

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav letadlové techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Integrace solárních článků do kompozitové konstrukce

Pavel Němeček

2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němeček** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **437220**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Inegrace solárních článků do kompozitové konstrukce

Název bakalářské práce anglicky:

Integration of solar cells in composite structures

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Rešerši současného stavu
- 2) Návrh technologie výroby kompozitních dílů s integrovanými solárními články
- 3) Ověření navržené technologie

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Barák, ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne :.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Barákovi za pomoc, cenné rady a připomínky, pomoc s výrobou vzorku, zejména však za mně věnovaný čas. Dále děuji rodině za podporu během studia.

Anotační list

Autor: Pavel NĚMEČEK

Název práce: Integrace solárních článků do kompozitové konstrukce

Anglický název: Integration of solar cells in composite structures

Rok: 2017

Obor studia: bez oboru

Ústav: Ústav letadlové techniky

Vedoucí: Ing. Karel Barák

Bibliografické údaje: - Počet stran: 41
- Počet obrázků: 24
- Počet tabulek: 0
- Počet příloh: 3

Klíčová slova:, Kompozity, Skelná tkanina, Solární článek

Key words: Composites, Fiberglass, Solar cell

Anotace:

Tato práce pojednává o integraci solárního článku do kompozitové konstrukce. Cílem bylo nalézt takovou metodu, která zajistí optimální výsledky, zejména, aby byl povrch konstrukce hladký a konstrukce byla pevná a nedocházelo k delaminaci. Zároveň bylo potřeba, aby výkon solárního článku nebyl příliš snížen vlivem integrace do kompozitu. V budoucnu se předpokládá využití v konstrukci křídla.

Abstract:

This work consists of integration of a solar unit into composite structure. The point was to find a method that would ensure optimal results, meaning so the surface would be smooth and the construction firm and steady and delamination wouldn't occur. There was also the need of the output of the solar cell to not be reduced much by the influence of the integration into the compositor. It is expected to be used in the future in wing construction.

Obsah

Zadání.....	1
Prohlášení	2
Poděkování	3
Anotační list	4
Seznam použitých zkratk	5
1.Úvod	7
1.1 Zastoupení technologie.....	8
2. Použité materiály.....	12
2.1 Kompozit.....	12
2.1.1 Výztuž.....	12
2.1.2 Spojovací matrice.....	12
2.2 Použité materiály na vyráběný vzorek.....	12
2.2.1 Skelná tkanina.....	12
2.2.2 Epoxidová pryskyřice.....	13
2.2.3 Epoxidová fólie.....	13
3. Technologie výroby.....	14
3.1 Předpokládaný postup.....	14
3.2 Skutečný postup výroby.....	14
3.2.1. Výroba laminováním ze skelné tkaniny za mokra.....	14
3.2.2 Výroba laminování skelné tkaniny za sucha.....	23
4. Závěr.....	25
4.1 Vyhodnocení vyrobených vzorků.....	25
4.2 Vhodnost technologie.....	29
Seznam zdrojů.....	31
Seznam obrázků.....	31
Přílohy.....	32

Seznam použitých zkratk

PVC - Polyvinylchlorid

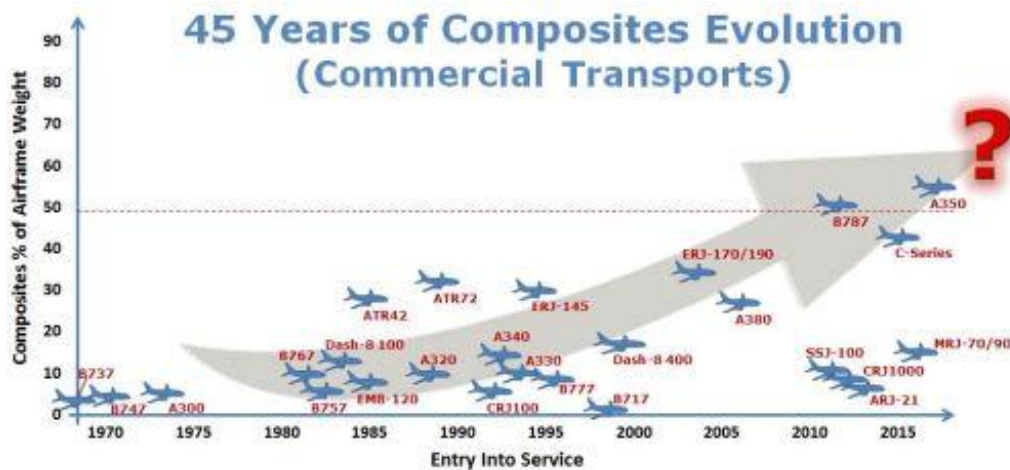
1. Úvod

Létání je jedním z nejúžasnějších divů světa. Přestože je pro lidstvo poměrně mladým oborem, od prvního letu bratří Wrightů v prosinci roku 1903 uplynulo 114 let, lidé v oboru létání udělaly obrovské pokroky. Od letadla těžší než vzduch, přes zaoceánské lety a nadzvukové létání až do současného stavu.

V této bakalářské práci se budu zabývat výrobou kompozitu, který bude obsahovat solární články. Vzhledem k dnešnímu tlaku na vývoj nových technologií v letectví, které spěje dopředu skutečně rychlým krokem, je třeba vymýšlet stále nové a nové technologie. Dle mého názoru je využití solární energie nasnadě. Narozdíl od solárních panelů, které stojí na zemi a nikam se nehýbou, letadla jsou stále v pohybu. V mnoha případech také létají nad mraky, které stíní přístup slunečních paprsků k panelům, pro letadla je však situace lepší.

Cílem této práce je nalézt řešení, které by do budoucna umožnilo výrobu kompozitních dílů se zabudovanými solárními články ve větší míře a s co nejmenší pracností, zároveň však s požadovanou kvalitou. Mezi hlavní požadavky zejména patří, aby nedocházelo delaminaci článků od povrchu křídla; vzhledem k předpokladu hladkého povrchu kompozitu, by se zvýšil odpor vůči vzduchu a snížil výkon solárního pohonu. Dále je třeba dosáhnout rozumného výkonu z článků, tudíž je třeba v konstrukci postupovat tak, aby se účinnost článku nesnižovala samotnou technologií výroby a články se tak nestaly mrtvou váhou.

Vzhledem ke stále hojnějšímu využívání kompozitů v letectví, které ilustruje graf pod odstavcem, je také důležité, aby výsledný produkt byl lehký a zároveň dostatečně pevný, aby splnil náročné požadavky v letectví mimo jiné i tím, že se předpokládá jeho umístění na křídla, která mají velkou plochu a nejsou příliš tvarově složitá.

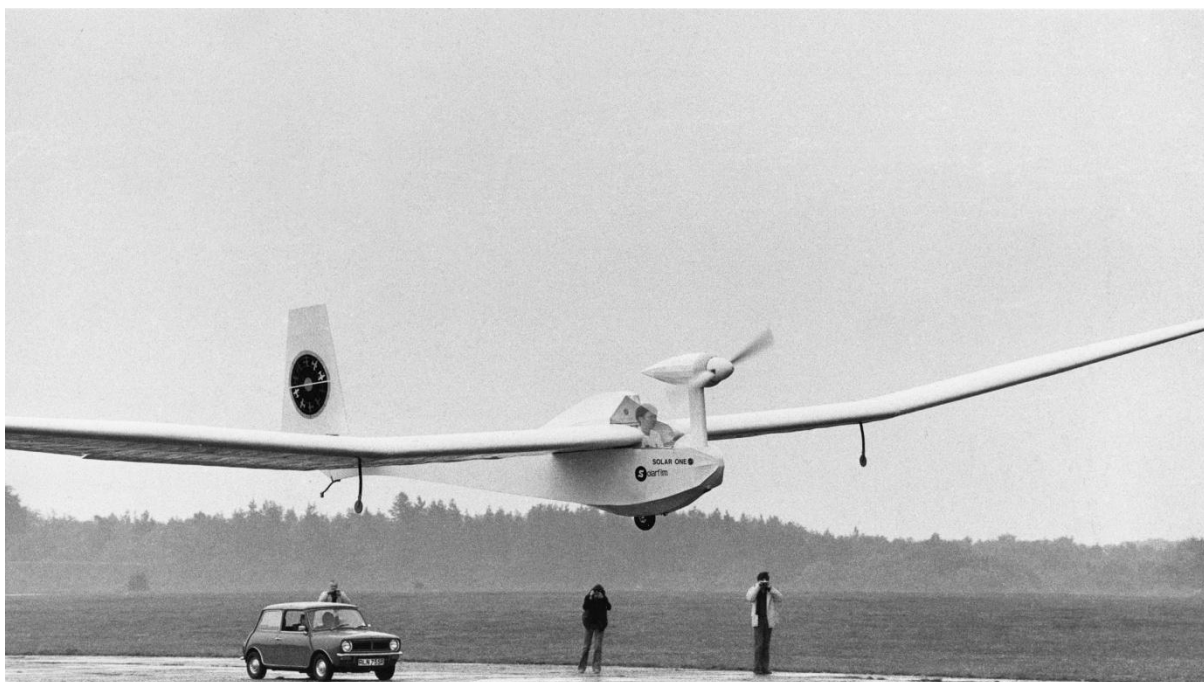


Obrázek 1 Vývoj zastoupení kompozitů v konstrukci letadel

Jak je patrné z obrázku nahoře, zastoupení kompozitních materiálů neustále roste, například firma Boeing po úspěšném typu B787 plánuje nový letoun, kde by měly být kompozity zastoupeny minimálně 70% v kompletní konstrukci.

