

Tváření vláknno-kovových laminátů (FML)

Jan Dobiáš

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan Dobiáš
Osobní číslo: T13061
Studijní program: B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení
Forma studia: prezenční

Téma práce: Tváření vláknokovových laminátů (FML)

Zásady pro vypracování:

1. I. Teoretická část
2. Rozdělení polymerních kompozitních materiálů, názvosloví a definice
3. Vláknokovové lamináty a jejich využití v průmyslu dopravních prostředků
4. Technologie výroby vláknových kompozitů a FML
5. Tvářitelnost kompozitních materiálů
6. Technologické zkoušky tvářitelnosti kovových a polymerních materiálů
7. II. Praktická část
8. Cíl bakalářské práce
9. Výroba vzorků
10. Provedení zkoušek
11. Vyhodnocení zkoušek

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Ehrenstein: **Polymerní kompozitní materiály**
2. Laš: **Mechanika kompozitních materiálů**
3. Pluhař: **Strojírenské materiály (z r. 1981)**
4. Harper: **Handbook of Plastics, Elastomers and Composites**
5. **Composite materials handbook, MIL HDBK17**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Alexander Čapka
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2016

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Dobiáš Jan

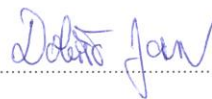
Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20. 5. 2016



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledek obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá historií, vývojem a použitím vlákno-kovových laminátů jako jsou ARALL, GLARE a CARE v průmyslu dopravních prostředků. Teoretická část popisuje základní pojmy a definice kompozitních materiálů, a dále druhy výroby a technologické zkoušky vlákno-kovových laminátů. Praktická část této práce popisuje výrobu zkušebních vzorků, jejich zkoušení a vyhodnocení zkoušek.

Klíčová slova: Vlákno-kovový laminát, ARALL, GLARE, CARE, hliník, tváření.

ABSTRACT

This bachelor's thesis discusses about the history, development and use of fiber-metal laminates such as ARALL, GLARE or CARE in the transport industry. The theoretical part describes the basic concepts and definitions of composite materials and varieties of production and technological testing of fiber-metal laminates. The practical part of this thesis describes the production of test samples, their testing and evaluation of the tests.

Keywords: Fiber-metal laminate, ARALL, GLARE, CARE, aluminum, forming.

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Alexanderovi Čapkovi za konzultace, poskytnuté rady a pomoc při tvorbě práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, NÁZVOSLOVÍ A DEFINICE.....	12
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
1.1.1 Vláknové kompozity	12
1.2 NÁZVOSLOVÍ A DEFINICE	13
1.3 MATRICE.....	14
1.3.1 Epoxidové matrice	14
1.3.2 Polyesterové matrice	14
1.4 VÝZTUŽE.....	14
1.4.1 Skleněné vlákna	14
1.4.2 Uhlíkové vlákna	15
1.4.3 Aramidové vlákna	15
1.4.4 Hybridní tkaniny.....	16
1.5 HLINÍKOVÉ SLITINY.....	17
1.5.1 Slitina 2024 – T3.....	17
1.5.2 Slitina 7475 – T76.....	17
2 VLÁKNO-KOVOVÉ LAMINÁTY A JEJICH VYUŽITÍ V PRŮMYSLU DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ	18
2.1 UHLÍKO-HLINÍKOVÝ LAMINÁT (CARE)	19
2.2 ARAMID-HLINÍKOVÝ LAMINÁT (ARALL).....	19
2.3 SKLO-HLINÍKOVÝ LAMINÁT (GLARE).....	19
2.4 VLÁKNO-KOVOVÉ LAMINÁTY V LETECKÉM PRŮMYSLU.....	21
2.5 VÝVOJ HYBRIDNÍHO HNACÍHO HŘÍDELE PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	22
3 TECHNOLOGIE VÝROBY VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ A FML	23
3.1 RUČNÍ KLADENÍ	23
3.2 METODA LISOVÁNÍ SE VSTŘIKEM MATRICE RTM	23
3.3 LISOVÁNÍ PREPREGŮ (PŘEDIMPREGNOVANÉ VÝZTUŽE)	24
3.3.1 Vakuové lisování prepregů.....	24
3.3.2 Lisování prepregů za tepla	25
4 TVÁŘITELNOST KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	26
5 TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY TVÁŘITELNOSTI KOVOVÝCH A POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	27
5.1 ZKOUŠKY TVÁRNOSTI ZA STUDENA	27
5.1.1 Zkouška lámavosti	27
5.1.2 Zkouška zahloubením podle Echichsena	28
5.1.3 Zkouška střídavým ohybem	28

5.2	ODLUPOVACÍ ZKOUŠKA	29
II	PRAKTICKÁ ČÁST	30
6	CÍL PRÁCE	31
7	VÝROBA VZORKŮ	32
7.1	POSTUP VÝROBY VZORKŮ	33
8	PROVEDENÍ ZKOUŠEK	36
9	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK.....	38
9.1	ZHODNOCENÍ VZORKŮ 1. TYPU	38
9.2	ZHODNOCENÍ VZORKŮ 2. TYPU	39
9.3	ZHODNOCENÍ VZORKŮ 3. TYPU	41
9.4	ZHODNOCENÍ VZORKŮ 4. TYPU	42
9.5	CELKOVÉ ZHODNOCENÍ ZKOUŠKY	43
	ZÁVĚR.....	46
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	47
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ	50
	SEZNAM TABULEK.....	52
	SEZNAM PŘÍLOH.....	53

ÚVOD

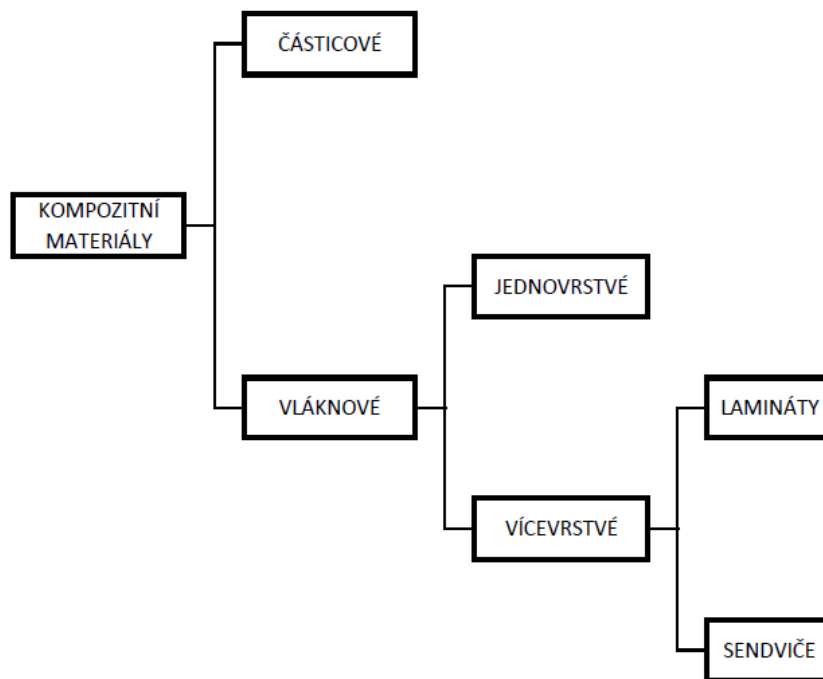
Příroda sama tvoří nové druhy materiálů tím, že kombinuje různé složky k dosažení lepších vlastností výsledného materiálu. Tato myšlenka kombinace materiálů s různými vlastnostmi je velmi stará. Tímto způsobem je využíváno příznivých vlastností jednotlivých materiálů a jejich vhodným kombinováním se odstraňují jejich nevýhody. Zde se člověk učil od přírody, která ve velké míře využívá tohoto způsobu. Příkladem může být řez buňkou merino a příčný výbrus epoxidové pryskyřice, která je jednosměrně vyztužena uhlíkovými vlákny. Dalším příkladem může být srovnání vrstvené struktury epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny se strukturou bambusového stonku. V praxi jsou kompozitní materiály využívány z důvodu dobrých mechanických vlastností a úspore hmotnosti. Nejčastěji se s těmito materiály setkáme v leteckém průmyslu, zvláště pak v kosmickém a v poslední době dochází k rozšíření i v automobilovém průmyslu. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, NÁZVOSLOVÍ A DEFINICE

1.1 Rozdělení polymerních kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se obecně rozdělují na vláknové a částicové. Toto rozdělení je rozdělením geometrickým, a je určeno tvarem, velikostí, orientací a rozměry vyztužujících prvků. Jedná se tedy o rozdělení kompozitních materiálů podle jejich geometrické struktury. [2]



Obr. 1. Rozdělení kompozitních materiálů

1.1.1 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity jsou kompozity, které jsou vyztuženy vlákny mající délkové rozměry mnohonásobně větší než průřezové. Z důvodu malých průřezových rozměrů se vlákna nemohou používat v technických aplikacích přímo. Proto se vkládají do matricových materiálů a vytvoří vláknové kompozity. Matrice je zde spojitou fází, která slouží k přenosu namáhání do vláken a také je chrání před vnějšími vlivy. Tyto kompozity se stávají nejdůležitějšími kompozitními materiály, protože jsou schopny dosahovat vysokých pevností. [3]

1.2 Názvosloví a definice

Kompozit – V pravém slova smyslu není hotovým materiálem, ale surovinou (stavebním prvkem) sloužící k dalšímu zpracování. Jde o heterogenní materiál kombinující vlastnosti dvou nebo více odlišných materiálových složek. Výsledný materiál má zřetelně odlišné vlastnosti než fáze, ze kterých se skládá.

Laminát – Označuje kompozit ve tvaru plošného výrobku z jednotlivých rozlišitelných vrstev, který vzniká spojením vláken a pryskyřice nezávisle na formě konstrukčního prvku nebo stavu výroby (vytvrzený, nevytvrzený laminát).

Matrice – Jedná se o materiál sloužící k ukládání vyztužujících vláken. Jejím úkolem je udržování geometrického tvaru, zavedení a přenos sil a ochrana vláken výztuže před vlivy okolního prostředí.

Prepreg – Polotovar výztuže, který je předimpregnován částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Tyto výztuže se vrství a poté jsou za pomoci působení tepla a případně i tlaku vytvrzeny.

Rohož – Plošná výztuž skládající se z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných, pramenců vláken spojených pojivem. Jsou velmi dobře ohybatelné a tudíž velmi vhodné na tvarově složitější dílce.

Termoset (Reaktoplast) – Je hmota, kterou lze teplem vytvrdit. Vytvrzení znamená vytvoření prostorové sítě v materiálu, díky které se stává netavitelným a nerozpustným. Po vytvrzení již nelze zpracovávat teplem.

Termoplast - Je plast, který je od určité vyšší teploty plastický a po ochlazení se stane pevným, přičemž tyto teplotou dané změny tvárnosti mohou nastávat opakovaně.

Tkanina – Skládá se ze vzájemně se křížících, propletených systémů vláken, plošná dobře zpracovatelná výztuž. Vyznačuje se různými vlastnostmi v různých směrech.

Výztuž - Výztuž bývá většinou tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka, která má ve srovnání s matricí o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost. Pokud je výztuž v podobě vláken, deformují se méně než matrice a tak nesou veškeré napětí působící na kompozitní dílec.

[1]

1.3 Matrice

Matrice je materiál, kterým je prosycen systém vláken a dalších složek tak, že po zpracování vznikne výrobek, který je tvarově stálý. Mezi hlavní úkoly matrice patří zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil a ochrana vlákna před vlivy okolního prostředí. Aby bylo dosaženo optimálních vlastností kompozitu je nutno dosáhnout dobrého spojení mezi vláknem a matricí. [1]

1.3.1 Epoxidové matrice

Za normálních teplot kapalné až pevné. Epoxidové matrice patří mezi velmi hodnotné termosety s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Výhodou je malé smrštění během vytvrzování, dobré elektrické a izolační schopnosti a dobrá chemická odolnost. Chemická odolnost je závislá na druhu tvrdidla. Dále jsou vysoce odolné proti vodě a proto široce využitelné při výrobě lodí. Cenově jsou však nevýhodné.[1]

1.3.2 Polyesterové matrice

Jsou bezbarvé, mírně nažloutlé roztoky. Lze je vytvrzovat za normální nebo zvýšené teploty bez vedlejšího produktu – těkavé složky. Při vytvrzování dochází k uvolňování reakčního tepla a tím dochází k velkému smrštění, asi 5 až 9%. Dobře smáčejí skelná vlákna, ale pevnost vazby je menší. Mají dobré elektrické vlastnosti a odolnost proti UV záření. Vyznačují se velkou variabilitou při zpracování, možností volby jednotlivých složek. Jejich cena je nízká, jsou spolehlivé a proto často používané při výrobě. [1]

1.4 Výztuže

1.4.1 Skleněné vlákna

Skleněné vlákno je izotropní materiál, to znamená, že jeho vlastnosti jsou v podélném i příčném směru stejné. Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku. Dlouhodobé tepelné namáhání nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Skleněná vlákna jsou nehořlavá, a proto ohnivzdorná. Součinitel teplotní délkové roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [1]



Obr. 2. Skelná tkanina

1.4.2 Uhlíkové vlákna

Uhlíková vlákna jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale nízkou tažností. Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, to znamená, že se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota modulu pružnosti. Mají vysokou pevnost a modul pružnosti až do teploty 500°C. Jsou velmi odolné proti korozi a mají dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. Dále umožňují dobrý průchod záření, neodrážení radarový paprsek. Vyznačují se odolností proti dlouhodobému dynamickému namáhání. [1]



Obr. 3. Uhlíková tkanina

1.4.3 Aramidové vlákna

Je to nejlehčí vyztužující vlákno, které má vysokou měrnou pevnost v tahu. Je silně anizotropní, to znamená, že jeho vlastnosti se v příčném a podélném směru velmi liší. Aramidová vlákna jsou hydrofilní, to znamená, že absorbují vlhkost, což ovlivňuje pevnost spoje mezi vlákny a matricí. Nejsou odolná proti vysokým teplotám. Adheze těchto vláken k matrici je často nižší než u ostatních vláken. [1]



Obr. 4. Aramidové vlákno

1.4.4 Hybridní tkaniny

V těchto tkaninách jsou využity kladné vlastnosti různých vláken při jejich kombinaci ve tkanině například rázová houževnatost aramidových vláken s tuhostí uhlíkových vláken nebo mez pevnosti v tlaku tlustších skleněných vláken. [1]

Nejčastěji používanou kombinací je kombinace uhlíkového a aramidového vlákna, která se vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Je chemicky odolná vůči chemikáliím a jiným agresivním látkám, má výborné izolační vlastnosti, vysokou tepelnou odolnost, vysokou pevnost a pružnost, mají velmi dobrý elektrický odpor a jsou nehořlavé. [1]



Obr. 5. Uhlíko-aramidová hybridní tkanina

1.5 Hliníkové slitiny

Vedle oceli patří k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Surovinou k výrobě je bauxit, v čistém stavu oxid hlinitý – z taveniny oxidu ve směsi s kryolitem se získává elektrolyticky čistý hliník. Čistý hliník je měkký, málo pevný a dobře tvárný. Používá se v potravinářském průmyslu, strojírenství a stavebnictví. Velká část hliníku se spotřebuje v elektrotechnice. [4]

V kombinaci s uhlíkovými, skleněnými, aramidovými nebo hybridními vlákny se nejčastěji používají slitiny hliníku 2024-T3 a 7475-T67.

