



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ LISOVÁNÍM ZA TEPLA

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING OF CARBON FIBRE COMPOSITES BY HOT FORMING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Přikryl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Pavel Přikryl**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jan Zouhar, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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

Technologie výroby uhlíkových kompozitů lisováním za tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití kompozitních materiálů je v současnosti na vzestupu, hlavním zpracovatelem je letecký průmysl. Díky zrychlení a zlevnění výroby tyto materiály také pronikají do sériové produkce v automobilovém průmyslu. Z tohoto hlediska se jako velmi efektivní jeví metoda výroby lisování materiálů za tepla. Tato metoda je dnes málo využívaná zejména díky chybějícím parametrům a náročnosti procesu.

Cíle diplomové práce:

1. Kompozitní materiály a jejich parametry.
2. Technologie výroby kompozitních materiálů.
3. Technologie lisování - technologické parametry, varianty.
4. Návrh formy, materiálů a parametrů výroby daného dílu.
5. Reálný test výroby zvolené součásti.

Seznam doporučené literatury:

CAMPBELL, F. C. ASM INTERNATIONAL. Structural Composite Materials. Materials Park: A S M International, 2010. ISBN 9781615030378.

Composite materials handbook. Volume 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. USA: SAE International on behalf of CMH-17, a division of Wichita State University, 2012. 700 s. ISBN 978-0-7680-7811-4.

BOGOLJUBOV, N. N. Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1995. 433 s.

MALLICK, P. K. Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997. 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá kompozitními materiály se zaměřením na kompozity vyztužené uhlíkovými a skelnými vlákny. Předmětem práce je studium složení a výroby součástí z kompozitních materiálů, které se odráží ve výsledných mechanických vlastnostech, kvalitě výrobku i v celkovém výrobním času. Praktická část se věnuje dvěma konkrétním technologiím využívající prepregy, a to s vytvrzením v autoklávu a metodou lisování za tepla.

Klíčová slova

kompozitní materiál, uhlíková vlákna, skelná vlákna, karbon, prepreg, autokláv, lisování za tepla

ABSTRACT

This master's thesis deals with the composite materials and especially aims on the carbon and glass fiber composites. It points out different composition types and manufacturing methods which reflect in the different mechanical properties, final quality of the manufactured part and also in the manufacturing time. The practical part includes two particular manufacturing methods using prepregs, one cured in an autoclave and one by hot compression moulding.

Key words

composite material, carbon fiber, glass fiber, prepreg, autoclave, thermal compression moulding, hot forming

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PŘIKRYL, Pavel. *Technologie výroby uhlíkových kompozitů lisováním za tepla*. Brno 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 48 s. 3 přílohy. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Technologie výroby uhlíkových kompozitů lisováním za tepla** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Pavel Příkryl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi, PhD. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 SLOŽENÍ.....	8
1.1 Vytzužující vlákna	8
1.1.1 Uhlíková vlákna.....	9
1.1.2 Skelná vlákna.....	11
1.1.3 Ostatní vlákna	12
1.2 Shrnutí vláken	13
1.3 Pojivo	15
1.3.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R).....	16
1.3.2 Epoxidové pryskyřice (EP-R).....	16
2 SROVNÁNÍ S KOVOVÝMI MATERIÁLY	17
2.1 Mechanické vlastnosti	17
2.2 Odolnost vůči únavě a rázům	18
2.3 Vliv okolního prostředí	19
3 TECHNOLOGIE VÝROBY	20
3.1 Ruční kladení	20
3.2 Navíjení	20
3.3 Resin Transfer Moulding	21
3.4 Vytvrzování za tepla	22
3.5 Lisování za tepla	24
4 VÝROBA DÍLU	26
4.1 Prvotní návrh a modelování	26
4.2 Prototypová výroba v autoklávu - jednodílná forma.....	28
4.3 Prototypová výroba v autoklávu - dvoudílná forma	32
4.4 Lisování za tepla	35
4.4.1 Testovací lisování plošných dílů.....	36
4.4.2 Lisování prototypů ve dvoudílné polykarbonátové formě.....	39
4.4.3 Lisování ve dvoudílné hliníkové formě	41
ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44

ÚVOD

Kompozitní materiály představují v současné době stále se rozvíjející skupinu materiálů využívaných v nejrůznějších odvětvích. Zásadní roli hrají především v leteckém, automobilovém a kosmickém průmyslu, ale v současnosti se s nimi setkáváme už i v celé řadě jiných běžných použití jako jsou sportovní potřeby, cyklistika, rybářské pruty, lodě, zbraně a mnoho dalších.

Kompozitní materiály mají své vlastní vědecké odvětví. Obecně jsou definovány jako dvou a vícesložkové materiály rozpoznatelné v makroskopickém měřítku, tedy pouhým okem. Proto do této kategorie neřadíme materiály jako například ocel, která sice teoreticky odpovídá této definici, ale jednotlivé složky jsou rozpoznatelné až při mikroskopických zvětšeních. Není ani možné aplikovat poznatky platné pro kovové materiály, neboť se svým chováním a vlastnostmi zcela odlišují. Dvěma hlavními složkami kompozitů potom máme na mysli vlákna dodávající pevnost a tuhost a pojivo uskutečňující soudržnost tohoto celku.

Hlavní výhodou a důvodem proč se rozšiřuje aplikace kompozitních materiálů je snaha redukovat hmotnost za současného zachování mechanických vlastností součástí. V automobilovém průmyslu odlehčení konstrukce umožňuje závodním autům dosáhnout vyšších rychlostí. V kosmickém průmyslu snížení hmotnosti kosmických raket vede k menší spotřebě paliva a tím pádem i menším palivovým nádržím a stejně jako v leteckém průmyslu mohou stroje vyvinout větší sílu při vzletu a snáze překonat tíhové pole Země. Kompozitní materiály se tedy dají označit za faktor zefektivňující výkon a spotřebu těchto zařízení. Je však nutno podotknout, že dosažení takových výsledků není jednoduchý úkol. Abychom docílili odpovídajících mechanických vlastností, je nutno splnit celou řadu konstrukčních a výrobních aspektů.

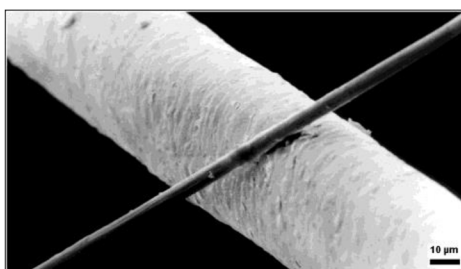
S výchozím polotovarem a požadovanými výslednými vlastnostmi pak souvisí i samotná výroba kompozitních dílů. Mezi nejčastější metody se řadí mokré kladení, navíjení, infuze pryskyřici nebo kladení předimpregnovaných tkanin - prepregů. Nedílnou součástí výroby je následné vytvrzování. Vytvrzovací cykly jsou různorodé, mohou probíhat za pokojové teploty, zvýšené teploty nebo za současného působení vysokého tlaku. Právě působení vysoké teploty a vysokých tlaků během vytvrzování pak umožňuje výrobu dílů o vysoké kvalitě a výborných mechanických vlastnostech. Těchto podmínek je možné dosáhnout při vytvrzování v autoklávu nebo lisování za tepla, čemuž se věnuje tato diplomová práce.

1 SLOŽENÍ

Kompozit se skládá z minimálně dvou hlavních komponent, tj. vláken a pojiva. Tyto složky se výrazně liší svými fyzikálními vlastnostmi a samostatně nedosahují potřebných vlastností pro aplikaci. Ty získávají až vzájemnou kombinací, kdy vlákna fungují jako výztuž a pojivo dodává celkovou soudržnost. Nejčastěji se setkáváme s kompozity na bázi polymerních pryskyřic vyztužených skelnými nebo uhlíkovými vlákny. Jsou známy vhodné kombinace vláken a pojiva a zároveň vhodné poměry složení mezi maticí a výztuží. Má-li kompozit přinést výhody, je třeba navrhovat optimální složení tak, aby bylo dosaženo potřebné životnosti v závislosti na pracovním prostředí.

1.1 Vyztužující vlákna

Vlákna ve srovnání s kompaktní hmotou vykazují mnohonásobně vyšší pevnost. Podobný princip funguje i v přírodě u pavoučích vláken. U skleněných vláken je závislost meze pevnosti v tahu na průměru vlákna dokonce exponenciální [1]. Vysvětlením je jednak výskyt menšího počtu vad a zároveň více tenčích vláken poskytuje větší povrch k uskutečnění adheze mezi vlákny a pojivem a tím pádem i lepší soudržnosti a přenosu sil. Na druhou stranu tlakovému zatížení lépe odolávají vlákna silnější. Příliš tenká vlákna navíc mohou snadno pronikat do plic [1]. Protože kompozit je tvořen vlákny v jednotlivých vrstvách, tak i počet a orientace vláken v těchto vrstvách hraje významnou roli. Porovnání uhlíkového vlákna s lidským vlasem je znázorněno na obr. 1.



Obr. 1 Uhlíkové vlákno (6 μm) ve srovnání s lidským vlasem (50 μm) [2].

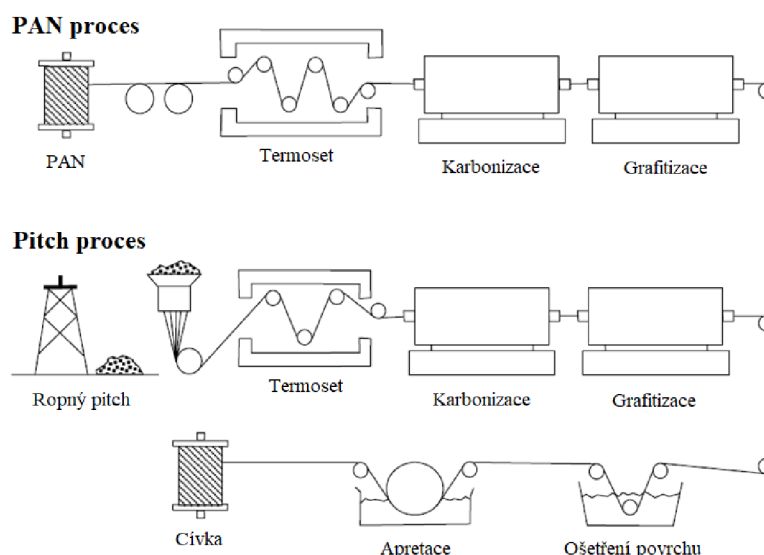
Hlavní funkcí vláken je přenášet zatížení. Z toho důvodu je potřeba dbát na to, aby směr vláken byl totožný se směrem zatížení, respektive aby orientace vláken odpovídala předpokládanému zatížení. Ke každému z jednotlivých směrů vláken (0° , $+45^\circ$, -45° , 90°) totiž můžeme přiřadit i typ zatížení, kterému nejlépe odolává. Příkladem uveďme rozhovor se spoluzakladatelem společnosti Festka panem Mourečkem [3] popisující konstrukci strojně navíjených kompozitních trubek z uhlíkových vláken. První vrstva dodává tvarovou stabilitu, druhá vrstva tvořená vlákny v nulovém směru dodává ohybovou tuhost a svrchní vrstva tvořená vlákny v $\pm 45^\circ$ stupních dodává torzní tuhost. Tímto způsobem se navrhuje konstrukce na míru pro danou potřebu a docílujeme tak nejvhodnější kombinace pevnostních vlastností a hmotnosti. S ohledem na aplikaci pak existuje několik druhů vláken. Mezi nejpoužívanější se řadí vlákna uhlíková a skelná, popřípadě aramidová. Silnější skelná vlákna (S-glass, nikoli E-glass) mají podobné vlastnosti jako uhlíková, avšak s velkým rozdílem v tuhosti a ceně. Právě vyšší tuhost uhlíkových vláken je důvodem, proč jsou mnohem rozšířenější ať už v leteckém nebo automobilovém průmyslu. Asi nejznámější použití aramidových vláken je kevlar, používaný v neprůstřelných vestách díky schopnosti absorbovat energii. Obecně je použití kevlaru omezené vzhledem k jeho slabé pevnosti v tlaku, příkladem mohou být tahově namáhané palivové. [4]

1.1.1 Uhlíková vlákna

Hlavní složku vláken tvoří uhlík a to z více než 90 %. Průměr vláken se obvykle pohybuje v rozmezí od 5 do 10 μm . [1] Jejich mechanické vlastnosti jsou silně ovlivněny způsobem výroby. Obecně se uhlíková vlákna dají charakterizovat vysokými hodnotami modulu pružnosti a vysoké pevnosti v tahu. Hlavní výhodou je jejich nízká hustota, díky které dosahují výborného poměru pevnosti a hmotnosti, což je také hlavní aspekt, jenž uhlíková vlákna staví do pozice konkurenta ocelím a jiným kovovým materiálům. Uhlíková vlákna vykazují silně anizotropní vlastnosti kolmo a rovnoběžně se směrem vláken, což je způsobeno typem vazeb krystalografické mřížky. Působící kovalentní vazby ve směru vláken zaručují mnohem vyšší tuhost a pevnost než Van der Waalsovy síly ve směru kolmém. Podobně je tomu i u tepelné roztažnosti, kde ve směru osy vlákna dosahují dokonce mírně záporných hodnot. [1]

Výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se vyrábí v průběžných pecích za vysokých teplot, viz obr. 2. Nejběžnějším polotovarem jsou termoplastická polymerní PAN vlákna (polyakrylonitril). I samotná výroba PAN vláken je velmi složitá a komplexní záležitost, jak popisuje video [5]. Uhlíková vlákna se pak vyrábí postupnou karbonizací. V první fázi dochází k oxidační stabilizaci za zvýšených teplot 200–300 °C pod mechanickým napětím a za přístupu vzduchu. Tímto přechází původní termoplastická struktura nově na strukturu termosetickou, díky čemuž nedochází k tavení a ztrátě tvaru vláken při vysokých teplotách. Následujícím krokem je nízkoteplotní karbonizace v inertní atmosféře při teplotách do 1600 °C a produktem je vlákno o složení 93–95 % uhlíku. Nazývají se vysokopevnostní uhlíková vlákna (HS = high strength). Ve většině případů je toto finální krok výroby. [6]



Obr. 2 Výroba uhlíkových vláken, upraveno dle [7].

Proces však může pokračovat opětovným zahřátím na teploty 2200–3000 °C. Tento volitelný krok se nazývá vysokoteplotní karbonizace a umožňuje získat vlákna o ještě vyšším podílu uhlíku až 99% a ještě vyšších hodnotách modulu pružnosti. Proto bývají označována jako vlákna vysokomodulová (HM = high modulus). [7] Ovšem vysoký modul pružnosti také znamená, že jsou vlákna křehčí, což omezuje technologie dalšího zpracování a do jisté míry i oblast jejich využití. Vzhledem k náročnějšímu procesu jsou i cenově nákladnější. [6]

Z pitchových vláken se podobným způsobem vyrábí ultravysokomodulová vlákna (UHM = ultra high modulus). Jejich křehkost je však ještě vyšší než u HM vláken a nelze je použít ani na tkaniny. Důležité je také zmínit, že toto názvosloví se může v mnohých případech lišit a z toho důvodu je vždy dobré se řídit dle daných mechanických vlastností.