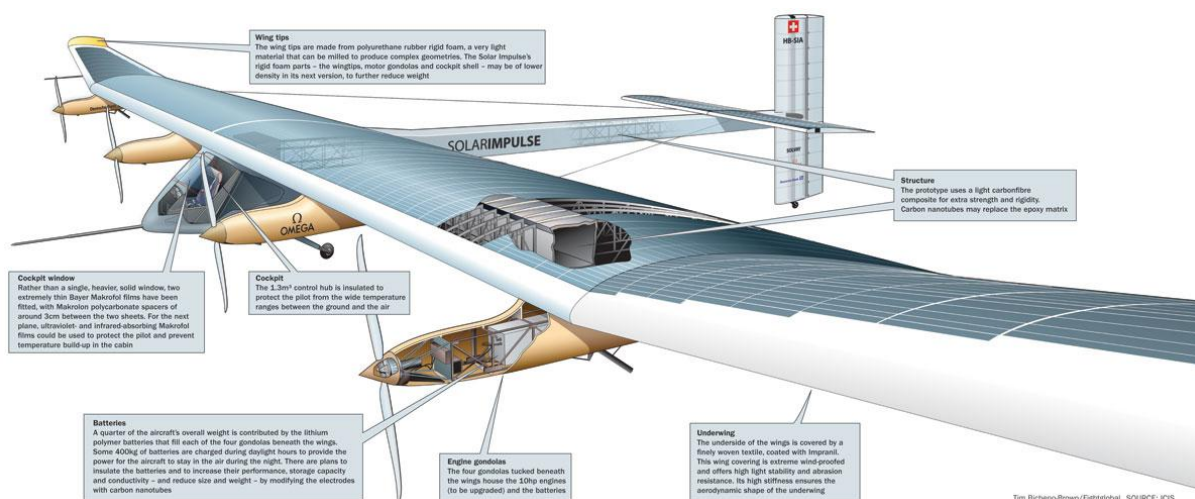
1.1 Zastoupení technologie

V současné době se technologie zabudovaných solárních článků v letectví nevyužívá. Některé letouny však technologie solárních článků, jako takové, využívají. Prvním letounem, které této technologii využil byl britský Solar One. První let zaznamenal 13. června 1979. Původně se mělo jednat o stroj poháněný člověkem, avšak kvůli vysoké váze – 108kg – se projekt změnil na letoun poháněný solárním pohonem. Na dřevěné konstrukci křídla byly použity solární články ve fólii, která se teplem smrskla, tudíž na konstrukci držela. Vzhledem k tehdejší vysoké ceně solárních článků, byl letoun osazen 750 články. Bohužel se při testech ukázalo, že letoun není schopen bez předchozího nabití baterií ani vzlétnout a při plném nabití baterií je motor schopen pouze 10 minut provozu; 8 minut stoupání a 2 minut letu v letové hladině, zbytek letu pouze klouzal. Proto bylo od původního záměru projektu, a to přelétnout kanál La Manche, upuštěno a projekt téhož roku zanikl.



Obrázek 2 Letoun Solar One

Asi neznámějším letounem je Solar Impulse II, jež vzniklo ve Švýcarsku. U tohoto letadla, jehož rozpětí přesahuje 80 metrů, jsou solární články, které čítají přes 17000, zataveny ve fólii a připevněny na povrch křídla z kompozitu složeného z uhlíkových vláken. Před nedávnem letadlo dokončilo cestu okolo světa, při které uletělo přes 40 000km [4]



Obrázek 3 Celková konstrukce letounu Solar Impulse



Obrázek 4 Detail konstrukce křídla Solar Impulse

Dalším strojem, který využívá solárních článků je švýcarské dvojmístné letadlo Sunseeker duo od společnosti Solar Flight. Stejně jako předešlý stroj i tento má články umístěné na křídlech, jejichž rozpětí je 22 metrů. Na křídlech je umístěno 1510 solárních článků a provozní dostup letadla je 12 000 stop. V závislosti na počasí je výdrž letounu v řádu hodin. V případě nedostatku solární energie je pak letadlo vzhledem ke svojí nízké váze - 280kg - schopno plazit jako kluzák a bezpečně tak přistát.



Obrázek 5 Letoun Sunseeker Duo

Mezi další exempláře, kde se využívá technologie se solárními články je německý letoun SolarWorld e-One. Za slunečného počasí je schopen na solární energii uletět přes 6000km. Solární články na jeho křídle vyprodukují zhruba 1,0kW energie. Články se nacházejí jak na křídlech, tak i na křídélkách. Na letounu se nalézá celkem 6m² plochy se solárními články.



Obrázek 6 Letoun Elektra One Solar

Mimo pár dalších strojů však technologie solárních článků v letectví není příliš rozšířená, zejména kvůli nízkým dodávaným výkonům. Účinnost solárních článků se totiž pohybuje okolo 20%. K dalším ztrátám také dochází při ukládání získané energie v bateriích. Z toho také plyne, že jakýkoliv stroj, který by měl být závislý pouze na solární energii bude mít buď velké rozpětí nebo by musel mít velkou kapacitu baterií. Nicméně u baterií se nyní dostává velmi rychle nových technologií.

2. Použité materiály

2.1 Kompozit

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více složek, které lze od sebe chemicky rozlišit. Dvě základní složky kompozitů se nazývají výztuž a matrice. Výztuž je část pevnější a tužší. Naopak matrice je část poddajnější a také slouží jako pojivo k výztuži.

Podle rozměrů částic výztuží lze rozlišovat kompozity na následující: makrokompozity, mikrokompozity a nanokompozity.

Podle materiálu použitého na matrici můžeme rozlišit kompozity: polymerní, kovové, uhlíkové, sklené aj.

Podle materiálu použitého na výztuž můžeme rozlišit kompozity: vláknové a částicové. [1]

2.1.1 Výztuž

Vláknová výztuž se sestává z vláken daného material. Materiál, který je sprážen do vláken má mnohem větší pevnost v tahu, než samostatně položený. Například rozdíl mezi sklovinou a skelným vláknem je 25x lepší ve prospěch vlákna. U uhlíkového vlákna a samostatným polykristalickým grafitem je rozdíl až 100 násobný. Čím jsou vlákna výztuže užší, tím lepší jsou jeho vlastnosti. Obvyklý průměr se pohybuje v rozmezí 5-20 μm , neboť u menších průměrů nelze dosáhnout tak dobrého prosycení maticí. [1]

2.1.2 Spojovací matrice

Spojovací matrice je v kompozitu nezbytná, aby spojovala a chránila výztuž. Ke správné funkci matrice je důležité, aby modul elasticity vláken výztuže v podélném směru byl větší než modul material matrice. Matric je několik druhů; polymerní, kovové, skelné, keramické aj. První dvě zde uvedené tuto podmínku splňují. [1]

2.2 Použité materiály na vyráběný vzorek

2.2.1 Skelná tkanina

Skelná tkanina vzniká spletením skelných vláken. Tato vlákna se získají ze skelné taveniny. Z těchto vláken se pak smotávají rovingy a z rovingů se posléze dělá skelná tkanina. Tkanina

se dodává v různých plošných hmotnostech. Plošná hmotnost se udává v gramech na metr čtvereční (g/m^2) a udává kolik gramů váží jeden metr čtvereční tkaniny. Čím méně g/m^2 tkanina má, tím je jemnější. Dle mých zkušeností je ale také náchylnější na manipulaci a například stříhat ji musíme velmi opatrně. Každá tkanina, která má různou plošnou hmotnost se také vyznačuje různými vlastnostmi, proto je třeba před každou aplikací pečlivě zvážit, kterou použijeme.

Skelná tkanina patří mezi nejvyužívanější při výrobě kompozitů. Kompozit ze skelné tkaniny nabízí velmi dobrou pevnost, nízkou hmotnost a velmi dobrou cenu. Nejčastěji se využívá v lodním průmyslu a letectví.



Obrázek 7 Detail skelné tkaniny

2.2.2 Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice patří mezi reaktoplasty. Sama o sobě je viskózní lepkavá tekutina po přidání vytvrzovače (polyaminy) se díky chemickým reakcím vytvrzuje.

2.2.3 Epoxidová fólie

Jedná se de facto o epoxidovou pryskyřici, nanešenou v tenké vrstvě na papír, který se před použitím odebere. Narozdíl od tekutých epoxidových pryskyřice je třeba, aby se vytvrzovala při vyšších než pokojových teplotách. Tekutá pryskyřice totiž může tvrdnout za pokojových teplot. V mém případě je teplota vytvrzování 120°C po dobu alespoň 60 minut. Jakmile pryskyřice překročí určitou teplotu dojde k jejímu zkapalnění a impregnuje tak výztuž.

3. Technologie výroby

3.1 Předpokládaný postup

Zkušební vzorek, který je součástí zadání, budu vyrábět ve školních laboratořích na Karlově náměstí. Abych dostal porovnání, budu vyrábět několik vzorků, které se budou lišit tloušťkou použitého skelného vlákna.

