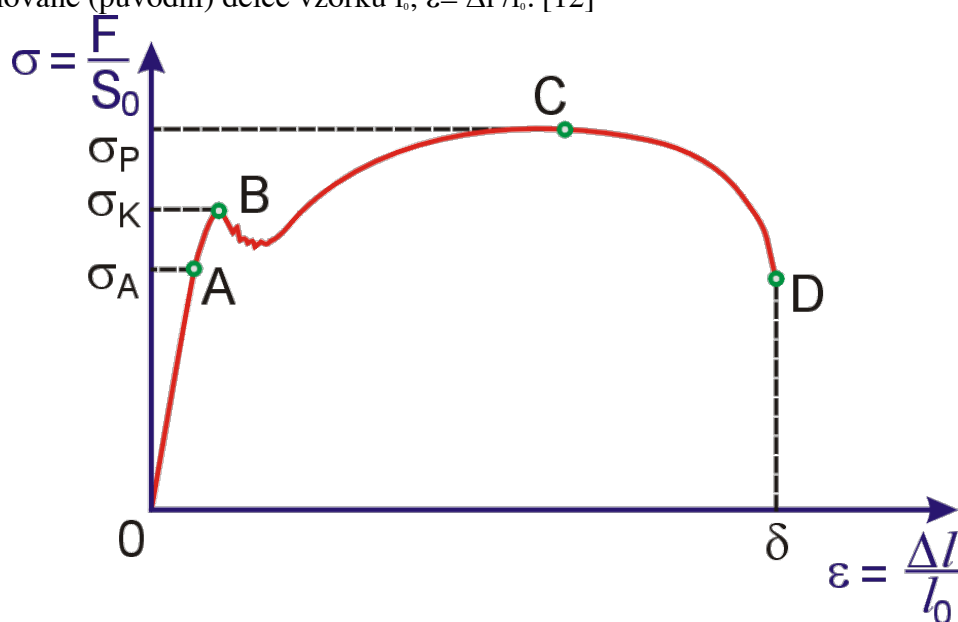
Obrázek 4.1 Ukázky návrhů lepených spojů [7]

Je známo, že největší zatížení nesou společné konce lepeného spoje, zatímco středová část spoje nese mnohem menší zatížení. Proto lepidla určená pro přenášení velkého zatížení musí být silná a tvárná, a to zejména pokud nastává ohyb ve spoji, který by mohl vyvolat zatížení v odlupu. Lepidla jsou často modifikována pryží nebo jinými elastomery, což snižuje adhezivní modul, aby se zlepšila lomová houževnatost a únavová životnost. Při porovnání „křehkého“ lepidla s vysokou pevností a vysokým modulem pevnosti, s tvárným lepidlem o nižší pevnosti, je tvárné lepidlo výrazně lepší (za předpokladu, že má dostatečnou pevnost ve smyku), protože „odpustí“ mnohem více než křehké lepidlo s vyšší pevností. To se projevuje zejména v reálných spojích, které často nejsou namáhány jenom na smyk, ale spoj se i kroutí a přenáší různé rázy a vibrace. Nicméně při konstrukci spoje se musí dbát na to, aby lepidlo bylo namáháno smykem tak, jak je to jen nejvíce možné.

Tahovému, stříhovému a odlupovému namáhání, je třeba se při konstrukci spoje vyhnout, většinou ale lze vymyslet řešení, které je vyhovující, viz obrázek 4.1. [3] [5]

#### 4.1 Testování lepeného spoje

Zkouška tahem se provádí v trhačím stroji, který je zařízením umožňujícím provádět deformaci vzorku různými deformačními mechanismy až po jeho destrukci. Při tahové zkoušce je vzorek podroben tahové deformaci, jejíž velikost s časem rovnoměrně roste (rychlost deformace je konstantní). Sleduje se závislost tahového napětí  $s$  na deformaci  $e$ . Napětím se zde rozumí tzv. smluvní napětí, tj. poměr síly  $F$  působící na vzorek k ploše  $S_0$ -průřezu nedeformovaného vzorku;  $\sigma = F/S_0$  a deformací se rozumí poměr prodloužení vzorku  $\Delta l$  k nedeformované (původní) délce vzorku  $l_0$ ;  $\varepsilon = \Delta l / l_0$ . [12]



Obrázek 4.2 Typický výstupní diagram ze zkoušky tahem [12]

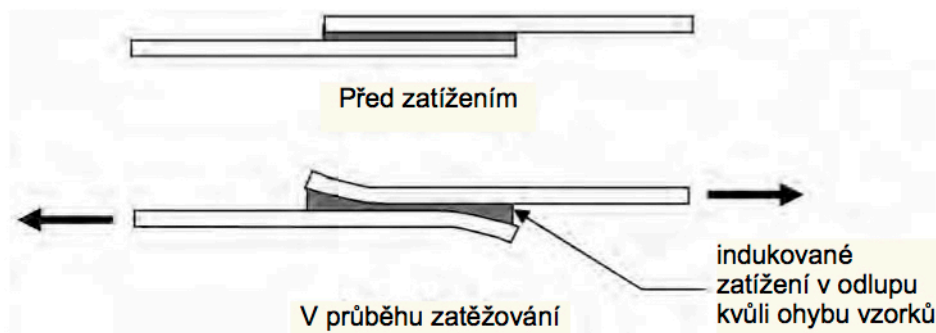
Počáteční část křivky až po bod A má přímkový charakter (Hookova přímka), napětí je úměrné deformaci a chování materiálu lze vystihnout modelem hookeovské látky. Napětí  $\sigma_A$  odpovídající bodu A se označuje jako mez úměrnosti. Překročí-li napětí mez úměrnosti, může se materiál až po dosažení napětí  $\sigma_K$ , které odpovídá bodu B křivky, chovat elasticky. To znamená, že po odstranění napětí zaujme svou původní délku  $l_0$ , jedná se o elastické, avšak nelineární chování-mezi body A a B se vzorek chová jako nelineárně elastická látka. Po překročení bodu B začne materiál plasticky téct, po odtížení zůstane trvale deformován, tj. byla

překročena mez pružnosti. U některých materiálů, např. u měkkých uhlíkatých ocelí se plastický tok projeví zřetelným poklesem napětí viz obrázek 4.2. Lokální maximální napětí  $\sigma_k$  pak jednoznačně určí napětí, při kterém začíná plastický tok. Takové napětí se označuje jako mez kluzu.

U materiálů, jež mají tahový diagram s nevýrazným přechodem mezi elastickou a plastickou částí namáhání, je stanovení meze kluzu obtížnější. Stanovuje se jako napětí, pro které trvalá deformace po odtížení dosahuje dohodnuté hodnoty, zpravidla se volí hodnota 0,2% a odpovídající napětí se označuje jako mez 0,2, tj  $R_{e0,2}$ . [12]

Síla lepeného spoje se obvykle měří právě pomocí zkoušky tahem, jak je znázorněno na obrázku 4.2. Pevnost ve smyku se udává jako poruchové zatížení v lepidle, které se vypočítá tak, že se vyloučí selhávající zatížení v oblasti pojiva. Jelikož rozložení napětí v lepidle není rovnoměrné nad oblastí spojů (špičky na okrajích spoje, viz obrázek 4.3), je uváděné smykové napětí nižší než skutečná pevnost lepidla. Zatímco se tento zkušební vzorek relativně snadno vyrábí a testuje, neumožňuje změřit skutečnou míru pevnosti ve smyku v důsledku adhezního ohýbání a indukovaných zatížení odlupování. Kromě toho neexistuje žádný způsob měření smykového namáhání, a tedy i výpočtu modulu smykového namáhání potřebného pro strukturální analýzu.