Provedení uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se dodávají v různých provedeních. Výběr daného provedení závisí dle zvolené technologie výroby kompozitních dílů. Uvedeny jsou nejčastější z nich.

a) rovingy

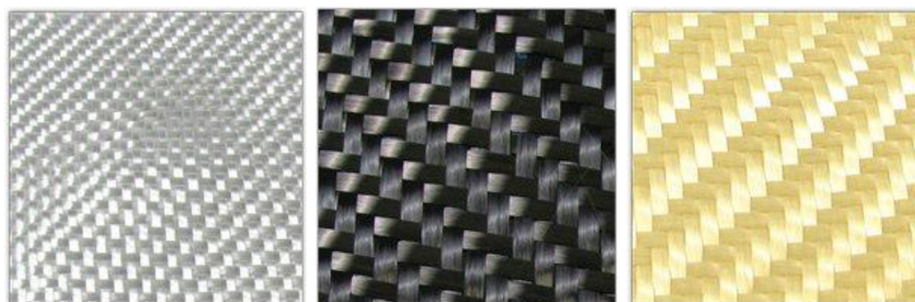
Rovingy jsou nejjednodušší typ vláken, kdy se jedná o sdružená vlákna v pramenci stočená v cívkách, viz obr. 3. Podle počtu vláken (filamentů) v jednom pramenci rozlišujeme 3k, 6k, 12k nebo 24k (24k = jeden pramenec tvoří 24 tisíc vláken). Rovingy tvoří základ pro výrobu tkanin a prepregů a přímo se využívají v technologii navíjení.



Obr. 3 Roving [8].

b) tkaniny

Dalším příkladem jsou tkaniny (viz obr. 4). Jak již bylo nastíněno, jedná se o vzájemně spletené snopce vláken. Stejně jako v textilním průmyslu i zde existuje celá řada typů vazeb, kde nejčastější vazbu tvoří vazba keprová (twill). Jako další lze uvést vazbu plátňovou nebo atlasovou. Suché tkaniny nachází nejčastěji využití v technologiích jako je infuze pryskyřic a důležitou roli hrají u předimpregnovaných tkanin, prepregů.



Obr. 4 Tkanina ze skelných, uhlíkových a aramidových vláken. [9]

c) prepregy

Technologie jako vytvrzování v autoklávu nebo lisování za tepla pak výhradně využívá již předimpregnovaných tkanin označovaných pod pojmem prepregy, viz obr. 5. Tato kombinace vytváří ideální volbu pro aplikace, u kterých je snaha dosáhnout co nejvyšších pevnostních vlastností. Na rozdíl od metod ručního nebo vakuového prosvycování se dosahuje dvou hlavních výhod, a to velmi nízkého obsahu vzduchových bublin a ideálního poměrového složení mezi výztuží a pojivem. To přináší větší celistvost vyrobeného dílu, jenž se odráží i ve vyšší pevnosti. Použití prepregů zároveň výrazně zjednodušuje a zkracuje výrobní časy. [10]

Předimpregnování eliminuje složitý proces prosycování vláken v rámci výroby daného dílu, jenž má velký vliv na kvalitu a vlastnosti budoucího výrobku. Provádí se za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek na speciálních zařízeních. Tímto způsobem se připravují různé druhy prepregů v závislosti na orientaci vláken, ať už jednosměrné nebo častěji používanější prepregy z různých druhů tkanin, u kterých dále hraje roli šířka jednotlivých snopců. Prepreg se zpravidla dodává ve svitcích podle velikosti, uložený mezi ochrannými vrstvami zabezpečujícími vzájemné slepení.



Obr. 5 Prepreg [11].

Skladování a distribuce závisí na typu pojiva. Pokud se jedná o prepreg s termosetickým pojivem, musí se až do doby dalšího zpracování uchovávat v chladu při teplotách pod bodem mrazu, cca do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nutnost skladování při takto nízkých teplotách souvisí s vytvrzovacím cyklem. U termosetických pojiv totiž dochází k postupnému vytvrzování i při pokojových teplotách vlivem přirozené polymerizace a zmražením se tomuto jevu dá částečně zabránit. Vytvrzení přírodní polymerizací dodává jen zlomek pevnosti oproti polymerizaci umělé za kontrolovaných podmínek. Udává se proto celková doba nutná do spotřebování materiálu (trvanlivost) a označuje se pod pojmem „shelf life“. Obvykle se uvádí v řádech týdnů nebo několika měsíců.

1.1.2 Skelná vlákna

Průměr skelných vláken se pohybuje od $3,5$ do $24\text{ }\mu\text{m}$. [1] Vyrábí se v řadě provedení dle použití (v kompozitním odvětví se nejčastěji používají E-glass a S-glass). Jednotlivé typy mají různé mechanické vlastnosti a rozhodujícím faktorem je chemické složení. Na rozdíl od uhlíkových vláken, kde hlavní stavební prvek tvoří uhlík, se u skelných vláken objevuje celá škála komponent. Největší procento zastupuje oxid siřičitý (SiO_2), v menší míře potom oxid hlinitý (Al_2O_3), oxid vápenatý (CaO) a další.

Tab. 1 Chemické složení dle hmotnostního % [12].

Typ	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	B_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
E-glass	55,0	14,0	0,2	7,0	22,0	1,0	0,5	0,3
S-glass	65,0	25,0	-	-	-	10,0	-	-

Jedním z dalších rozdílů ve srovnání s uhlíkovými vlákny je izotropie skelných vláken, tedy shodné vlastnosti v příčném i podélném směru. Z konstrukčního hlediska pak hraje významný vliv tuhost vláken. Modul pružnosti je podobný jako u hliníku a výrazně menší než u uhlíkových vláken. Proto například můžeme sledovat ztlačení křidel větroňů, která se vyrábí právě ze skelných kompozitů. Naopak pevnost v tahu je srovnatelná s uhlíkovými vlákny. Proto pokud aplikace nevyžaduje velmi tuhou konstrukci, stává se často rozhodujícím ukazatelem cena materiálu, která je ve srovnání s uhlíkovými vlákny několikanásobně nižší.

Vyrábí se tažením z roztavené skloviny připravené v platinových pecích. Tažením se ztenčí na požadovaný průměr. Na čerstvě vyrobená vlákna se nanáší ochranná vodní emulze, která brání vlákno před oxidací, zvyšuje chemickou odolnost a zároveň zvyšuje adhezi a smáčivost vláken s matricí. [1] Stejně jako uhlíková vlákna se dodávají ve formě rovingů, tkanin a prepregů. Často navíc jako rohože, což jsou náhodně uspořádaná vlákna a mohou být kontinuální nebo sekané.

Možná je i kombinace uhlíkových a skelných vláken, avšak ne vždy je to výhodné. Vyšší hodnoty poměrného prodloužení u skelných vláken znamenají, že při tahovém zatížení přenáší napětí pouze vrstva uhlíkových vláken, zatímco skelná má tendenci se dále prodlužovat a napětí nepřenáší. Z toho důvodu význam této kombinace s uhlíkovými vlákny je omezený, ale může například spočívat v aplikaci skelných vláken jako deformační zóny zmírňující dopad havárie.

1.1.3 Ostatní vlákna

Uhlíková a skelná vlákna jsou nejrozšířenější druhy vláken, existuje však mnoho dalších. Většinou se jedná o vlákna se specifickými vlastnostmi a využitím.

Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou známější pod svým obchodním názvem kevlar. Odtud také neprůstřelné kevlarové vesty, kde se používají díky svým tlumícím schopnostem. Mají nízkou pevnost v tlaku a jsou silně hydrofilní. Stejně jako uhlíková vlákna jsou anizotropní. Ve spojení s uhlíkovými vlákny se také používají jako hybridní tkaniny.

Dyneema®

Jedná se o polyethylenová vlákna s vysokou pevností, houževnatostí a odolností proti nárazu a abrazi. Používají se pro výrobu vysokopevnostních lan. Tvoří vhodnou kombinaci s uhlíkovými vlákny, kde tlumí nárazy a otřesy. Jejich další využití je i v outdoorovém vybavení. [13]

Innegra®

Polypropylenová vlákna s podobnými vlastnostmi jako výše uvedená vlákna Dyneema®, tedy pevná, houževnatá a odolná proti nárazu. Podobně jako kevlar se využívají k vytvoření hybridních tkanin s uhlíkovými vlákny, toto spojení je však lehčí a silnější. Zajímavostí je, že Innegra® vlákna v hybridní tkanině zůstávají bílá. [14]

Bazaltová vlákna (čedičová)

Pevná a ohebná vlákna, která v určitých případech mohou nahrazovat vlákna skelná. Hlavní výhodou je jejich nehořlavost, teplotní stálost a chemická odolnost. Vyrábí se především jako tkaniny a nachází uplatnění v různých technických odvětvích. [15]

Přírodní vlákna

Z přírodních vláken se využívají hlavně lněná, konopná a jutová.

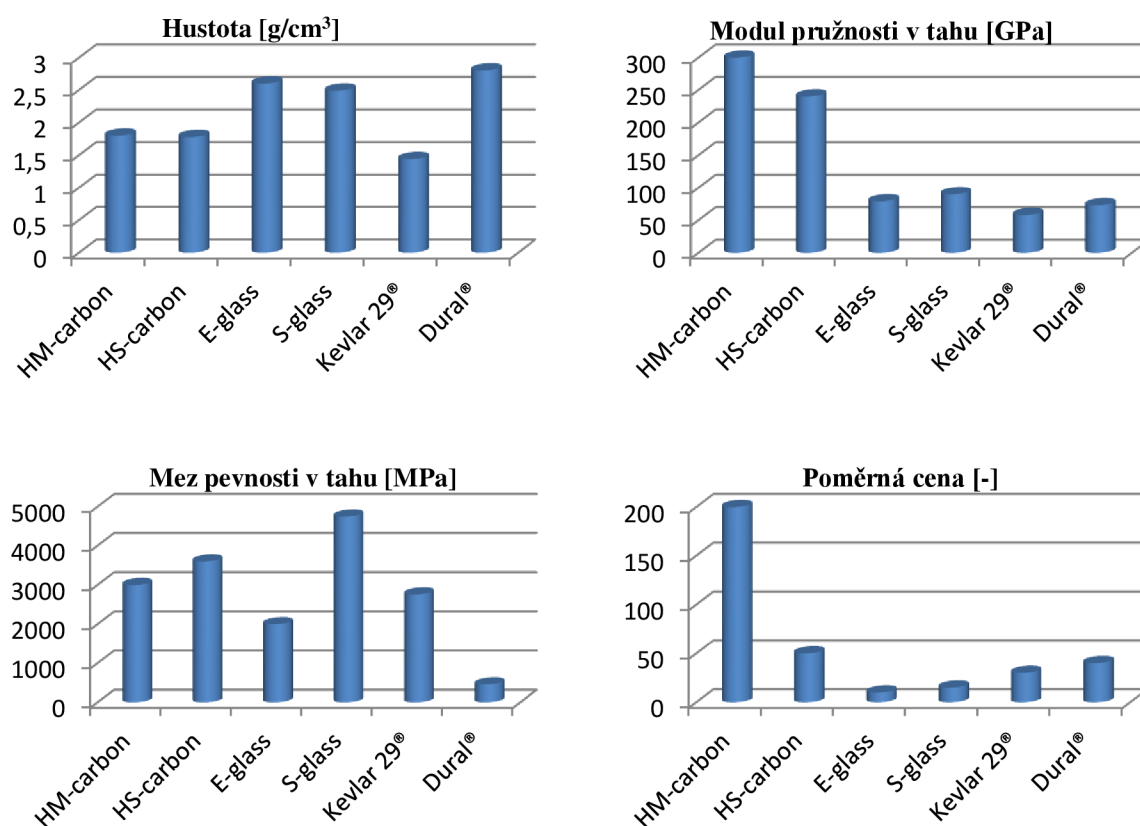
1.2 Shrnutí vláken

Volba typu vláken závisí na komplexním posouzení dané aplikace. Hlavními faktory jsou typ a velikost zatížení, potřebná tuhost konstrukce nebo koeficient bezpečnosti, který se nepřímo odráží i v pořizovací ceně. Informace uvedené v předchozích kapitolách shrnuje následující tabulka, která kromě uhlíkových a skelných vláken uvádí pro porovnání i slitinu hliníku dural.

Tab. 2: Vlastnosti vybraných materiálů [1] [16] [17].

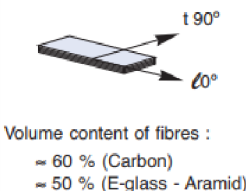

















Materiál	ρ [g/cm ³]	E [GPa]	R _m [MPa]	A [%]	α [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]
HM-carbon	1,8	300	3000	1	-1,2
HS-carbon	1,78	240	3600	1,5	-1
E-glass	2,6	72–85	2000	4,8	5
S-glass	2,49	86–93	4750	5,7	2,9
Kevlar 29®	1,44	58	2760	3,7	-2
Dural®	2,8	73	420-500	≤22	22,5

Uhlíková a aramidová vlákna vykazují silnou anizotropii, uvedené hodnoty modulu pružnosti a koeficientu teplotní roztažnosti odpovídají směru rovnoběžně s vlákny. Data z tabulky jsou pro názornost zaznamenány do sloupcových grafů, viz obr. 6. Poměrné ceny materiálů jsou pouze orientační a mohou se lišit.



Obr. 6 Srovnání vybraných vlastností.

Pro reálné aplikace však mají větší vypovídající hodnotu mechanické vlastnosti již finálních kompozitních materiálů, tj. určitého poměru výztuže a pojiva. Tyto mechanické vlastnosti popisuje například tabulka společnosti Hexcel [18], viz obr. 7 a uvádí hodnoty platné pro kompozity s epoxidovou maticí.