Poněvadž se nevyskytuje mnoho materiálů ohledně solárních článků a kompozitových konstrukcí, zkusím laminaci za sucha a za mokra, s ohledem na fakt, že jsem nikdy předtím nedělal kompozit. Tyto dvě metody by měly být jednoduché na zvládnutí a mohly by dát dobré výsledky.

Vzhledem k ceně solárního článku, budu používat do vzorků náhradu, kterou poslouží plastový obdélník 10x15cm z PVC fólie, o přibližné tloušťce jako solární článek. Pokud se výroba kompozitu podaří, lze vyrobit i samostatný kus s reálným solárním článkem.

Jako první technologii vyzkouším výrobu ze skelné tkaniny a epoxydové pryskyřice ručním kladením za mokra. Tento postup výroby bude časově náročnější, protože vzorky musí být zavakuovány nejméně 12 hodin, ale je poměrně jednoduchý. Nicméně je třeba být pečlivý, aby se předešlo nedostatkům.

Podle dostupných textilií v dílně budu vyrábět tři sadu tří vzorků, jeden bude mít vrchní vrstvu pouze PVC destičku, další dva budou mít první vrstvu skelnou textilií a teprve potom přijde PVC fólie.

Druhý způsob, který vyzkouším je ruční kladení za sucha, místo epoxydu v tekutém stavu použiji epoxydovou fólii. Předpokládám jednodušší výrobu a časovou úsporu.

3.2 Skutečný postup výroby

3.2.1. Výroba laminováním ze skelné tkaniny za mokra

Na začátku výroby je třeba mít formu. Vzhledem k faktu, že vyrábím tvarově jednoduchý díl, využil jsem laminátovou desku. Desku jsem toluenovým rozpouštědlem vyčistil od nečistot

nechal zaschnout. Protože v desce jsem našel vrypy, zahladil jsem je tmelem. Po zaschnutí tmelu bylo třeba, aby se na desku nanasla ochranný film – separátor, který zajistí, že výsledný kompozit půjde snadno od desky oddělit. Na základě rad mého vedoucího jsem nanasla tři vrstvy separátoru Frekote 700 NC. Po každé vrstvě jsem počkal 20 minut, aby separátor zaschl. Poté jsem aplikoval separační vosk TR 104. Podle návodu na obalu jsem nanasla 5 vrstev. Mezi každou jsem počkal 10 minut. Na obrázku níže vidíme zprava; toluenové čisticí, separátor a separační vosk.



Obrázek 8 Použité přípravky na přípravu formy

Připravenou desku jsem potom důkladně obalil oboustranou páskou. Ta slouží jako izolace pro vakuování. Během čekání při nanášení jednotlivých vrstev separátorů, jsem si nastříhal skelnou tkaninu. Jeden kus o plošné hmotnosti 17g/m^2 a 80g/m^2 a dále 13 kusů tkaniny o plošné hmotnosti 110g/m^2 . Dále jsem si připravil 3 kusy separační fólie a několik kusů separační tkaniny.



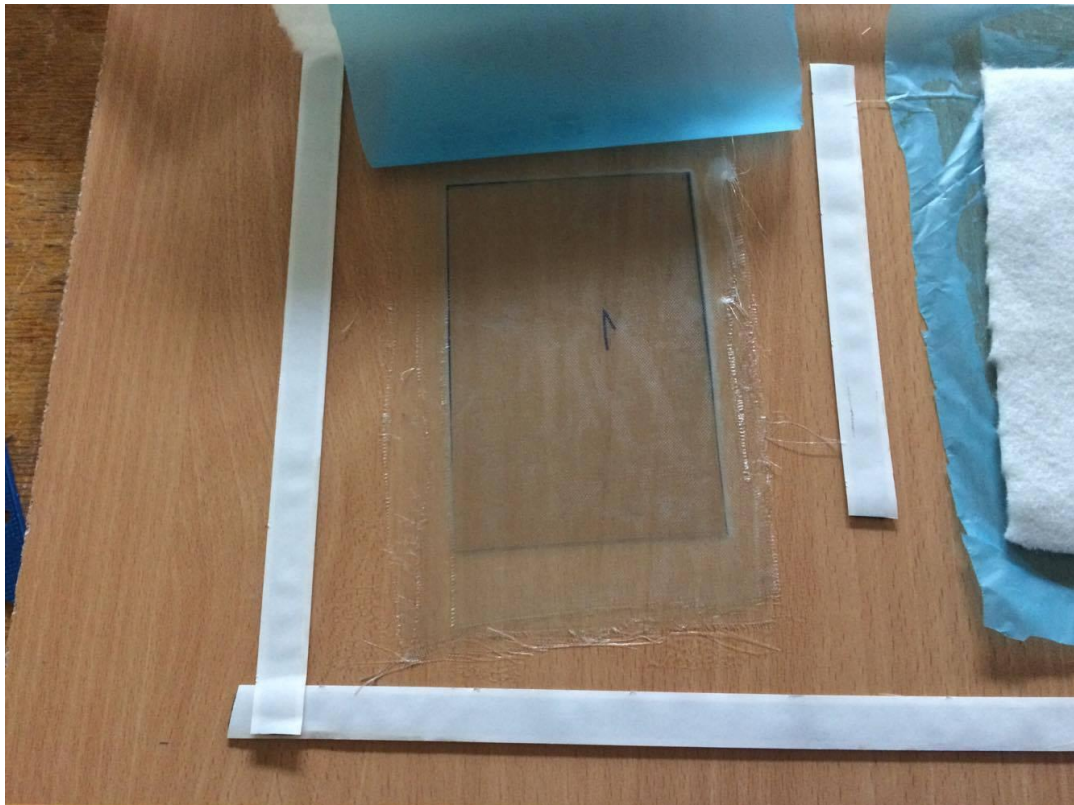
Obrázek 9 Připravená deska

Po všech těchto přípravách jsem se pustil do přípravy epoxidu. Ten se skládá ze samotné epoxidové pryskyřice EPIKURE MGS LR 285 a tužidla EPIKURE MGS LH 287. Tyto dvě složky epoxidu se míchají 100:40, já si připravoval 90g epoxidu, tudíž pryskyřice bylo 70g a tužidla 20g. Doba použitelnosti je zhruba 90 minut, vzhledem k tomu, že jsem měl vše připraveno, byla tato doba dostatečná. Na obrázku níže vidíme dvě složky; čirá je pryskyřice a fialová je vytvrzovač.



Obrázek 10 Pryskyřice a tužidlo

Nejprve jsem začal laminovat vzorek číslo 1. Na laminátovou desku jsem nanesl vrstvu epoxidu a opatrně položil PVC fólii, aby se mi pod ní nedostalo velké množství vzduchu. Poté jsem desku malířským válečkem potřel další vrstvou epoxidu. Válečkem jsem se rovněž snažil odstranit bubliny, které se pod PVC nacházely. Následně jsem kladl vrstvy tkaniny o plošné hmotnosti 110g/m^2 . Každou vrstvu jsem potřel epoxydem a uhladil stěrkou a celkem jsem nanesl 5 vrstev tkaniny. Narozdíl od dvou následujících vzorků se tento vzorek neustále při větším přitlačení stěrky pohyboval. Tento fakt nejspíše přispěl k pozdějšímu výsledku. Jakmile jsem skončil s laminováním, laminát jsem přikryl separační fólií a separační tkaninou.



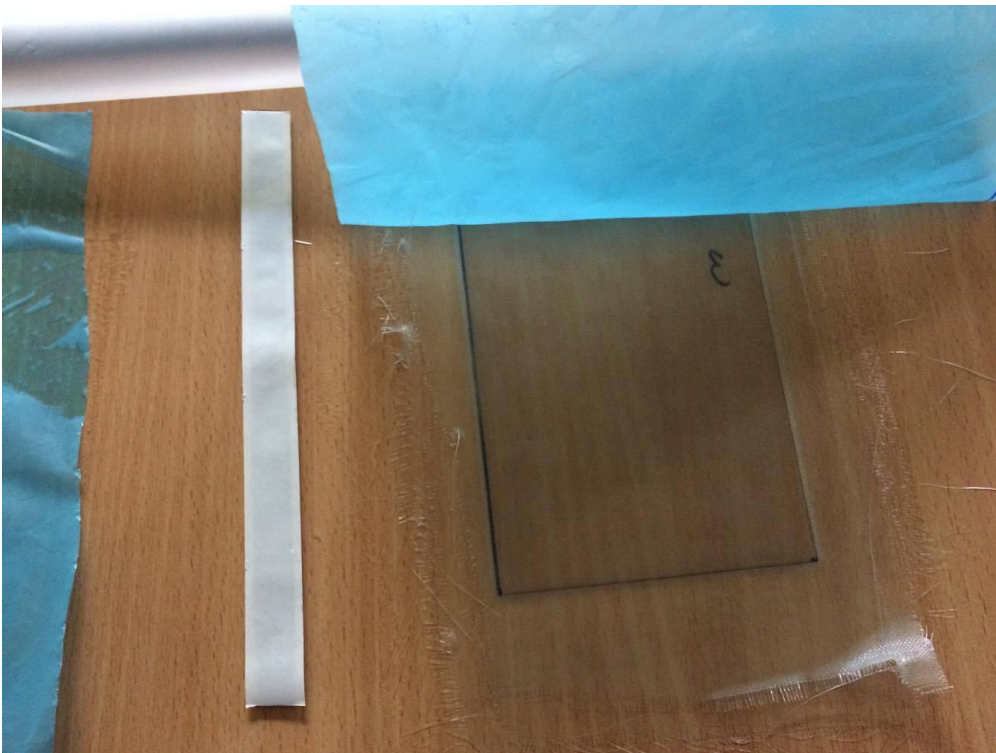
Obrázek 11 Vzorek číslo 1

U druhého vzorku jsem opět na začátku nanesl vrstvu epoxidu a poté opatrně položil tkaninu o plošné hmotnosti 17g/m^2 . Tuto tkaninu jsem se snažil špachtlí uhladit, nicméně tkanina byla velmi jemná, a proto jsem musel být velmi opatrný. Na tkaninu jsem poté opět opatrně položil PVC. Dále jsem postupoval stejně jako v předchozím případě, jen jsem místo 5 vrstev tkaniny 110g/m^2 použil pouze 4 vrstvy. Po skončení laminování jsem opět nanesl separační fólii a separační tkaninu.