1.5.1 Slitina 2024 – T3

Označení slitiny 2xxx značí, že hlavními složkami jsou hliník a měď. Označení T3 udává stav po rozpouštěcím žihání, tváření za studena a přirozeném stárnutí.

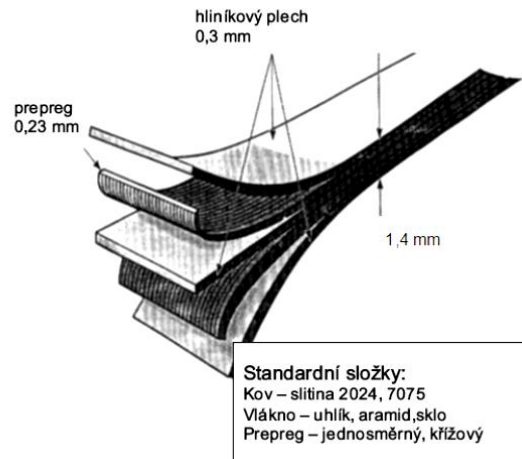
Tato slitina se vyznačuje dobrou únavovou odolností, zvláště pokud se jedná o tlusté desky. V dnešní době je tato slitina používána u mnoha leteckých konstrukcí. Desky jsou používány u konstrukcí trupu, tažných prvků křídel, výztužných žeber namáhaných na ohyb a u konstrukcí, u nichž je požadována tuhost, dobré únavové vlastnosti a pevnost. Lze se s nimi setkat také u součástí motorů, které nejsou vystaveny příliš vysoké teplotě. [4]

1.5.2 Slitina 7475 – T76

Označení slitiny 7xxx značí, že hlavními složkami jsou hliník a zinek. Označení T76 udává stav po rozpouštěcím žihání a umělém přestárnutí k dosažení dobré odolnosti proti vrstevnaté korozi.

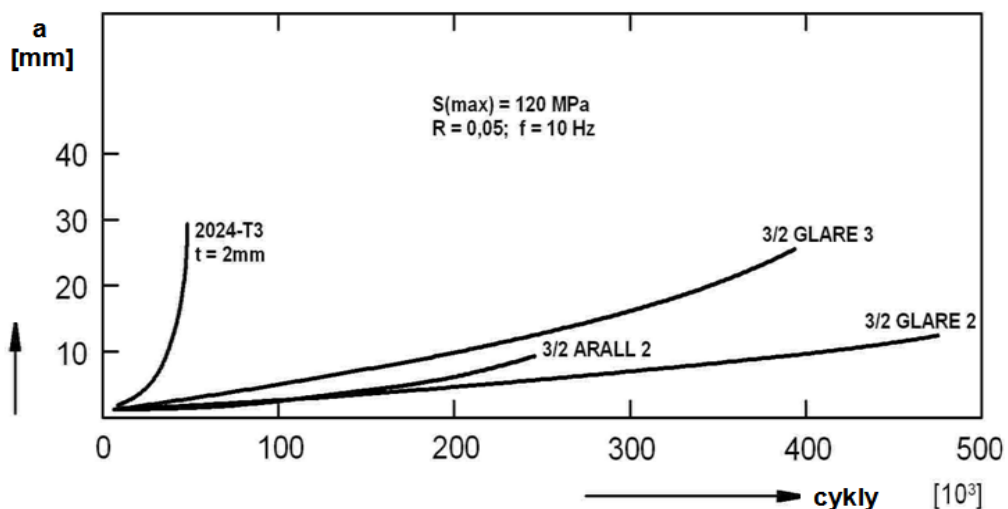
Slitina 7475 – T76 byla vyvinuta pro aplikace vyžadující kombinaci vysoké pevnosti, vynikající lomové houževnatosti a odolnosti proti vzniku únavové trhliny. Korozní odolnost a únavové chování slitiny 7475 je stejné a v některých případech dokonce lepší než u mnoha běžných vysoce pevných slitin. Desky i plechy z této slitiny jsou určeny pro součásti, které jsou ohrožené únavovým lomem. Mohou to být potahy trupu a křídel, vzpěry křídel, přepážky trupu a další. [4]

2 VLÁKNO-KOVOVÉ LAMINÁTY A JEJICH VYUŽITÍ V PRŮMYSLU DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ



Obr. 6. Skladba vláknokovových laminátů [5]

Vláknokovové lamináty jsou kombinací vrstev kompozitních a kovových materiálů. Výsledkem je odstranění nedostatků samostatně použitých kovových nebo kompozitních materiálů. Nejčastěji se jedná o kombinaci hliníkové slitiny a vláknového kompozitu s epoxidovou matricí. Tyto materiály se vyznačují vynikající odolností proti šíření únavové trhliny, odolností při požáru, nebo zásahu blesku. Další výhodou je snížení hmotnosti od 15% do 30%. Nevýhodou těchto materiálů je vysoká cena. Mezi nejznámější zástupce komerčních vláknokovových laminátů patří ARALL a GLARE, které se používají především v konstrukci letadel. [5]



Obr. 7. Šíření trhliny ve vláknokovovém laminátu v porovnání se slitinou hliníku [5]

2.1 Uhlíko-hliníkový laminát (CARE)

CARE (GARbon REinforced) je jednou z variant zvýšení užitečných vlastností vlákno-kovových laminátů za použití uhlíkových vláken. Předpokládalo se, že kompozit s uhlíkovými vlákny bude mít díky vyšší tuhosti a mnohem větší pevnosti vláken lepší mechanické vlastnosti než ARALL. Byla však očekávána a následně potvrzena tvorba koroze při kontaktu uhlíkového vlákna a kovu. Pro další uplatnění tohoto kompozitního složení to bylo zásadní omezení a musel se najít vhodný adhezivní izolant, který by kontaktu a vzniku koroze zabránil. Využití uhlíkového laminátu v praxi bylo odsunuto, a ani dnes se uhlíkový laminát v leteckých konstrukcích neobjevuje. [5]

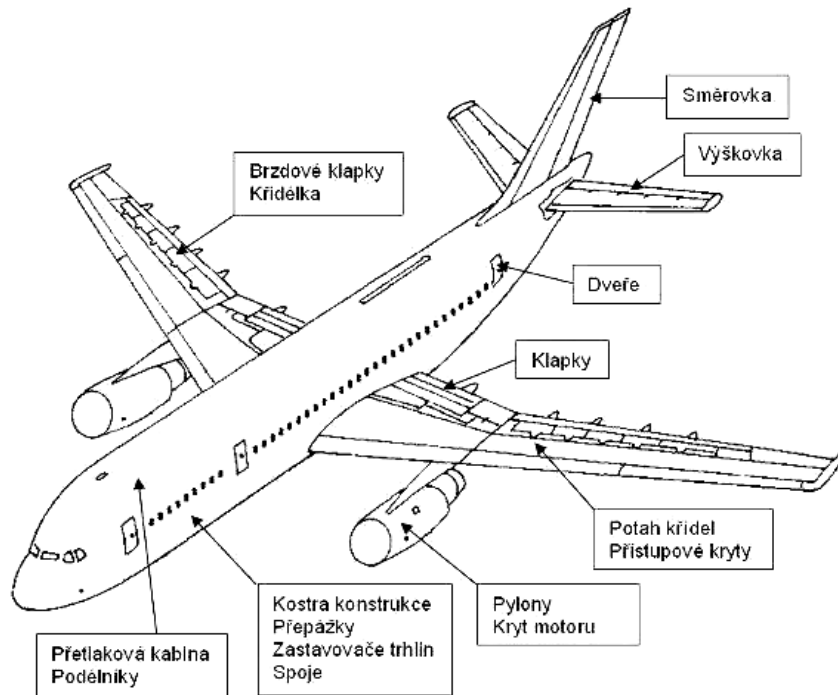
2.2 Aramid-hliníkový laminát (ARALL)

ARALL (Aramid Reinforced ALuminium Laminates) je prvním vlákno-kovovým laminátem pro letectví vynalezený roku 1978. ARALL je materiál vzniklý plátováním tenkých vrstev plechů z hliníkové slitiny a aramidového prepregu. Je koncipován v jednosměrném uspořádání vláken orientovaných ve směru dominantního zatížení. Po vyhodnocení leteckých simulací zohledňujících použití bylo zjištěno, že ušetří až 30% hmotnosti a podstatně prodlouží životnost letadel. Díky výborné odolnosti proti únavě se začal používat pro potahy spodních částí křídel a záďových kormidel. Podrobným výzkumem však byla zjištěna nežádoucí omezení. Především nízká maximální hodnota objemu vláken v matrici (50%) kvůli malé adhezivní pevnosti mezi vlákny a pryskyřicí a dále fakt, že ARALL nelze vyrábět s vlákny orientovanými ve více směrech. [5]

2.3 Sklo-hliníkový laminát (GLARE)

GLARE (GLASS REinforced) je materiál vzniklý plátováním tenkých vrstev plechů z hliníkové slitiny a skleněného prepregu. Laminát je vyráběn vytvrzováním v autoklávu. Před vytvrzením jsou na sebe nakladeny jednotlivé vrstvy laminátu a to buď ručně, nebo strojně. Vzhledem k vrstvené struktuře materiálu je možné upravit materiál pro konkrétní použití, počet vrstev i orientace vláken může být měněna v závislosti na dané konstrukci. Mezi největší přednosti GLARE patří velká odolnost proti únavě, nárazu, prohoření a lepší odolnost proti korozi než samotná hliníková slitina. Pracovní a inspekční postupy jsou jednodušší než u jiných kompozitů a v podstatě stejné jako u běžné hliníkové slitiny. Dnes je tento typ kompozitu využíván výrobcem letadel Airbus, který GLARE ve velké míře vyu-

žívá u velkokapacitního dopravního A380 na horní části přetlakové kabiny. Dále je použit na směrovém kormidlu, na spodních potazích křídla a na dalších místech. [5]



Obr. 8. Použití GLARE a ARALL kompozitů v konstrukci letadel [5]

Tab. 1. Standardní složení vláknokovových laminátů [5]

Typ	Složení	Kov	Typ prepregu	Orientace prepregu
ARALL 2	2/1 - 6/5	2024-T3	aramid-epoxy	jednosměrná
ARALL 3	2/1 - 6/5	7475-T76	aramid-epoxy	jednosměrná
GLARE 1	2/1 - 6/5	7475-T76	sklo-epoxy	jednosměrná
GLARE 2	2/1 - 6/5	2024-T3	sklo-epoxy	jednosměrná
GLARE 3	2/1 - 6/5	2024-T3	sklo-epoxy	křížová/jednosměrná
GLARE 4	2/1 - 6/5	2024-T3	sklo-epoxy	křížová/jednosměrná

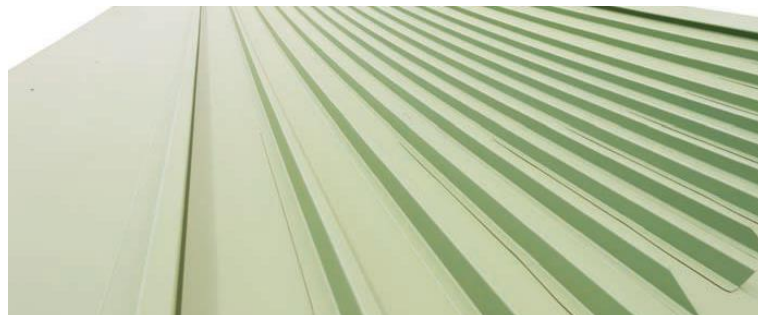
Tab. 2. Mechanické vlastnosti vlákno-kovových materiálů [5]

Laminát	Tloušťka kovu [mm]	Tloušťka prepregu [mm]	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	E [GPa]	Hustota [g/cm ³]
ARALL 1	0,3	0,22	897	535	67,5	2,16
ARALL 2	0,3	0,22	849	411	68,3	2,16
GLARE1	0,3	0,25	1494	530	62,2	2,42
GLARE2	0,2	0,25	1670	416	60,9	2,34
	0,3	0,25	1449	406	63,0	2,42
	0,4	0,25	1295	399	64,5	2,47
GLARE 3	0,3	0,25	849	382	81,3	2,42

2.4 Vlákno-kovové lamináty v leteckém průmyslu

Velmi významným hlediskem při vývoji leteckých konstrukcí je hmotnost. Cílem je dosažení co nejnižší hmotnosti a výrobní pracnosti při současném zvyšování spolehlivosti. Použitím kompozitních materiálů je možno uspořit přibližně 20% hmotnosti při zlepšené funkčnosti. [1]

V roce 2005 byl uveden do provozu Airbus A380 svou hmotností, rozměry či počtem cestujících dodnes největší letadlo světa. Těchto vlastností by ale nebylo možné dosáhnout bez použití moderních materiálů a technologií. Velkého snížení hmotnosti bylo dosaženo využitím moderních vlákno-kovových laminátů. Použitím materiálu GLARE v konstrukci horní části trupu bylo na ploše 400 m² ušetřeno 800 kg hmotnosti. V porovnání s letouny klasické konstrukce došlo krom snížení hmotnosti také k podstatnému zvýšení životnosti a odolnosti proti únavě a atmosférickým vlivům. Celkem bylo na A380 v roce 2005 použito 22% kompozitních materiálů. [1]