				FIBRES							
		UNITS	E-GLASS		ARAMID		HIGH STRENGTH CARBON		INTERMEDIATE MODULUS CARBON		
			UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric	
 <p>Volume content of fibres : = 60 % (Carbon) = 50 % (E-glass - Aramid)</p>		σ_l  MPa	1100	600	1100	500	2000	800	2400	900	
		σ_t  MPa	35	550	35	450	80	750	80	850	
		E_l  GPa	43	20	60	30	130	70	170	90	
		E_t  GPa	8	19	8	30	9	65	9	90	
		Poisson's ratio ν_{lt}		0.28	0.13	0.34	0.2	0.25	0.05	0.27	0.05
Compression 	σ_l  MPa	900	550	250	150	1300	700	1600	800		
	σ_t  MPa	150	500	150	150	250	650	250	750		
	E_l  GPa	42	17	75	31	115	60	150	80		
	E_t  GPa	10	16	5.5	30	10	55	11	75		
Flexural 	σ_l  MPa	1200	700	550	400	1800	1000	1400	1200		
	E_l  GPa	42	20	40	25	120	65	140	75		
In-plane shear 	σ_{lt}  MPa	60	55	45	40	95	80	95	80		
	G_{lt} GPa	4	4.2	2.1	4	4.4	5.5	4.4	5		
Interlaminar shear 	σ  MPa	75	50	60	50	80	70	80	70		

Obr. 7 Hodnoty vybraných kompozitních materiálů a jejich tkanin. [18]

1.3 Pojivo

Pojivo neboli matrice udržuje vyztužující vlákna v požadované poloze, zajišťuje mezi vlákny rovnoměrný přenos sil a dodává materiálu potřebné fyzikální a chemické vlastnosti (elektroizolační, tepelné, chemické, apod.) Abychom plně využili jejich potenciál, je třeba zabezpečit co nejlepší adhezi mezi vlákny a matricí. Čím dokonaleji jsou vlákna smočena pojivem, tím lepších mechanických vlastností lze dosáhnout. Povrch se proto po výrobě chemicky upravuje (tzv. apretace), aby se na rozhraní mezi matricí a vlákny vytvořily pevné chemické vazby [1]. V závislosti na chemické struktuře potom rozlišujeme matrice termosetické (reaktivní) a termoplastické.

Termoplastické

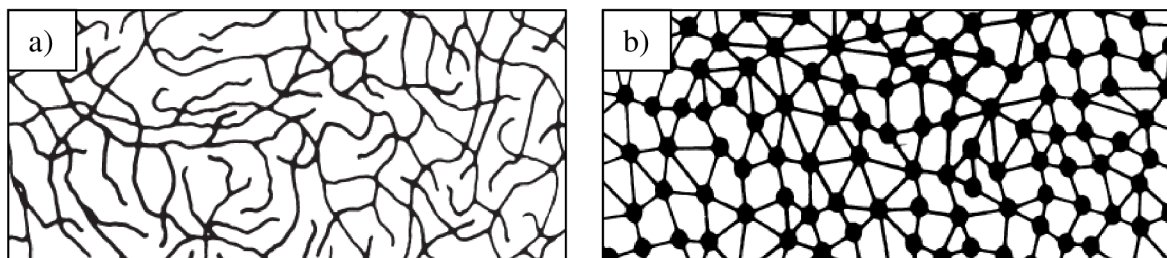
- polypropylen (PP)
- polystyren (PS)
- polyetylen (PE)
- polyamid (PA)

Termoplasty se skládají z různě dlouhých a různě orientovaných molekulových řetězců, obr. 8 a). To způsobuje, že termoplasty jsou ve výchozím stavu pevné a neformné [19]. Po zahřátí je lze tvarovat, při čemž dochází pouze k fázové přeměně (roztavení a ztuhnutí matrice), nikoli vytvrzení (přestože může dojít k mírnému nárůstu mechanických vlastností). Tento cyklus je opakovatelný. Kvůli výše zmíněným vlastnostem se však termoplasty používají jen v omezené míře. Používají se například pro výrobu preformů. [1]

Termosetické

- nenasycené polyesterové (UP-R)
- vinylesterové (VE-R)
- epoxidové (EP-R)
- fenolické (P-R)

Mnohem častěji se setkáváme s kategorií matric termosetických. Ty jsou také tvořeny molekulovými řetězci, avšak se síťovanou strukturou (cross-linking), obr. 8 b). Soudržnost a formování těchto řetězců se uskutečňuje vlivem chemických vazeb. Na rozdíl od termoplastů jsou ve výchozím tvaru poddajné a tvarovatelné, což je výhodné zejména při zpracování a také z hlediska smáčelnivosti vláken. Vytvrzují se vlivem zvýšené teploty, UV zářením nebo pomocí katalyzátorů a tužidel, čímž dochází k tvorbě zmiňované polymerní prostorové sítě. Po vytvrzení zůstávají v tuhé fázi a i při zahřátí drží tvar, čímž se zvyšuje odolnost vůči tečení (creepu). Zároveň se po vytvrzení výrazně zvýší jejich mechanické vlastnosti. Tyto výsledné vlastnosti jsou ovlivněny typem vytvrzování. [19]



Obr. 8 Struktura [26]: a) termoplastu b) termosetu.

1.3.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Nenasycené polyesterové pryskyřice se řadí do skupiny termosetů. Pryskyřice mají vyvážené mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Obvykle se používají v kombinaci se skelnými výztužemi. Balancováním obsahu styrenu lze ovlivnit viskozitu, přidáním aditiv nebo druhem katalyzátoru lze dosáhnout ohnivzdorných nebo samozhášivých vlastností, podobně jako je možné ovlivnit výsledné elektrické nebo mechanické vlastnosti. Pryskyřici je potřeba zcela vytvrdit a zamezit přístupu vzduchu, jinak by plochy zůstaly lepivé. [1] Z hlediska chemické odolnosti je potřeba předem znát chemické prostředí, ob stojí v mírně alkalických a velmi dobře v mírně kyselých podmínkách. [20]

1.3.2 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice se opět řadí do skupiny termosetů. Mají výborné vlastnosti (mnohem lepší než UP-R) a používají se nejčastěji v kombinaci s kvalitními výztuhami, jako jsou uhlíkové nebo karbon-kevlarové tkaniny [20]. Typem tvrdidla a přidáním aditiv může být opět dosaženo specifických vlastností. Dobré mechanické vlastnosti se odvíjí od dobré smáčelnivosti (pryskyřice dobře zatéká mezi vlákna) a malé tendenci tvořit vzduchové bubliny. Epoxidové pryskyřice jsou vhodné i pro dynamicky namáhané součásti. [1] Protože se vyrábí i epoxidová lepidla, není překvapením, že disponují dobrou přilnavostí.

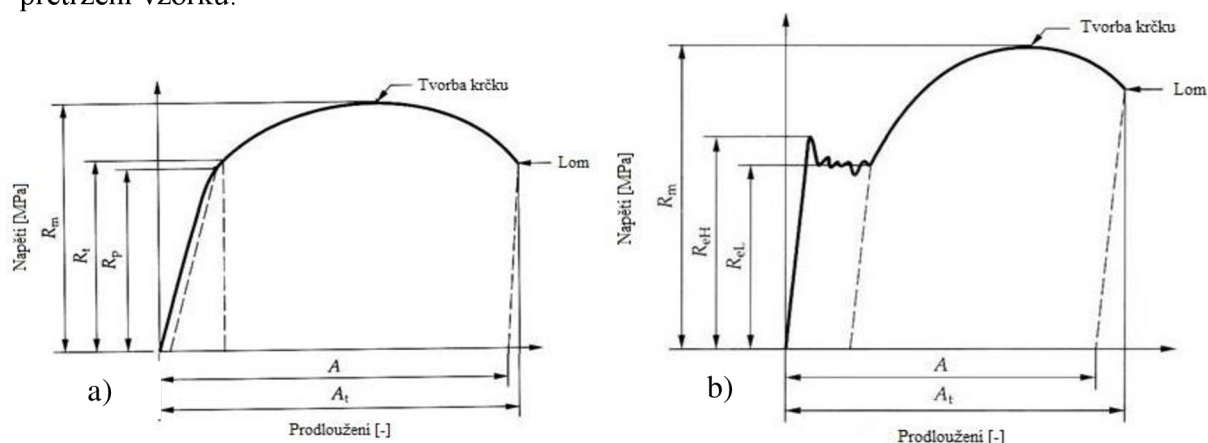
2 SROVNÁNÍ S KOVOVÝMI MATERIÁLY

Při srovnání kovových a kompozitních materiálů najdeme jen velmi málo společných rysů, liší se takřka ve všech ohledech. Vykazují odlišné mechanické vlastnosti, rozdílné mechanismy deformace, jinak odolávají vlivům okolního prostředí a samozřejmě i výroba je zcela odlišná.

2.1 Mechanické vlastnosti

K porovnání mechanických vlastností je důležité znát rozdíl mezi mechanickými veličinami, které slouží k jejich popisu. Mezi základní patří pevnost a tuhost materiálu. Pevností materiálu rozumíme schopnost odolávat silovému zatížení. Působením tahového napětí dojde při překročení určité mezní hodnoty k přetržení vzorku. Velikost této síly označujeme jako mez pevnosti v tahu R_m . Naopak tuhost materiálu vyjadřuje schopnost odolávat deformaci. Míru této schopnosti popisuje Youngův modul pružnosti v tahu E . Je také důležité zmínit, že tyto veličiny spolu nekorespondují, existují materiály s vysokou tuhostí a nízkou pevností a naopak. K popisu deformace pak slouží Poissonova konstanta definovaná jako poměr deformace příčné a podélné.

Vlastnosti kovových materiálů jsou izotropní (stejně ve všech směrech), což zjednodušuje jejich popis. Z jedné tahové zkoušky jsme schopni zjistit řadu parametrů, jako je smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ ocelí s nevýraznou mezí kluzu, viz obr. 9 a), horní a dolní mez kluzu R_{eH}/R_{eL} ocelí s výraznou mezí kluzu, viz obr. 9 b), mez pevnosti R_m nebo Youngův modul pružnosti v tahu E . Do meze kluzu se projevuje pouze elastická deformace, po jejím překonání pak současně i plastická deformace a při dosažení napětí odpovídající mezi pevnosti pak dochází k tvorbě krčku (trojosá napjatost) a následnému přetržení vzorku.

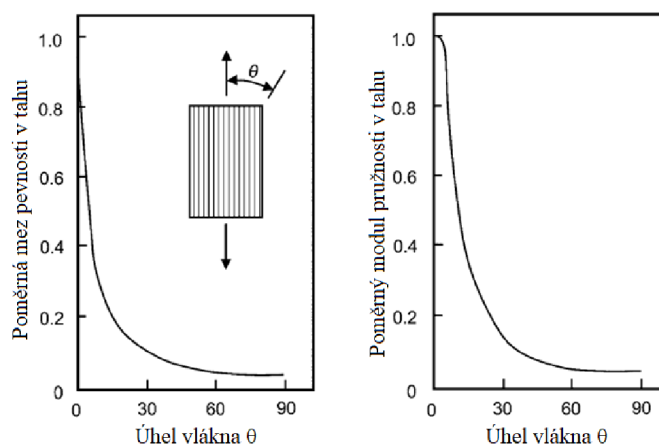


Obr. 9 Tahový diagram ocelí: upraveno dle [29].

a) s nevýraznou b) s výraznou mezí kluzu

Naopak kompozitní materiály izotropii nevykazují, jejich mechanické vlastnosti se výrazně mění v závislosti na směru vláken. Mechanické veličiny je tím pádem potřeba definovat v jednotlivých směrech, a to minimálně ve směru příčném a podélném. Obtížnější je tak definovat i počáteční podmínky mechanických výpočtů. Na druhou stranu právě díky tomu můžeme u kompozitních materiálů vlastnosti v určitém rozsahu korigovat. Vhodným konstrukčním řešením můžeme díl zesílit ve směru hlavního zatížení a naopak zeslabit ve směru nezatíženém. Takovým způsobem vznikají díly přesně na míru podle dané potřeby. O to větší pozornost je však nutno věnovat výslednému směru a velikosti zatížení namáhané součásti.

Nejvyšší pevnosti dosahují kompozity ve směru vláken, kdy je úhel θ roven 0° viz obr. 10. Zatěžováním dochází k postupnému nárůstu napětí až do kritické hodnoty, kdy se vzorek přetrhne. Nesledujeme výraznou elastickou ani plastickou deformaci, jako tomu bylo u kovů a mez kluzu přibližně odpovídá i mezi pevnosti. Jinak tomu je v případě zatížení kolmo na vlákna, kdy je síla potřebná k deformaci vzorku mnohem menší, protože vlákna nepřenášejí žádné zatížení a materiál drží pohromadě pouze pojivo, které vykazuje pouze zlomek pevnosti vláken. [6]



Obr. 10 Závislost pevnosti na úhlu směru vláken, upraveno dle [7].

Tyto rozdíly spočívají v odlišných mechanismech deformace. Kovy mají možnost deformovat se elasticky roztahováním a stlačováním vazeb krystalické mřížky. Plastická deformace je řízena mechanismy jako je pohyb dislokací (BCC, FCC mřížka) nebo dvojčatění (HCP mřížka). Oproti tomu kompozity jsou mnohem tužší (mají vyšší modul pružnosti), k plastické deformaci u nich nedochází a přetržení vzorku je náhlé. Z typů deformace se projevuje především delaminace, neboli vzájemné oddělování jednotlivých vrstev. Dochází tak k porušení nejslabší části kompozitu a to pojivové vrstvy. Nejčastější příčinou je vliv rázového namáhání. Delaminace je nebezpečný jev, protože může vznikat i pod povrchem materiálu a nemusí být na první pohled patrná.

2.2 Odolnost vůči únavě a rázům

Jednou z výrazných pozitiv kompozitních materiálů je jejich únavová odolnost. Uhlíková vlákna a lehké kovy jako hliník a titan jsou konkurenčními materiály v mnohých odvětvích. Právě odolnost vůči únavě může hrát rozhodující roli, která v tomto případě hraje ve prospěch kompozitů. Tento fakt například potvrzuje test cyklistických řídítek z kanálu společnosti GCN. V tomto videu [21] se dozvíme, že za stejných zatěžujících podmínek odolává karbon statisticky 600–800 tisícům cyklů, čímž převyšuje stanovenou normu a překonává tak i hodnoty hliníkové slitiny pohybující se mezi 450–500 tisíci cykly. Odůvodněním je mechanismus šíření trhlin. U kovů vlivem cyklického zatěžování vznikají mikrotrhliny, v kořenu trhliny se tvoří koncentrátor napětí a trhлина se postupně šíří materiálem až do kritického bodu, kdy dojde k přelomení součásti za mnohem menší hodnoty napětí než je napětí statické. Zatímco u kompozitů působí jednotlivá vlákna a vrstvy jako bariéry nutné k překonání a šíření trhlin tak úspěšně brání.

Věnujme pozornost také druhé části zmíněného videa [21], ve které jsou vedle únavových testů podstoupeny i rázové testy. V testu byly oba vzorky vystaveny rázové síle padající zátěže o hmotnosti 5,8 kg na každé ze stran řídítek. Výška byla stupňována a test názorně předvedl, že rázové namáhání je obecně slabinou kompozitních materiálů. Ačkoli bylo dosaženo nadmíru dostačujících výsledků, absence plastické deformace u kompozitů je klíčovým faktorem, proč je v některých aplikacích lepší volit materiály kovové. Přestože i kompozity dokáží vydržet až překvapivě vysoké hodnoty nárazové práce, za extrémních podmínek dojde s větší pravděpodobností k lomu součásti a zcela ztrácí svoji funkci.