V každém případě je ale zkouška tahem velmi efektivní kontrolní test pro vyhodnocování lepidel, povrchových přípravků a pro řízení procesu. Existují ještě další testy pro charakterizaci lepicích systémů, z nichž mnohé jsou shrnuty v knize CAMPBELL, F.C. *Manufacturing processes for advanced composites*. [3] [5] [11]

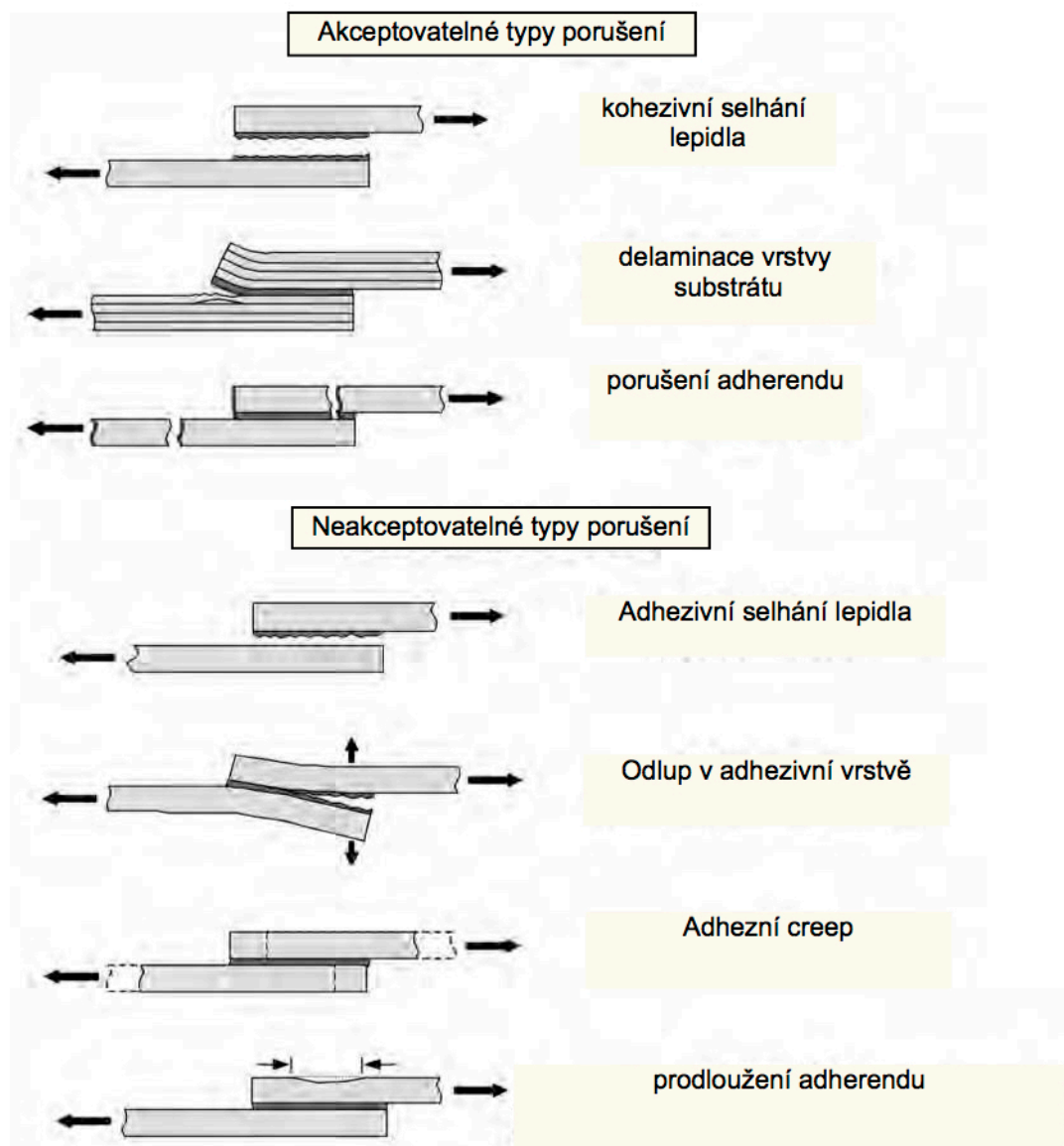


Obrázek 4.3 Napětí ve vzorku, přeloženo do čj [3]

Při testování nebo charakterizaci adhezivních materiálů existuje několik důležitých faktorů, které je třeba brát v potaz:

- všechny zkušební podmínky musí být pečlivě kontrolovány, včetně přípravy povrchu, lepidla a lepení
- měly by být provedeny testy na skutečném kloubu, který bude používán i při výrobě
- musí být provedeno důkladné vyhodnocení provozních podmínek, včetně teploty, vlhkosti a jakýchkoli rozpouštědel nebo kapalin, kterým bude lepidlo během své životnosti vystaveno
- měly by se prověřit režimy selhání u všech zkušebních vzorků

Některé přijatelné a nepřijatelné poruchové režimy jsou znázorněny na obrázku 4.4. Například pokud vzorek vykazuje spíše selhání na adhezivním rozhraní než kohezní poruchu v lepidle, může to být známka problému přípravy povrchu, který bude mít za následek snížení trvanlivosti spoje. [3] [5]



Obrázek 4.4 Akceptovatelné a neakceptovatelné typy porušení spoje, přeloženo do čj [3]

## 5 Rešerše vhodných lepidel

Nejrozšířenějšími typy lepidel pro spojení uhlíkových kompozitů jsou dvousložková epoxidová a metylmetakrylátová lepidla, kterých je na trhu celá řada pro různé druhy použití.

Při výběru lepidla nestačí jenom volit podle toho, jaké materiály chceme slepit, ale musí se brát v potaz mnohem více faktorů, které jsou pro lepený spoj důležité.

Těmito faktory jsou:

- Prostředí, při kterém bude lepidlo použito (teplotní rozmezí, odolnost vůči vodě a UV záření).
- Šířka spáry spoje.
- Jakým namáháním bude lepený spoj namáhaný (smyk, natažení nebo komprese).
- Odolnost spoje vůči chemikáliím (olej nebo benzín a další podobné látky).
- Další mechanické vlivy (vibrace a ostatní potenciálně nebezpečné namáhání).

V tomto konkrétním případě lepeného spoje se lepí dva uhlíkové kompozity s poměrně vyhraněnými požadavky na lepidlo. Lepidlo musí odolávat relativně velmi vysoké teplotě, okolo 120°C. Lepidlo musí být schopné lepit spoje se šířkou spáry 0,5 mm. Navíc se lepí v motorovém prostoru motorizovaného surfového prkna a to znamená, že lepidlo musí odolávat vodě (jak sladké, tak i mořské), benzínu i oleji. Tím ovšem požadavky nekončí, vzhledem k dvoutaktnímu motoru, který se uvnitř surfu nachází, musí lepený spoj přenášet i vibrace a při jízdě na zvlněné hladině se celá konstrukce krouť. [10] [13] [14]

### 5.1 Tabulka s vlastnostmi jednotlivých lepidel

Značka	Označení	Pevnost ve smyku cca 20°C Al	Pevnost ve smyku 80°C Al	Pevnost ve smyku cca 20°C karbon
<b>EPOXIDY</b>				
3M	DP-490	30,2 Mpa	11,9 MPa	36,1 MPa
ADEKIT	H9952BK	22 MPa	17MPa	17 MPa
PERMABOND	ET5401	10-15 MPa	9,4-14 MPa	22-24 MPa
LORD	320/310	15,6 MPa	15,3 Mpa	-
LORD	310B	11,8 MPa	8,9 Mpa	-
<b>METYLMETAKRYLÁTY</b>				
ACRALOCK	SA 10-05	21 MPa	cca 17MPa	33 Mpa
PLEXUS	MA420	20,7-26,2 MPa	-	-

Tabulka 5.1 Porovnání vybraných typů lepidel [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]

Značka	Označení	pružnost	Objemový míchací poměr	Vytvrzování
<b>EPOXIDY</b>			<b>pryskyřice : tvrdidlo</b>	
3M	DP-490	5-10%	míchání 2:1	168 h; pokojová teplota
ADEKIT	H9952BK	3%	míchání 2:1	24 h; pokojová teplota
PERMABOND	ET5401	4-8%	míchání 2:1	24 h; pokojová teplota
LORD	320/310	2%	míchání 1:1	24 h; pokojová teplota
LORD	310B	2%	míchání 1:1	24 h; pokojová teplota
<b>METYLMETAKRYLÁTY</b>			<b>lepidlo : aktivátor</b>	
ACRALOCK	SA 10-05	80-120%	míchání 10:1	19 h; pokojová teplota
PLEXUS	MA420	30-50%	míchání 10:1	24 h; pokojová teplota

Tabulka 5.2 Porovnání vybraných typů lepidel [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]

Tabulka ukazuje nejdůležitější technické parametry jednotlivých lepidel. Zeleně zvýrazněný produkt 3M DP-490 je lepidlo, kterým se lepí nyní. Žlutě jsou zvýrazněny lepidla, která jsou potenciálně vhodná pro tento lepený spoj.