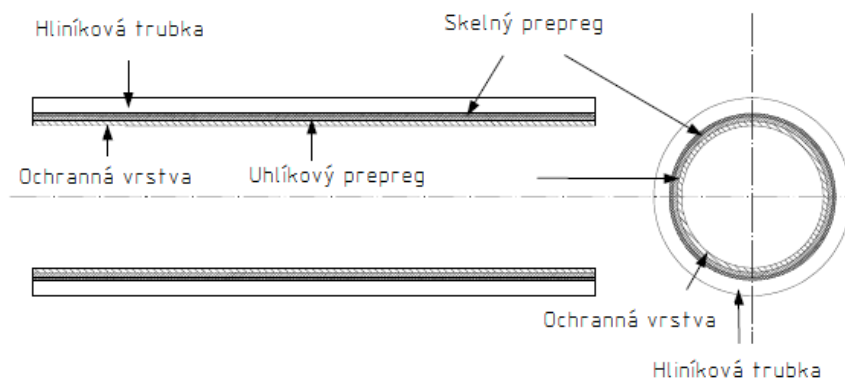


Obr. 9. GLARE panel trupu s žebry pro Airbus A380 [12]

2.5 Vývoj hybridního hnacího hřídele pro automobilový průmysl

Hlavní úlohou hnacího hřídele je přenášet točivý moment od motoru k hnané nápravě. Klasické ocelové hnací hřídele jsou poměrně těžké, což v době kdy je cílem dosáhnout co nejnižší hmotnosti automobilu a tím i nižší spotřeby paliva přestává být vyhovujícím řešením, proto vznikl nápad vyvinout hybridní kompozitní hnací hřídel. [6]

Hybridní hnací hřídel byl navrhován tak, aby nahradil konvenční ocelové hnací hřídele v automobilech. Dalším kritériem bylo dosažení co nejnižší hmotnosti při současném zachování dobrých mechanických vlastností. Hybridní hnací hřídel by měla splňovat tři hlavní kritéria, a to pevnost v krutu, pevnost v ohybu a odolnost proti vzpěru. Těchto vlastností bylo dosaženo použitím kombinace hliníkové trubky, která přenáší krouticí moment a uhlíkového vlákna, které zvyšuje pevnost v ohybu. Takto řešená hnací hřídel má mnoho výhod, mezi hlavní patří nižší hmotnost, hluk a vibrace. Další výhodou v důsledku použití kombinace hliníku a kompozitních materiálů je snížení nákladů, než kdyby byla použita pouze samostatná drahá uhlíková vlákna. [6]



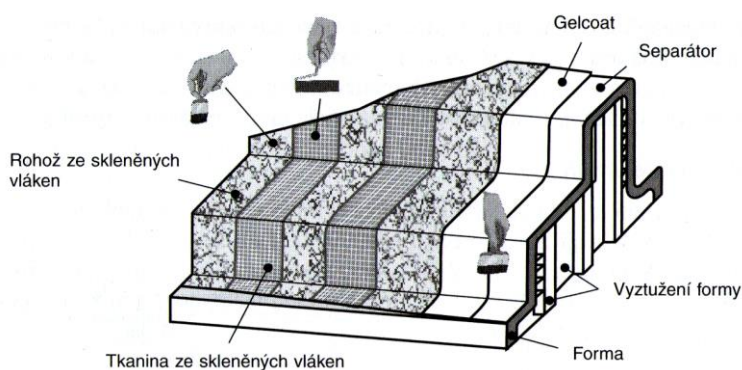
Obr. 10. Jednotlivé vrstvy materiálů na hybridním hnacím hřídeli [6]

3 TECHNOLOGIE VÝROBY VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ A FML

3.1 Ruční kladení

Ruční kladení je nejjednodušší pracovní postup vhodný pro malé série, prototypy a velkoplošné díly. Tato technologie spočívá v nanášení vrstev pryskyřice a výztuže na vhodný povrch formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvalitního povrchu kompozitního dílce. V konečném důsledku má tedy pouze jedna strana výrobky kvalitní povrch. [7]

Výhodami této metody je její jednoduchost, minimální náklady na nástroje a prakticky neomezená volba tvarů a velikostí. Nevýhodami této metody je relativně velké množství odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat, pouze jeden povrch výrobku je kvalitní, malá produktivita a fakt že kvalita výrobku je závislá na zručnosti a zkušenosti pracovníka. [7]

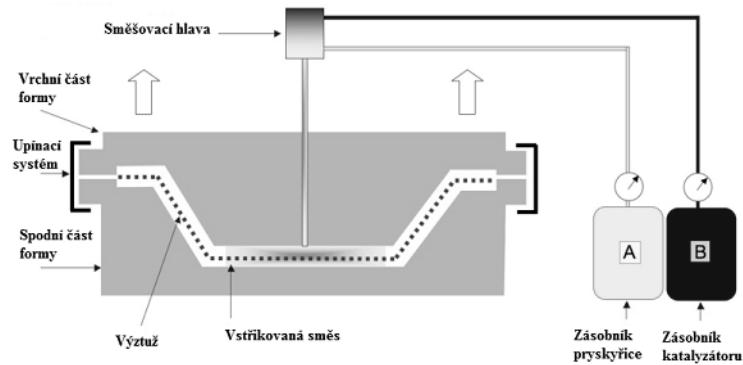


Obr. 11. Ruční laminování [1]

3.2 Metoda lisování se vstřikem matrice RTM

Tato metoda patří do skupiny metod pracujících s uzavřenou formou. Do formy se vloží suchá výztuž, forma se uzavře a vstříkne se do ní katalyzovaná pryskyřice. Vytvrzování se děje většinou při pokojové teplotě. [7]

Výhodou této metody je to, že je možno vyrobit kompozitní díly, které mají na obou stranách kvalitní povrch, který může mít na každé straně jinou barvu. Dále je možno velmi přesně nastavovat tloušťkové tolerance, lze do výrobku snadno vlamínovat různé příruby a jiné součásti. Vyrábí se poměrně velké plošné výrobky 5-19m². Nevýhodou je nutnost použití těžkých a drahých kovových forem. [7]



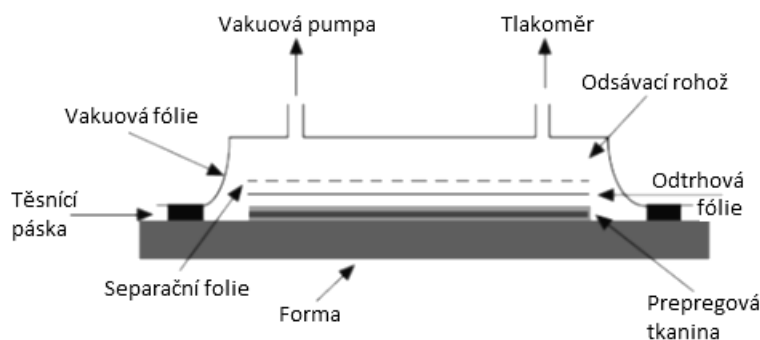
Obr. 12. Metoda lisování se vstřikem matrice RTM [8]

3.3 Lisování prepregů (předimpregnované výztuže)

3.3.1 Vakuové lisování prepregů

Tato technologie využívá takzvaných prepregů, to jsou tkaniny, které byly předimpregnovány pryskyřicí. Prepreg podle přesného plánu vkládáme do formy v několika vrstvách. Dále se vkládají další technologické materiály, jako jsou odtrhová tkanina, separační fólie, odsávací tkanina a vakuová fólie. Díky vakuové fólii je umožněno vakuové pumpě vytvořit vakuum a tím slisovat všechny materiály. Poté se připravená forma přemístí do autoklávu nebo vyhřívané pece. [8]

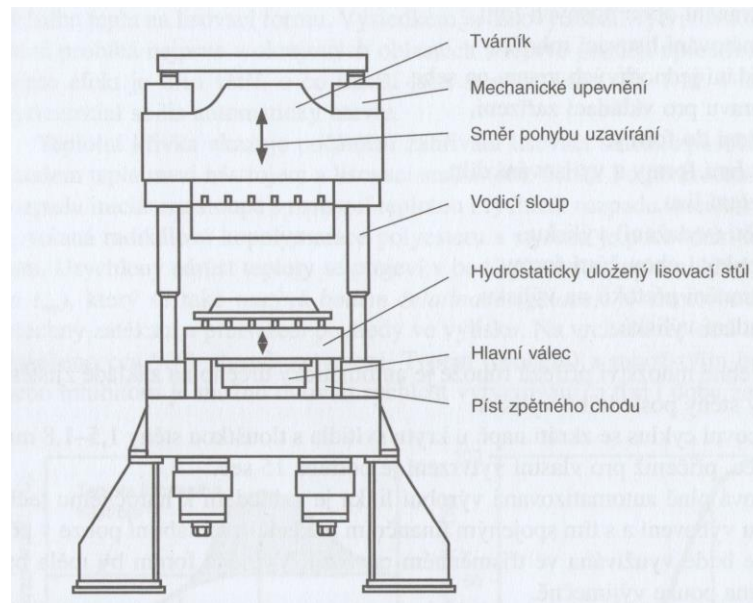
Výhodou této metody je kontrolovatelnost, díky které je dosaženo lepších kvalitativních a mechanických vlastností. Metoda je vhodná pro velké výrobky. Nevýhodou je složitost procesu a vyšší náklady v důsledku použití dalších technologických materiálů. [8]



Obr. 13. Vakuové lisování prepregů [8]

3.3.2 Lisování prepregů za tepla

Při lisování za tepla se používají hydraulické lisy a ocelové formy. Vytvrzovací reakce je iniciována přívodem tepla zvenčí. Formy proto musí být vyhřívány například elektricky, olejem nebo párou. Lisovací teploty se pohybují v rozmezí 130 až 160°C u polyesterových pryskyřic a u epoxidových pryskyřic v rozmezí 125 až 200°C. Pro zpracování se používají lis s krátkým zdvihem, u kterých jsou tvárník a lisovací stůl odděleny.



Obr. 14. Lis pro lisování prepregů za tepla [1]

4 TVÁŘITELNOST KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Tvářitelnost kompozitních materiálů je velmi obtížná. Kompozitní materiály je možné zpracovávat různými způsoby, ale je nutné respektovat faktory, jako je například orientace vláken. Za studena se tyto materiály tvářet dají jen velmi obtížně a za tepla je možné tvářet jen ty, u kterých je použita termoplastická matrice. [9]

U tváření kompozitů je nutné, aby proběhlo bez poškození matrice a vyztužujících vláken. Tvárnost je závislá na množství vláken ve výztuži a na plastických vlastnostech matrice. Tváření za studena je velmi obtížné, nejčastěji se používá pouze pro kompozity, které jsou jednosměrně vyztužené, a to ve směru vláken a při velkém poloměru ohybu. Jednodušeji lze ohýbat upravené polotovary, u kterých se v místě ohybu nevyskytují zpevňující vlákna. Nejsnadněji lze tvářet kompozity za tepla, to ale platí pouze pro kompozity, které obsahují termoplastickou matrici, matrice se vlivem tepla stává plastičtější a potom je možné tvářet i vícevrstvé materiály, kde nezáleží na orientaci vyztužujících vláken. [9]

5 TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY TVÁŘITELNOSTI KOVOVÝCH A POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

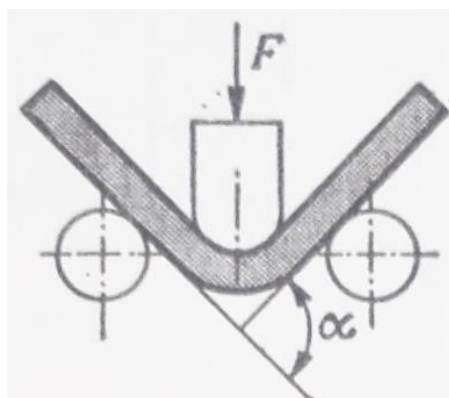
Technologické vlastnosti materiálu nelze vyjádřit v přesně definovaných základních veličinách, které mají fyzikální význam. Technologickými zkouškami, které provádíme za podmínek podobných zpracování ve výrobním procesu, zjišťujeme pouze srovnatelné ukazatele, komplexního charakteru, které umožňují kvalitativní posouzení vhodnosti materiálu pro určitý způsob zpracování. Pro většinu technologických zkoušek se používají jednoduché dílenské prostředky nebo běžná zkušební zařízení s použitím vhodných přípravků. Pro zajištění srovnatelnosti a reprodukovatelnosti je nutné dodržovat podmínky, které jsou obvykle uvedeny v normách. [10]

5.1 Zkoušky tvárnosti za studena

Zkouškou tvárnosti za studena se zjišťuje vhodnost materiálu k deformaci za studena. Zkušební vzorek se ohýbá kolem trnu, přičemž až do stanoveného úhlu ohybu nesmí dojít ke vzniku trhlin nebo zlomení zkoušeného vzorku. [10]

5.1.1 Zkouška lámavosti

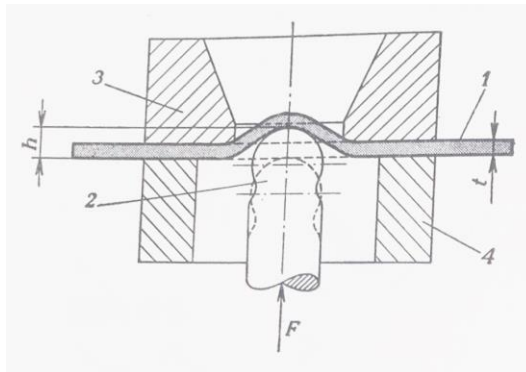
Zkušební vzorky pro zkoušku lámavosti jsou obvykle ploché a maximálně 30mm tlusté. Průměr trnu, přes který se ohýbá, je úměrný tloušťce a pevnosti zkoušeného materiálu. Při zkoušce se měří i prodloužení vláken na tažené straně. Přesné postupy této zkoušky jsou určeny normou ČSN EN ISO 7438. Pro účely této práce byly podmínky zkoušky z důvodů velké vytíženosti zkušebního stroje upraveny. [10]



Obr. 15. Zkouška lámavosti [10]