Obrázek 12 Vzorek číslo 2

Postup u třetího vzorku byl totožný se vzorkem druhým. Na vrchní vrstvu epoxidu jsem opět nanesl tkaninu tentokráte o plošné hmotnosti 80g/m^2 a teprve poté jsem nanesl PVC a 4 vrstvy skelné tkaniny o plošné hmotnosti 110g/m^2 .



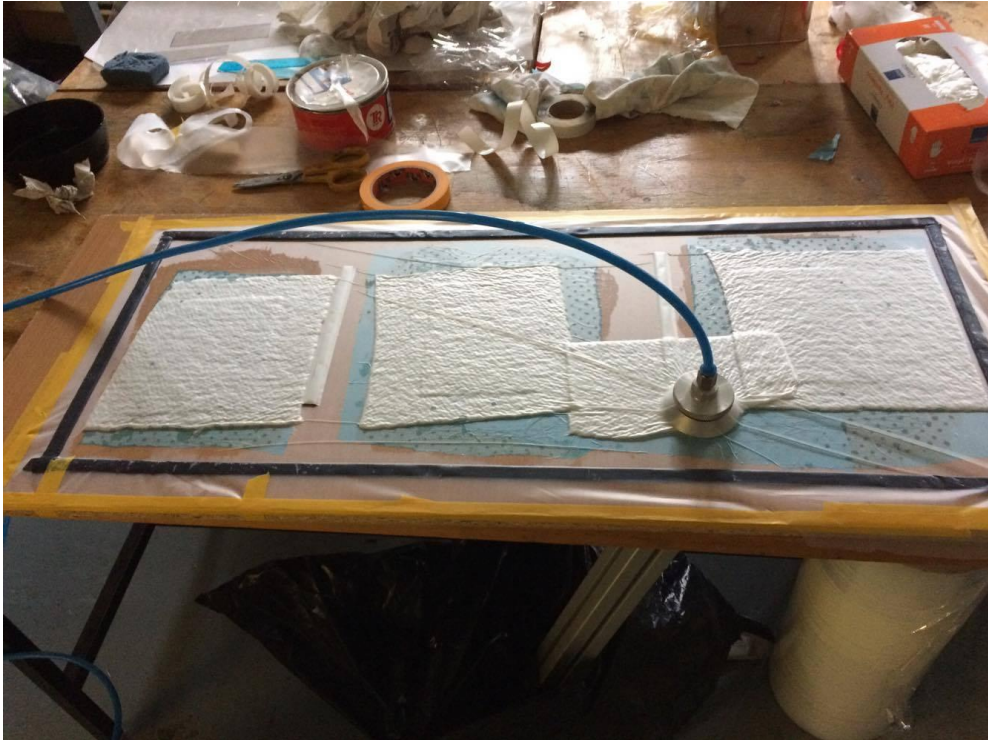
Obrázek 13 Vzorek číslo 3

Výsledek pak vypadal následovně:



Obrázek 14 Vzorky připravené k pokrytí fólií

Jakmile jsem měl všechny vzorky laminovány, bylo třeba zavakuovat pracovní plochu. Nejdříve jsem odstranil ochrannou vrstvu oboustranné izolační pásky na jedné hraně a opatrně přilepil fólii, takto jsem postupoval u každé hrany, až mi nakonec stejně zbylo volné místo, které bylo třeba utěsnit větší porcí izolace z pásky. Zároveň bylo také třeba během lepení fólie udělat otvor pro ventil k vývěvě. Otvor jsem udělal na základě rady od mého vedoucího mimo laminované vzorky, aby nedošlo k otisknutí ventilu do vzorků. Následně jsem připevnil hadičku k výrobku a separátoru, aby přebytečná pryskyřice nevnikla do systému vývěvy. Ze separátoru jsem pak vedl další hadičku tentokráte do vývěvy. Nakonec jsem pustil vakuovou pumpu a výsledek mé snahy nakonec vypadal následovně:



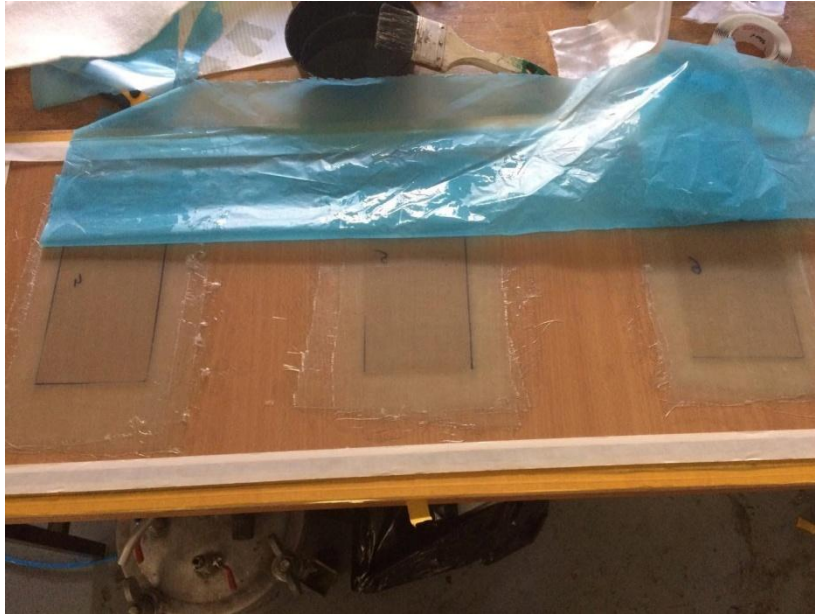
Obrázek 15 Zavakuované vzorky



Obrázek 16 Údaj na vakuové pumpě

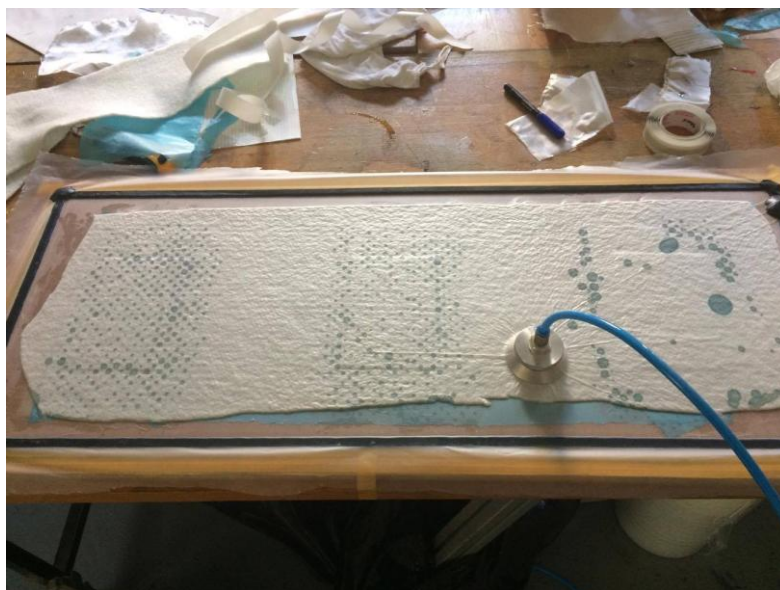
Zavakuovaný kompozit by měl zrát nejméně 12 hodin, vzorky jsem tedy nechal zavakuované 16 hodin, při tlaku -0,91 barr. Druhý den jsem pak vzorky opatrně rozbilil. Výsledek bohužel nebyl ideální vzorky 1 a 2 byly viditelně kontaminovány vzduchvými bublinami u vzorku číslo 3 nebylo kvůli špatně zvolenému podkladu.

Po konzultaci jsem se tedy pustil do výroby druhé sady vzorků číslovaných 4-6. Postup výroby byl schodný, pouze jsem po dohodě s vedoucím použil více epoxidu a zvolil jiný podklad, k tomuto účelu posloužila PVC fólie, která byla původně určena na náhradu za solární článek.



Obrázek 17 Připravená druhá sada

V tomto případě šla výroba o trochu rychleji a epoxidem jsem tentokrát nešetřil. Při zavakuování se dokonce podařilo dosáhnout ještě lepšího tlaku, hodnota se tentokráte pohybovala okolo -0,97 barr.