Vzhledem k tomu, že lepidlo Adekit H9952BK je epoxidové lepidlo, stejně jako 3M DP-490, tak se žádné výrazně odlišné parametry oproti lepidlu 3M neočekávají, jeho výhodou je lehce vyšší pevnost ve smyku při zvyšující se teplotě a kratší čas, potřebný k vytvrzení lepidla. Zato jeho prodloužení je ještě menší než u lepidla od firmy 3M, což určitě vhodné není.

Největší potenciál je v metylmetakrylátovém lepidle Acralock SA10. Pevnosti ve smyku jsou sice dle tabulkových hodnot oproti lepidlu 3M při pokojové teplotě o něco nižší, ale s rostoucí teplotou pevnost ve smyku neklesá tak rapidně. Největší výhodou je ovšem jeho prodloužení, které se pohybuje v rozmezí 80-120 %, čemuž se daná epoxidová lepidla ani zdaleka nepřibližují.

## 6 Zkoušky tahem

Na zkoušky tahem byly vybrány dle tabulky dvě lepidla, a to Acralock SA10 a 3M DP-490, pro porovnání s nynějším lepeným spojem. Tahové zkoušky se prováděly ve firmě Matrix a.s. v Rychnově nad Kněžnou.

Lepidlo 3M DP-490 je černé tixotropní dvousložkové epoxidové lepidlo pro vyplňování mezer s mimořádně dobrými aplikačními charakteristikami. Je určeno k použití v aplikacích vyžadujících odolnost a vysokou pevnost a je vhodné zejména na konstrukci složených sestav.

- Otevřený čas: 90 minut
- Manipulační pevnost: 240-360 minut
- Maximální pevnost: po 168 hodinách
- Prodloužení: 5-10 %
- Smyková pevnost: 30,2 MPa

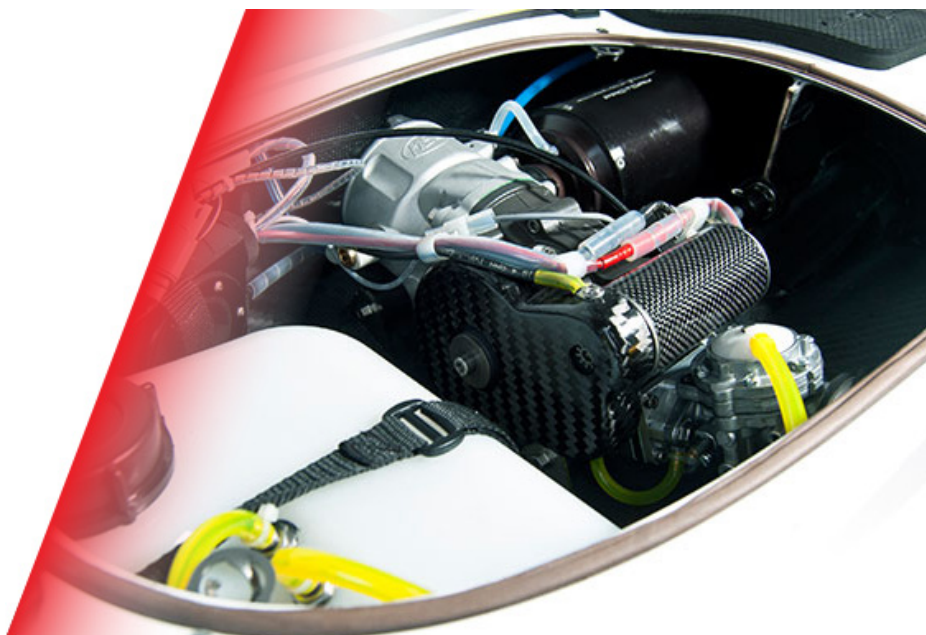
Acralock konstrukční lepidla, vyráběná společností Engineered Bonding Solutions LLC, jsou zdokonalená dvoukomponentní metakrylátová lepidla určená pro chemické spojení většiny povrchů, vytvářející pevné spoje a integrované celky z oceli, hliníku, inženýrských plastů, moderních kompozitů a dalších materiálů. Vlastnosti lepidla SA 10-05 jsou znázorněna pod textem.

- Otevřený čas: 5 minut
- Manipulační pevnost: 15 minut
- Maximální pevnost: po 19 hodinách
- Prodloužení: 80–120 %
- Smyková pevnost: 21 MPa
- Teplotní odolnost: 200 °C, 1h

[14] [15] [20]

### 6.1 Zadaní testu

Testování lepených spojů, slepených pomocí lepidla ACRALOCK SA 10-05 a lepidla 3M DP-490 na karbonových vzorcích dodaných firmou MSR Engines s.r.o. . Testují se adhezni a kohezní vlastnosti lepeného spoje. Vzorky budou vystaveny i klimatickému zatížení a následně testovány na smykovou pevnost lepeného spoje. [14]



Obrázek 6.1 Detail motorového prostoru produktu Jet-Surf [22]

## 6.2 Příprava vzorků

Byly dodány karbonové tělíska k provedení zkoušky pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. Tělíska rozměrově odpovídají normě DIN EN 1465 pro tento typ zkoušky. Rozměr adherendu je 100 x 25 mm, velikost přeplátování 12,5mm. Vzniklo tak 5 ks sad slepených spojů pro každou definovanou zkoušku. Velikost lepicí spáry byla 1 mm. [14] [25] [26]

## 6.3 Příprava povrchu před lepením

Úprava povrchu byla provedena dle pracovní instrukce zadavatele-vzorky byly očištěny přípravkem Betaclean 3350. Čištění je nutné, aby nedošlo k zanesení mastnoty do povrchu adherendu. Vzorky byly čištěny v jednom směru a poté se nechaly na 15 minut odvětrat. [14] [25] [26]



Obrázek 6.2 Čistící přípravek Betaclean 3350 [23]

## 6.4 Lepení vzorků

Lepení bylo provedeno v laboratorních podmínkách MATRIX Lab, při 23°C a 16% vzdušné vlhkosti. Nanášení lepidla Acralock SA 10-05 bylo provedeno manuální pistolí DS 51-00-10 v poměru 10:1, za použití mixeru MBQX 05 – 16L. Nanášení lepidla 3M DP-490 bylo provedeno pneumatickou pistolí DP 400-100-01 v poměru 1:1, za použití mixeru EPX MC 10-24-02. [14]



Obrázek 6.3 Mixer s pistolí pro lepidlo 3M DP-490 [24]



Obrázek 6.4 Pistole pro lepidlo Acralock SA 10-05

## 6.5 Testování

### Testovací normy

- 1) ČSN ISO 1465 - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav
- 2) ČSN ISO 9142 - Směrnice k výběru laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů
- 3) ČSN ISO 10365 - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje

### Testovací zařízení

K testování bylo užito zkušební stroj Shimadzu Autograph AGS-X 50kN a klimakomora WKL 34/40.