5.1.2 Zkouška zahloubením podle Echichsena

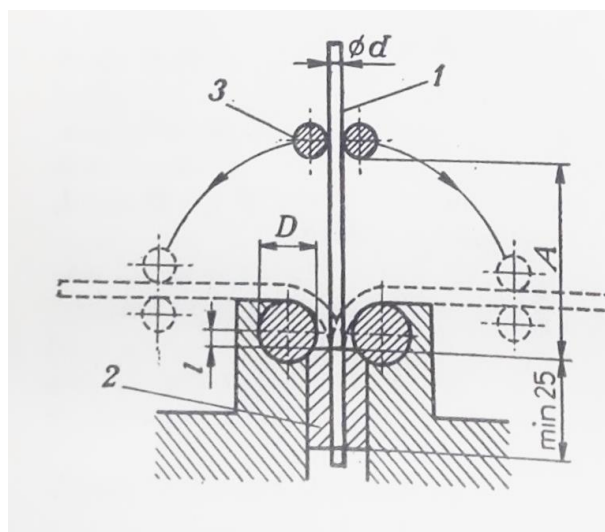
Při zkoušce zahloubení podle Erichsena se vlačuje kulový průtažník o průměru 20mm do materiálu, který je upnutý pomocí přídržovače na průtlačnici, tak dlouho, než se vytvoří trhlina. Důležitá je orientace trhliny a hladkost vytlačeného kulového vrchlíku. Trhliny, které sledují vrstevnici, dokazují, že materiál je vhodný pro tažení. [10]



Obr. 16. Schéma zkoušky zahloubení podle Erichsena [10]

5.1.3 Zkouška střídavým ohybem

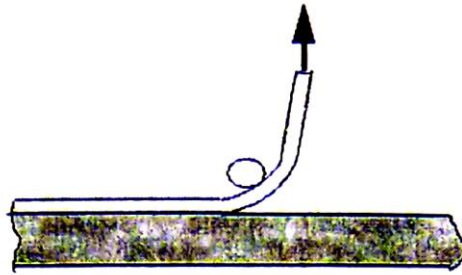
Zkouška střídavým ohybem spočívá v tom, že vzorek materiálu upnutý do čelistí, se ohýbá střídavě o 180°C rychlostí asi 60 ohybů za minutu. Výsledkem tvárnosti vzorku je počet ohybů do porušení. [10]



Obr. 17. Zkouška střídavým ohybem [10]

5.2 Odlupovací zkouška

Tuto zkoušku je možné použít, pokud je jeden z materiálů méně tuhý a povoluje velký ohyb. Tento materiál se odlupuje přes přípravek, který zaručuje konstantní poloměr ohybu při odlupování. Míra adheze je určena odlupovací silou, která je vztažena na jednotku délky hranice odloupenutí. [11]

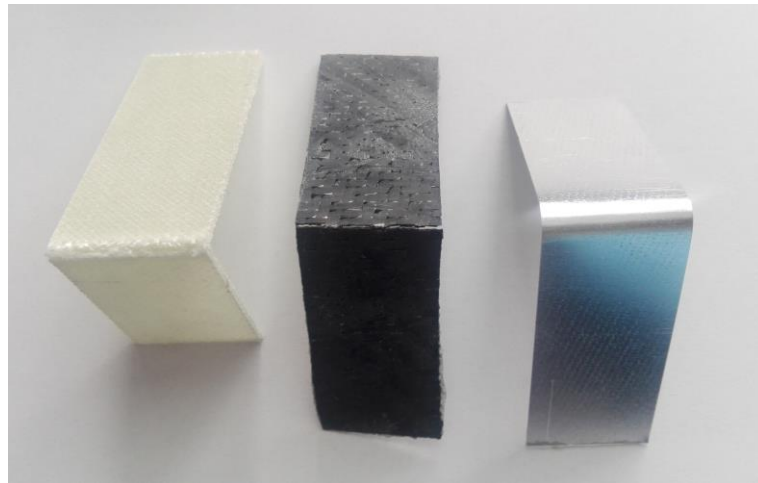


Obr. 18. Princip odlupovací zkoušky

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

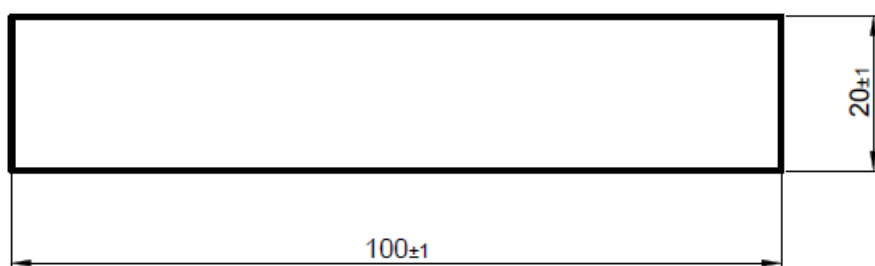
Cílem práce bylo zjistit, zdali dokáže hliníkový plech v kombinaci s uhlíkovým, nebo skleněným prepregem zvýšit tvárnost výsledného kompozitu, a tím zabránit jeho poškození. Aby bylo možno dosáhnout výsledků bylo nutné vyrobit zkušební vzorky, u kterých bylo zkoumáno jejich chování při navržené zkoušce lámavosti se stanoveným úhlem ohybu 90°. Pro porovnání byly nejdříve otestovány jednotlivé vzorky hliníkového plechu, skelného a uhlíkového kompozitu. Tímto testem bylo zjištěno, že zatímco hliníkový plech bylo možné ohnout do požadovaného úhlu bez porušení, tak jak skelný tak uhlíkový kompozit prasknul, ještě dříve než bylo dosaženo požadovaného úhlu ohybu.



Obr. 19. Porovnání tvárnosti skelných a uhlíkových vláken s hliníkovým plechem

7 VÝROBA VZORKŮ

Po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto vyrobit celkem čtyři typy vzorků vláknokovového laminátu vždy po 5 kusech. První typ vzorků se skládal z dvou kusů hliníkového plechu, mezi který byl vložen skelný prepreg. Druhý typ vzorků se skládal ze tří kusů hliníkového plechu, s tím, že jednotlivé vrstvy plechu byly odděleny skelným prepregem. Třetí typ byl vyroben stejným postupem jako první typ, ale místo skelného prepregu byl použit prepreg uhlíkový. Čtvrtý typ vzorků byl obdobou druhého typu, s tím, že skelný prepreg byl nahrazen prepregem uhlíkovým. Rozměry vzorku byly navrženy 20x100mm.



Obr. 20. Rozměry zkušebních vzorků



Obr. 21. Struktura vzorku typ 1.



Obr. 22. Struktura vzorku typ 2.



Obr. 23. Struktura vzorku typ 3.



Obr. 24. Struktura vzorku typ 4.

7.1 Postup výroby vzorků

Lis, s jehož pomocí bylo provedeno slisování a vytvrzení vzorků byl nastaven na teplotu 130°C. Na odmaštěný hliníkový plech byl podle typu vzorku nalepen příslušný prepreg. Po přípravě vzorků byly naseparovány separačním voskem kovové desky, mezi které byly umísťovány jednotlivé typy vzorků. Separace byla provedena vždy před každým jednotlivým lisováním a to nejméně dvakrát při dodržení 5 minutového intervalu na zaschnutí jednotlivých vrstev. Po zaschnutí druhé vrstvy separátoru byly vzorky vloženy mezi naseparované kovové desky, které byly umístěny a uzavřeny v lisu. Po uplynutí 15 minut byly vzorky vytvrzeny a následně vyjmuty z lisu a kovových desek. Po vyjmutí vzorků byly kovové desky očištěny a znovu naseparovány, tak aby byly připravené na lisování dalších vzorků. Vlastnosti použitých materiálů jsou uvedeny v technických listech, které jsou umístěny v přílohách. Vzorky byly vyráběny při teplotě 25°C a tlaku vzduchu 992hPa.

Tab. 3. Technické údaje laboratorního lisu

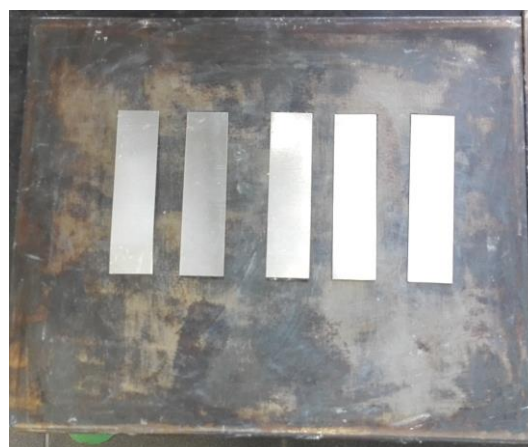
Technické údaje laboratorního lisu	
Rozměry desek	250x250mm
Příkon	2400W
Max. teplota	200°C
Svírací síla	5t



Obr. 25. Laboratorní vulkanizační lis



Obr. 26. Naseparované kovové desky



Obr. 27. Rozložení vzorků v lisu



Obr. 28. Hotový vzorek typ 1.



Obr. 29. Hotový vzorek typ 2.



Obr. 30. Hotový vzorek typ 3.



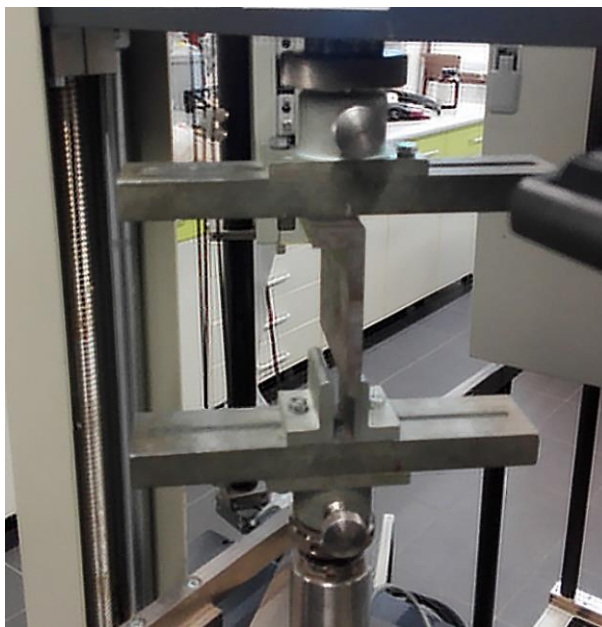
Obr. 31. Hotový vzorek typ 4.

8 PROVEDENÍ ZKOUŠEK

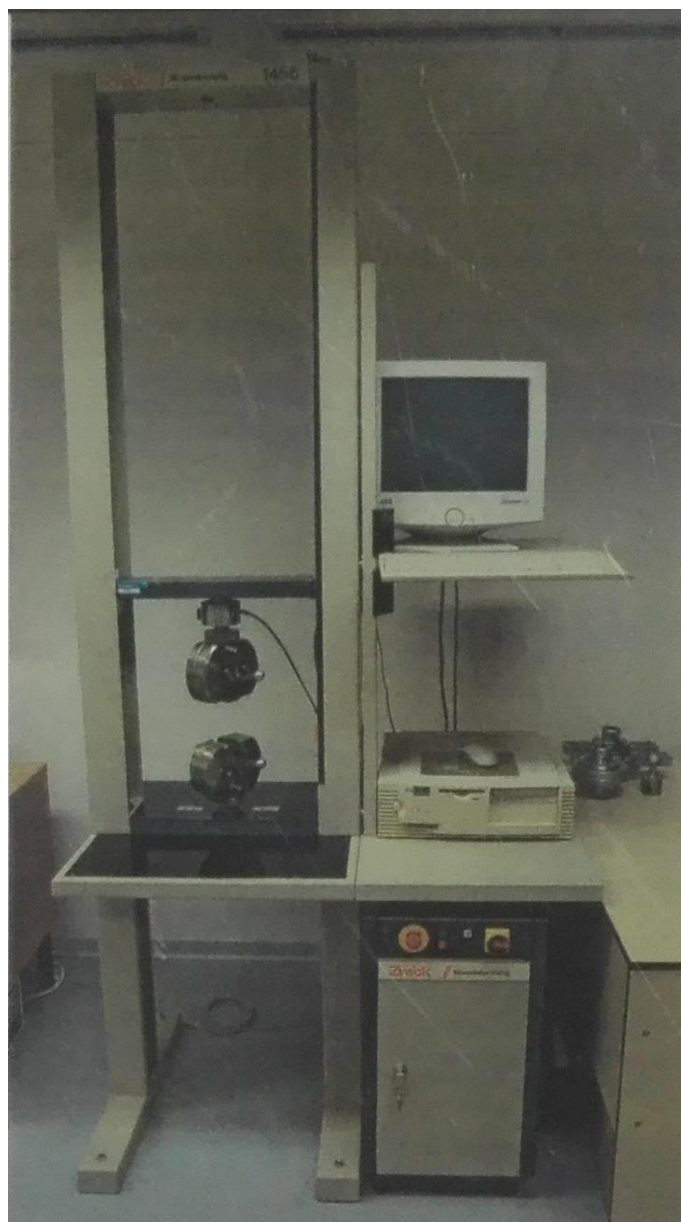
Byla navržena a provedena zkouška lámavosti. Zkouška byla navržena dle normy ČSN EN ISO 7438, která z důvodů velkého vytižení zkušebního stroje a dostupných pomůcek nebyla dodržena v plném znění. Průměr trnu, přes který byl vzorek ohýbán a průměr podpěr byl navrhnout 10mm. Vzdálenost mezi podpěrami byla vypočtena dle vzorce uvedeného v normě a byla 13mm. Cílem zkoušky bylo zjistit, zda hliníkový plech v laminátu zvýší jeho tvárnost, tím že byl materiál ohýbán, až do úhlu 90°. K dosažení přesné hodnoty úhlu ohybu bylo využito šablony. Zkoušky byly provedeny na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456 za teploty 25°C a při tlaku 992hPa.