Obrázek 18 Zavakuovaná druhá sada vzorků



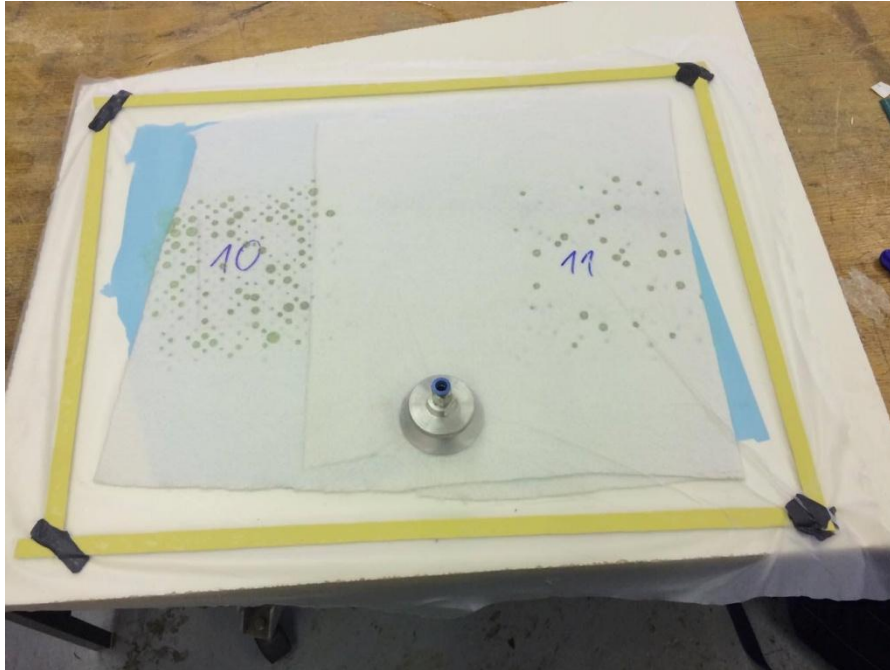
Obrázek 19 Údaj na ukazateli pumpy

Výroba třetí sady vzorků proběhla zcela stejně jako výroba předchozích dvou. Pouze jsem nezapomněl očistit PVC předtím, než jsem ji uložil do laminátu.

3.2.2 Výroba laminování skelné tkaniny za sucha

Díky firmě LA Composites jsem obdržel kus epoxidové fólie Letoxit LFX 035, která se dá použít k laminování za sucha. Výrobci těchto fólií uvádí několik výhod oproti laminování za mokra mj. úsporu času při výrobě. Bohužel mi naopak tento způsob výroby přišel náročnější, zejména proto, že epoxidová fólie šla velmi špatně sloupnout z ochranného obalu a velmi často – zhruba ve třetině případů - se zmuchlala a nešla tudíž použít. Jako forma opět posloužila laminátová deska, která byla ošetřena toluenovým čističem a posléze separátorem a separačním voskem, jako v předchozím případě. Protože v návodu k fólii je psáno, že mezi formou a epoxidovou fólií byla vždy alespoň jedna vrstva výztuže, dělám pouze dva vzorky. Vzorek číslo 11 je prokládám vždy jednou vrstvou tkaniny a jednou vrstvou fólie naopak vzorek číslo 10 je složen z jedné vrstvy tkaniny, poté náhrady za solární článek, následně je položeno více vrstev fólie a na ní více vrstev tkaniny. Další změna, která byla nutná provést je, že místo PVC jsem použil kovou destičku podobné tloušťky, protože PVC by nevydrželo teplotu v peci. Před samotným laminováním jsem opět formu natřel 3 vrstvami separátoru a 4 vrstvami separačního vosku. Skelnou tkaninu jsem volil ze zbytků, které mi zbyly z laminace za mokra. Jakmile jsem měl laminát připraven, zabalil jsem ho a připravil

k vakuování. Nejdříve jsem formu zavakuoval mimo pec, abych utěsnil místa, kudy stále proudil do formy vzduch. Jakmile jsem vše utěsnil, celou formu jsem umístil do pece, kterou jsem zapnul na 120°C a zavakuovanou formu jsem nechal dvě hodiny tvrdnout. Po dvou hodinách jsem vyndal formu a do druhého dne počkal, než vychladne. Ihned po vyndání z pece výrobek vypadal následovně:



Obrázek 20 Laminování za sucha po vyndání z pece

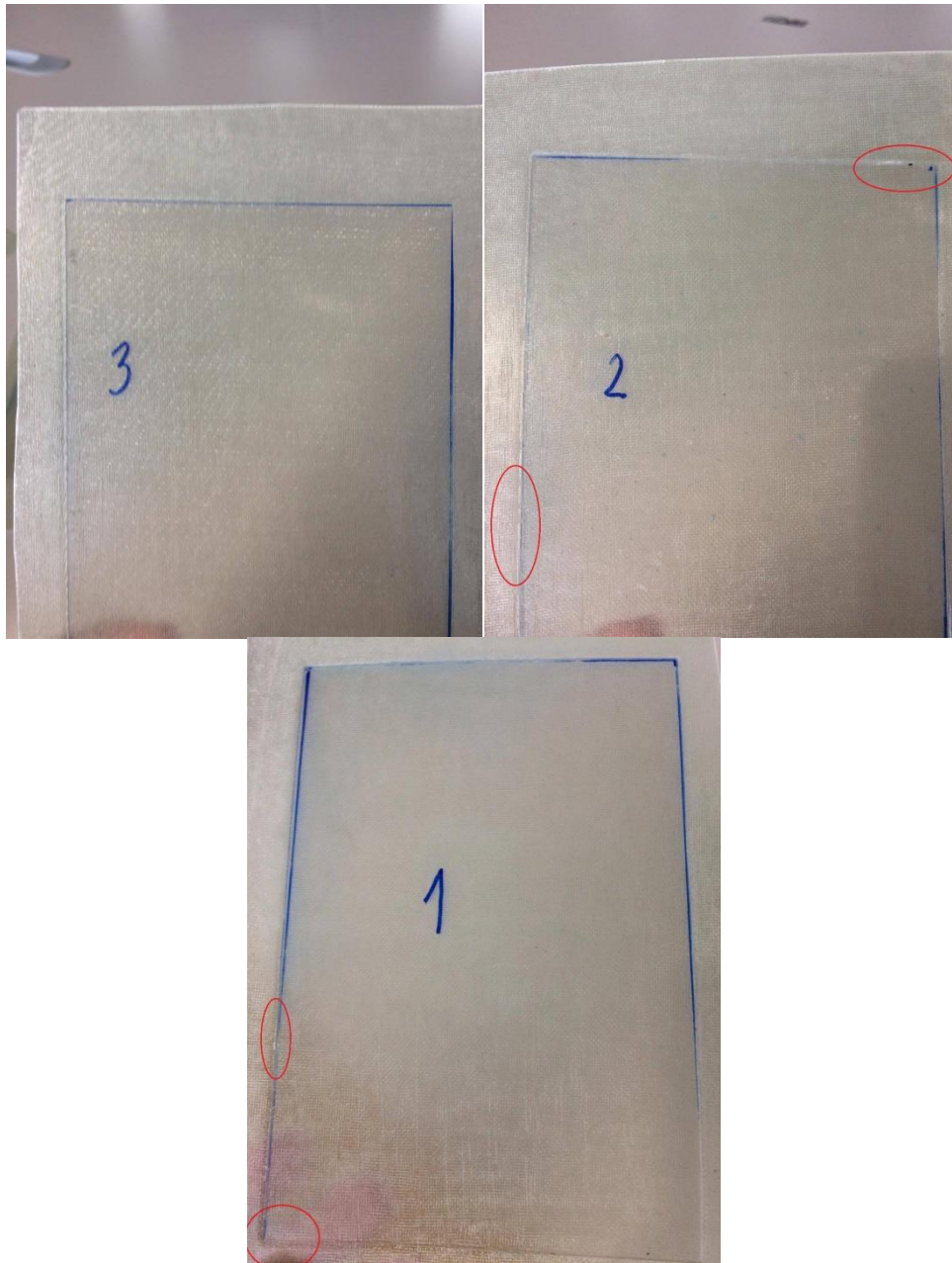
Z obrázku je zřetelně vidět, že vzorek číslo 10 byl vyráběn s více vrstvami epoxidu, neboť se do separační tkaniny vsáklo více přebytečného epoxidu, který během vytvrzování v peci přešel do kapalné fáze.