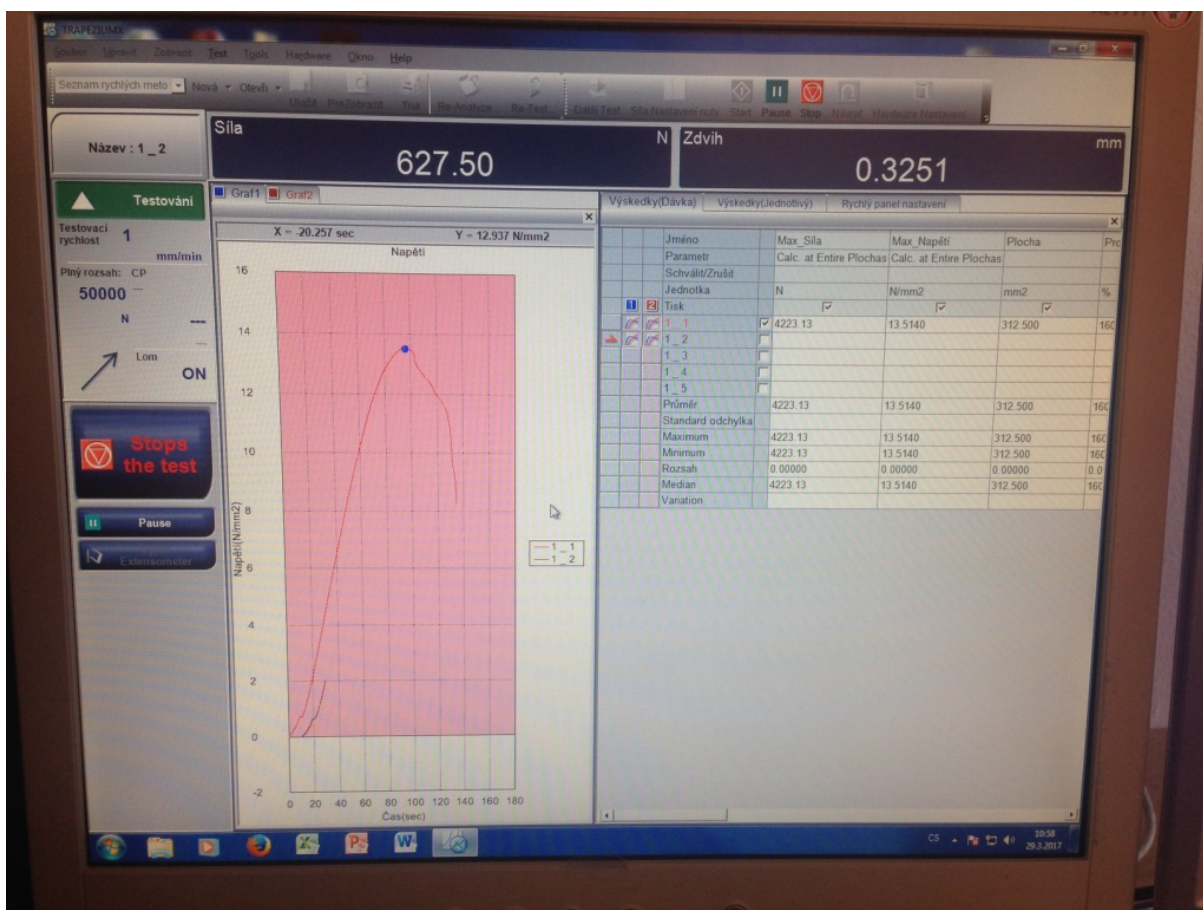
### Testovací software

TRAPEZIUM X Single a S!MPATI.

[14][25][26]



Obrázek 6.5 Testovací software trapezium X Single [27]

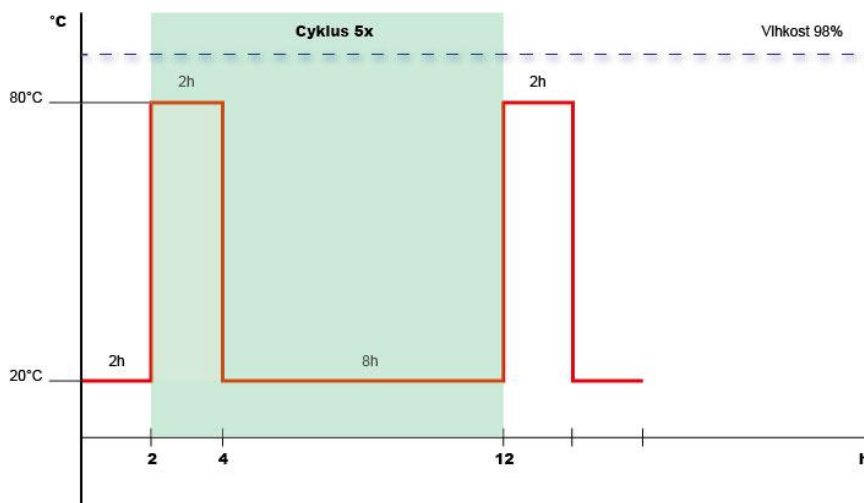


Obrázek 6.6 Prostředí softwaru Trapezium X Single

## 6.6 Průběh testování

### 6.6.1 Klimatický test

Klimatický test probíhal v klimakomoře WEIS WLK 34/40. Nejdříve došlo ke kondicionování vzorků a posléze byl zvolen klimatický cyklus  $+80^{\circ}\text{C}$  po dobu 2h a posléze  $20^{\circ}\text{C}$  po dobu 8h při 98% vzdušné vlhkosti. Cyklus byl opakován 5krát. Klimatický cyklus má simulovat co nejméně podmínky klimatického zatížení v reálném provozu a jeho parametry byly dohodnuty se zadavatelem. [14]



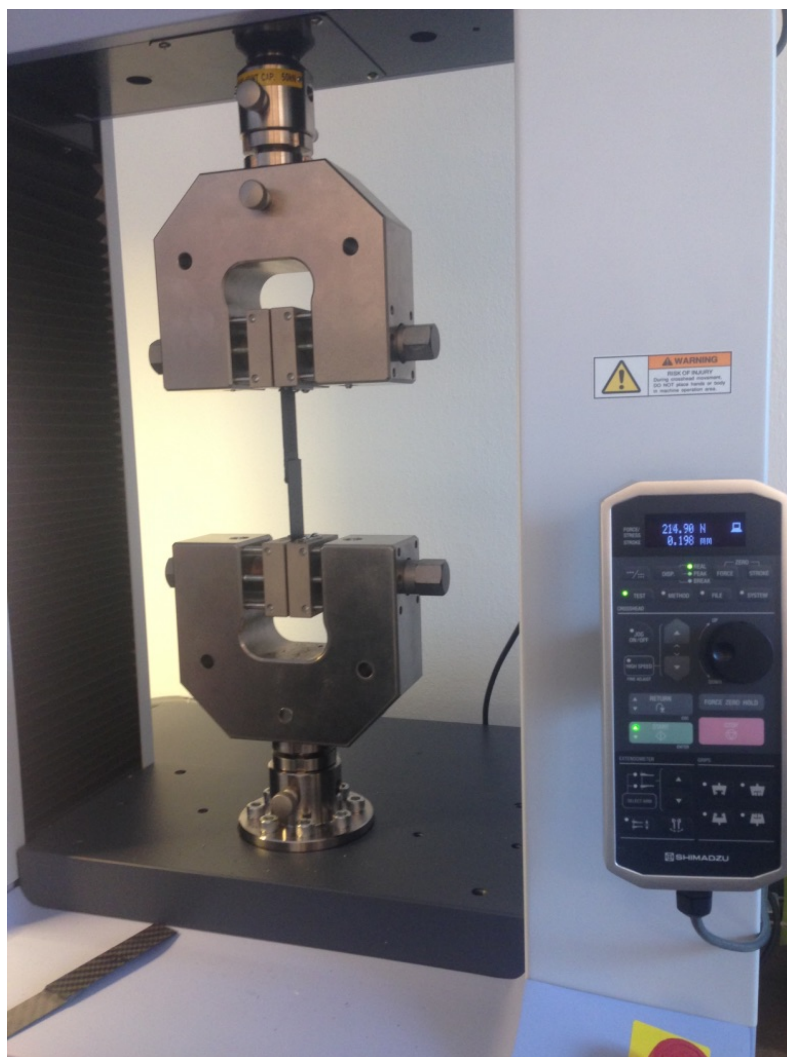
Obrázek 6.7 Názorná ukázka klimatického testu [14]



Obrázek 6.8 Klimakomora WEIS WLK 34/40

### 6.6.2 Mechanický test

Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. [14]



Obrázek 6.9 Zkouška tahem

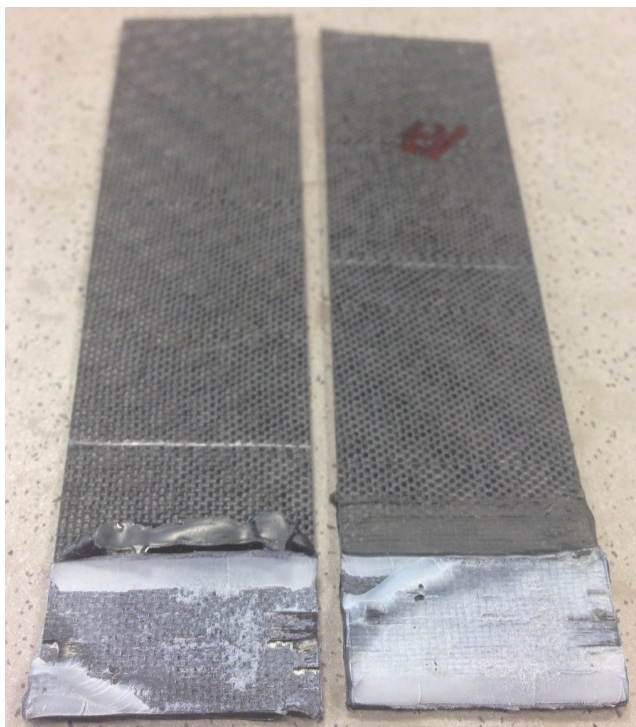
## 6.7 Výsledky laboratorních testů

### 6.7.1 Výsledky testů bez zatížení

Vzorek	Síla	Napětí	Druhy selhání		
Jednotky	N	N/mm <sup>2</sup>	Adh	Koh	Sub
11 SA10	4223.13	13.5140		100%	
12 SA10	4682.26	14.9832		100%	
13 SA10	4392.31	14.0554	34%	66%	
14 SA10	4404.89	14.0956		100%	
15 SA10	4809.54	15.3905	40%	60%	
Průměr	4502.43	14.4077			
odchylka	237.857	0.76114			
Maximum	4809.54	15.3905			
Minimum	4223.13	13.5140			
Rozsah	586.410	1.87650			
Median	4404.89	14.0956			
Variation	0.05283	0.05283			