Tab. 4. Technické údaje zkušebního stroje Zwick 1456

Technické údaje laboratorního lisu	
Maximální posuv příčnicku	800mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Tepelná komora	-80/+250°C
Možnosti testů	Tah/Ohyb/Tlak



Obr. 32. Detail podpěr a trnu

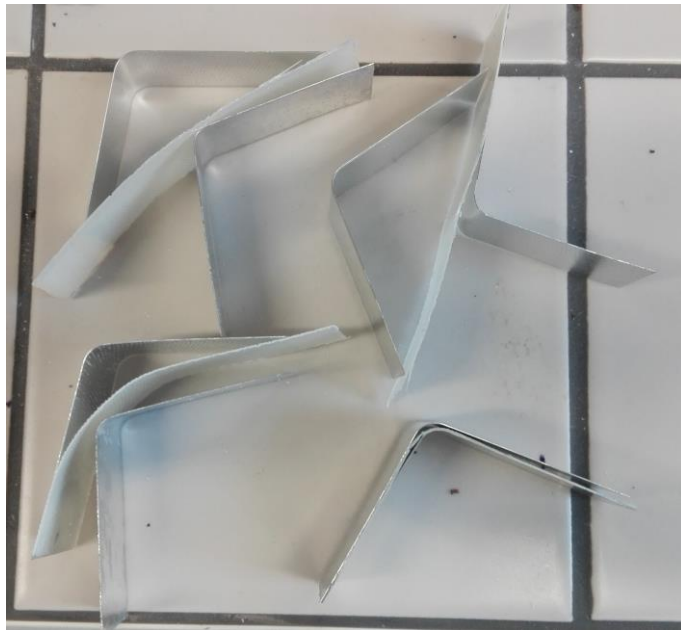


Obr. 33. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456

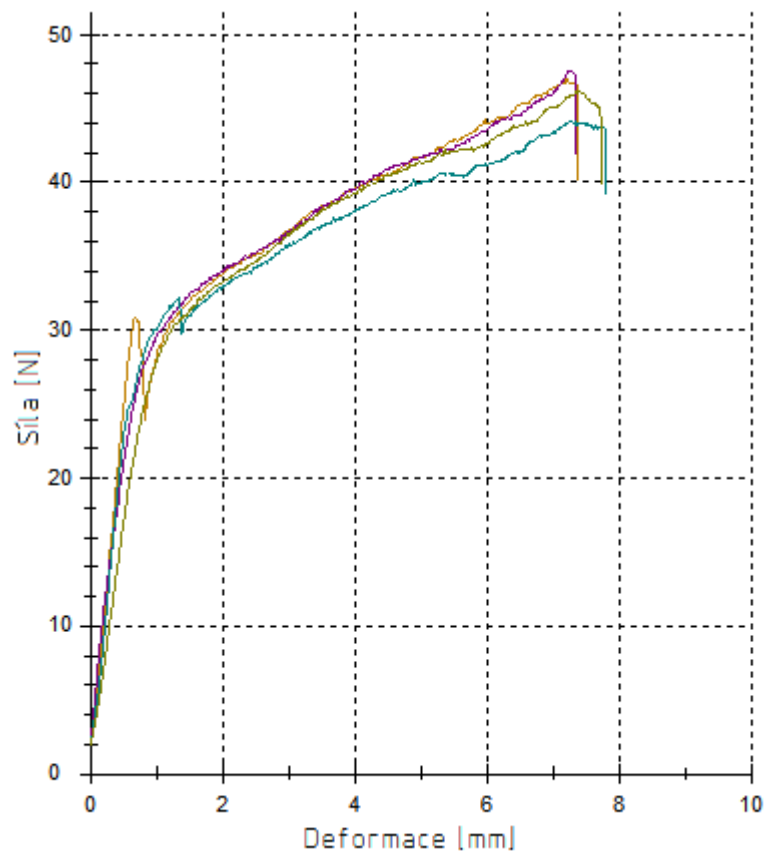
9 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

9.1 Zhodnocení vzorků 1. typu

U tohoto typu vzorků bylo pomocí navržené zkoušky zjištěno, že adheze jednotlivých vrstev hliníkového plechu a skelného prepregu byla nevyhovující, a tím docházelo k delaminaci jednotlivých vrstev. Z hlediska tváření byl tento typ vzorků označen za nevyhovující.



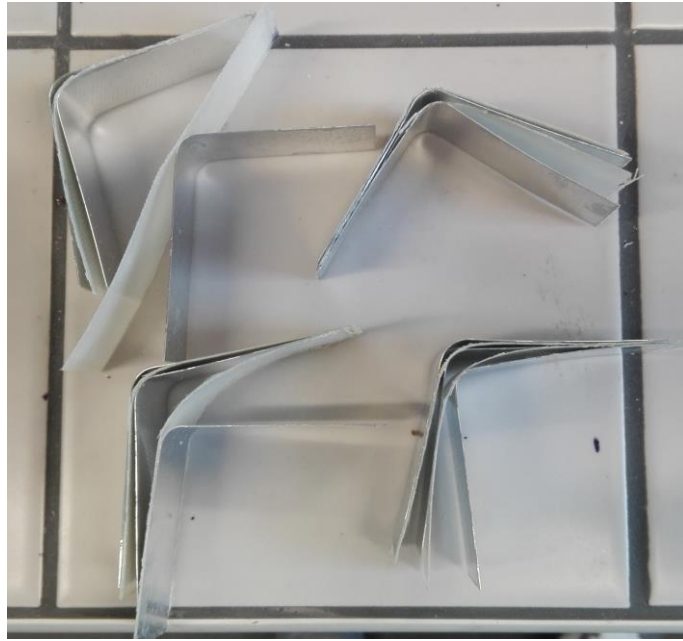
Obr. 34. Vzorky typ 1. po zkoušce



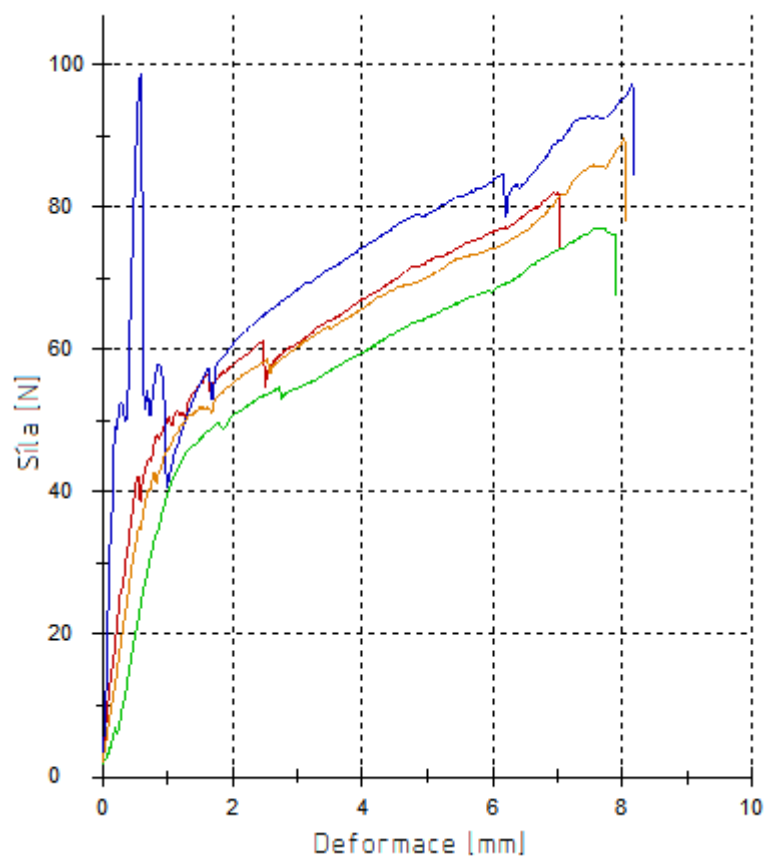
Obr. 35. Graf porovnání hodnot pro 1. typ vzorků

9.2 Zhodnocení vzorků 2. typu

U tohoto typu vzorků bylo pomocí navržené zkoušky zjištěno, že v porovnání s 1. typem vzorků byl tento typ schopen snést větší zatěžující sílu, ale adheze jednotlivých vrstev hliníkového plechu a skelného prepregu byla stejně jako v případě 1. typu vzorků nevyhovující, a tím docházelo k delaminaci jednotlivých vrstev. Z hlediska tváření byl tento typ vzorků označen za nevyhovující.



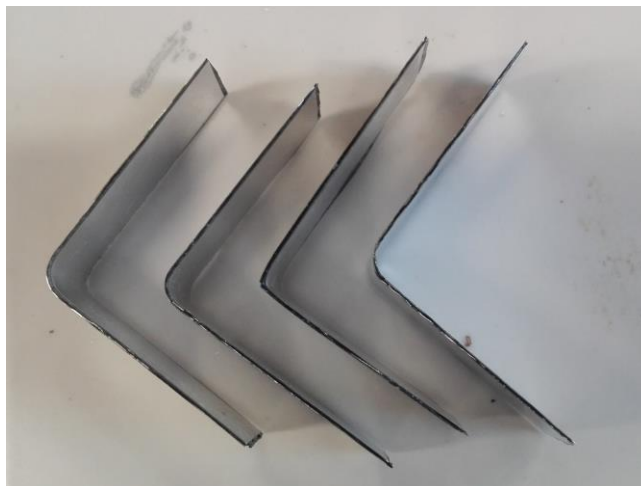
Obr. 36. Vzorky typ 2. po zkoušce



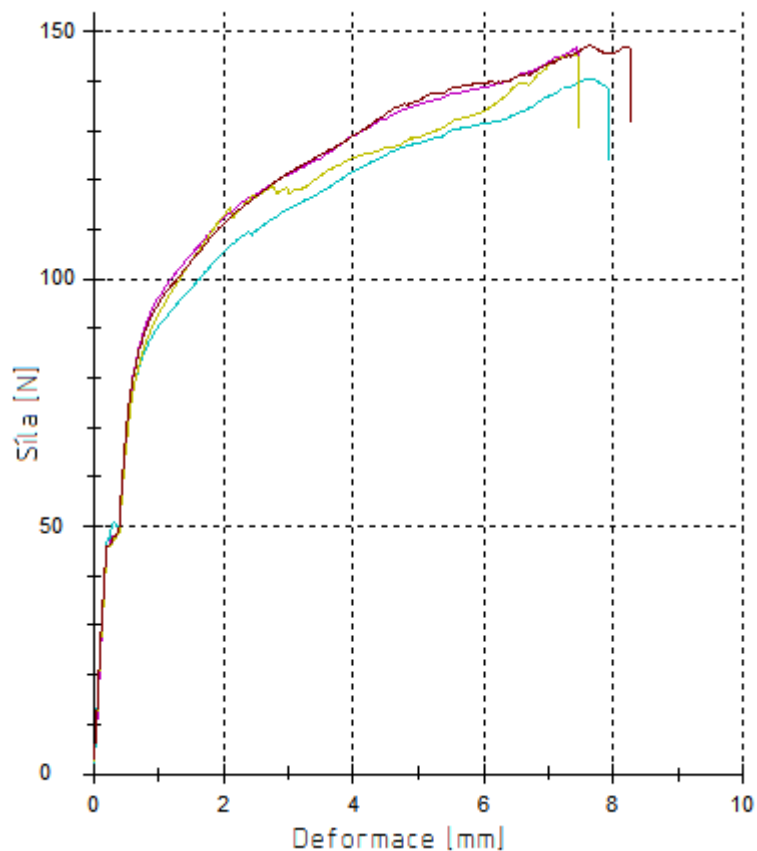
Obr. 37. Graf porovnání hodnot pro 2. typ vzorků

9.3 Zhodnocení vzorků 3. typu

U těchto typů vzorků bylo pomocí zkoušky zjištěno, že adheze hliníkového plechu a uhlíkového prepregu byla dobrá, a tím nedocházelo k delaminaci jednotlivých vrstev. Tento typ vzorků bylo možné z hlediska tvárnosti označit za vyhovující.



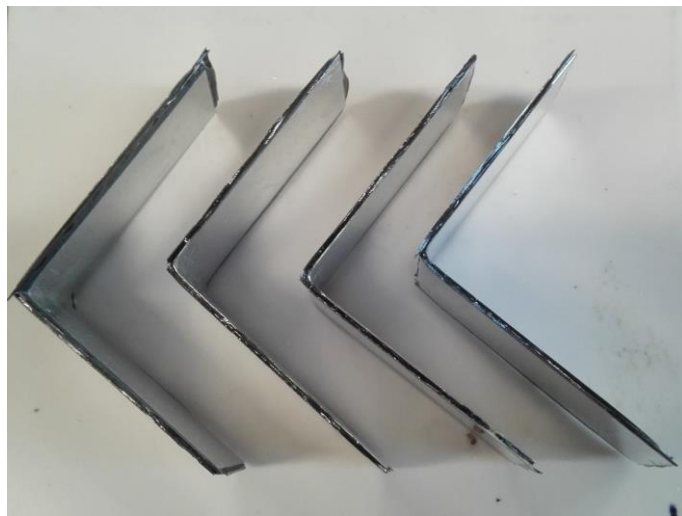
Obr. 38. Vzorky typ 3. po zkoušce



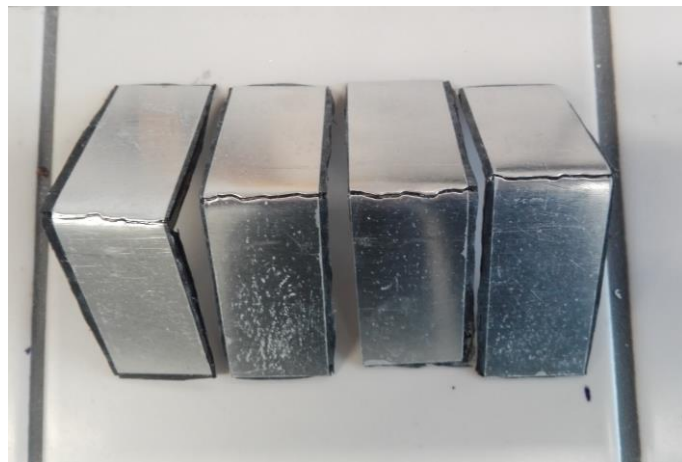
Obr. 39. Graf porovnání hodnot pro 3. typ vzorků

9.4 Zhodnocení vzorků 4. typu

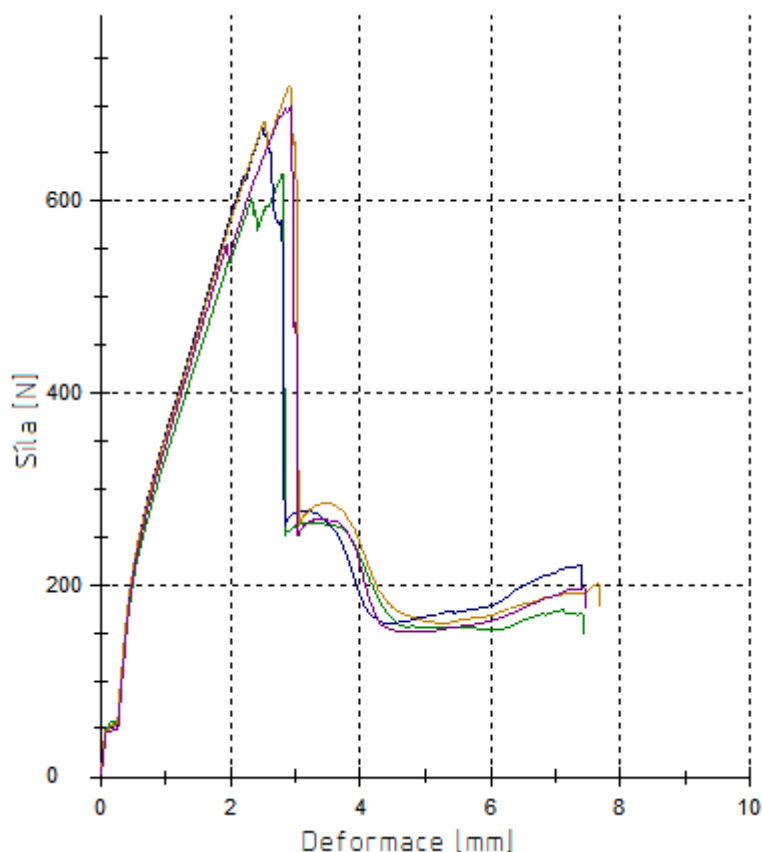
U těchto typů vzorků bylo pomocí zkoušky zjištěno, že adheze hliníkového plechu a uhlíkového prepregu byla stejně jako v případě 3. typu vzorků dobrá a nedocházelo k delaminaci jednotlivých vrstev. Dále bylo zjištěno, že pro tento typ vzorků by bylo vhodnější použít větší průměry podpěr a ohýbacího trnu, tak aby nedošlo ke zlomení spodní vrstvy hliníkového plechu, proto i tento typ vzorků byl označen jako nevyhovující. Vhodnost těchto vzorků by bylo možné lépe posoudit až po dalších zkouškách za provedení úpravy zkušebního postupu.