4. Závěr

4.1 Vyhodnocení vyrobených vzorků

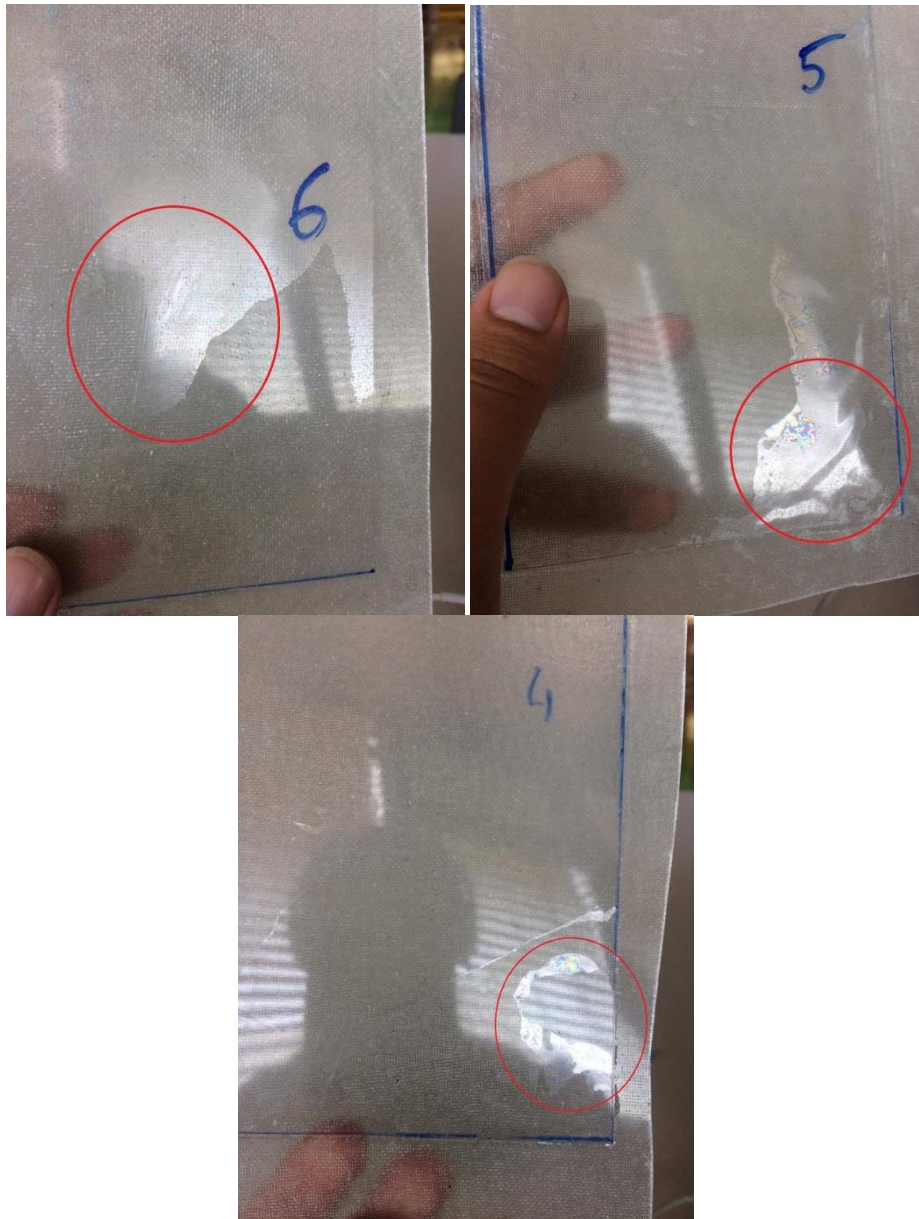
Celkem jsem vyrobil 3 sady vzorků s číslováním vzorků od 1 do 8. První sada o třech vzorcích 1-3 byla vyrobena laminováním skelného vlákna. U vzorku 1 byla jako vrchní vrstva pouze vrstva epoxidu a poté jsem kladl na PVC fólii skelnou tkaninu o plošné hmotnosti 110g/m^2 . U druhého vzorku jsem pod PVC fólii dal tkaninu o plošné hustotě 17g/m^2 nasycenou epoxydem a poté vrstvy tkaniny o plošné hmotnosti 110g/m^2 . Vzorek číslo 3 měl jako první vrstvu použítu taninu o plošné hmotnosti 80g/m^2 a poté jsem na PVC opět kladl vrstvy tkaniny o plošné hmotnosti 110g/m^2 .

První sada vzorků, kterou jsem vyrobil, nedopadla bohužel nejlépe. Ve dvou vzorcích označených číslem 1 a 2, byly viditelné vzduchové bubliny. Ve vzorku 1 navíc nedošlo k úplnému přilnutí po obvodu PVC fólie. Tyto nedostatky byly patrně způsobeny malým nasycením epoxidovou pryskyřicí. U vzorku číslo 3 nešlo příliš zjistit, jestli taktéž obsahuje vzduchové bubliny, vzhledem k tomu, že v úplném počátku jsem nezvolil zcela hladkou desku a při následném vytvrzování ve vakuu došlo k obtisknutí tohoto vzoru dřevěného laminátu na vzorky. Viditelné vady jsou na obrázcích označeny červeně.



Obrázek 21 Vady u první sady vzorků

Druhá sada je složením totožná jako sada první, nicméně jsem upravil postup dle rad mého vedoucího. Bohužel se ukázalo, že jsem se dopustil závažné chyby, a to, že jsem zapomněl očistit PVC fólii, ta byla tudíž mastná a bohužel došlo k výrazné delaminaci na všech vzorcích, jak je vidět na obrázcích níže. Viditelné vady jsou opět označeny červeně. Pozitivní však bylo, že u vzorku číslo 6 se nenacházely ve velké míře vzduchové bubliny po okraji PVC fólie.



Obrázek 22 Vady u druhé sady vzorků

U poslední sady vzorků vyráběných laminací za mokra došlo opět k několika vadám. U vzorku číslo 7 došlo k delaminaci PVC od sklolaminátu ihned při vyndávání z formy. U vzorku číslo 8 došlo ke stejné vadě jako u vzorku číslo 5 a 6. Vzorek číslo 9 dopadl ze všech kladených za mokra nejlépe, pouze po okraji zbyla místa, která nejsou vyplněna epoxidem.



Obrázek 23 Vady u třetí sady vzorků

Druhým způsobem, tedy laminací za sucha mi přijdou výsledky lepší. Sice se vzorky velmi špatně dostávaly z formy, jak je vidět na obrázku, nicméně na první pohled byly vzorky bez viditelných vad, a to u obou způsobů, jak několika vrstev fólie a několika vrstev tkaniny, tak u střídaného skládání vrstev. Výsledky druhé strany vzorků jsou bohužel zkaženy velmi složitým vyndáváním z formy, při kterém došlo delaminaci vzorku 10 a na vzorku 11 bohužel zůstal celý podklad z laminátu. Věřím však, že při použití jiného podkladu by tyto dva vzorky dopadly nejlépe.



Obrázek 24 Vzorky z laminování za sucha

4.2 Vhodnost technologie

Na základě zkoušek bych se z metody laminování za mokra přiklonil ke vzorku složeného z tkaniny o plošné hmotnosti 80g/m² na povrchu, posléze solárního článku (v mém případě PVC jako náhrady), vzhledem k nejmenšímu počtu vyskytnutých vad na vzorcích. Největší vady vznikly při vyndávání vzorků z formy. Bohužel na vzorcích zůstal i zbytek laminátu. Při použití vhodnějšího podkladu jako formy si myslím, že tato metoda bude pro případnou

další výrobu vhodnější, zejména proto, že díky tomu, že se epoxidová pryskyřice zkapalní až po vložení do pece, dokáže lépe vyplnit prádná místa mezi solárním článkem a tkaninou, než u metody mokrého laminování.

U pravého solárního článku také věřím v lepší výsledky, protože jeho povrch není hladký jako na náhradách, které jsem použil, tudíž na něm epoxid lépe ulpí a riziko delaminace bude menší.

Zdroje

[1] http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf (použito dne 23.03.2017)

[2] <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/122-designing-with-fiberglass.html> (použito dne 27.3.2017)

[3] <http://www.fibreglast.com/category/Fiberglass>

[4] <http://www.aerospace-technology.com/projects/solar-impulse-2-hb-sib-solar-airplane/>

[5] <http://inhabitat.com/worlds-first-two-person-solar-powered-plane-by-solar-flight-inc-nears-completion/>

[6] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52257

[7] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar-Powered_Aircraft_Developments_Solar_One

[8] KASSAPOGLOU, Christos. Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2013. Aerospace series. ISBN 978-1-118-40160-6.

[9] DORWORTH, Louis C., Ginger L. GARDINER a Greg M. MELLEMA. Essentials of advanced composite fabrication & repair. Newcastle: Aviation Supplies & Academics, 2009. ISBN 978-1-56027-752-1.

[10] https://www.youtube.com/user/matthieutje65/videos?sort=dd&shelf_id=3&view=0 (tutoriály k samotné výrobě)

[11] INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS INTO COMPOSITE WING SKINS, James LEONARD, 2010, diplomová práce, Oklahoma State University

Obrázky:

[1] <http://www.compositesworld.com/cdn/cms/composites-in-aircraft-Red4.jpg> (použito dne 13.5.2017)

[2] <https://i.ytimg.com/vi/LDZRVLH6QI/maxresdefault.jpg> (použito dne 29.7.2017)

[3] <https://www.flightglobal.com/assets/getasset.aspx?ItemID=40984> (použito dne 13.5.2017)

[4] <https://knowledge.ulprospector.com/media/2016/05/SolarImpulseWing.jpg> (použito dne 13.5.2017)

[5] <http://inhabitat.com/worlds-first-two-person-solar-powered-plane-by-solar-flight-inc-nears-completion/sunseeker-duo-solar-powered-flight-two-man-airplane-kickstarter-solar-flight-inc> (použito dne 20.6.2017)

[6] http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2012/04/Elektra_One_Solar_SolarWorld_2.jpg

[7] https://www.boatpark.cz/User_Files/photos/thumbs/t178-m252_56aa2ab750028tkanina.jpg

[8]-[24] zdroj autor

Přílohy

[1] Separáčn  vosk TR 104

[2] Epoxidov  fólie Letoxid FX 035

[3] Separátor Frekote700-NC

Příloha 1

TR 104 Separační vosk

Popis výrobku:

Tuhá vosková pasta na vyrobená z nejkvalitnějšího rafinovaného karnaubského vosku smíšeného s dalšími syntetickými vysoce tepelně odolnými materiály a organickými destiláty.