Vzorek	Síla	Napětí	Druhy selhání		
Jednotky	N	N/mm <sup>2</sup>	Adh	Koh	Sub
41 DP490	1067.02	3.41446	100%		
42 DP490	2077.50	6.64800	100%		
43 DP490	1929.12	6.17317	100%		
44 DP490	2930.96	9.37907	100%		
45 DP490	2661.17	8.51573	100%		
Průměr	2133.15	6.82609			
odchylka	723.993	2.31678			
Maximum	2930.96	9.37907			
Minimum	1067.02	3.41446			
Rozsah	1863.94	5.96461			
Median	2077.50	6.64800			
Variation	0.33940	0.33940			

Tabulka 6.1 Porovnání výsledků testů bez teplotního zatížení [14]

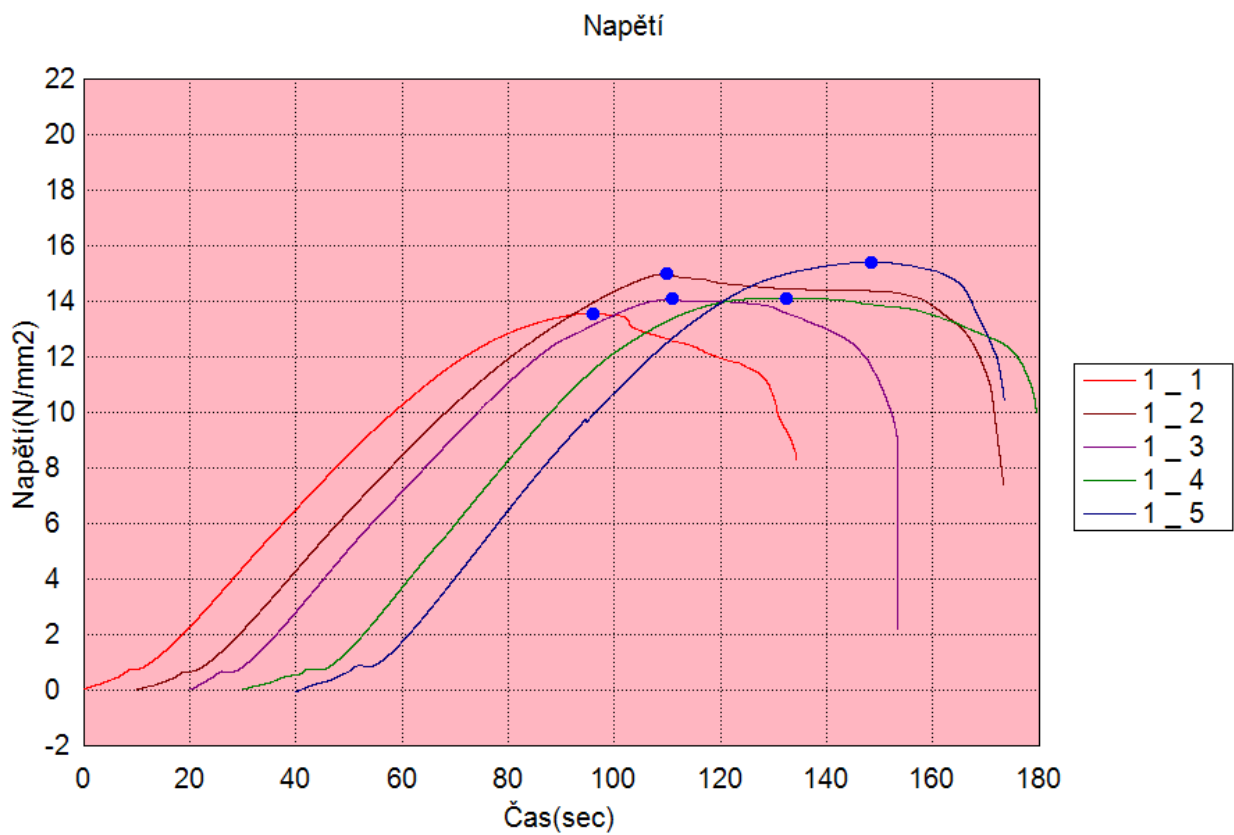
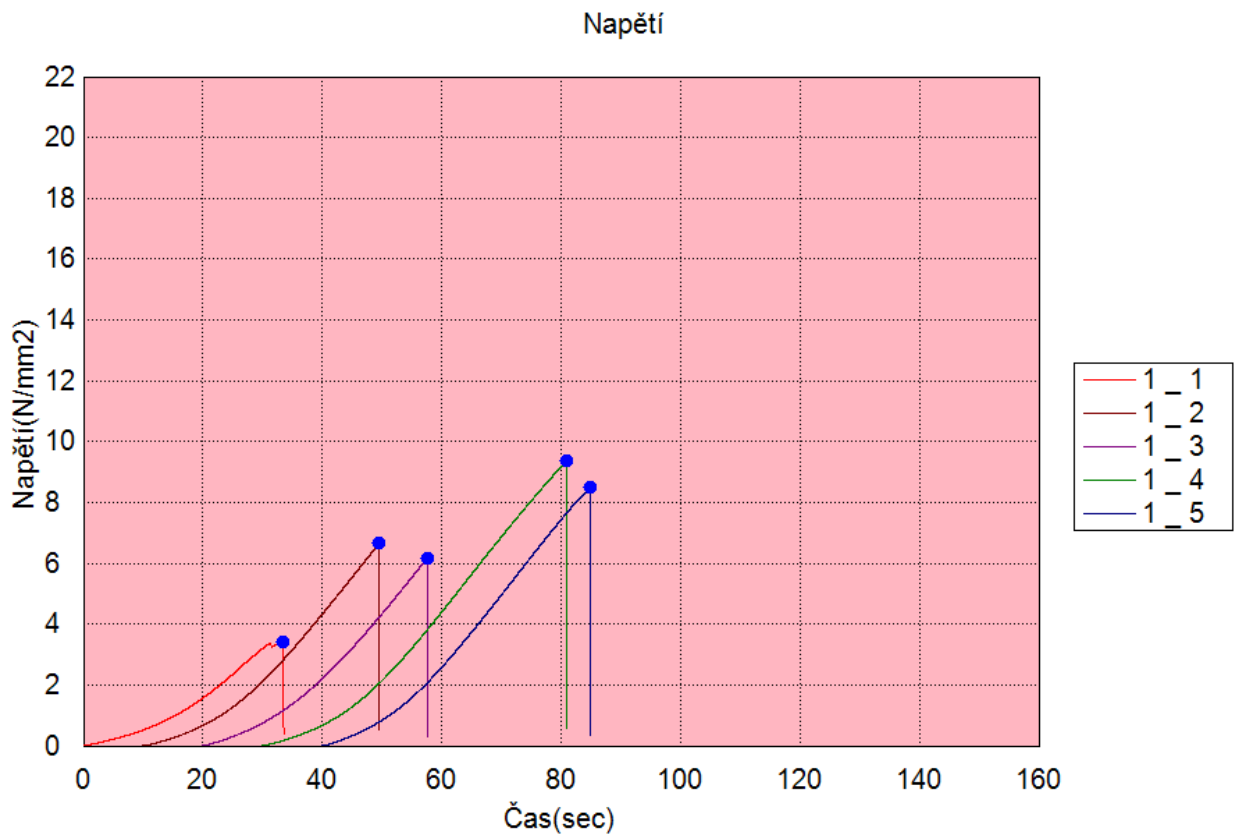