Obr. 40. Vzorky typ 4. po zkoušce



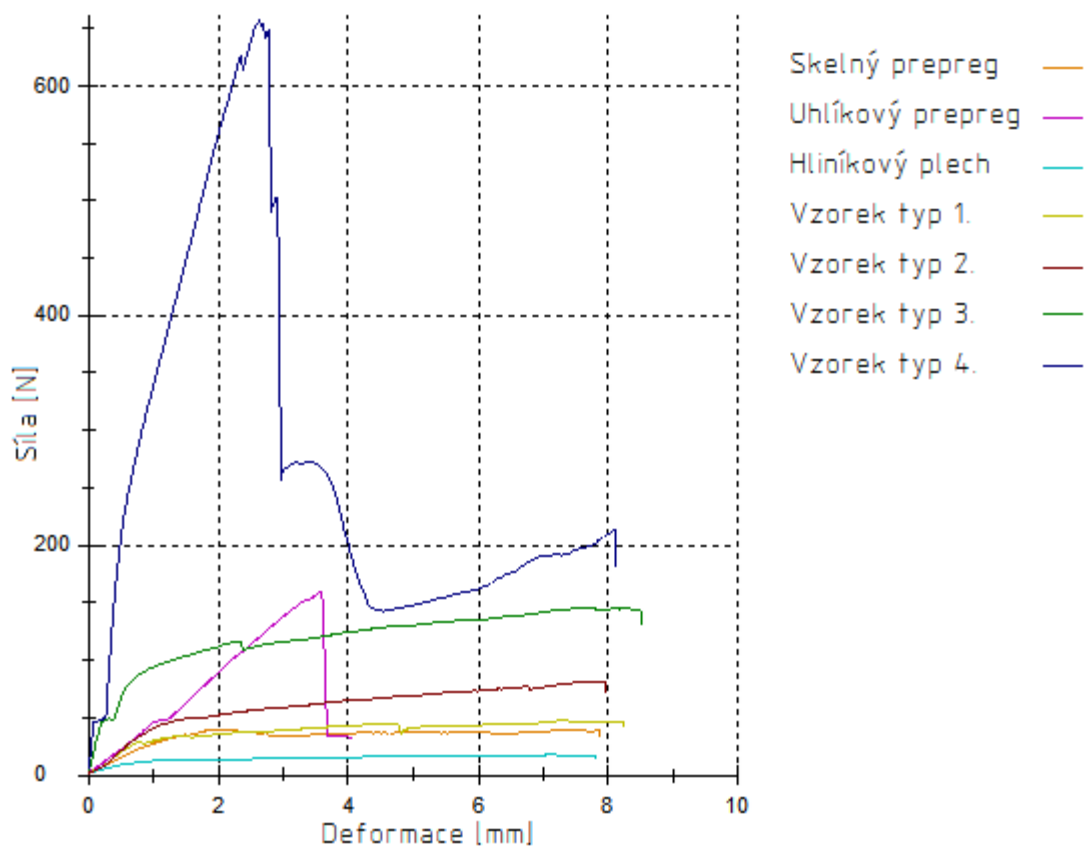
Obr. 41. Vzorky typ 4. po zkoušce pohled ze shora



Obr. 42. Graf porovnání hodnot pro 4. typ vzorků

9.5 Celkové zhodnocení zkoušky

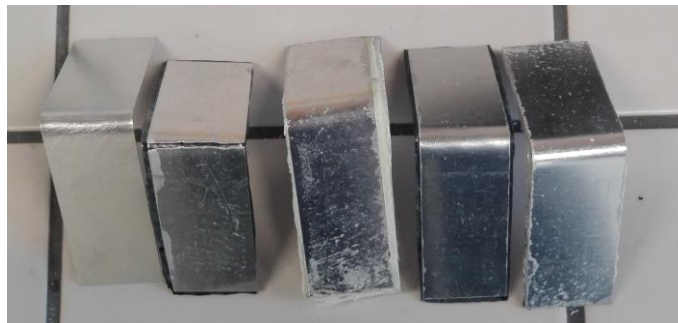
Zkouška byla navrhována podle normy ČSN EN ISO 7438, nicméně její přesné znění nebylo dodrženo a zkouška byla upravena, tak aby bylo možné její provedení v univerzitních laboratořích bez dalších investic a časového prodloužení. Celkem byly zkoušeny čtyři typy vzorků, přičemž s jistotou bylo možné prohlásit za vyhovující pouze jeden typ. Typ 1. a 2. bylo nutné prohlásit za nevyhovující, jelikož docházelo k delaminaci jednotlivých vrstev. Tohoto problému by mohlo být zabráněno provedením odlupovacího testu, kde by bylo jasné patrné, že je nutno změnit typ skelného prepregu, nebo použít jinou, vhodnější technologii výroby. Typ 3. byl hodnocen jako nejoptimálnější řešení, jelikož nedocházelo k delaminaci vrstev, ani žádnému jinému okem viditelnému narušení a tvárnost tohoto materiálu byla mnohem lepší než tvárnost samotného uhlíkového kompozitu. Typ 4. byl zhodnocen jako nevhodný, z důvodu, že docházelo k prasknutí spodní vrstvy hliníkového plechu. Aby bylo možné tento typ lépe zhodnotit, byla by potřeba upravit podmínky zkoušky a zhotovit více vzorků pro další podrobnější zkoumání.



Obr. 43. Graf porovnání zkoušených vzorků



Obr. 44. Porovnání vzorků



Obr. 45. Porovnání vzorků pohled se shora

Tab. 5. Porovnání výsledků jednotlivých vzorků

Vzorek	F_{\max} [N]	Vyhovuje/Nevyhovuje
Typ 1.	(46,4±1,5)	NEVYHOVUJE
Typ 2.	(85,7±8,5)	NEVYHOVUJE
Typ 3.	(145,0±3,0)	VYHOVUJE
Typ 4.	(674,0±36,0)	NEVYHOVUJE

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zjistit, zda dokáže hliníkový plech vylepšit tvárnost kompozitních materiálů. Proto bylo nutné navrhnout a vyrobit vzorky takzvaného vlákno-kovového laminátu. Zkoumané vzorky byly vyrobeny jako kombinace vrstev hliníkového plechu a skelného nebo uhlíkového prepregu. Pro výrobu těchto vzorků bylo využito univerzitní laboratoře, kde byly vzorky za při 130°C lisovány po dobu 15 minut. Když byly vzorky vyrobeny, bylo nutné otestovat tvárnost vzniklého materiálu. Pro provedení tohoto testu byla navržena vlastní podoba technologické zkoušky, která vycházela ze zkoušky lámavosti dle ČSN EN ISO 7438. Snahou bylo zjistit, jak se budou vzorky materiálu chovat, pokud se je budeme snažit ohnout do úhlu 90°. K provedení zkoušky byl použit univerzální zkušební stroj Zwick 1456. Při samotném testování bylo zjištěno, že u vzorků se skleněným prepregem nebyla zaručena dobrá adheze jednotlivých vrstev a tím pádem docházelo k delaminaci vrstev. U vzorků v kombinaci hliník – uhlíkový prepreg – hliník bylo dosaženo nejlepších výsledků a tvárnost byla vylepšena. U vzorků typu hliník – uhlíkový prepreg – hliník – uhlíkový prepreg – hliník docházelo k praskání spodní vrstvy hliníkového plechu, což bylo nejspíše způsobeno nevhodným navržením zkoušky. Aby bylo dosaženo vypovídajících výsledků, byla by potřeba změnit výrobní technologii vzorků a použít technologii vakuového lisování prepregů, poté ověřit adhezi mezi vrstvami pomocí odlupovacího testu a upravit technologický postup zkoušky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-X.
- [3] D. AGARWAL, Bhagwan, Lawrence J. BROUTMAN, Lubomír SODOMKA, Richard BAREŠ, Jan JAVORNICKÝ a Jaroslava ZEMÁNKOVÁ. Vláknové kompozity. 1. vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [4] SKÁLOVÁ, Jana, Vladislav MOTYČKA a Jaroslav KOUTSKÝ. Nauka o materiálech. 3. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7043-244-6.
- [5] B. MIRACLE, Daniel, L. DONALDSON Steven. ASM Handbook Volume 21: Composites. 1. vyd. ASM International, 2001. ISBN 978-0-087170-703-1
- [6] LEE, Dai Gil. Composite Structure 63. Department of Mechanical Engineering, ME3261, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon-shi 305-701, Jižní Korea. Vydáno Elsevier Ltd. 2004.
- [7] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [8] RUSNÁKOVÁ, Soňa. Kompozity_FORM - technology. Zlín, 2011.
- [9] MÍŠEK, Bohumil. Polymery, keramika, kompozity. Brno: Vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-214-0521-X.
- [10] PLUHAŘ, Jaroslav. Strojírenské materiály. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 568s.
- [11] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [12] Fokker aerostructures. www.fokker.com [Online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.fokker.com/innovations>
- [13] HARPER, Charles A. Handbook of plastics, elastomers, and composites. 4. vyd. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 0071384766.

- [14] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity [Online]. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z:
<http://www.muweb.cz/zkorinek/>
- [15] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů [Online]. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [16] MACHEK, Václav, SODOMKA Jaromír. Polymery a kompozity s polymerní maticí: Nauka o materiálu. 4. část. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03297-4.
- [17] ČSN EN ISO. Kovové materiály – zkouška ohybem. CEN 2005-06-13

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ARALL Aramid Reinforced Aluminium Laminates

CARE Carbon Reinforced

E Modul pružnosti [GPa]

F_{\max} Maximální dosažená síla [N]

FML Fiber Metal Laminate

GLARE Glass Reinforced

RTM Resin Transfer Moulding

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení kompozitních materiálů</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2. Skelná tkanina</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3. Uhlíková tkanina</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4. Aramidové vlákno.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5. Uhlíko-aramidová hybridní tkanina.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 6. Skladba vlákno-kovových laminátů [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 7. Šíření trhliny ve vlákno-kovovém laminátu v porovnání se slitinou hliníku [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 8. Použití GLARE a ARALL kompozitů v konstrukci letadel [5]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 9. GLARE panel trupu s žebry pro Airbus A380 [12]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 10. Jednotlivé vrstvy materiálů na hybridním hnacím hřídeli [6]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 11. Ruční laminování [1]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 12. Metoda lisování se vstřikem matrice RTM [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 13. Vakuové lisování prepregů [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 14. Lis pro lisování prepregů za tepla [1]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 15. Zkouška lámavosti [10].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 16. Schéma zkoušky zahlobení podle Erichsena [10]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 17. Zkouška střídavým ohybem [10]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 18. Princip odlupovací zkoušky.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 19. Porovnání tvárnosti skelných a uhlíkových vláken s hliníkovým plechem</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 20. Rozměry zkušebních vzorků.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 21. Struktura vzorku typ 1.</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 22. Struktura vzorku typ 2.</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 23. Struktura vzorku typ 3.</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 24. Struktura vzorku typ 4.</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 25. Laboratorní vulkanizační lis</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 26. Naseparované kovové desky.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 27. Rozložení vzorků v lisu</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 28. Hotový vzorek typ 1.</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 29. Hotový vzorek typ 2.</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 30. Hotový vzorek typ 3.</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 31. Hotový vzorek typ 4.</i>	<i>35</i>

<i>Obr. 32. Detail podpěr a trnu</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 33. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 34. Vzorky typ 1. po zkoušce.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 35. Graf porovnání hodnot pro 1. typ vzorků.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 36. Vzorky typ 2. po zkoušce.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 37. Graf porovnání hodnot pro 2. typ vzorků.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 38. Vzorky typ 3. po zkoušce.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 39. Graf porovnání hodnot pro 3. typ vzorků.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 40. Vzorky typ 4. po zkoušce.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 41. Vzorky typ 4. po zkoušce pohled ze shora</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 42. Graf porovnání hodnot pro 4. typ vzorků.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 43. Graf porovnání zkoušených vzorků</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 44. Porovnání vzorků</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 45. Porovnání vzorků pohled se shora</i>	<i>45</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Standardní složení vlákno-kovových laminátů [5].....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2. Mechanické vlastnosti vlákno-kovových materiálů [5].....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3. Technické údaje laboratorního lisu.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 4. Technické údaje zkušebního stroje Zwick 1456</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5. Porovnání výsledků jednotlivých vzorků</i>	<i>45</i>

SEZNAM PŘÍLOH

- PI Technický list hliníkového plechu
- PII Technický list skelného prepregu
- PIII Technický list uhlíkového prepregu
- PIV Technický list separačního vosku

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST HLINÍKOVÉHO PLECHU

ALCOA MILL PRODUCTS



ALLOY 2024 SHEET AND PLATE

EXCELLENT FATIGUE PROPERTIES—CONSISTENT PERFORMANCE

SUPPLYING THE WORLD'S BEST



ALLOY 2024

DESCRIPTION

Alloy 2024 was introduced by Alcoa in 1931 as an alclad sheet in the T3 temper. It was the first Al-Cu-Mg alloy to have a yield strength approaching 50,000-psi and generally replaced 2017-T4 (Duralumin) as the predominant 2XXX series aircraft alloy. With its relatively good fatigue resistance, especially in thick plate forms, alloy 2024 continues to be specified for many aerospace structural applications. 2024 variant alloys, such as higher purity 2124 and 2324, with improvements in strength and other specific characteristics, have also found application in critical aircraft structures. An improved sheet alloy for fuselage applications was introduced in 1991. Alclad C188 offers improved fracture toughness and fatigue crack growth while maintaining the strength characteristics of 2024.