2.3 Vliv okolního prostředí

Kovové materiály jsou náchylné na širokou škálu okolních podmínek. Také proto existuje mnoho různých skupin, zpracování a tepelných úprav, které mají za úkol se s danou problematikou vypořádat. U kompozitů se jedná zejména o tři druhy okolních vlivů, které mohou negativně ovlivnit strukturu a vlastnosti součásti, tj. vlhkost, teplota a UV záření.

Teplota a vlhkost

Materiál degraduje, pokud je dlouhodobě vystaven vysoké teplotě. Do teploty 300 °C nedochází u uhlíkových vláken k prakticky žádné změně mechanických vlastností, naopak znatelný pokles je zaznamenán zejména u aramidových a částečně skelných vláken. Problém navíc může způsobit směrově rozdílný koeficient teplotní roztažnosti, způsobující zbytková napětí a nežádoucí deformace. Teplotní hranice kompozitů jsou však dány především materiálem matric a zvláště kombinace zvýšené teploty a vlhkosti může negativně ovlivnit jejich pevnostní vlastnosti. Z vláken samotných pak vlhkosti podléhají například vlákna uhlíková a aramidová.

Chemická a galvanická koroze

Významnou roli hraje i fakt, že oproti kovům nedochází u kompozitů k chemické korozi. Může nastat pouze případ galvanické koroze vlivem rozdílu potenciálů, obzvláště ve vlhkém a slaném prostředí. Galvanická koroze je důvodem, proč se v například v letectví nesmí použít kombinace uhlíkových kompozitů s ocelí nebo slitinami hliníku a hořčíku. Namísto toho je nutno použít spoje titanové. Celkově je však u kompozitů výhodnější eliminovat počet šroubových nebo nýtovaných spojů, pokud to konstrukce umožňuje. Taková místa konstrukci často oslabují a působí jako vruby. Mnohem častěji se u kompozitů setkáváme se spoji lepenými nebo spečenými.

Elektrická vodivost

Karbon je vodič, ale dokáže vést pouze statickou elektřinu. U letadel se ke zlepšení elektrické vodivosti přidávají kovové mezivrstvy, aby se při úderu blesku zachovala kostra letadla jako Faradayova klec. Tím však opět narůstá hmotnost, výzkum tak směřuje i cestou kovových nanopřísad, zatím však s nedostatečnými výsledky. [6]

3 TECHNOLOGIE VÝROBY

Existuje mnoho různých technologií výroby. Některé vychází z metod výroby plastů, většinou se však jedná o specifickou výrobu spojenou právě s problematikou kompozitních materiálů. Zvolená technologie má přímý dopad na výslednou kvalitu a odvíjí se zejména od tvaru součásti a její aplikace. Výroba dílů často zahrnuje využití určitého druhu formy k vytvoření požadovaného tvaru, jenž si kompozit udrží po jeho vytvrzení. I k vytvrzení součásti existuje několik možných přístupů. Nejjednodušší varianta je reaktivní vytvrzování chemickou reakcí dvousložkové směsi, kdy stačí smíchat pryskyřici s náležitým tužidlem nebo katalyzátorem. Součást pak stačí nechat vytvrdit za pokojové teploty. Jedná se však o poměrně zdlouhavý proces. Urychlení lze dosáhnout působením zvýšené teploty, například v peci.

Mezi další odlišující se prvky můžeme zařadit způsob sycení vláken. Nejjednodušším, a zároveň nejméně efektivním způsobem je ruční sycení. Tento způsob výroby se potýká s nejvyšší koncentrací vzduchových bublin a pórů, čemuž se při výrobě kompozitních dílů chceme co nejvíce vyvarovat. Proto se mezi častější metody využívá sycení tkaniny pomocí vakua nebo tlakového vstřikování. Sycení tkaniny se ale můžeme zcela vyhnout pořízením již předimpregnované tkaniny označované jako prepreg.

Karbonová textura na povrchu součásti však nemusí vždy znamenat, že je z karbonu vyroben celý díl. Někdy se využívá proces označovaný jako skinning, tedy nanesení karbonové vrstvy na povrch již vyhotoveného dílu za cílem renovace nebo estetického dojmu. Zjednodušeně řečeno se jedná o lepení tkaniny na mechanicky nebo jinak zdrsňený díl, sycení pryskyřicí, vytvrzování a broušení.

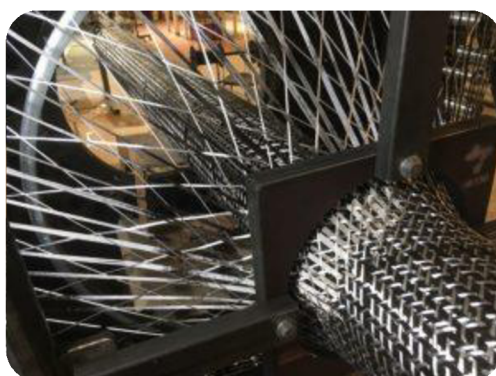
3.1 Ruční kladení

Ruční kladení patří k nejstarším metodám výroby kompozitních dílů. Jedná se o nenáročnou metodu vhodnou pro výrobu prototypů. Mezi metodu ručního kladení se řadí tradiční technika mokrého kladení (wet lay-up) nebo modernější technika kladení prepregů. Mokré kladení spočívá v ručním vrstvení suché výztuže včetně ruční impregnace pryskyřicí. Pro impregnaci pryskyřice postačí obyčejný štětec nebo váleček. Společným znakem takřka všech metod je ošetření formy separačním činidlem před zahájením procesu kladení, aby bylo umožněno snadné vyjmutí hotového vytvrzeného dílu. K vytvrzení může dojít buďto za pokojové teploty smícháním pryskyřice s tužidlem / katalyzátorem nebo uměle v peci. Nevýhodou metody je velký podíl matrice a množství vzduchových bublinek uvězněných ve struktuře spolu s poměrně vysokou nehomogenitou dílu. Uzavřením prosyceného dílu v poslední fázi výroby do vakuového pytle a odsáním vzduchu pomocí vakuové pumpy můžeme jejich množství snížit, přesto však nedosáhneme převratných výsledků jako u pokročilejších metod výroby. [6]

3.2 Navíjení

Principem metody je souvislé navíjení pramene uhlíkových vláken na otáčející se trn. Souběžně dochází k impregnaci vláken přes vanu s pryskyřicí. Tímto způsobem se vyrábí různé druhy trubek a dutých rotačních součástí, mimo jiné i lyžařské hůlky nebo rybářské pruty. Automatizovatelné strojové navíjení s předpětím umožňuje výrobu i proměnného tvaru, velikostí a požadovaných orientací vláken k dosažení cílených pevnostních parametrů. Poměrem rychlosti otáčení trnu a posunem ukládacího zařízení lze regulovat úhel náviny. Po dokončení navíjení se díl vytvrzuje i s jádrem při neustálé rotaci. Otáčející se trn bývá rozebíratelný a vyjímatelný, ale může po skončení procesu zůstat součástí dílu.

Výhodou metody je použití levné formy výztuže, rovingů, na druhou stranu pořizovací náklady složitých navíjecích strojů jsou poměrně vysoké. [22] Tato technologie prochází různými inovacemi, setkat se je možné i s komplexním splétáním více pramenů vláken zářaz a mezi sebe, což přináší výhodu ve větší pevnosti a možnosti použití v náročnějších aplikacích. Tato metoda se označuje jako triaxiální splétání vláken (viz obr. 11) a umožňuje přidat vlákno i v rovnoběžném směru s osou dílu. [23] V současnosti technologie navíjení není už jen omezena na rotační díly, ale dokáže zpracovávat i složité a komplexní tvary.



Obr. 11 Triaxiální pletací stroj [23].

3.3 Resin Transfer Moulding

Resin Transfer Moulding (RTM) je metoda, u které existuje několik variací, princip však zůstává stejný. Jedná se o sycení suché tkaniny pojivem v uzavřeném prostoru, tj. vakuovém pytli nebo dvojdílné formě. Ve většině případů se pojivo namíchá jako dvousložková směs pryskyřice a tužidla. Do připravené a ošetřené formy je umístěna suchá tkanina, strhávací vrstva a vrstva usnadňující plynulé proudění namíchané směsi, (tato vrstva bývá označována jako RDM = resin distribution medium). Podle způsobu distribuce pojiva pak mluvíme o klasickém RTM, nízkotlakém LRTM nebo vysokotlakém HP-RTM.

Rozdíly mezi jednotlivými metodami jsou stručně objasněny v instruktážních videích společnosti JHM Technologies, Inc [24]. Základem metody RTM je dvoudílná forma a vytvoření centrálního místa, odkud se pod tlakem vstříkuje pryskyřice. Ta se šíří dál směrem od tohoto místa a postupně prosycuje celou součást až po její okraj. Ke správnému toku a kompletnímu prosycení dílu pryskyřicí je potřeba vhodně navrhnout větrací místa (průduchy), kam má pryskyřice největší tendenci zatékat. Za taková místa se volí například rohy dílu. Tato metoda může mít problémy se zatečením pryskyřice kompletně ke všem okrajům.

Obdobně, avšak na opačném efektu je založena metoda LRTM (Light Resin Transfer Moulding). V tomto případě je pro distribuci pryskyřice vytvořen umělý kanálek po obvodu celého dílu. Na vhodném místě (uprostřed) je umístěn ventil a po vysátí vzduchu vytvořeno vakuum. Po spuštění procesu tak pryskyřice jako první vyplní vytvořený kanálek a postupně pokračuje směrem do středu vyráběného dílu. Obdobně je pak možné umístit ventil k jedné straně dílu a kanálek vytvořit například po zbylých okrajích dílu. V místě vyčerpávání vzduchu je zvykem umístit vhodnou nádobu pro zachycení vzduchových bublin, které mají tendenci prostupovat v čele pryskyřicového toku. Metodu tedy můžeme označit jako určitou modifikaci klasického RTM, která eliminuje vznik neprosycených míst.

Další alternativou je metoda VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding). Rozdílem je použití vaukového pytle místo dvoudílné formy. Přesný postup je například popsán a demonstrován také společností Easy Composites Ltd v jejich instruktážních videích [25].

Vysokotlaké HP-RTM (High Pressure RTM) může využít oba výše zmiňované způsoby toku pryskyřice. Hlavním rozdílem, jak již název napovídá, je využití vysokého tlaku vstřikování. Aby bylo možné působení vysokých tlaků, je zapotřebí i dostatečně pevných forem. Typický materiál forem bývá ocel, případně hliníková slitina. Forma může být kompletně uzavřena, často se však nechává úzká mezera, aby pryskyřice vyplnila díl rychleji. Na závěr procesu se formy dotlačí, čímž vyženou přebytečnou pryskyřici.

3.4 Vytvrzování za tepla

Výrobní postup

Výrobní postup se čítá z několika kroků. Prvním je výroba formy. Formy bývají z kovu nebo kompozitu, prototypové formy pak často z 3D tisknutelných materiálů jako například polykarbonát. Ideální volbou je materiál o stejné teplotní roztažnosti jako vyráběný díl. Protože vrstvy laminátu kopírují tvar formy, je jí dán i požadovaný tvar dílu. Povrch formy by měl být hladký, protože určuje také výslednou kvalitu povrchu dílu.

Následuje položení potřebného počtu vrstev prepregu do formy ošetřené separačním činidlem. Položené vrstvy se následně překryjí separační, případně strhávací vrstvou, zabalí do netkané textilie a vloží do vakuového pytle utěsněného butylovou páskou po obvodu formy. V případě dvoudílné formy se složí spodní a horní část formy a až následně zabalí do netkané textilie a vloží do vakuového pytle. Zapojí se vakuová pumpa a vytvoří podtlak. Pokud provedená kontrola nezjistí únik tlaku, součást je připravena k umístění do pece nebo autoklávu a nechá se vytvrdit.

Vytvrzování v autoklávu

Autokláv je hermeticky uzavřená nádoba umožňující tepelný ohřev za současného tlakového působení. Existují různé druhy jako například lékařské autoklávy pro sterilizaci chirurgických nástrojů. Rozlišovacím znamením je rozsah maximálních tlaků, který se u lékařských autoklávů pohybuje v rozmezí 1-2 bar, u průmyslových až do 10 bar. Z toho důvodu musí průmyslové autoklávy splňovat i vyšší bezpečnostní požadavky a jsou tak i cenově nákladnější. Průmyslový autokláv pro zpracování uhlíkových kompozitů běžně operuje s hodnotami tlaku kolem 6–7 bar. Zobrazen je na obr. 12.

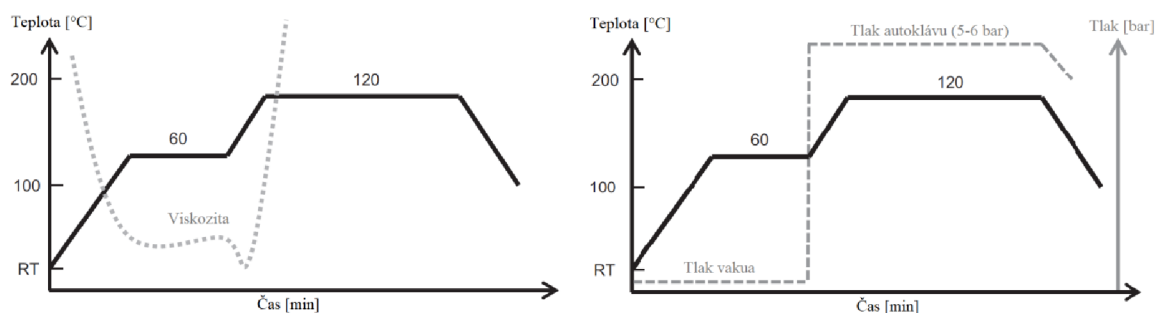


Obr. 12 Autokláv [19].

Tlak je významný faktor pozitivně ovlivňující výsledné mechanické vlastnosti vyrobeného dílu. Působením tlaku dochází k mnohem lepší eliminaci vzduchových bublin a tím i lepší adhezi mezi vlákny a pojivem. Velikost vyráběných dílů je omezena velikostí autoklávu, přesto kvůli jeho důležitosti v leteckém a kosmickém průmyslu se můžeme setkat i s autoklávy o průměru komory až několik metrů. U méně rozměrných součástí se často vytvrzuje několik dílů současně.

Veškeré podmínky uvnitř autoklávu jsou monitorovány a řízeny počítačovým systémem k co největšímu zefektivnění výrobního procesu. Polotovarem jsou zpravidla prepregy, které samy o sobě poskytují velmi nízkou hladinu vzduchových bublin a obsah vláken až 60 %. [19] Kombinace prepregů a autoklávového vytvrzování proto tvoří vhodnou výrobní metodu pro celou řadu možných použití s vysokými mechanickými či tvarovými požadavky.