Obrázek 6.10 Kohezivní selhání lepidla SA 10



Obrázek 6.11 Adhezivní selhání lepidla DP 490

Tělesa byla roztržena po uplynutí doby plného vytvrzení, dle údajů z technických listů. Pro Acralock SA10 to znamená po více než 19 hodinách a pro 3M DP490 po více než 168 hodinách. Průměrná hodnota napětí pro SA10 je 14,41 MPa a pro DP490 je 6,83 MPa. U lepidla DP490 nedošlo ani po plné době vytvrzení k dobrému provázání s adherendem, což je doloženo adhezivním selháním. Lepidlo SA10 selhalo ve 3 případech 100% kohezivně a dvakrát kombinovaně. [14]



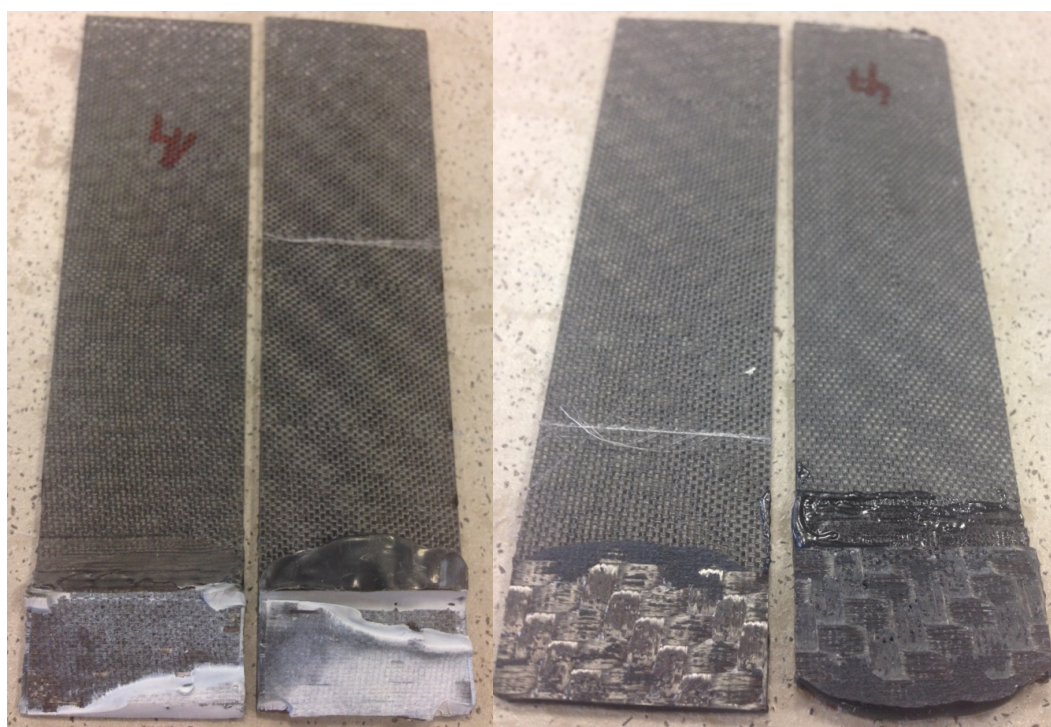
## 6.7.2 Výsledky testů po teplotním zatížení v klimakomoře

Vzorek	Síla	Napětí	Druhy selhání		
Jednotky	N	N/mm <sup>2</sup>	Adh	Koh	Sub
16 SA10	4328.94	13.8526		100%	
17 SA10	4812.41	15.3997		100%	
18 SA10	4126.27	13.2041		100%	
19 SA10	4883.83	15.6283		100%	
20 SA10	4190.45	13.4094		100%	
Průměr	4468.38	14.2988			
odchylka	355.205	1.13667			
Maximum	4883.83	15.6283			
Minimum	4126.27	13.2041			
Rozsah	757.560	2.42420			
Median	4328.94	13.8526			
Variation	0.07949	0.07949			

Vzorek	Síla	Napětí	Druhy selhání		
Jednotky	N	N/mm <sup>2</sup>	Adh	Koh	Sub
46 DP490	3697.49	11.8320			100%
47 DP490	4297.32	13.7514			100%
48 DP490	4526.50	14.4848			100%
49 DP490	4762.46	15.2399			100%
50 DP490	4096.04	13.1073			100%
Průměr	4275.96	13.6831			
odchylka	408.322	1.30663			
Maximum	4762.46	15.2399			
Minimum	3697.49	11.8320			
Rozsah	1064.97	3.40790			
Median	4297.32	13.7514			
Variation	0.09549	0.09549			

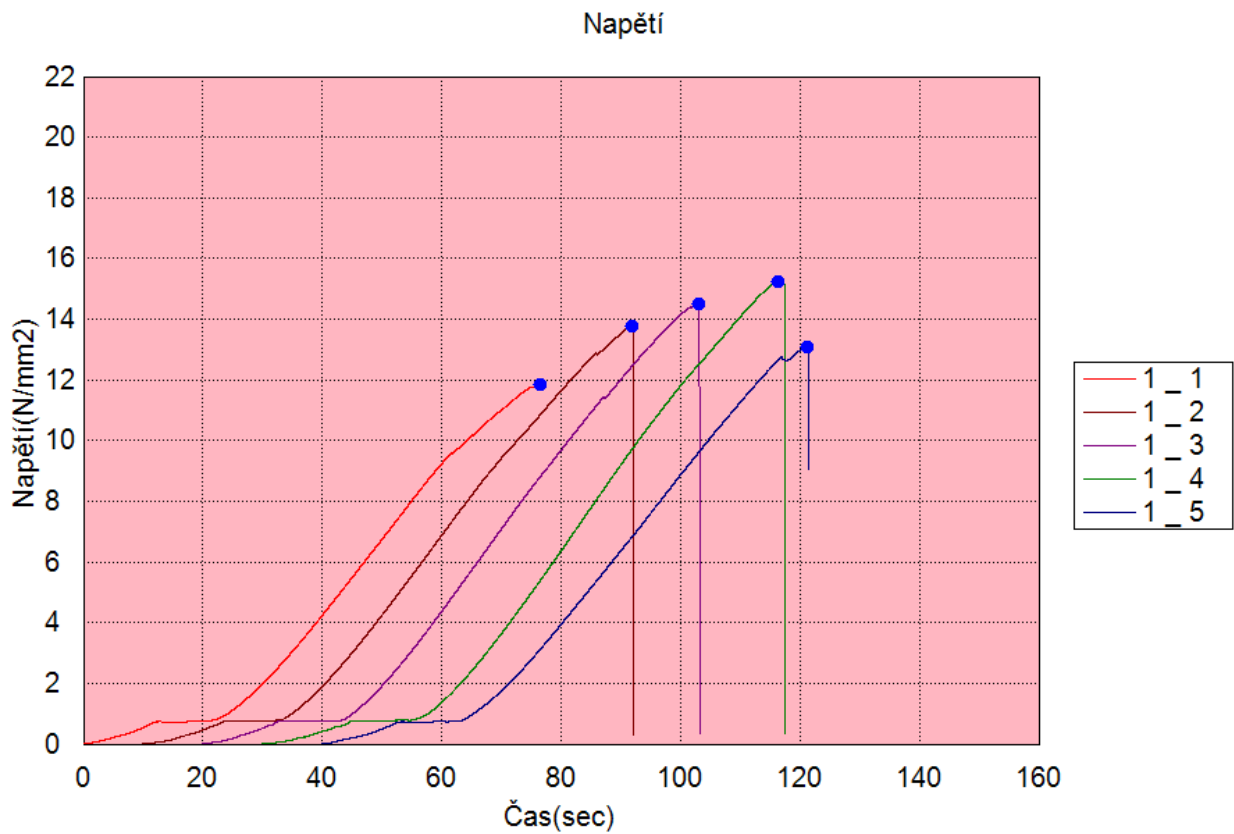
Tabulka 6.2 Porovnání výsledků testů po teplotním zatížení [14]