Alloy 2024 is available in bare and alclad sheet and plate product forms in the annealed state and several tempers of T3, T4, and T8 types.

APPLICATIONS

Alloy 2024 plate products are used in fuselage structurals, wing tension members, shear webs and ribs and structural areas where stiffness, fatigue performance and good strength are required. Sheet products, usually alclad, are used extensively in commercial and military aircraft for fuselage skins, wing skins and engine areas where elevated temperatures to 250°F (121°C) are often encountered.

CHEMICAL COMPOSITION LIMITS (WT.%)

Si . . . 0.50	Zn 0.25
Fe . . . 0.50	Ti 0.15
Cu . . . 3.8-4.9	Others, each . . 0.05
Mn . . . 0.30-0.9	Others, total . . 0.15
Mg . . . 1.2-1.8	Balance, Aluminum
Cr . . . 0.10	

Note: Value maximum if range not shown.

MECHANICAL PROPERTIES

ALLOY 2024

All values are minimum long transverse mechanical properties except where noted.

Temper	Thickness in. (mm)	Tensile Strength ksi (MPa)	Yield Strength ksi (MPa)	Elongation %
0-Sheet & plate	0.010-0.499 (0.25-12.44)	32.0 (max) (220)	14.0 (max) (96)	12
T3-Flat Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	63-64 (434-441)	42 (289)	10-15
T351-Plate*	0.250-4.000 (6.35-101.60)	64-57 (441-393)	42-41 (289-282)	12-4
T4-Coiled Sheet	0.010-0.125 (0.254-3.16)	62 (427)	40 (276)	12-15
T81-Flat Sheet	0.010-0.249 (0.254-6.32)	67 (462)	58 (400)	5
T851-Plate	0.250-1.499 (6.35-38.07)	67-66 (462-455)	58-57 (400-393)	5

*Strength Decreases as thickness increases

ALCLAD 2024

Two side cladding. Nominal cladding thickness is 5% on gauges under 0.062 in. (1.57mm) or less; 2.5% on gauges over 0.062 in. (1.57mm). Property values for one side cladding are slightly higher (not shown). All values are minimum long transverse mechanical properties except where noted.

Temper	Thickness in. (mm)	Tensile Strength ksi (MPa)	Yield Strength ksi (MPa)	Elongation %
0-Sheet & plate	0.008-1.75 (0.20-44.45)	30-32 (max) (207-220)	14 (max) (96)	10-12
T3-Flat Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	58-62 (400-427)	39-40 (269-276)	10-15
T351-Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	62-57 (427-393)	40-41 (276-282)	12-4
T4-Coiled Sheet	0.010-0.128 (0.254-3.25)	58-61 (400-420)	36-38 (248-262)	12-15
T81-Flat Sheet	0.010-0.249 (0.254-6.32)	62-65 (427-448)	54-56 (372-386)	5
T851-Plate	0.250-1.000 (6.35-25.40)	65-66 (448-455)	56-58 (386-400)	5

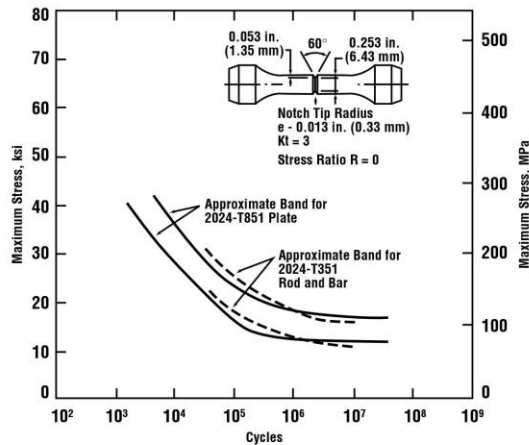
FRACTURE TOUGHNESS

Alloy 2024 sheet and plate products in the T3 and T4 type tempers are noted for their excellent toughness at moderately high strength levels.

FATIGUE PROPERTIES

Approximate bands for axial-stress notch fatigue data are shown for 2024-T351 and T851 products.

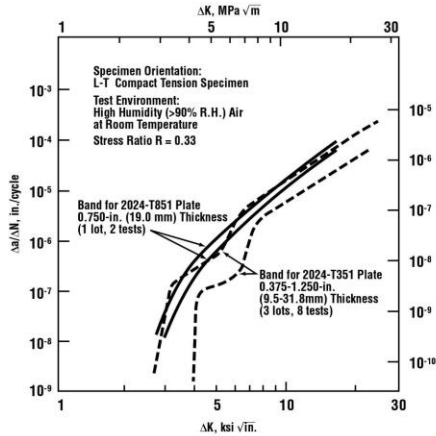
AXIAL-STRESS NOTCH FATIGUE DATA FOR 4.00-6.00 IN. (101.6-152.4 MM) THICK 2024-T851 PLATE AND 2024-T351 ROD AND BAR



ALLOY 2024

FATIGUE CRACK PROPAGATION

CONSTANT-AMPLITUDE FATIGUE CRACK PROPAGATION DATA FOR ALLOY 2024-T351 AND 2024-T851 PLATE



Approximate bands of fatigue crack propagation data for alloys 2024-T851 and T351 plate are shown in the accompanying graph.

CORROSION RESISTANCE

General Corrosion

All alloys of the 2XXX series are susceptible to atmospheric corrosion, especially in industrial or seacoast atmospheres. These alloys should be protected, at least on faying surfaces, when exposed to these conditions. Alcladding these alloys provides high resistance to atmospheric corrosion. The clad surface is resistant to corrosive attack and also provides additional cathodic protection to the core alloy.

Exfoliation

Alloy 2024 in the T351 and T851 tempers has not experienced any in-service problems with exfoliation. In laboratory tests for exfoliation, alloy 2024-T851 material was essentially immune in any test plane.

Stress Corrosion Cracking Resistance

In the T851 temper, alloy 2024 has very good resistance to SCC. Control of quenching and artificial aging of 2XXX high strength alloys that have been heat treated has been effective in developing a high resistance to stress-corrosion cracking. In over 20 years of service experience there have been no reported incidents of SCC failures in 2024-T351 or 2024-T851 materials.

THERMAL TREATMENTS

The recommended practices for heat-treating and aging alloy 2024 sheet and plate are described in MIL-H-6088, *Heat Treatment of Aluminum Alloys*.

PROCUREMENT SPECIFICATIONS

	Plate	Sheet
Temper	2024-T351	2024-T3
Specification	QQ-A-250/5	QQ-A250/5
MIL-HDBK-5 Coverage	Approved	Approved
Temper	2024-T851	2024-T81
Specification	QQ-A-250/4	QQ-A-250/4
MIL-HDBK-5 Coverage	Approved	Approved

REFERENCES

- Alcoa Green Letter No. 188, *Avoiding Stress-Corrosion Cracking in high-Strength Aluminum Alloys*.
- MIL-H-6088, *Heat Treatment of Aluminum Alloys*.
- MIL-HDBK-5D, May 1985

OTHER PRODUCT FORMS

Extruded, wire/rod/bar, and forged products in alloy 2024 are also available.



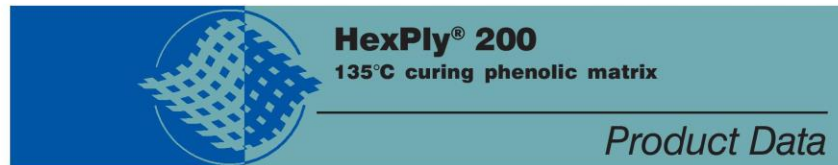
PRODUCT SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE

ALCOA MILL PRODUCTS, INC.

P.O. BOX 8025 • BETTENDORF, IOWA 52722 • (800) 523-9596 • www.millproducts-alcoa.com

SPD-10-036

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST SKELNÉHO PREPREGU



Description

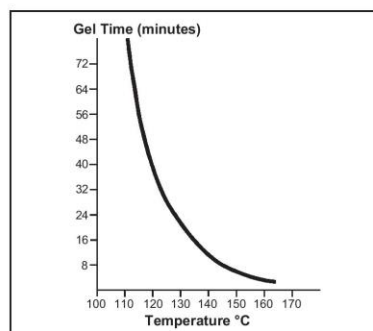
HexPly 200 is a phenolic resin used extensively in fire proof components such as engine cowlings, fire walls, rocket nozzles and exit gas cones. The low smoke density and very low toxicity during ignition meet the requirements of FAR 25 and ATS 1000-001 specifications. The HexPly 200 system has excellent ablative resistance and is available in fabric reinforcements and single tows.

Benefits and Features

- High flow matrix.
- Excellent tack life, 60 days at 23°C.
- Versatile cure cycle 120 - 160°C.
- Self extinguishing.
- Excellent service temperature to 200°C.
- Good ablative properties.

Resin Matrix Properties

Gel Time





HexPly® 200

Fire Properties

		Method
Fire behaviour	Pass	FAR 25.853 apd F part
(on typical E glass 300 g/m ²)	Pass	I+III+IV+V
		ATS 1000.001 Issue V
Cured resin density	1.45	

Cured Prepreg Properties (cured at 150°C)

	Method		200/40%/G1051	200/38%/644	200/40%/G803
Reinforcement			High Strength 3K carbon, plain weave, 193 g/m ²	E glass, 8H satin, 305 g/m ²	High Strength 3K carbon, 5H satin, 285 g/m ²
Tensile Strength, MPa	pr EN2561	Warp Weft	750 -	520 380	550 -
Tensile Modulus, GPa	pr EN2561	Warp Weft	70 -	- -	58 -
Flexural Strength, MPa	pr EN2562	Warp Weft	950 -	490 340	650 -
Flexural Modulus, GPa	pr EN2562	Warp Weft	65 -	29 23	60 -
Inter Laminar Strength, MPa	pr EN2563	Warp Warp 80°C Warp 100°C	40 -	40 21	35 - 28
Compression Strength, MPa	DIN 65380	Warp	-	365	-

200/40%/G1051 results obtained with 60% fibre volume laminate

200/38%/644 results obtained with 50% fibre volume laminate

200/40%/G803 results obtained with 57% fibre volume laminate

135 °C curing phenolic matrix

Prepreg Curing Conditions

HexPly 200 system can be processed using various cycles, at a pressure between 3 and 7 bar, with a post cure at 160°C for 4 hours.

Temperature (°C)	Time
135	90 min
150	30 min

Heat up rate 1-3°C/min

Prepreg Storage Life

■ Tack life	@ 23°C	30 days
■ Guaranteed shelf life	@ -18°C	12 months

Precautions for Use

The usual precautions when handling uncured synthetic resins and fine fibrous materials should be observed, and a Safety Data Sheet is available for this product. The use of clean disposable inert gloves provides protection for the operator and avoids contamination of material and components.



HexPly® 200 Product Data

Important

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required. All sales are made subject to our standard terms of sale which include limitations on liability and other important terms.

©Copyright Hexcel Corporation
Publication FTA055c (March 2007)

For More Information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fibre
- RTM Materials
- Honeycomb Cores
- Continuous Fibre Reinforced Thermoplastics
- Carbon, glass, aramid and hybrid prepregs
- Reinforcement Fabrics
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Sandwich Panels
- Special Process Honeycombs

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734

For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list please go to:

<http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST UHLÍKOVÉHO PREPREGU



Description

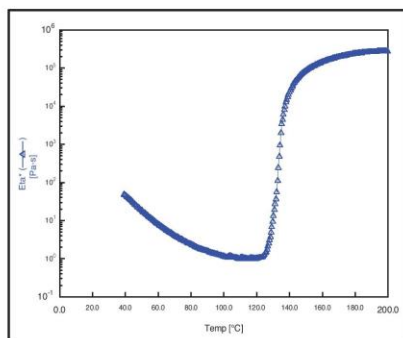
HexPly® M49 is a 120°C curing toughened epoxy matrix with good impact resistance suitable for use in performance cars. The matrix is highly tolerant to a wide variety of production techniques and equipment making it easy to process. HexPly® M49 is especially suitable for carbon look applications (eg car interiors).

Benefits and Features

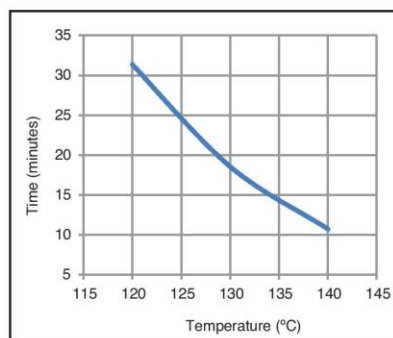
- High Toughened epoxy
- Good impact resistance
- Autoclave process for cosmetic application
- Self-adhesive on honeycomb
- Vacuum bag process with low porosity level achieved
- Good stability under UV
- Long shelf life and out life at room temperature
- Excellent tack and drape

Resin Matrix Properties

Rheology (EN 6043-A, 2°C/min)



Gel time (hot plate)



- | | |
|--|--|
| ■ Colour | Transparent |
| ■ Density | 1,18 g/cm ³ |
| ■ Maximum Glass Transition Temperature, (TG onset dry) | 105°C (depending of the reinforcement) |
| ■ TG onset wet | 80 °C |



HexPly® M49

Alternative Cure Cycles

HexPly® M49 is a versatile curing system which can be cured from 85°C to 140°C.