Průběh teplotního cyklu bývá dvouschodový, viz obr. 13. První izotermická prodleva je na teplotu nižší než teplota vytvrzování. V tento moment má pryskyřice nejmenší viskozitu a dokáže nejlépe zatéct mezi vlákna kompozitu. Doba prodlevy se odvíjí od schopnosti pryskyřice si tuto nízkou viskozitu udržet, než začne houstnout. Tento moment se označuje jako bod gelace. Doba gelace je někdy označována jako doba zpracovatelnosti. Platí nejen pro reaktivní pryskyřice kompozitních matic, ale také pro vícesložková lepidla nebo povlaky. Výška teplot se odvíjí především od typu použité pryskyřice. U uhlíkových kompozitů s epoxidovou pryskyřicí se vytvrzovací teplota pohybuje nejčastěji kolem 120–130 °C. Vyšší teploty se používají spíše v letectví například u fenolických pryskyřic se samozhášivými schopnostmi. U výšky teplot hraje roli i celkový objem a tvar dílů. Aby se dosáhlo rovnoměrného vytvrzení všech přítomných dílů, je vhodné umísťovat objemově a tvarově podobné díly. Důležitý je také rovnoměrný ohřev a chlazení, aby nedocházelo k nežádoucím deformacím.

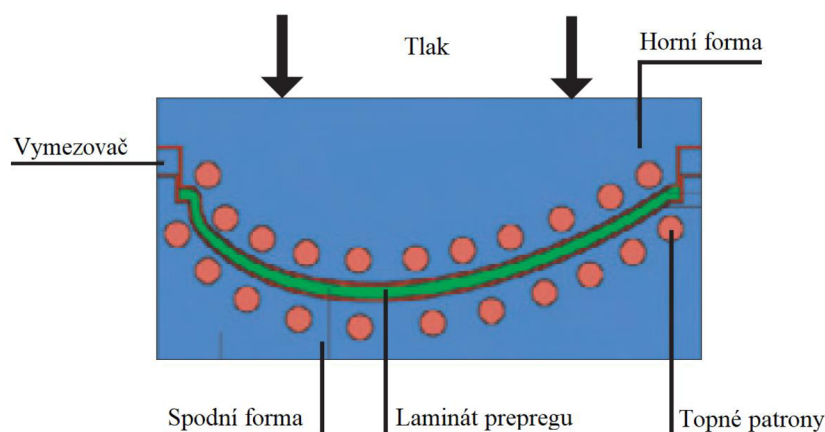


Obr. 13 Cyklus autoklávu; upraveno dle [19].

Hlavní nevýhodou metody jsou vysoké pořizovací náklady. Často však není jiné východisko. Snaha o vývoj metod „out of autoclave“ zatím nepřináší požadované výsledky a pomalu se od nich opouští, jako například strojové navíjení trupů letadel, souběžně vytvrzovaných laserem.

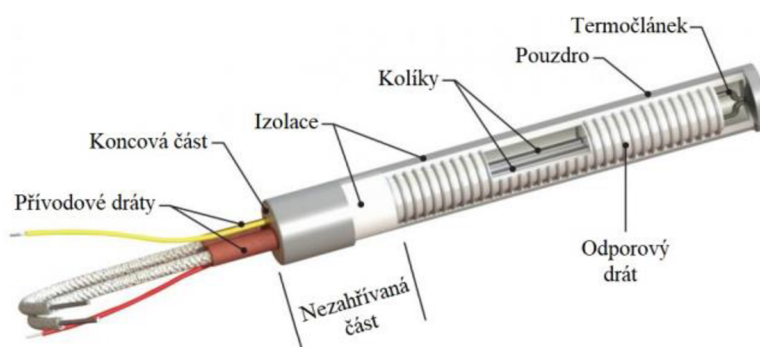
3.5 Lisování za tepla

Metoda lisování za tepla se vyznačuje výrobou dílů s vysokými pevnostními požadavky a užitím výhradně dvoudílných vyhřívaných forem. Pro sériovou výrobu jsou to formy kovové a vyhřívání formy se realizuje nejčastěji pomocí topných patron (viz obr. 15) vhodně umístěných ve vyvrtných otvorech (viz obr. 14). Topné patrony se běžně používají při vytápění vtokových soustav, při vstřikování plastů nebo v obalovém průmyslu. Jedná se o odporové součástky využívající k ohřátí materiálu Joulova tepla a existuje celá řada různých druhů dle provedení, průměru, materiálu, výkonu, apod.



Obr. 14 Příklad vyhřívané dvoudílné forma; upraveno dle [26].

Lisování za tepla může být pro některé aplikace alternativou pro vytvrzování v autoklávu. Společným znakem zůstává použití předimpregnovaných tkanin, kdy se potřebný počet vrstev naskládá do dutiny mezi formami, která určuje výslednou tloušťku dílu. Specifikem jsou však speciální lisovací pryskyřice umožňující mnohem kratší vytvrzovací cykly, obecně v řádu několika minut. Spolu s dvoudílnou formou se tak docílí mnohem intenzivnější přenosu tepla díky přímému kontaktu vyhřívané formy a vyráběného dílu. Spojením těchto dvou aspektů se tak vytvrzovací cyklus významně zkracuje a umožňuje vyšší stupeň automatizace. Samotný teplotní cyklus má pak zpravidla jednoschodový izotermický průběh. Složitější cykly nejsou praktické z hlediska nízké tepelné vodivosti kovových forem.

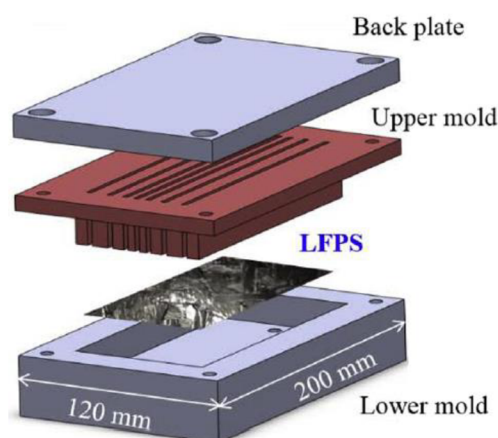


Obr. 15 Topná patrona, upraveno dle [27].

Působením vysokého tlaku lisu na horní část formy dojde ke stlačení dílu, jeho zpevnění a redukci porozity. Ve výsledku tak dostáváme díly s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Obvykle se lisovací tlaky pohybují v rozmezí 30–60 bar. [19] Přítomnost horní a dolní části formy zaručuje výrobu přesných dílů a kvalitního povrchu z obou jeho stran. Kontaktní plochy forem se většinou brousí, zejména při výrobě pohledových dílů je to nutností. Parametry lisovacího procesu jsou snadno kontrolovatelné, což usnadňuje reprodukovatelnost výroby. Protože tvar dílu je pevně spjat i s tvarem formy, nevýhoda nastává v případě nutné rozměrové nebo tvarové změny vyráběných dílů. V mnohých případech je tak potřeba zcela nových forem. V porovnání s pořizovacími náklady na autokláv se však přesto jedná o cenově výhodnou metodu vedoucí k výrobě pevnostně náročných dílů.

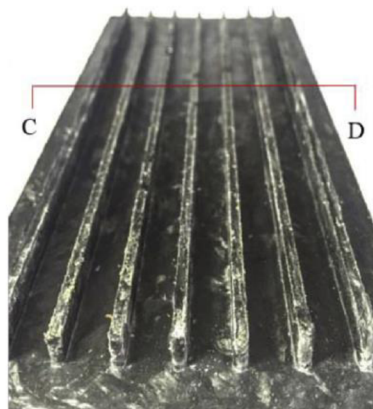
Varianty lisování

Na podobném principu jako je lisování za tepla provedli na School of Mechanical Engineering Seoul experiment lisování žebor (viz obr. 16) z dlouhvláknitého prepregu dosahující maximální délky vláken 50 mm (LFPS - long fiber prepreg sheet) [28]. Společnými rysy jsou použití vysoké teploty (155 °C) a vysokého tlaku (10, 30 a 60 MPa). Pro jednotlivé tlaky byl navíc volen čas 5 a 10 min. Za dané teploty se z výsledků experimentu ukázal jako nejvhodnější parametr tlaku 30 MPa po dobu působení 10 minut. Za těchto podmínek bylo naměřeno nejvyšších hodnot meze pevnosti a modulu pružnosti.



Obr. 16 Lisování žebor. [28]

Působení takto enormně vysokých tlaků má v tomto experimentu své opodstatnění, jelikož záměrem je vznik dlouhých těžko lisovatelných žebrovitých úseků, viz obr. 17.



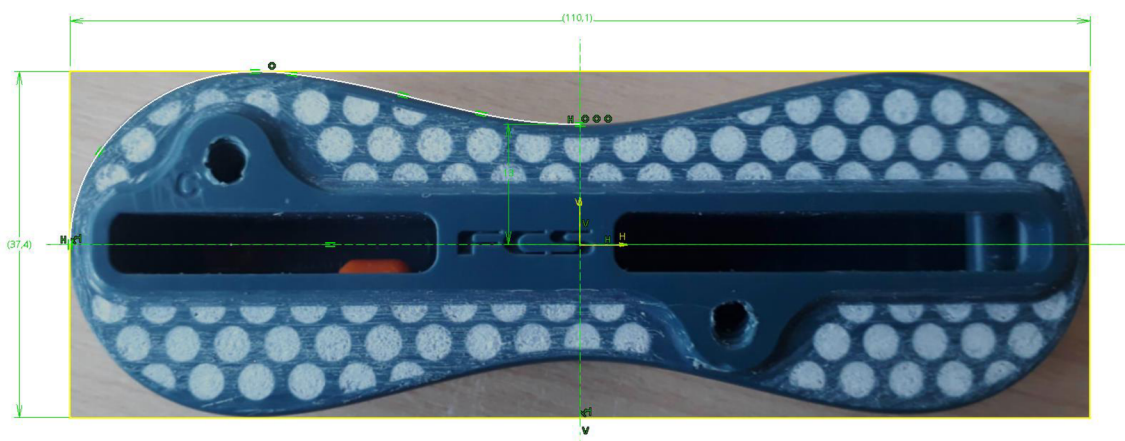
Obr. 17 Výsledná žebra. [28]

4 VÝROBA DÍLU

Úkolem diplomové práce je výroba kompozitního dílu ve spolupráci se společností M.S.R. Engines s.r.o., který je součástí skeletu trupu zařízení Jetsurf®. Předlohou pro výrobu tohoto dílu bylo předání již vyrobené vložky, která je určena k vlepení do vyráběného kompozitního dílu. Její funkce spočívá v uchycení bočních kýlů. Pohled na horní část vložky je uveden na obr. 18.

4.1 Prvotní návrh a modelování

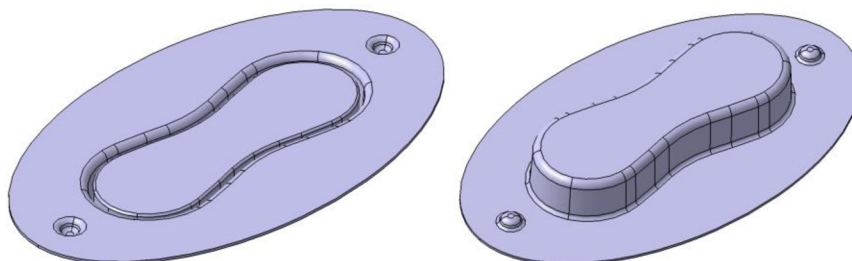
Vložka byla předána bez vlastní výkresové dokumentace. Jedním z prvních úkolů tedy bylo zjistit rozměry této součásti a převést je do CAD modelu. Nejjednodušším krokem se nabízelo odečíst měřitelné rozměry součásti pomocí posuvného měřidla, ale především zaoblené plochy takto nebylo možné přesně změřit. Aby bylo dodrženo co nejpřesnějších rozměrů, byl pořízen fotografický snímek, který posloužil jako reference k vytvoření odpovídajících křivek. Před vložením snímku do modelářského CADu bylo potřeba provést několik úprav, tj. oříznout a změnit velikost snímku tak, aby po vložení odpovídal měřítku 1:1. Výsledek ukazuje obr. 18, kde zelené kóty představují skutečné rozměry naměřené posuvným měřidlem.



Obr. 18 Reference pomocí fotografického snímku vložky.

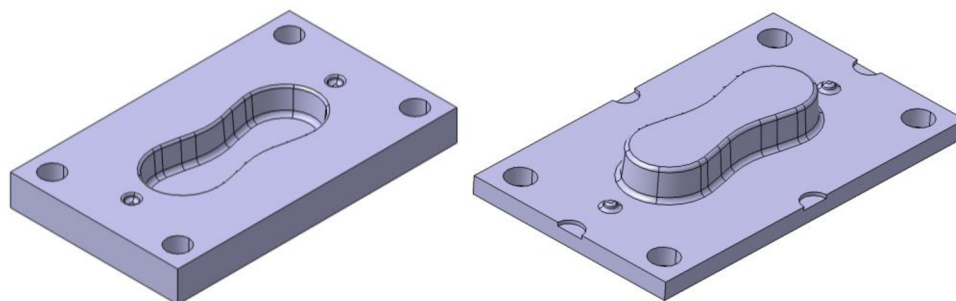
V této fázi byla vytvořena kontura čtvrtiny součásti (viz obr. 18) a následně ozrcadlena podle os X a Y. Tímto způsobem bylo dosaženo finální kontury pro další využití nejen pro model vložky, ale i budoucí tvorbu forem. Svým způsobem by se tento postup dal považovat za velmi zjednodušený postup reverzního inženýrství.

S finální konturou byla nejprve vymodelována samotná vložka sloužící především pro vizuální kontrolu v rámci budoucí sestavy dílu a forem. Následovala tvorba samotného dílu, který byl dimenzován na tloušťku 1 mm. Jako základ byla opět použita zmiňovaná kontura, ale je důležité zdůraznit, že v tomto případě finální kontura musela být offsetem zvětšena, aby bylo dosaženo dostatečné mezery pro nanesení lepidla k vlepení dané vložky. Po vymodelování základního tvaru dílu následovala řada úprav, jako tvorba úkosů a rádiusů. Vyobrazený návrh tohoto dílu je na obr. 19, kde je rovněž patrná výrazná přírubová plocha. I ta má svůj význam, jelikož za tuto plochu bude díl lepen ke skeletu trupu. Již v průběhu rešeršní části práce bylo uvedeno, že mezi nejčastější spoje kompozitních materiálů patří právě lepené spoje, což ani zde není výjimkou. Jakékoli vrtání a šroubové spoje způsobují ve struktuře materiálu nežádoucí vruby a zeslabení konstrukce.