Vlastnosti výrobku:

- Lehké nanášení a pozdější odstraňování. Lze lehce vyleštit i po dlouhém času od nanášení na povrch formy
- Dává tvrdý film s vynikající tepelnou a chemickou odolností
- Lehké dosažení vysokého lesku povrchu bez matných míst

Fyzikální vlastnosti:

Doba zrání po nanášení: 5 -10 minut při 23 C
Teplota měknutí: 88 - 98 C
Barva: bledě modrá
Tuhost: shodná s karnaubským voskem při 25 C

Doporučené aplikace:

Jako separační vosk na polyesterové, epoxidové, kovové a jiné formy s tvrdým povrchem. Vhodné pro použití do teplot nepřesahujících 90 C ve formě.

Na nové nebo opravené formy doporučujeme použít jako základní vrstvu plnič-leštič TR 301 před použitím vosků pro zlepšení separace, lesku a životnosti formy. Vosk nanášíte krouživým pohybem na povrch formy. Necháte vyzrát cca 5 minut a vyleštíte do finálního lesku. Pro nové nebo opravované formy dávejte minimálně 5 vrstev voskové pasty a po každém vyleštění necháte ještě vrstvu vyzrát po dobu 30 - 60 minut. Nejlepšího výsledku se dosahuje, jestliže po poslední nanášené a vyleštěné vrstvě se nechá voskový film vyzrát po dobu 10 a více hodin při pokojové teplotě.

Před vlastním použitím formy se nanese nová vosková vrstva, nechá vyzrát 30 - 60 minut a zařadí se do výrobního cyklu. Po odformování prvních 2 - 3 výrobků z nové formy je vhodné formu znovu převoskovat. Dále se forma již separuje podle potřeby, tak jak to vyžaduje technologický proces pro snadné odformování.

Informace zde uváděné jsou na základě testů. Každému uživateli je doporučeno provést si vlastní testy na jeho zamýšlené aplikaci, protože není možno obsáhnout veškeré materiály a technologické podmínky při testech u výrobce tak, aby byly hodnovimné a precizované pro danou konkrétní výrobu.

Příloha 2

TECHNICAL DATA SHEET

Version: 11/2011

Letoxit® LFX 035

Usage

Epoxy resin in the form of foil is designed for patent Letoxit Foil Technology (LF Technology). LF Technology is a dry lamination technique, which is suitable especially for production of laminate structures with exactly defined reinforcement and resin content. If it is necessary to increase the amount of resin in a certain place, it is also possible to combine epoxy resin Letoxit Foil with prepregs.

Letoxit Foil LFX 035 can be applied for all types of reinforcement. Various types of glass, carbon or Kevlar fabrics or their combinations are mostly used. Unidirectionally oriented reinforcements or 3D fabrics can be used, too. LFX 035 is suitable especially for production of sandwich structures and honeycomb constructions. The produced laminate has very good mechanical properties under stress in temperature range from -75°C to +110°C. Therefore it is used for manufacturing of aircraft parts and transport vehicles.

Type

Epoxy resin, which contains a hardening system

Appearance

A resin is in the form of yellowish transparent foil, 0.1-0.7 mm thick (according to the customer request). It is flexible and shapeable at indoor or increased temperature.

Lamination technique

Laminate is made by laying foils and reinforcement in order to keep the required predetermined reinforcement/resin ratio. Required shape corresponding to the shape of laminated surfaces is cut out with scissors, knife or other tool from the Letoxit Foil resin. Covering paper is pulled off the foil and the resin is put on the upper layer of the reinforcement. The resin foil pushed against the reinforcement a little and smoothed to avoid reinforcement folds. The reinforcement has to be loosened well to fill the mold perfectly. The second covering polyethylene foil is then pulled off and next reinforcement layer is applied. These steps are repeated until the desired amount of reinforcement layers is reached. It is recommended to work at the manipulation temperature – temperature range, which specifies processability of Letoxit Foil. Below the manipulation temperature, this material is too brittle and it breaks and it is too shapeable and adhesive above this temperature range. The manipulation temperature is thus 15-35°C; the best processability is between 20 and 30°C. It is suitable to use hot-air gun for assembling of more difficult compositions or shaped surfaces, especially when warm table cannot be used. It is possible to use either more layers of reinforcement alternately with the Letoxit Foil resin or to use one thick layer of Letoxit Foil resin and several layers of reinforcement. It is necessary to have at least one layer of reinforcement between the mold and the layer of Letoxit Foil resin.

The amount of Letoxit Foil has to be high enough to fill up the vacant space in the reinforcement structure. Minimal amount of resin content can be calculated with following formula:

$$m_{LF} / \rho_{LF} + m_R / \rho_R = t_c$$

where m_{LF} is a Letoxit Foil area weight (g/m^2), ρ_{LF} is a Letoxit Foil density (g/cm^3), m_R (g/m^2) is a reinforcement area weight (g/m^2), ρ_R is reinforcement density (g/cm^3) and t_c is composite thickness (μm). Area weight can be calculated for all layers of reinforcement or Letoxit Foil. Examples of some reinforcement density can be found in the table.



Na Záhonech 1177
686 04 KUNOVICE
Česká republika

tel: +420 572 433 711
fax: +420 572 433 700
email: 5M@5M.cz

www.5M.cz
LETOXIT® is registered trademark

Company of the Year 2010 in Czech Republic

1 / 5

TECHNICAL DATA SHEET

Type of reinforcement	Density (g.cm ³)
E-glass	2.58
S2-glass	2.46
Carbon	1.76

Air has to be evacuated from the composition reinforcement-Letoxit Foil before curing. Required pressure is 0.075-0.09 MPa. The composition has to be evacuated longer to achieve required pressure value in all parts of the laminate. It is important particularly for large products or products with high number of layers. It is recommended to perforate the Letoxit Foil with a spiked roller; it allows better evacuation of air before curing. The evacuated composition is cured in the mold at increased temperature under vacuum or in a press or autoclave.

Resin can be also added to prepregs by laying the Letoxit Foil to a specified place, where increased amount of resin is needed. The processing of this composition is the same as in the case of prepregs. Careful evacuation of air and sufficient pressure difference reach perfect impregnation of fibers after temperature rise; thus the quality of the resulting composite is comparable with prepregs without necessity of autoclave use.

Curing

Letoxit Foil LFX 035 resin is usually cured at temperature 120-125°C for 60 minutes. Laminate is fixed with pressure 0.075-0.09 MPa during curing. Two processes occur during temperature rise of the foil:

- 1/ The viscosity of Letoxit Foil decreases with increasing temperature and the dry reinforcement is being impregnated
- 2/ Epoxy resin starts to cure (effect of hardeners) after temperature rise

Therefore it is necessary to ensure sufficient time for impregnation of dry reinforcement during curing at increased temperature before Letoxit Foil reaches the gel point when material is not able to flow and thus impregnate the dry reinforcement. For that reason the following temperatures are determined:

- *Impregnation temperature*, which is the lowest temperature when the viscosity of Letoxit Foil is low enough to impregnate the dry reinforcement. In the case of Letoxit Foil LFX 035, the impregnation temperature is 70°C. Impregnation is easier at higher temperatures, but the time for resin flow is shorter.
- *Curing temperature*, which is the temperature when resin is cured at certain time.



Na Zahonech 1177
686 04 KUNOVICE
Česká republika

tel: +420 572 433 711
fax: +420 572 433 700
email: 5M@5M.cz

www.5M.cz
LETOXIT® is registered trademark

2 / 5

Company of the Year 2010 In Czech Republic

TECHNICAL DATA SHEET

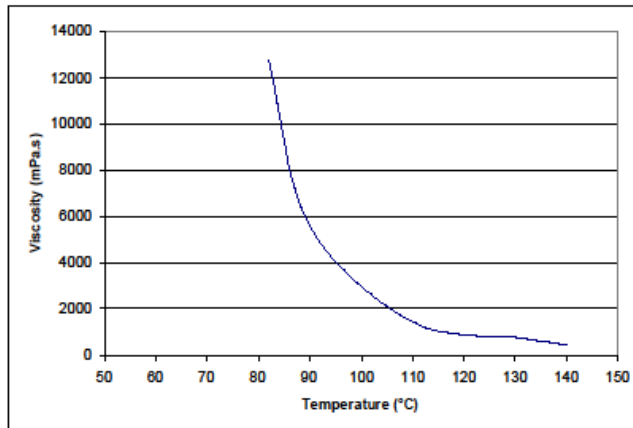


Fig. 1: Dependence of viscosity on time at various temperatures.

Curing time is counted from the moment when the temperature within the produced laminate reaches curing temperature. No volatile compounds are released from laminate during preparation or curing. Laminated ca be also cured at lower temperature, see following figure and table, which contain curing temperatures and properties.