The nominal cure cycle is 1 hour at 120°C but alternative cure cycles can be used:

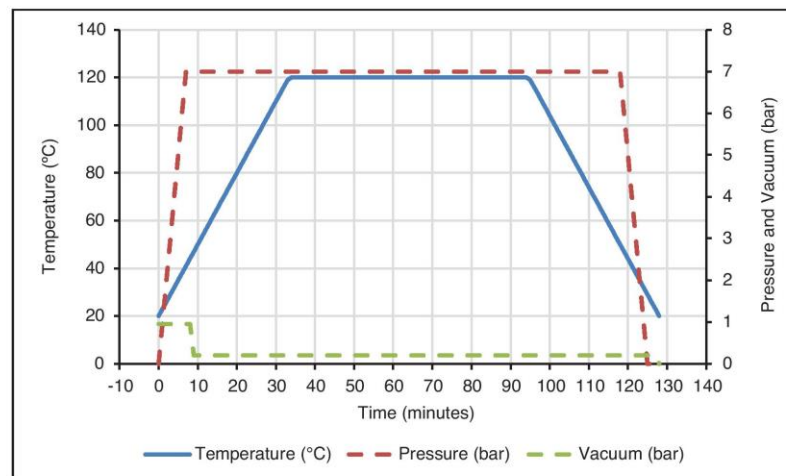
Cure Temperature	85°C	90°C	100°C	120°C	140°C
Time	720 min	360 min	120 min	60 min	30 min
T _g	Up to 105°C*				

*Depending of the reinforcement

Recommended Cure Cycle for thin parts

NB : For carbon look parts, autoclave process is recommended (contact Hexcel for optimal cure cycle).

1. Apply the full vacuum (0.9 bar)
2. Apply 7 bar gauge autoclave pressure
3. Reduce vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches around 1 bar gauge
4. Heat at 1 to 3 ° C/min to 120° C
5. Hold at 120° C for 60 minutes
6. Cool at 2 to 5° C/minute
7. Vent autoclave pressure when the part reaches 60° C or below



Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slow heat-up rates should be used for thicker components and large tools. Accurate temperature measurements of the component should be made during the cure cycles by using thermocouples. For a honeycomb sandwich panel, a cure cycle of 1 to 3 bar should be used, dependent on honeycomb density.

Performance testing should accompany alternative cure cycles to ensure suitability for the particular application.



120°C curing epoxy matrix

Prepreg Physical Properties (Examples only. For the wider prepreg range contact Hexcel®)

Product Designation		M49/42%/ 200T2X2/ CHS-3K	M49/42%/ 245T2/ AS4-3K	M49/42%/ 370T2/ CHS-12K	M49/39%/ 600T2X2/ CHS-12K	M49/32%/ 600S8/ GE-300
Fibre	-	HS Carbon 3K	HS Carbon 3K	HS Carbon 12K	HS Carbon 12K	E Glass -
Tow	-					
Weave	-	Twill 2x2	Twill 2x2	Twill 2x2	Twill 2x2	Satin 8
Mass	g/m ²	200	245	370	600	600
Nominal Cured Ply Thickness	mm	0.235	0.286	0.433	0.659	0.473
Nominal Fibre Volume	%	47.8	47.6	47.5	50.6	49.5
Nominal Laminate Density	g/cm ³	1.47	1.47	1.47	1.47	1.20

Cured Prepreg Mechanical Properties (Examples only. For the wider prepreg range contact Hexcel®)

Mechanical Properties are based on 120°C cure for 60 minutes, at 7 bar pressure and -0.9 bar vacuum.

Data is the result from several tests on autoclave cured laminates. Some of the values achieved will have been higher, and some lower than the figure quoted. These are nominal values.

Test	Methods	Units	M49/42%/ 200T2X2/ CHS-3K	M49/42%/ 245T2/ AS4-3K	M49/42%/ 370T2/ CHS-12K	M49/39%/ 600T2/ CHS-12K	M49/32%/ 600S8/ GE-300
Tensile Strength	Carbon EN2561	MPa	1050	980	1000	840	550
Tensile Modulus	Glass EN 2747	GPa	68	66	66	63	20
Flexural Strength	Carbon EN 2562	MPa	1000	960	800	780	660
Flexural Modulus	Glass EN 2746	GPa	60	60	55	55	21
ILSS	Carbon EN 2563 Glass EN 2377	MPa	60	57	60	62	56
Comp. Strength	EN 2850 B	MPa	730	760	650	500	460

NB : Data normalised to Fibre Volume Content (55% for fabrics; 60% for UD) except for ILSS and Flexural.



HexPly® M49

Prepreg Storage Life

Shelf Life¹: 12 months at -18°C/0°F (from date of manufacture).

¹ Shelf Life: The maximum storage life for HexPly® prepreg, when stored continuously, in a sealed moisture-proof bag, at -18°C/0°F or 5°C/41°F. To accurately establish the exact expiry date, consult the box label.

Out Life²: 30 days at room temperature (25°C max).

² The maximum accumulated time allowed at room temperature between removal from the freezer and cure.

Tack Life³: Up to 30 days (depending of the reinforcements and the resin content) at room temperature (25°C max).

³ Tack Life: The time, at room temperature, during which prepreg retains enough tack for easy component lay-up.

Storage Conditions

HexPly® M49 prepregs should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag, thus preventing condensation (a full reel in it's packaging can take up to 48 hours).

Precautions for Use

The usual precautions when handling uncured synthetic resins and fibrous materials should be observed. A Safety Data Sheet is available for this product. The use of clean, disposable, inert gloves provides protection for the operator and avoids contamination of material and components.

Important

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required. All sales are made subject to our standard terms of sale which include limitations on liability and other important terms.

©Copyright Hexcel Corporation
Publication FTM175d (June 2015)

For More Information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fibre
- Reinforcement Fabrics
- Carbon, glass, aramid and hybrid prepregs
- RTM Materials
- HexTOOL® composite tooling material
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Cores
- Engineered Core

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734

For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list please go to:

<http://www.hexcel.com/OurCompany/sales-offices>

PŘÍLOHA P IV: TECHNICKÝ LIST SEPARAČNÍHO VOSKU

1

Separátory

Separátory jsou produkty v tekuté nebo pastovité podobě, které zabraňují přilnutí dvou materiálů k sobě. Vosk a fólie (PVA) se používají zejména pro odstraňování dílů z plastových a kovových forem. Tyto produkty jsou často kombinovány, např. separační vosk je použit jako první vrstva a potom jako druhá vrstva je aplikován separátor PVA.

Leštění na boty, podlahu a nábytek, auto, atd. nejsou vhodnými separátory, často obsahují silikonový olej jako lesk, který může být přenesen na výrobek. Později musí tato vrstva být odstraněna pečlivým vyčištěním (odstraňovač silikonu) a pískováním.

Efekt separace může být velmi špatný.

Který separátor je nejlepší?

Názory na použití separátorů se různí. Přesto je zde pouze jeden reálný požadavek:

Forma a výrobek se musí spolehlivě oddělit!

Žádný problém, můžete si myslet.

V praxi, nicméně, jeden separátor funguje dobře pro jednoho uživatele a pro druhého vůbec. Proč tomu tak je?

Předně byste měli používat pouze separátory, které byly doporučeny pro určitý materiál (epoxidovou/polyesterovou pryskyřici). Aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího okopírování, separační film má obvykle tloušťku pouze několika setin milimetru a je tudíž citlivý na mechanické zatížení. Nejjistější metodou prevence separace je vyleštit vosk papírovými ubrousky nebo tkaninami, tvrdé komponenty poškrábou separační film. Je proto velmi důležité použít pro leštění pouze čistý, měkký (bavlněný) hadřík!

Aplikace

Forma a vosk by měly být nahřáty na pokojovou teplotu (20 °C). Před aplikací řádně protřepte nádobkou, protože materiál se mohl usadit.

Nové formy se voskují 5 - 10 x. Tímto se více měně forma "zavede" a mikropóry všech povrchů se zalepí.

V závislosti na separačním vosku by se měla nová vrstva aplikována pokaždé, když se výrobek z formy vyloupne. V případě velmi dobře "zaběhlých" forem (20 použití), lze z formy odstranit několik výrobků při použití jedné vrstvy separátoru. Nicméně, toto vždy znamená určité riziko, proto tuto techniku nedoporučujeme.

Základna

Separátory mohou být použity pouze na čisté povrchy, tzn. bez oleje a mastnoty. Pokud není toto pravidlo dodrženo, bude to vést k téměř kompletnímu odstranění vosku při leštění, protože ten plave na filmu mastnoty. Efekt separace je tudíž špatný.

Stejně nevhodné jsou absorpční povrchy, jako je pěna, dřevo, omítka a další. Tyto materiály musí být nejdříve nalakovány a zavoskovány.

Vrstva ze skelné tkaniny 80 - 160 g/m² a epoxidové pryskyřice nebo polyesterového gelu jsou obzvláště vhodné. Polyesterový gel R&G se snadno pískuje a leští a měla by se mu dávat přednost před epoxidovou pryskyřicí.

Smrštitivost polyesteru je zanedbatelná, protože vrstva má tloušťku pouze přibližně 0,3 mm. Výplň formy by neměla být z polystyrenové pěny (Styropur®, Styrodur®), protože tyto materiály se rozpouštějí v polyesterových pryskyřicích. Polyuretanová pěna, například, je odolná.

Lakované povrchy, např. makety (díly pro automobily apod.) mohou být odstraněny z formy pomocí separátorů R&G. Předpokladem pro toto, je nicméně adekvátní odolnost tohoto laku vůči rozpouštědům obsaženým v separátoru. Pokud je chemická odolnost nízká, rozpouštědla mohou proniknout do laku a zabránit čisté separaci. Lak posléze přilne k formě a poškodí maketu. Formy nemohou být před vypiskováním znovu použity.

Dvosložkové laky (polyuretanové, epoxidové či na bázi akrylátu) se všeobecně prokázaly jako nejlepší.

Doporučuje se však nejdříve je vyzkoušet (zkouškové výrobky).

2

Leštění

Při tření plastových povrchů se tyto elektrostaticky nabíjejí. Přitahují se tak částičky prachu ze vzduchu, které znečišťují povrch. Doslova všechno, co padá ze stropu se akumuluje ve filmu separátoru, zvláště během schnutí v čase 15 minut. Proto se ujistěte, že vzduch je bez prachu.

Toxikologie

Separáčnı vosky obsahují parafın, který je rozpustný pouze v organických rozpouštědlech (hydrocarbony). R&G separáčnı vosky obvykle obsahují lıh, který, ne jako benzın z čerpacı stanice, neobsahuje toxický benzen. Lıh velmi rychle vyprchá, takže vrstva vosku schne v několika minutách.

Vytvrzování při zvýšených teplotách

Separátory jsou vhodné rovněž pro vytvrzování komponentů při zvýšených teplotách. Teploty pro použití jsou max. 120 °C. Nové formy je nejlepší vytvrzovat při zvýšených teplotách s první vrstvou vosku. Zvýšená teplota rovněž způsobuje, že vosk pronikne do povrchu formy.

Kombinace

Nejspolehlivějšího odstranění výrobku z formy je dosaženo kombinací vosku a separátoru.

R&G primární vosk byl zvláště vyvinut pro hůře navlhčitelné povrchy a aplikuje se jako první vrstva.

Separátor - film lze aplikovat bez vad (očkování, stopách po štětci) na voskový povrch.

Film separátoru schne během 20 minut a vytváří vysoce lesklý povrch. Zbytky na formě a výrobku lze odstranit vodou.

Čištění formy

Separátor se může po několika aplikacích vosku navrstvit na formě. I když se tomuto obvykle předejde tak, že se předchozí nános rozpustí do nově aplikované vrstvy, celkové vyčištění se doporučuje nejméně po několika stovkách aplikacích. Ztvrdlé vrstvy se nejjednodušeji odstraní jemnou ocelovou vlnou a teplou vodou.

Matný vzhled povrchu formy se následně může vyleštit do vysokého lesku pomocí R&G lešticího vosku a kotoučků.

Shrnutí

- Nepoužívejte studené (méně než 15 °C) separáčnı vosky.

- Před použitím nádobku důkladně protřepejte.

- Odstraňte olej a mastnotu (zapříčiněnou leštěnkou na auta, pastou na podlahy, krémem na boty apod.) rozpouštědlem/ocelovou vlnou před aplikací separátoru.

- Pro aplikaci a leštění použijte pouze čisté bavlněné hadříky. Papírové ubrusky a plastická vlákna poškrábou separáčnı film.

- Nové formy voskujte tence R & G primárním voskem asi 5 - 10 x.

	Separáčnı sprej	Primární vosk	Separáčnı fólie
Forma dodání	Tekutina	Řıdká pasta	Tekutina
Vzhled	Bílá - šedivá	Bílá - žlutá, šedivá	Bezbarvá
Zápach	Slabý	Slabý	Slabý
Rozpouštědlo	Lıh	Lıh	Izopropanol
Tlak par mbar/20 °C	---	Méně než 1150	Méně než 1150
Bod vznětu	Vynechán	Větší než 24 °C	Vynechán
Zpracování	Nastříkejte, potom po 10 min leštěte	Aplikujte hadříkem, po 10 minutách přetřete (neleštěte)	Aplikujte štětcem nebo houbou, nechte uschnout
Rozpustný/ředitelný v	Lıh/petrolej, éterické aromatické a chlorinované hydrocarbony	Lıh/petrolej, éterické aromatické a chlorinované hydrocarbony	Voda Izopropanol Ethylalkohol
Pracovní teplota	Od 15 °C	Od 15 °C	Od 15 °C
Použitelná teplota	Do přibl. 120 °C	Do přibl. 100 °C	Do přibl. 100 °C

Bezpečnostní pravidla	Odsávejte výpary a aerosoly spreje.
Maska, rukavice, ochranné brýle	Nepředepsány

R & G separátor PVA

PVA (polyvinylalkohol) je velmi oblíbený díky snadnému použití a spolehlivému odstranění výrobku z formy. Po uschnutí se vytvoří lesklý, tuhý, fólii podobný lakový film.

PVA je vhodný pro epoxidové, polyesterové, vinylesterové a polyamidové pryskyřice při teplotě vytvrzení do max. 100 °C.

Aplikuje se znovu po každém vytáhnutí výrobku z formy.

Zpracování

PVA je nejlepší v kombinaci s primárním voskem. Tento systém se prokázal být extrémně spolehlivým. Vytváří dobrý, vysoce lesklý povrch, který

R & G primární vosk

Tento vysoce efektivní primární vosk se používá pro předchozí ošetření špatně navlhčitelných povrchů.

Primární vosk se samotný používá na silikonové formy a na kompozitové formy v kombinaci se separátorem PVA. Separátor PVA schne na tomto primárním vosku bez příležitostných závad (očka, stopy po štětcí). Rozdíl v kvalitě mezi nanášením štětcem nebo stříkáním je prakticky nepozorovatelný.

Zpracování

Primární vosk se po aplikaci jemně otře měkkým bavlněným hadříkem, aby se odstranily nerovnosti způsobené nerovnoměrně silnou aplikací. Vyleštění není možné a není ani nutné, protože následující separátor usychá s vysokým leskem.