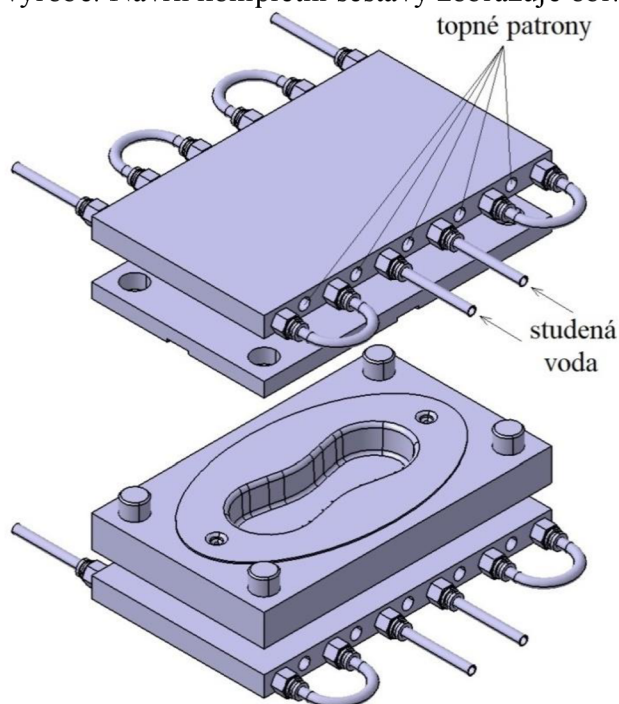
Obr. 19 Model vyráběného kompozitního dílu s vložkou.

Jelikož se diplomová práce zaměřuje na výrobu lisování za tepla, nedílnou součástí tvoří dvoudílná forma. Pro modelování forem bylo využito geometrie zhotoveného dílu. Horní a dolní část této formy zobrazuje obr. 20. Návrh výkresové dokumentace je uveden v příloze. Průchozí díry v každém z jednotlivých rohů jsou určeny pro kolíkové spojení forem.



Obr. 20 Model dolní a horní části formy.

Na spodní straně dolní formy jsou dále patrné zářezy po stranách, které mají umožňovat snazší vzájemné oddělení forem po procesu lisování. Jelikož se jedná o prototypovou výrobu, nejsou součásti formy sofistikovaná řešení jako vyhazovače používané při sériové výrobě. Návrh kompletní sestavy zobrazuje obr. 21.



Obr. 21 Návrh sestavy pro lisování za tepla.

4.2 Prototypová výroba v autoklávu - jednodílná forma

Prototypová výroba v autoklávu byla zařazena ještě před zahájením výroby metodou lisování za tepla, která tvoří hlavní náplň této práce, a poskytuje možnost simulace podobných podmínek. Pomocí jednodílné formy se navíc otestuje, zda byl návrh formy správně vymodelován a výsledný kompozitní díl sedí a lícuje s danou vložkou. Zároveň se jedná o výbornou příležitost, díky které budou k dispozici vzorky pro porovnání výsledných vlastností dílů vyrobených těmito technologiemi.

Výrobní postup

- a) výroba formy
 - 3D tisk polykarbonátové formy
 - broušení
 - separace
- b) nástřih prepregu
- c) laminace
- d) příprava před vakuováním
 - položení separační vrstvy
 - obalení netkanou textilií
 - příprava vakuového pytle
- e) vakuování
- f) kontrola těsnosti vakuového pytle
- g) vytvrzení v autoklávu
- h) vyjmutí vytvrzeného dílu

Výroba polykarbonátové formy

Pro první prototypové kusy byla zvolena výroba pomocí jednodílné formy, tj. formy a vakuového pytle, kdy vakuový pytel zastává funkci protikusu formy. Pro výrobu formy byla zvolena technologie 3D tisku s tiskem na průmyslové 3D tiskárně. Tvar formy vznikl úpravou stávajícího CAD modelu, především se jedná o zdvojení formy, aby bylo možné vyrábět dva kusy najednou.

Materiál pro tisk byl zvolen polykarbonát, který se ideálně hodí pro výrobu prototypových i funkčních součástí. Jedná se o tvrdý, houževnatý a tepelně odolný materiál spadající do kategorie termoplastů. Životnost polykarbonátové formy čítá přibližně pár desítek vyrobených kusů.

Po vytisknutí je formu ještě potřeba připravit na laminování. Jedná se o přebroušení zejména kontaktních povrchů, na které budou kladeny jednotlivé vrstvy. Dále je nezbytné ošetření formy separačním činidlem pro snadnější oddělení vytvrzeného dílu. Až takto nachystaná forma je připravena na proces laminování. Takto nachystaná forma (již používaná) je zobrazena na obr. 22.

Nástřih uhlíkového prepregu a laminace

Samotnému procesu laminování předchází vytvoření vhodných nástřihů prepregu dle listu skladby. Pro tuto i veškerou následující výrobu bylo použito standartních HS uhlíkových vláken. List skladby v tomto prvním případě spočíval v obložení nejprve stěny s přírubovou částí a následném překrytí vrchní plochy. Celkově tak bylo potřeba dvou obdélníkových nástřihů a dvou nástřihů ve tvaru „osmiček“. Veškerý nástřih byl vytvořen z prepregu o gramáži 630 g/m^2 . Nástřih se provádí obyčejnými nůžkami nebo v případě sériové výroby odladěných dílů na plotru. Výsledek první laminace prepregové tkaniny je znázorněn na obr. 22.



Obr. 22 Laminace na polykarbonátovou formu.

Příprava před vakuováním

Po zalaminování i druhého dílu na polykarbonátovou formu následovala příprava před vložením do vakuového pytle. Nejdůležitějším krokem je v této přípravě obalení netkanou textilií, díky které se tlak vakua rozloží rovnoměrně na celou plochu formy. Obalení netkanou textilií je zobrazeno na obr. 23.



Obr. 23 Obalení netkanou textilií.

Protože se však v této fázi jedná o výrobu bez protikusové části formy, je nezbytné netkanou textilií od vrstev prepregu oddělit separační vrstvou, která zamezí jejich přímému kontaktu (viz obr. 24). Netkaná textilie by jinak absorbovala pryskyřici z prepregu a po vytvrzení by došlo k jejich spojení a výrobě zmetku.



Obr. 24 Položení separační vrstvy.

Separační fólie vykazuje vysokou tažnost (až 300%), přesto je při jejím pokládání vhodné dbát na to, aby bylo vytvořeno dostatečné množství vrásek a přehybů. Vrásky a přehyby totiž zaručují větší celkovou plochu vrstvy a tím snižují pravděpodobnost jejího napnutí, které by mohlo vyústit v případné protržení. To by znamenalo ztrátu její funkce, prosycení netkané textilie pryskyřicí a výrobu zmetkového dílu, jak již bylo popsáno výše.

Volitelným krokem je přidání strhávací vrstvy pod vrstvu separační (mezi separační vrstvu a prepreg). Od separační vrstvy se liší svojí strukturou. Protože je strhávací vrstva tkaná, pryskyřice kopíruje její strukturu a výsledný povrch dílu po jejím stržení získá hrubší povrch. Přidání strhávací folie je proto žádoucí zejména v případě přípravy lepených povrchů. Dojde tak ke zdrsnění povrchu a dosažení lepší adheze s lepidlem.

Vakuování

Po položení separační vrstvy a obalení netkanou textilií je díl připraven na vložení do vakuového pytle. Vakuový pytel lze jednoduše vytvořit přeložením obdélníkové fólie a zatěsněním pomocí butylové pásky po jeho okrajích. Před kompletním zatěsněním butylovou páskou se nesmí zapomenout na umístění spodní části ventilu na vhodné místo. Spodní část ventilu se rovněž podkládá přeloženou netkanou textilií. Až následně se vakuový pytel může kompletně zatěsnit. Dále zbývá nasadit a utáhnout horní část ventilu (viz obr. 25). Vakuový pytel je takto připraven na odčerpání vzduchu a vytvoření vakua. Podobně jako u separační fólie se dbá na dostatečné zvrásnění, jak znázorňuje obr. 25. Důvodem je opět vytvoření většího povrchu, který zabraňuje napínání a tvorbě tzv. mostů.



Obr. 25 Umístění do vakuového a odčerpání vzduchu.

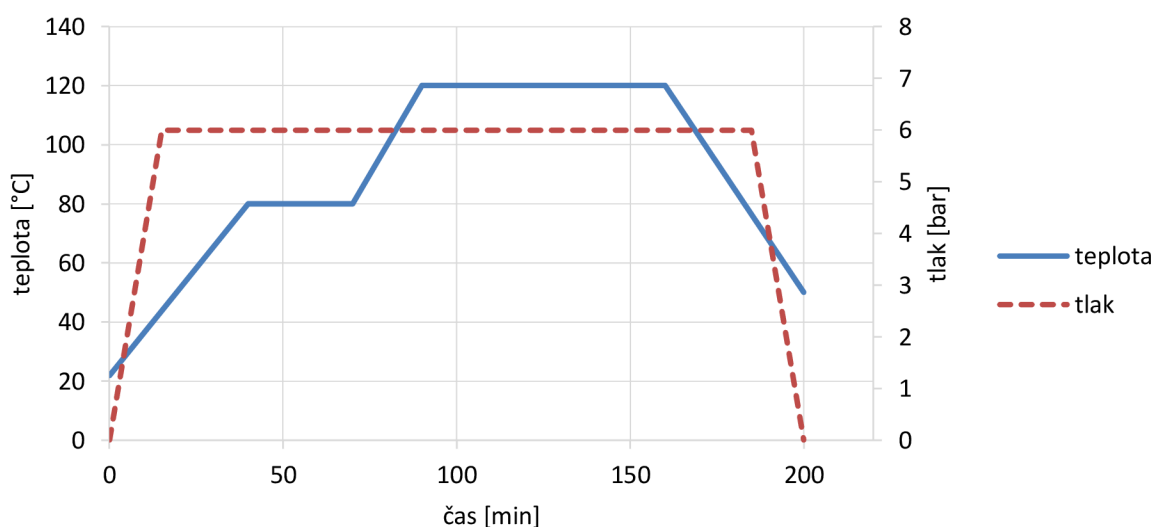
Kontrola těsnosti

Finálním krokem je kontrola těsnosti. Ta se provádí většinou po 30 minutách od odčerpání vzduchu. Může se provádět například přiložením manometru, který případnou netěsnost indikuje naměřením tlakové difference. Triviálnější způsobem je zatažení za vrásky vakuové pytle. Pokud pevně drží, vakuový pytel je správně utěsněn.

Vytvrzení v autoklávu

Po úspěšné kontrole putuje celek do autoklávu a proces pokračuje vytvrzováním v časovém intervalu několika hodin. Obecný teplotní a tlakový cyklus autoklávu byl již popsán v kapitole 3.4. V tomto případě se jednalo o velmi podobný cyklus, viz obr. 26.

rychlost ohřevu	2 °C/min
tlak (při dosažení teploty 50 °C)	6 bar
teplota první izotermické prodlevy	80 °C
doba první izotermické prodlevy	30 min
teplota druhé izotermické prodlevy	120 °C
doba druhé izotermické prodlevy	70 min
rychlost chlazení	2 °C/min



Obr. 26 Vytvrzovací cyklus autoklávu.

Jakmile je proces u konce, klesne tlak i teplota a díly je možné vyjmout z autoklávu. Obvykle se nechává zchladnout na teplotu kolem 40–60 °C. Vytvrzený díl není výškou této teploty nijak výrazně ovlivněn.

Finální vytvrzené díly

Vytvrzený díl je po vyjmutí z autoklávu stále ve vakuovém pytle. Následuje proto postupné oddělení všech vrstev od vytvrzeného dílu (tzn. vakuového pytle, netkané textilie, separační fólie a případně strhávací vrstvy). U vytvrzeného dílu je ve většině případů nutno zabrousit ostré hrany nebo přetoky, obzvláště pokud se jedná o prototypovou výrobu. V tomto případě bylo potřeba ořezat přírubovou plochu na požadovaný tvar, který je znázorněn na obr. 27. V rámci této práce se tak jedná o první úspěšně vyrobený kus.

Při vyhodnocování dílu je na první pohled patrné, která strana byla v kontaktu s formou, a která nikoli. Kontakt s formou zaručil mnohem kvalitnější povrch včetně dodržení úkosů. Opačná strana je v důsledku vlivu separační fólie zvrásněná. Také vlivem daného nástřihu a absence protikusové formy nebylo dodrženo konstantní tloušťky stěn.



Obr. 27 Finální díly vyrobené pomocí jednodílné formy.

4.3 Prototypová výroba v autoklávu - dvoudílná forma

Úspěch výroby pomocí jednodílné formy a dosažení správného tvaru kompozitního dílu znamenalo možné pokračování a zdokonalení výrobního postupu. Dalším krokem proto bylo zadání tisku protikusové části stávající formy.

Výroba protikusové části formy

Přítomností protikusové části formy lze očekávat mnohem lepší dodržení požadovaného tvaru současně s dosažením konstantní tloušťky stěny z obou stran dílu. Stejně jako v předchozím případě proběhla výroba pomocí 3D tisku polykarbonátu. Obdobný je také postup a příprava formy. Formu je opět potřeba dostatečně vybrousit a naseparovat. Je vhodné používat brusné papíry s kvalitním pojivem, aby nedocházelo k ulpívání jednotlivých zrn mezi vlákny vytisknuté formy. Za jeden z ideálních brusných papírů byl například shledán Smirdex P320. Na obr. 28 už je vidět porovnání vybroušeného a nevybroušeného povrchu. Nevybroušený povrch na levé straně obsahuje typické stopy vláken FDM tisku, což je nevhodné z hlediska kvality výsledného povrchu a z hlediska nanášení separačního činidla.



Obr. 28 Postupné broušení ploch polykarbonátové formy.

Po kompletním vybroušení všech ploch tak dostáváme k dispozici i protikusovou část polykarbonátové formy (viz obr. 29). Na tomto obrázku je i vidět srovnání nové a používané formy, a jakým způsobem se opotřebení projevuje, čemuž je v průběhu výroby potřeba věnovat pozornost. Jak již bylo zmíněno, životnost forem čítá pouze desítky kusů. Po každém vyrobeném kusu je dobré kontrolovat povrch formy a v případě nutnosti odstranit místa s ulpěnou pryskyřicí, která by znehodnotila nově vyrobené kusy. K odstranění takových míst můžeme použít nejlépe stlačený vzduch nebo různé škrabky, ideálně plastové, aby nedošlo k porušení samotného polykarbonátu.



Obr. 29 Dvoudílná polykarbonátová forma.