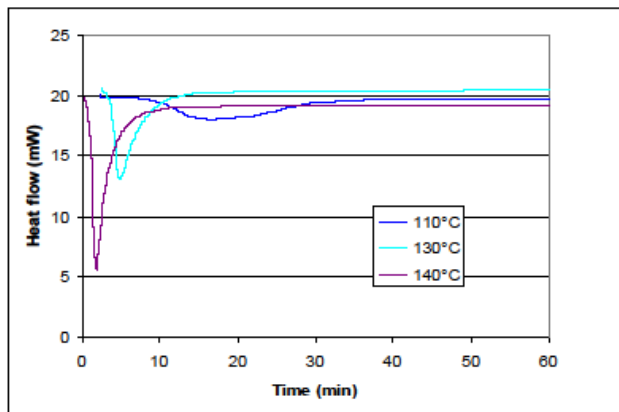


Fig. 2: Dependence of reaction rates on time at constant curing temperatures 110, 130 and 140 °C.

5M

Na Záhonech 1177
686 04 KUNOVICE
Česká republika

tel: +420 572 433 711
fax: +420 572 433 700
email: 5M@5M.cz

www.5M.cz
LETOXIT® is registered trademark

3 / 5

Company of the Year 2010 in Czech Republic

TECHNICAL DATA SHEET

140°C. Measured at DSC.

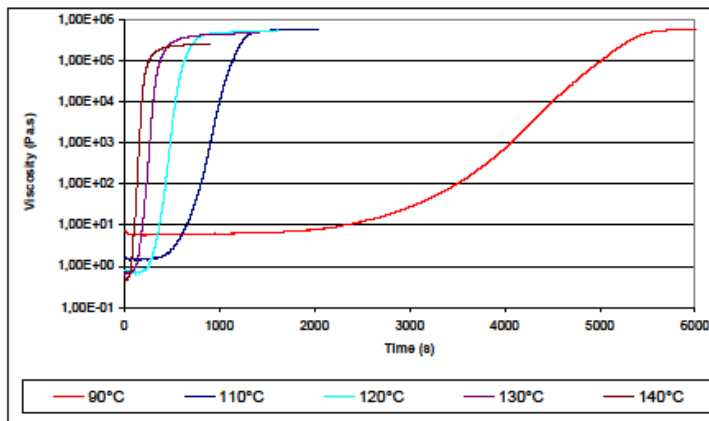


Fig. 3: Dependence of viscosity on time at different curing temperatures

It is necessary to keep the composition at the curing temperature for at least the minimal curing time. It is necessary to verify that the curing temperature is reached within whole cross-section of the cured composition. Temperature inside the cured composition can be measured with e.g. thermocouple.

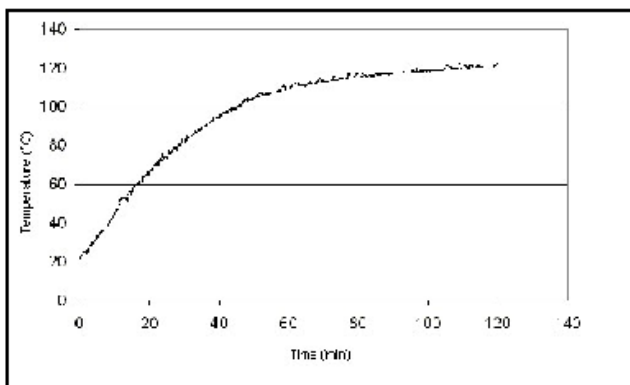


Fig. 4: Dependence of temperature inside the composition carbon fabric-Letoxit Foil 2.3mm thick. The composition was cured under vacuum in a steel mold at 120°C laid in a drying kiln.

Na Záhonech 1177
686 04 KUNOVICE
Česká republika

tel: +420 572 433 711
fax: +420 572 433 700
email: 5M@5M.cz

www.5M.cz
LETOXIT® is registered trademark

Company of the Year 2010 In Czech Republic

4 / 5

TECHNICAL DATA SHEET

Properties of Letoxit® Foil LFX 035

Density of uncured resin (g/cm ³)	1.19	1.19	1.19
Curing temperature (°C)	90	120	140
Minimal curing time (min)	150	20	15
Recommended curing time (min)	240	60	30
Properties of pure resin*			
Density (g/cm ³)	1.19	1.19	1.19
Shrinkage (%)		0.40	
Hardness Barcol	18-19	18-19	18-19
Tg (°C)	102	125	120
Maximal flexural stress (MPa)	100	120-125	120
Flexural modulus of elasticity (GPa)	3.2-3.3	3.2-3.3	3.3-3.4
Impact strength (kJ/m ²)	13	30-35	12

*Stated properties of cured resin were measured after curing at given temperature and recommended curing time

Composite properties reinforced with glass *

Density (g/cm ³)	1.71
Resin content (%)	43.9
Maximal flexural stress (MPa)	580
Flexural modulus of elasticity (GPa)	17.1

** Properties of cured composite were measured after curing at given temperature and recommended curing time. Composite constitution: 12 layers of glass fabric - twill weave, 163 g/m², and 5 layers of Letoxit Foil LFX 035, 300 g/m².

The composition produced under the LF Technology can be cured to lower conversion degree, app. 70% and post-cured outside the mould. However, the composition that is not cured properly is very brittle!

Packing:

The resin is delivered in the form of foil, 250 mm or 1000 mm width, which is protected by a polyethylene foil from one side and isolating paper from the other side. It is wound up on the hollow with the total weight up to 10 kg (usually 5 kg rolls are supplied – according to the customer request).

Storage:

Without the change of properties, the resin can be stored for 1 month at +20°C, for 3 months at 5°C and up to 1 year for –18°C. The temperature +30°C mustn't be crossed during transport and storage.

Safety during processing:

see Safety sheet

Producer and Supplier:

5M s.r.o.
Na Záhonech 1177
686 04 Kunovice
Czech Republic

Letoxit® is a registered trademark of 5M s.r.o. company



Na Záhonech 1177
686 04 KUNOVICE
Česká republika

tel: +420 572 433 711
fax: +420 572 433 700
email: 5M@5M.cz

www.5M.cz
LETOXIT® is registered trademark

5 / 5

Company of the Year 2010 In Czech Republic

Příloha 3



Technical Data Sheet

LOCTITE® FREKOTE 700-NC™

Known as 700-NC™
January 2015

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® FREKOTE 700-NC™ provides the following product characteristics:

Technology	Mold Release
Appearance	Clear, colorless ⁽¹⁾
Chemical Type	Solvent Based Polymer
Odor	Solvent
Cure	Room temperature cure
Cured Thermal Stability	≤400 °C
Application	Release Coatings
Application Temperature	13 to 135 °C
Specific Benefit	<ul style="list-style-type: none">• No chlorinated solvents• High gloss finish• High slip• No contaminating transfer• No mold build-up

LOCTITE® FREKOTE 700-NC™ offers excellent release properties for the most demanding applications and is a great all-purpose release agent. LOCTITE® FREKOTE 700-NC™ releases epoxies, polyester resins, thermoplastics, rubber compounds and most other molded polymers.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C 0.755 to 0.764⁽¹⁾

Flash Point - See SDS

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

For safe handling information on this product, consult the Safety Data Sheet (SDS).

Mold Preparation

Cleaning:

Mold surfaces must be thoroughly cleaned and dried. All traces of prior release must be removed. This may be accomplished by using Frekote® PMC or other suitable cleaner. Frekote® 915WB™ or light abrasives can be used for heavy build-up.

Sealing New/Repaired Molds:

Occasionally, green or freshly repaired molds are rushed into service prior to complete cure causing an increased amount of free styrene on the mold surface. Fresh or "production line"

repairs, new fiberglass and epoxy molds should be cured per manufacturer's instructions, usually a minimum of 2-3 weeks at 22°C before starting full-scale production. Fully cured previously unused molds should be sealed before use. This can be accomplished by applying one to two coats of an appropriate Frekote® mold sealer, following the directions for use instructions. Allow full cure of the appropriate Frekote® mold sealer before you apply the first coat of LOCTITE® FREKOTE 700-NC™ as outlined in the directions of use.

Directions for use:

1. LOCTITE® FREKOTE 700-NC™ can be applied to mold surfaces at room temperature up to 135°C by spraying, brushing or wiping with a clean lint-free, cloth. When spraying ensure a dry air source is used or use an airless spray system. Always use in a well ventilated area.
2. Wipe or spray on a smooth, thin, continuous, wet film. Avoid wiping or spraying over the same area that was just coated until the solvent has evaporated. If spraying, hold nozzle 20 to 30cm from mold surface. It is suggested that small areas be coated, working progressively from one side of the mold to the other.
3. Initially, apply 2 to 3 base coats allowing 5 to 10 minutes between coats for solvent evaporation.
4. Allow the final coat to cure for 15 to 20 minutes at 22°C.
5. Maximum releases will be obtained as the mold surface becomes conditioned to LOCTITE® FREKOTE 700-NC™. Performance can be enhanced by re-coating once, after the first few initial pulls.
6. When any release difficulty is experienced, the area in question can be "touched-up" by re-coating the entire mold surface or just those areas where release difficulty is occurring.
7. NOTE: LOCTITE® FREKOTE 700-NC™ is moisture sensitive, keep container tightly closed when not in use. The product should always be used in a well ventilated area.
8. Precaution: Users of closed mold systems (rotomolding) must be certain that solvent evaporation is complete and that all solvent vapors have been ventilated from the mold cavity prior to closing the mold. An oil-free compressed air source can be used to assist in evaporation of solvents and ventilation of the mold cavity.