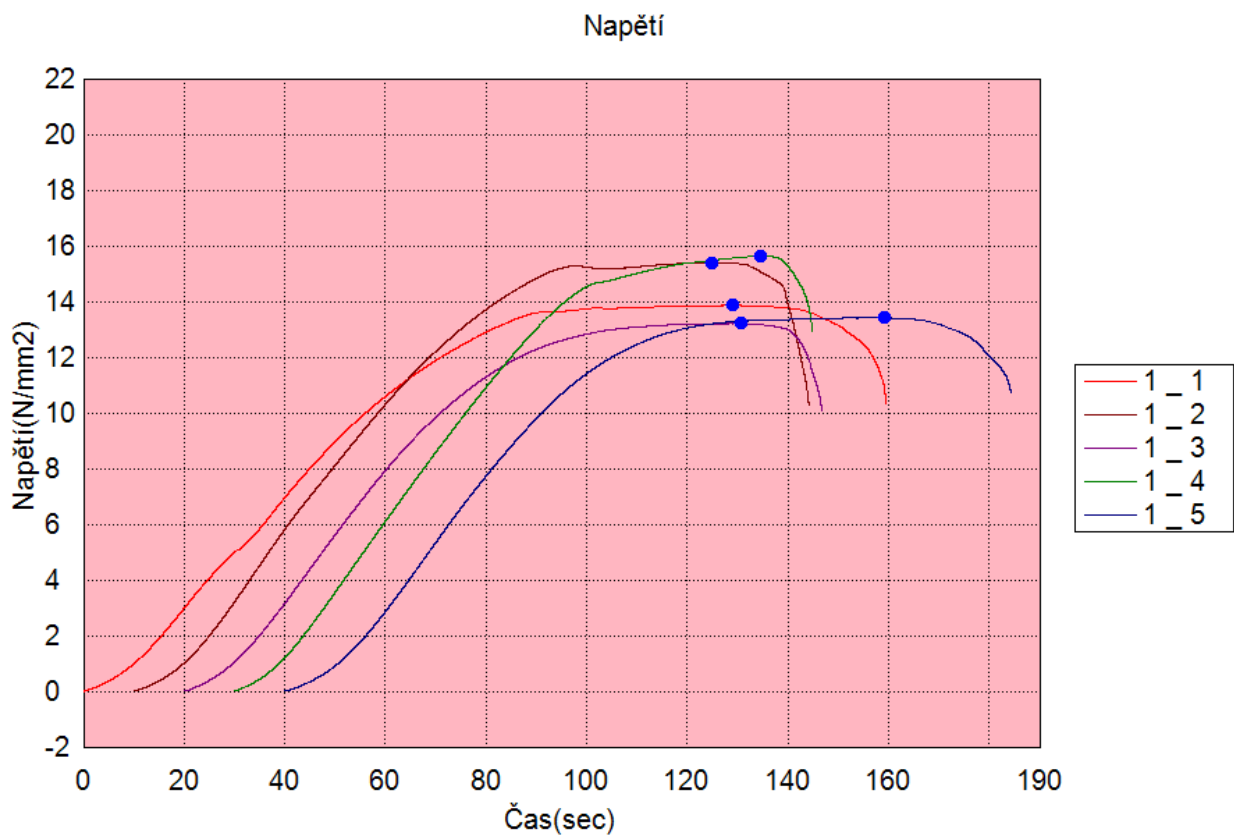
Obrázek 6.14 Kohezivní selhání lepidla SA 10      Obrázek 6.15 Substrátové selhání lepidla DP 490

Po klimatickém testu došlo v důsledku dodatečného prosítování lepidla za působení tepla k lepšímu provázání lepidla DP490 s povrchem adherendu. Průměrná hodnota napětí je 13,68 MPa, avšak selhání je substrátové na povrchu karbonu. Nepružnost lepidla zapříčinila vytržení karbonových vláken a poničení substrátu.

Lepidlo SA10 po klimatickém testu neprojevuje změnu vlastností od testu bez zátěže. Jeho průměrná hodnota napětí je 14,30 MPa. Došlo k úplnému provázání s adherendem, což je doloženo 100% kohezivním selháním lepidla. [14]



Obrázek 6.16 Graf napětí za čas: DP 490 po teplotním zatížení [26]



Obrázek 6.17 Graf napětí za čas: SA 10 po teplotním zatížení [27]

## 7 Závěr

Tato práce se zabývá teorií lepení kompozitů. Na začátku práce jsou okrajově popsány kompozitní materiály s důrazem na uhlíkové kompozity. Následně práce přibližuje základní pojmy při lepení materiálů, jako jsou adheze, koheze a smáčivost lepidla. Zároveň je nedílnou součástí této práce i kapitola o přípravě povrchu, jakožto o jednom z nejdůležitějších faktorů při lepení. Dále je v práci shrnuto základní rozdělení lepidel a podrobněji vysvětlena funkce epoxidových a metylmetakrylátových lepidel, které se k lepení uhlíkových kompozitů používají nejčastěji. Z těchto dvou typů lepidel byla pak pomocí rešerše vhodných lepidel vytvořena tabulka s lepidly s odpovídajícími vlastnostmi pro daný spoj a vybrány dvě lepidla pro testování pomocí tahové zkoušky.

Na tahových zkouškách se testovalo metylmetakrylátové lepidlo Acralock SA 10 a epoxidové lepidlo 3M DP490, doposud používané pro daný spoj, kvůli porovnání a smysluplnosti výsledků.

Mechanické testování potvrdilo teoretické závěry. Epoxidové lepidlo 3M DP 490 vykazuje výbornou pevnost, ale minimální pružnost. Lepidlo samo o sobě dostatečně silné je, ale pro použití na daný spoj při reálném provozu je nezbytné použití pružnějšího lepidla. Methylmetakrylátové lepidlo vykazuje lepší vlastnosti, a to hlavně díky jeho mnohem větší pružnosti. Mimo strohých hodnot maximálního napětí je nutné přihlédnout i k typu porušení spoje, kdy u metylmetakrylátového lepidla to bylo vždy kohezivní selhání, což je ideální typ selhání. U epoxidového lepidla bylo porušení buď adhezivního nebo substrátového charakteru. Při reálném použití v provozu je očekávatelný ještě větší rozdíl ve výsledné výdrži lepidel než pouze při zkoušce tahem, a to hlavně díky vibracím a rázům, které při reálném provozu vznikají.

## 8 CITACE

- [1] Jetsurf: Race. In: *Jetsurf: Motorized board* [online]. Střelice, 2018 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: [http://www.jetsurfconfigurator.com/assets/img/boards/race\\_main.png](http://www.jetsurfconfigurator.com/assets/img/boards/race_main.png)
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil., Václav. ŠVORČÍK a Dalibor. VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VŠCHT, 2005. ISBN 978-80-7080-568-8.
- [3] CAMPBELL, F.C. *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford: Elsevier, 2004. ISBN 18-561-7415-8.
- [4] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-704-3273-X.
- [5] CAMPBELL, F. C. *Structural composite materials*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 9781615030378.
- [6] CUSTOM CARBON FIBER TUBES, RODS, SHEETS AND ANGLES. In: *Composite resources: custom order* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://composite-resources.com/Media/Images/products-resized.jpg?maxwidth=800&maxheight=600>
- [7] MRŇA, Libor. Lepení materiálů. In: *Ústav strojírenské technologie fakulty strojního inženýrství* [online]. Brno [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_lepeni\\_materialu\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf)
- [8] *Vacuum Bagging Peel Ply 1.52m* [online]. Carbon Mods Unit 39 Park Hall Business Village Longton, Stoke-on-Trent ST3 5XA [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.carbonmods.co.uk/Images/products/medium/vacuum-bagging-peel-ply.jpg>
- [9] ZALDIVAR, R.J., J. NOKES, G.L. STECKEL, H.I. KIM a B.A. MORGAN. The Effect of Atmospheric Plasma Treatment on the Chemistry, Morphology and Resultant Bonding Behavior of a Pan-Based Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composite. *Journal of Composite Materials* [online]. 2009, **44**(2), 137-156 [cit. 2018-04-30]. DOI: 10.1177/0021998309345343. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998309345343>
- [10] *Základy teorie lepení.pdf.: ABC LEPIDLA - internetový obchod: Rádce lepení - Teorie lepení, pojmy z oblasti lepení* [online]. 2005 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [http://www.abclepidla.cz/pdfs/Zaklady\\_teorie\\_lepeni.pdf](http://www.abclepidla.cz/pdfs/Zaklady_teorie_lepeni.pdf)
- [11] *METHYL METHACRYLATE ADHESIVES*. *Adhesives.org* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: [http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/adhesive-technologies/chemically-curing/two-component-\(2-c\)/methyl-methacrylate-adhesives](http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/adhesive-technologies/chemically-curing/two-component-(2-c)/methyl-methacrylate-adhesives)
- [12] *Pevnost a lom látek*. *Physics.mff.cuni.cz* [online]. MFF- Katedra fyziky povrchů a plazmatu. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/2\\_6](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6)