Nástřih uhlíkového prepregu, laminace a finální díly

List skladby byl zprvu totožný jako v předchozím postupu, avšak při složení forem docházelo ke shrnování prepregové tkaniny kopírující stěnu formy. Z toho důvodu bylo učiněno opatření v podobě změny nástřihu vedoucí k větší celistvosti tak, aby jednotlivé vrstvy nebyly tvořeny dvěma kusy nástřihu, ale pouze jedním. Spolu s tím byla vybrána lehčí tkanina 380 g/m^2 místo původních 630 g/m^2 . Na základě těchto změn pak byla provedena výroba dvou testovacích kusů, viz obr. 30. Jedná se o laminaci dvou totožných dílů, obou tvořených dvěma celistvými nástřihy o gramáži 380 g/m^2 . Jediný rozdílem je, že nástřih vzorku č. 2 byl pouze volně položen a až následně dotlačena protikusovým dílem formy při skládání forem (viz obr. 31).



Obr. 30 Laminace a finální díly vyrobené dvoudílnou formou.

Složení forem proběhlo bez jakýchkoli dalších komplikací. Přítomnost separační fólie není nutná, protože se však jedná o prototypovou výrobu, byla ponechána v rámci snadnějšího oddělení forem. V sériové výrobě se však již vynechávají a to právě z důvodu zanechání horšího výsledného povrchu.



Obr. 31 Složení forem.

Finální vytvrzené kusy na obr. 30 potvrdily stanovené předpoklady. Jedná se o mnohem přesnější výrobu s konstantní tloušťkou stěny a přesnými úkosy z vnitřní i vnější strany. Pozitivum přinesl také fakt, že oba vzorky nejeví žádné výraznější odlišnosti. Volné položení nástřihu a dotlačení protikusovou formou je tak bez obav možné aplikovat i při další výrobě. Tento postup tak přináší výhodu ve snadnější a kratší manipulaci s nástřihem, čímž zkracuje i celkový výrobní čas.

I přes přítomnost separační fólie však byla zaznamenána poměrně výrazná soudržnost forem při jejich oddělování. S ohledem na výrobu metodou lisování za tepla, kde využití hliníkové formy a působení vyšších tlaků může mít za následek ještě větší soudržnost forem, bylo na základě této zkušenosti označeno za vhodné, aby se zvětšila hodnota úkosů při výrobě hliníkových forem. Větší hodnoty úkosů tak mohou předejít vzniku případných komplikací.

Vytvrzování v autoklávu

Vytvrzování proběhlo za zcela totožných podmínek, které jsou uvedeny v předchozí kapitole, vytvrzovací cyklus je tedy stejný jako na obr. 26.

Vytvrzené díly těsně po vyjmutí z formy

Je na místě také uvést, jak vypadají díly bezprostředně po vyjmutí z forem. V tomto stavu jsou výrobky znázorněny na obr. 32. Na vzorcích jsou na první pohled patrné přetoky přebytečné pryskyřice a nerovnoměrné okraje tkaniny. Tok pryskyřice se v největší míře odehrává v průběhu její nejnižší viskozity, tedy při prvním izotermickém pochodu. Vytvrzené díly těsně po vyjmutí z formy znázorňují, proč je díly často nutné dále upravovat, tj. brousit nebo ořezávat.



Obr. 32 Díly těsně po vyjmutí z dvoudílné formy.

Lakování

Vyrobena bylo více dílů, kde jeden z nich byl dále použit pro experiment nanesení polyakrylátového laku. Jednosložkové polyakrylátové laky, někdy nesoucí označení 1K, se volí pro běžná použití. Protože se nemusí míchat s tužidlem, jejich aplikace je jednodušší. Pro pokus byl použit čirý lak ve spreji dodávající lesklý povrch. Povrch dílu byl před nanesením laku vybroušen brusným papírem Smirdex P320, tedy stejným jako při broušení polykarbonátové formy.

Díl byl pokryt jen jednou vrstvou a výsledek je zobrazen na obr. 33. Vrstva po 24 hodinách vykazovala dostatečně silné adhezni vlastnosti. Lak vytvořil souvislou vrstvu a podtrhl texturu uhlíkových vláken. Výhoda však nespočívá jen v estetické stránce, ale může přinášet řadu dalších funkcí, jako je odolnost proti UV záření.



Obr. 33 Srovnání nalakovaného a nenalakovaného dílu.

Pro náročnější použití je však vždy lepší volit dvousložkové polyuretanové laky, které se před aplikací smíchají s tužidlem, a proto se někdy označují jako 2K. Obecně vykazují lepší vlastnosti ve všech ohledech. Schnou a vytvrzují se rychleji, na druhou stranu po smíchání s tužidlem (katalyzátorem) se musí spotřebovat do 12–16 hodin. Podobně mají tyto laky také kratší životnost z hlediska skladovatelnosti. Provedení ve spreji obsahuje uvnitř spreje nádobku s katalyzátorem, kterou je před aplikací nutno prorazit, aby došlo k promíchání směsi, a lze je tak označit za jednorázovou záležitost. Setkat se je možné i se spreji s označením 2X. V tomto případě se však ve většině případů jedná opět o jednosložkové polyakrylátové laky, kde 2X pouze vyjadřuje schopnost pokrýt dvakrát tak větší plochu a nesmí se proto zaměňovat s označením 2K.

4.4 Lisování za tepla

Společné znaky lisování a autoklávové výroby spočívají v působení tlaku a teploty, což má za následek vytvrzení prepregové tkaniny a eliminaci vzduchových bublin. Základním specifikem lisování jsou však krátké výrobní časy, což je také hlavní rozdíl ve srovnání s vytvrzováním v autoklávu, kde se cyklus pohybuje v řádu několika hodin. Aby bylo dosaženo těchto krátkých časů, musí být předimpregnován vhodnou pryskyřicí, která umožňuje rychlé vytvrzení v řádu několika minut. Z pohledu lisování jsou tak nejdůležitější pryskyřice a typ vláken pouze určuje výsledné mechanické vlastnosti.

4.4.1 Testovací lisování plošných dílů

Dodavatelem byla zaslána lisovací skelná S-glass prepregová tkanina, bohužel bez katalogového listu, který by specifikoval optimální vytvrzovací cykly. První fáze výroby proto spočívala v určení těchto parametrů. V rámci této předvýroby byly lisovány jednoduché plošné díly o rozměrech 110x150 mm s různým počtem vrstev a za různých teplot.

Čelní frézování ocelových desek

Plošné díly byly lisovány mezi ocelovými deskami, jejichž kontaktní plochy byly přefrézovány čelní frézou, viz obr. 34. Otáčky vřetene byly nastaveny dle vztahu (1).

$$v_c = 100 \text{ m/min}$$

$$D = 160 \text{ mm}$$

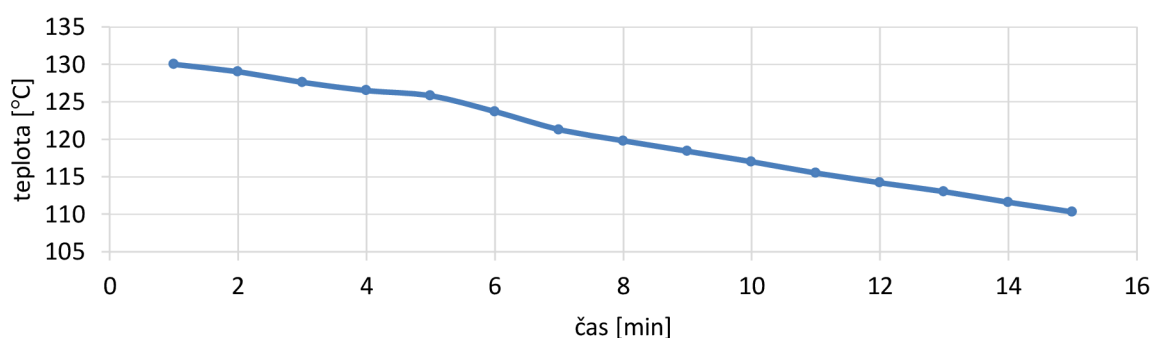
$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \rightarrow n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{100 \cdot 1000}{\pi \cdot 160} \doteq 200 \text{ min}^{-1} \quad (1)$$



Obr. 34 Frézování kontaktních ploch.

Předehřev ocelových desek

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.5, ideální teplotní cyklus je izotermický, spočívá v nahřátí nástroje (formy) na danou teplotu a výdrži po dobu vytvrzování. Stejně tak působení tlakového zatížení je udržováno na konstantní hodnotě. Teplotní cyklus byl v rámci experimentální výroby zajištěn pouze předehřátím ocelových desek v peci. Pro omezení úniku tepla byly desky při lisování od podkladu a nástroje izolovány vrstvou netkané textilie. Jednalo se o stejnou netkanou textili, která byla použita i při vakuování v rámci prototypové výroby. Tímto opatřením bylo při nahřátí desek na 130 °C dosaženo průměrného poklesu teploty o 1,41 °C/min. Tuto závislost ukazuje také graf na obr. 35. Při nahřátí na vyšší teplotu byl zaznamenán pokles strmější, kdy u maximální teploty nahřátí ocelových desek na 170 °C činil již 2,49 °C/min. Z grafu je také patrný celkový čas lisování, který trval 15 minut. Po této době byla lisovací forma umístěna na vzduch a po ochlazení na 70 °C byl vytvrzený díl vyjmut.



Obr. 35 Graf poklesu teploty nástroje.

Pro měření teploty bylo použito přenosného digitálního termočláňkového měřidla EM589 (viz obr. 36).



Obr. 36 Termometr EM589.

Nástřih skelného prepregu a lisování plošných dílů

S lisovacími prepregovými tkaninami se zachází stejně jako při autoklávové výrobě. Nastříhané obdélníky o zmiňovaných rozměrech 110x150 mm byly před vložením mezi nahřáté ocelové desky odděleny separačními vrstvami. Celek byl následně uložen na ruční lis CTC 5, viz obr. 37, který umožňoval stlačení vzorků přibližně 2,5 bary.



Obr. 37 Lisování rovinných dílů na lisu CTC 5.

Finální vytvrzené plošné díly

Po skončení lisovacího cyklu byly díly spolu s ocelovými deskami přeneseny na vzduch a po vychladnutí na teplotu 70 °C byly díly vyjmuty. Tímto způsobem se vylisovaly celkem 4 vzorky, viz obr. 38. Při vyhodnocování vytvrzených dílů bylo učiněno závěru v podobě intervalu možných lisovacích teplot. Jak bylo ze vzorků patrné, může dojít ke dvěma okrajovým případům, kdy s uvážením teplotních úniků byla počáteční teplota pod 100 °C stanovena jako nedostatečná teplota pro řádné vytvrzení. Pryskyřice je v tomto případě křehká a snadno se láme. V případě velmi nízkých teplot ani nemusí dojít ke kompletní solidifikaci pryskyřice.

Druhým okrajovým případem je naopak teplota příliš vysoká pro vytvrzování. Ta v rámci tohoto experimentu byla stanovena na přibližné hranici 170 °C. Při takto vysoké teplotě proběhne proces vytvrzení příliš rychle, čímž je zkrácena i doba gelace a většina pryskyřice tím pádem zůstane uvězněna v tkanině. Důkazem bylo vytečení pouze malého množství pryskyřice ven z tkaniny po vyjmutí vytvrzeného dílu. Patrné je rovněž výrazné zbarvení pryskyřice do tmavších odstínů.



Obr. 38 Porovnání vytvrzených dílů.

Oba okrajové případy nízké a vysoké vytvrzovací teploty byly shodně vyrobeny laminací celkem 5 vrstev skelné tkaniny. Zhodnocený výsledek podkládá i gramáž dílů spolu s rozdílem ve výsledné průměrné tloušťce vytvrzených vrstev, který činil 0,24 mm. Celkové vyhodnocení všech vzorků uvádí tab. 3. Počáteční vytvrzovací teplota je označena jako $T_{\text{poč}}$ a průměrná tloušťka \bar{t} byla vyhodnocena z celkem 8 bodů. Vzorek č. 5 slouží pouze pro porovnání a jedná se o jednu vrstvu skelné tkaniny vytvrzené za pokojové teploty.

Tab. 3 Vyhodnocení sklolaminátových vzorků.

	Počet vrstev	$T_{\text{poč}}$ [°C]	m [g]	\bar{t} [mm]
Vzorek 1	3	130	25,5	0,76
Vzorek 2	4	105	32,8	0,95
Vzorek 3	5	95	43,1	1,24
Vzorek 4	5	170	48,5	1,48
Vzorek 5	1	22	10,4	0,43

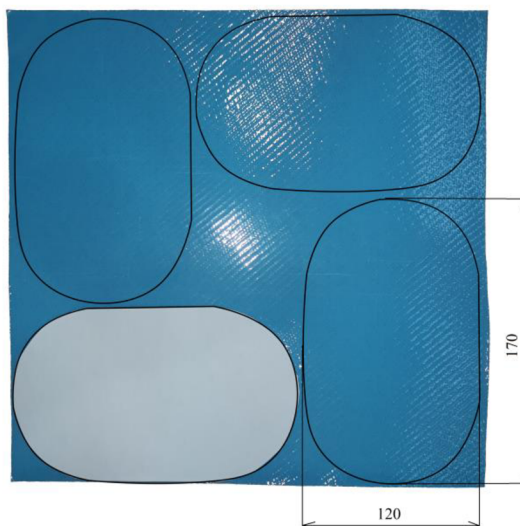
Díly lisované v intervalu okrajových teplot, konkrétně 105 a 130 °C vykazovaly ideální stupeň vytvrzení. Doporučená teplota pro další lisování byla proto zvolena v intervalu 120–140 °C.

4.4.2 Lisování prototypů ve dvoudílné polykarbonátové formě

Následující výroba již zahrnuje použití formy jako lisovacího nástroje. Pro experiment byla znovu použita dvoudílná polykarbonátová forma a proces byl veden ve stejném duchu jako lisování plošných dílů.

Nástřih skelného prepregu

Lisovaným materiálem byla opět skelná prepregová tkanina použitá i u předchozího testovacího lisování. Pomocí papírové šablony byl usnadněn nástřih jednotlivých vrstev. S pomocí šablony bylo zároveň maximalizováno využití dodaných prepregových tkanin, viz obr. 39. Pro lisované díly bylo zvoleno, aby se skládali z celkem 4 vrstev. Tento počet byl stanoven na základě průměrné tloušťky testovacích plošných dílů, neboť čtyřvrstvý plošný díl nejvíce korespondoval s průměrnou tloušťkou 1 mm, na kterou byl dimenzován model formy.



Obr. 39 Šablona a skelný prepreg.

Předeřev ocelových desek a polykarbonátové formy

Ocelové desky tentokrát včetně polykarbonátové formy byly opět předeřevy na požadovanou teplotu, která byla nastavena na 120 °C. Tato teplota odpovídá vhodné lisovací teplotě a zároveň se nachází dostatečně pod teplotou skelného přechodu, která u polykarbonátu leží na hranici 160 °C. Obecně jsou s ohledem na teplotu skelného přechodu přípustné pracovní teploty v intervalu 10–20 °C pod touto teplotou, rovněž v závislosti dle daného zatížení. I přes tuto znalost však došlo k mírné deformaci dvou rohů polykarbonátové formy, které byly opřeny o v průřezu kruhovitou stěnu pícky. Teplota stěny pícky musela tím pádem přesáhnout teplotu skelného přechodu polykarbonátu. I takovéto okolnosti je třeba do budoucna mít na vědomí.