- [13] *Adhesive bonding of composites with structural adhesives*. 3m.com [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: [http://www.3m.com/3M/en\\_US/bonding-and-assembly-us/composite-bonding/](http://www.3m.com/3M/en_US/bonding-and-assembly-us/composite-bonding/)
- [14] HLADKÝ, Viktor a Milan HOLÝ. *TESTREPORT Acralock SA 10-05 vs. DP 490: 170420*. Matrix a.s., Třebešov 1, 516 01, Rychnov nad Kněžnou, 2017. Nепublikováno
- [15] *3M Scotch-Weld EPX Adhesive DP490*. 3m.com [online]. United Kingdom PLC, 1996 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://multimedia.3m.com/mws/media/827900/dp490-scotch-weld-tm-adhesive.pdf>
- [16] *ADEKIT STRUCTURAL EPOXY ADHESIVE: HIGH AGING RESISTANCE* [online]. France, 2014 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: [http://www.axson-technologies.com/sites/default/files/adekit-h9952-gb\\_0.pdf](http://www.axson-technologies.com/sites/default/files/adekit-h9952-gb_0.pdf)
- [17] *PERMABOND® ET5401: Two-Part Epoxy* [online]. United Kingdom, 2016 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: [http://www.permabond.com/wp-content/uploads/2016/04/ET5401\\_TDS.pdf](http://www.permabond.com/wp-content/uploads/2016/04/ET5401_TDS.pdf)
- [18] *LORD® 320/310-B and 320/310-B Black: Epoxy Adhesives* [online]. LORD Corporation World Headquarters 111 Lord Drive Cary, NC 27511-7923 USA, Rev.7;3/18 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [https://www.lord.com/sites/default/files/Documents/TechnicalDataSheet/DS3378\\_LORD320-310.pdf](https://www.lord.com/sites/default/files/Documents/TechnicalDataSheet/DS3378_LORD320-310.pdf)
- [19] *LORD® 310: Epoxy Adhesives* [online]. LORD Corporation World Headquarters 111 Lord Drive Cary, NC 27511-7923 USA, Rev.7;4/18 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [https://www.lord.com/sites/default/files/Documents/TechnicalDataSheet/DS3374\\_LORD310.pdf](https://www.lord.com/sites/default/files/Documents/TechnicalDataSheet/DS3374_LORD310.pdf)
- [20] *ACRALOCK SA10 LV-SERIES: METHACRYLATE STRUCTURAL ADHESIVE PRELIMINARY TECHNICAL DATA SHEET* [online]. Engineered Bonding Solutions, LLC: 801 Marina Road, Titusville, FL 32796, www.acralock.com, 2012 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [https://acralock.cz/datasheets\\_docs/TL/European%20TDS\\_SA10%20LV%20series%20Czech%20rev%20022.04.2012.pdf](https://acralock.cz/datasheets_docs/TL/European%20TDS_SA10%20LV%20series%20Czech%20rev%20022.04.2012.pdf)
- [21] *PLEXUS MA420: TECHNICAL DATA SHEET* [online]. ITW PLEXUS, Unit 3, Shipton Way, Express Business Park, Northampton Road, Rushden, Northants NN10 6GL., Rev05;03/06 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [https://www.ulbrich.cz/chemical-technical-products/TDS\\_PLEXUS\\_MA420\\_eng.pdf](https://www.ulbrich.cz/chemical-technical-products/TDS_PLEXUS_MA420_eng.pdf)
- [22] *BOARD DIAG* [online]. USA [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://jetsurfny.com/wp-content/themes/jetsurf/images/board-diag-01.jpg>
- [23] *BEATCLEAN 3350* [online]. Via Lavoratori Autobianchi, 1 - Polo Tecnologico Brianza 20832 Desio (MB) - Italy -VAT IT10569980153 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.sistar.it/it/wp-content/uploads/BETACLEAN-3350.jpg>
- [24] *Dispenser pneumatisch: 200ml* [online]. Kunststoff-Verarbeitungs.Zubehör Postfach 443 Chefstrasse 34 CH-8636 Wald/ZH [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [http://www.bewi-co.ch/images/dp200\\_400-mit-mischer\\_500.jpg](http://www.bewi-co.ch/images/dp200_400-mit-mischer_500.jpg)
- [25] HLADKÝ, Viktor a Milan HOLÝ. *TESTREPORT 3M DP 490 vs. karbon a nerez: 170418*. Matrix a.s., Třebešov 1, 516 01, Rychnov nad Kněžnou, 2017. Nепublikováno
- [26] HLADKÝ, Viktor a Milan HOLÝ. *TESTREPORT Acralock SA 10-05 vs. karbon a nerez: 170413*. Matrix a.s., Třebešov 1, 516 01, Rychnov nad Kněžnou, 2017. Nепublikováno

[27] *Trapezium X Testing Software* [online]. SHIMADZU CORPORATION,1, Nishinokyo Kuwabara-cho, Nakagyo-ku, Kyoto 604-8511, Japan [cit. 2018-05-03]. Dostupné z:  
<https://www.shimadzu.com/an/sites/default/files/ckeditor/an/test/universal/qn5042000001aswt-img/qn5042000001at9a.jpg>

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Jetsurf Race [1].....	1
Obrázek 2.1 Synergické chování složek kompozitu [2] .....	2
Obrázek 2.2 Rozdělení kompozitních materiálů [4] .....	3
Obrázek 2.3 Materiály výztuží kompozitních materiálů [2].....	3
Obrázek 2.4 Druhy vláknitých výztuží, přeloženo do čj [3].....	4
Obrázek 2.5 Porovnání vlastností vlákna, matrice a kompozitu v tahu, přeloženo do čj [5]..	5
Obrázek 2.6 Uhlíkové kompozity [6] .....	6
Obrázek 3.1 Znázornění vnitřních sil v lepeném spoji [7].....	8
Obrázek 3.2 Smáčivost povrchu [7].....	9
Obrázek 3.3 Nylonová strhávací tkanina [8] .....	10
Obrázek 4.1 Ukázky návrhů lepených spojů [7].....	14
Obrázek 4.2 Typický výstupní diagram ze zkoušky tahem [12] .....	15
Obrázek 4.3 Napětí ve vzorku, přeloženo do čj [3] .....	16
Obrázek 4.4 Akceptovatelné a neakceptovatelné typy porušení spoje, přeloženo do čj [3]....	17
Obrázek 6.1 Detail motorového prostoru produktu Jet-Surf [22].....	20
Obrázek 6.2 Čistící přípravek Betaclean 3350 [23].....	20
Obrázek 6.3 Mixer s pistolí pro lepidlo 3M DP-490 [24].....	21
Obrázek 6.4 Pistole pro lepidlo Acralock SA 10-05.....	21
Obrázek 6.5 Testovací software trapezium X Single [27].....	21
Obrázek 6.6 Prostředí softwaru Trapezium X Single .....	22
Obrázek 6.7 Názorná ukázka klimatického testu [14] .....	22
Obrázek 6.8 Klimakomora WEIS WLK 34/40.....	23
Obrázek 6.9 Zkouška Tahem .....	24
Obrázek 6.10 Kohezivní selhání lepidla SA 10	
Obrázek 6.11 Adhezivní selhání lepidla DP 490 .....	25
Obrázek 6.12 Graf napětí za čas: DP 490 bez teplotního zatížení [26] .....	26
Obrázek 6.13 Graf napětí za čas: SA 10 bez teplotního zatížení [27] .....	26
Obrázek 6.14 Kohezivní selhání lepidla SA 10	
Obrázek 6.15 Substrátové selhání lepidla DP 490.....	27
Obrázek 6.16 Graf napětí za čas: DP 490 po teplotním zatížení [26].....	28
Obrázek 6.17 Graf napětí za čas: SA 10 po teplotním zatížení [27].....	28

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 5.1 Porovnání vybraných typů lepidel [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] .....	18
Tabulka 5.2 Porovnání vybraných typů lepidel [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] .....	18
Tabulka 6.1 Porovnání výsledků testů bez teplotního zatížení [14] .....	24
Tabulka 6.3 Porovnání výsledků testů po teplotním zatížení [14].....	27