Lisování prototypů

Lisování proběhlo na hydraulickém zkušebním stroji ZD40 / 400 kN, viz obr. 40. Tento lis rovněž umožňuje výpis přítláčné síly. Záznam přítláčné síly je uveden v příloze této práce. Ocelové desky slouží k udržení teploty polykarbonátové formy. Od podkladu a nástroje byly opět izolovány pomocí netkané textilie. Během nahřívání byl nachystán laminát dle listu skladby a oddělen separačními vrstvami. Po nahřátí na danou teplotu (120 °C) byla postupně umístěna spodní deska, dále složená polykarbonátová forma již obsahující nástřih skelného prepregu a nakonec i vrchní ocelová deska.



Obr. 40 Hydraulický lisovací stroj ZD40/400kN.

Přítlačná síla odpovídající 26 kN byla stanovena dle přepočtu tlaku působícího v autoklávu, tedy přibližně 5,5 bar, na plochu lisovacího nástroje dle vztahu (2).

$$p = \frac{F}{S} \rightarrow F = p \cdot S = 550\,000 \cdot 0,048 = 26\,400\text{ N} \doteq 26\text{ kN} \quad (2)$$

$$\text{tlak v autoklávu} \quad p = 5,5 \text{ bar} = 550\,000 \text{ Pa}$$

$$\text{plocha formy} \quad S = 0,24 \cdot 0,2 = 0,048 \text{ m}^2$$

Finální vytvrzené prototypové díly

Lisováním v rámci tohoto experimentu byly vyhotoveny celkem čtyři vzorky. Zmíněná deformace polykarbonátové formy v průběhu předehřevu však bohužel měla negativní dopad na proces lisování, kdy došlo k neúplnému dolisování některých míst vyrobených dílů. Nedolisování je patrné na obr. 41. Tato místa jsou tmavší než okolí, protože obsahují větší procento pryskyřice. Tento obrázek vyobrazuje díly již po ořezání přírubových ploch.



Obr. 41 Vady vytvrzených prototypových dílů.

4.4.3 Lisování ve dvoudílné hliníkové formě

V průběhu dlouhé cesty výroby prototypových a jiných dílů byly zaznamenány důležité poznatky, které měly vliv na tuto finální část výroby. Například na základě zkušeností z výroby prototypových dílů ve dvoudílné polykarbonátové formě bylo rozhodnuto, aby úkosy hliníkové formy byly zvětšeny ze 3° na 5°. Při testovacím lisování plošných desek byly zase určeny možné intervaly vytvrzovacích teplot spolu s ideálním počtem vrstev laminátu. Nebo že stačí, aby nachystaný prepregový laminát byl volně položen na spodní část formy a dotlačen protikusovou částí formy. Po všech těchto krocích tak přichází na řadu lisování ve dvoudílné hliníkové formě, která již umožňuje i zavedení případné sériové výroby. Vyrobena forma je zobrazena obr. 42.



Obr. 42 Dvoudílná hliníková forma.

Nástřih skelného prepregu a laminace

Tento proces probíhal stejně jako při prototypové výrobě lisováním ve dvoudílné polykarbonátové formě. Pro tvar a velikost nástřihu skelného prepregu bylo použito papírové šablony. Pro počet vrstev bylo využito znalostí z testovacího lisování plošných dílů, kde tloušťka 4 vrstev nejlépe koresponduje s milimetrovou mezerou mezi formami.

Protože se jedná o hliníkovou formu, nebylo tentokrát použito separační fólie, ale důkladné separace před každým vyrobeným kusem.

Předehřev hliníkových forem

Výhoda hliníkové formy spočívá v lisování bez teplotního omezení z hlediska materiálu formy (nehrozí skelný přechod jako u polykarbonátu). Teplota předehřevu s uvažováním teplotních úniků byla zvolena 140 °C a byla dosažena při ručním lisování, viz obr. 43. Při lisování na hydraulickém lisu bylo dosaženo teploty pouze 130 °C. Hned po nahřátí formy na tuto teplotu byl na spodní část formy umístěn předpřipravený laminát skelného prepregu a dotlačen protikusovou částí formy. Následně byl celek přenesen na lis.



Obr. 43 Teplota předehřevu zobrazená na termometru EM589.

Předeřev a lisování

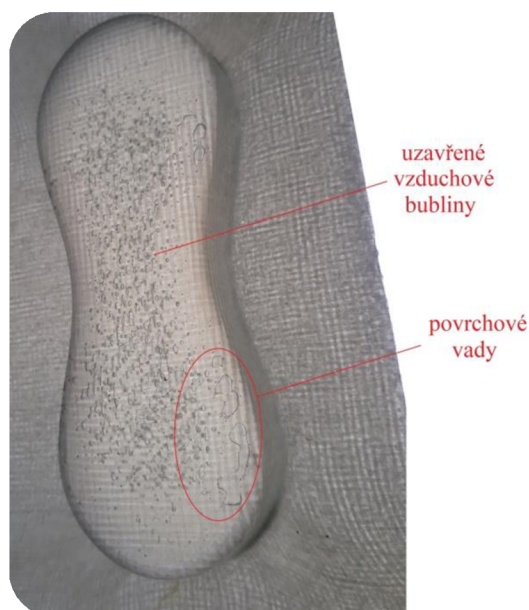
Lisování proběhlo ve dvou fázích, každá na jiném lisovacím stroji. Jedná se však o stejné lisy, kterých bylo využito i v předchozím prototypovém lisování. Prvně na ručním lisu CTC 5, který umožňuje stlačení tlakem cca 2,5 bar. Následně pak na zkušebním hydraulickém lisu ZD40/400kN, kde přítlačná síla zůstala nezměněna, tedy 26 kN (síla odpovídající tlaku autoklávu, přibližně 5,5 bar). Ukázka z lisování je na obr. 44.



Obr. 44 Lisování na lisu ZD40/400kN s dvoudílnou hliníkovou formou.

Finální vytvrzené díly

Výsledkem lisování na ručním a hydraulickém lisu bylo několik vzorků. Již na první pohled se jedná o nejkvalitněji prolisované díly s nejlepší drsností povrchu. Přesto se objevilo několik druhů vad, které mají původ v parametrech lisování, konkrétně teplotním cyklu. Jsou jimi povrchové vady a uzavřené vzduchové bubliny. Hliníková forma snadno odvádí teplo a vzduchové bubliny v průběhu doby gelace neměly dostatečný čas, aby pronikly ven z materiálu. Možným řešením je předeřev na vyšší teplotu. K eliminaci těchto vad by rovněž pomohlo udržení konstantní teploty bez tepelných ztrát. Toho je možné docílit v rámci soustavy s topnými patronami. Mimo jiné se projevilo i mírné smrštění dílu, jehož příčinou bylo nedostatečné vytemperování formy před vyjmutím dílů.



Obr. 45 Vady vytvrzených dílů.

ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce se věnuje problematice kompozitních materiálů a vybraným technologiím výroby. Jedná se o téma, které představuje neustále se rozvíjející odvětví. Hlavní výhodou a důvodem proč se rozšiřuje aplikace kompozitních materiálů, je schopnost redukce hmotnosti konstrukce za současného udržení mechanických vlastností, případně i jejich zlepšení.

Teoretická část práce se zabývá složením kompozitních materiálů, tedy vláknů a pojivem. Jsou popsány jejich jednotlivé typy se zaměřením na nejpoužívanější z nich. Kromě popisu se práce věnuje i jejich vzájemnému srovnání. Teoretickou a praktickou část spojuje kapitola technologie výroby, která uvádí hlavní používané technologie a jejich vliv na výsledné vlastnosti kompozitních dílů.

Praktická část se věnuje metodám, které umožňují výrobu pevnostně náročných dílů. Jedná se o vytvrzování kompozitů v autoklávu a vytvrzování lisováním za tepla. Obě tyto metody mají společné rysy v podobě působení vysoké teploty a tlaku v průběhu vytvrzování. Prvním krokem byl 3D tisk jednodílné formy a výroba prototypových vzorků vytvrzených v autoklávu. Postupně docházelo ke zdokonalování výroby, jako 3D tisk protikusové části formy. Následovala testovací fáze lisování za tepla a vznik prvních prototypových dílů. V rámci celé této části byly zaznamenány poznatky a zkušenosti, které byly aplikovány v konečné fázi výroby. Tou bylo lisování za tepla ve dvoudílné formě z hliníkové slitiny. Výstupem praktické části je tak celá řada vzorků s odlišnými vlastnostmi.

Dosažené výsledky nabízí několik možností, jak v práci pokračovat. Jednou z nich je určení konkrétních mechanických vlastností dodaného skelného prepregu tahovou zkouškou. K tomu mohou posloužit již vyrobené plošné díly, které původně sloužily pro určení vhodné lisovací teploty. V případě doplnění vzorků o nové vytvrzovací teploty v daném intervalu, by bylo možné zjistit vliv vytvrzovacích teplot na mechanické vlastnosti. Dále je možné zdokonalení metody výroby lisování za tepla ve dvoudílné formě z hliníkové slitiny. Zdokonalení spočívá v realizaci původního návrhu autora práce, za použití topných patron a chladicího okruhu. Topné patrony by umožnily udržení konstantní teploty lisovacího cyklu a měly pozitivní vliv na vyrobené díly. Zároveň by se usnadnil postup práce a zautomatizoval celý cyklus.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. v ČR. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] Human hair - carbon fibre. In: *Wikipedia* [online]. b.r. Dostupné také z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfaser_haarrp.jpg
- [3] MOUREČEK, Michael. Vlastnosti karbonu - FESTKA-ŠTĚRBA - 2. díl. *YouTube* [online]. SterbaBike, b.r. Dostupné také z: <https://1url.cz/6Ma4z>
- [4] Carbon Fiber vs Kevlar vs Fiberglass - Which one is right for YOU?. *YouTube* [online]. KYLE.ENGINEERS, b.r. Dostupné také z: <https://1url.cz/PMakX>
- [5] Carbon Fiber: PAN Precursor Carbon Fiber. *Innovations in Manufacturing at Oak Ridge National Laboratory* [online]. b.r. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=4t1pBvTDNxE>
- [6] KUEN Y., Lin. *Composite Materials Overview for Engineers*. University of Washington: edX, b.r.
- [7] CAMPBELL, F. *Structural Composite Materials*. 1st printing. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 9781615030378.
- [8] 12K Carbon-Roving NF-12. In: *Carbon-Werke: Weißgerber GmbH & Co KG* [online]. b.r. Dostupné také z: <https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-fasern/carbon-rovings/406/12k-carbon-roving-nf-12>
- [9] Wet Layup. In: *TOTALBOAT* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.totalboat.com/wet-layup-2/>
- [10] Pre-Preg Overview. *YouTube* [online]. Fibre Glast, b.r. Dostupné také z: <https://1url.cz/lMak6>
- [11] XPREG XC110 Prepreg Carbon 3K, 210g, 2/2 Twill. In: *Easycomposites* [online]. b.r. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/#!/prepreg/component-prepregs/xpreg-xc110-prepreg-carbon-fibre-22-twill-210g.html>
- [12] SATHISHKUMAR, T a J. NAVEEN. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *SAGE journals* [online]. 2014, , 20 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0731684414530790?journalCode=jrpa>
- [13] *Dyneema®: With you when it matters* [online]. DSM, b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.dsm.com/products/dyneema/en_GB/home.html
- [14] Carbon Fibre & Innegra Hybrid. *The Fibreglass Shop* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.fibreglassshop.co.nz/products/carbonfibreinnegrahybrid?variant=8040308113456>
- [15] Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků. *Basaltex, a.s.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm
- [16] *AZO MATERIALS* [online]. AZoNetwork, b.r. Dostupné také z: www.azom.com
- [17] *Dural®: Material Information* [online]. GoodFellow, b.r. Dostupné také z: <http://www.goodfellow.com/E/Dural-Aluminium-Copper-Magnesium.html>
- [18] *HexPly Prepreg Technology* [online]. In: . HEXCEL, b.r. [cit. 2019-05-23].

- [19] LENGSELD, , WOLFF-FABRIS, KRÄMER, LACALLE a ALTSTÄDT. *Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. 1st. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.
- [20] MATERIÁLY: LAMINÁTY. *KOMPOZITYMICHALÍK s.r.o.* [online]. Bernartice, b.r. Dostupné také z: <http://www.kompozity-michalik.cz/materialy>
- [21] Carbon Vs. Aluminium Handlebars | Which Are The Strongest?. *YouTube* [online]. Global Cycling Network, b.r. Dostupné také z: <https://1url.cz/wMak8>
- [22] *Technologie jejich popis a schémata* [online]. In: . Havel Composites, b.r.
- [23] TECHNOLOGIE: Splétání vláken karbonu. *4tex s.r.o.* [online]. b.r. Dostupné také z: <http://www.4tex.cz/technologie-produkty-z-karbonu/>
- [24] JOHN, Moore. RTM, LRTM, HP-RTM - What's the Difference?!. *YouTube* [online]. JHM Technologies, Inc., b.r. Dostupné také z: <https://1url.cz/sMasL>
- [25] How To Do Perfect Vacuum Resin Infusion of a Carbon Fibre (Fiber) Part - Basic Tutorial. *YouTube* [online]. Easy Composites Ltd, b.r. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=VodfQcrXpxc>
- [26] *Composite materials handbook*. Waldenbuch: R&G Faserverbundwerkstoffe, 2009.
- [27] Cartridge Heater 0.125 inch Watlow Firerod 120V 100W. In: <https://www.ebay.co.uk> [online]. WARMSTAR, b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.ebay.co.uk/itm/Cartridge-Heater-0-125-inch-Watlow-Firerod-120V-100W-/322415086557>
- [28] BAE, Ji-Hun, Min-Gu HAN a Seung-Hwan CHANG. Formability of complex composite structures with ribs made of long carbon-fiber-reinforced prepregs. In: *Elsevier* [online]. Republic of Korea: School of Mechanical Engineering, b.r. [cit. 2019-05-23].
- [29] Tensile Testing. *Mechanical Engineering Department* [online]. Teherán: Amirkabir University of Technology, b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Tensile%20Testing.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
BCC	Body centered cubic
FCC	Face centered cubic
GCN	Global Cycling Network
HCP	Hexagonal closest packed
LFPS	Long fiber prepreg sheet
HS	High strenght
HM	High modulus
UHM	Ultra high modulus
PA	Polyamid
PAN	Polyakrylonitril
PE	Polyetylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
RTM	Resin Transfet Moulding
LRTM	Light Resin Transfer Moulding
HP-RTM	High Pressure Transfer Moulding
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding

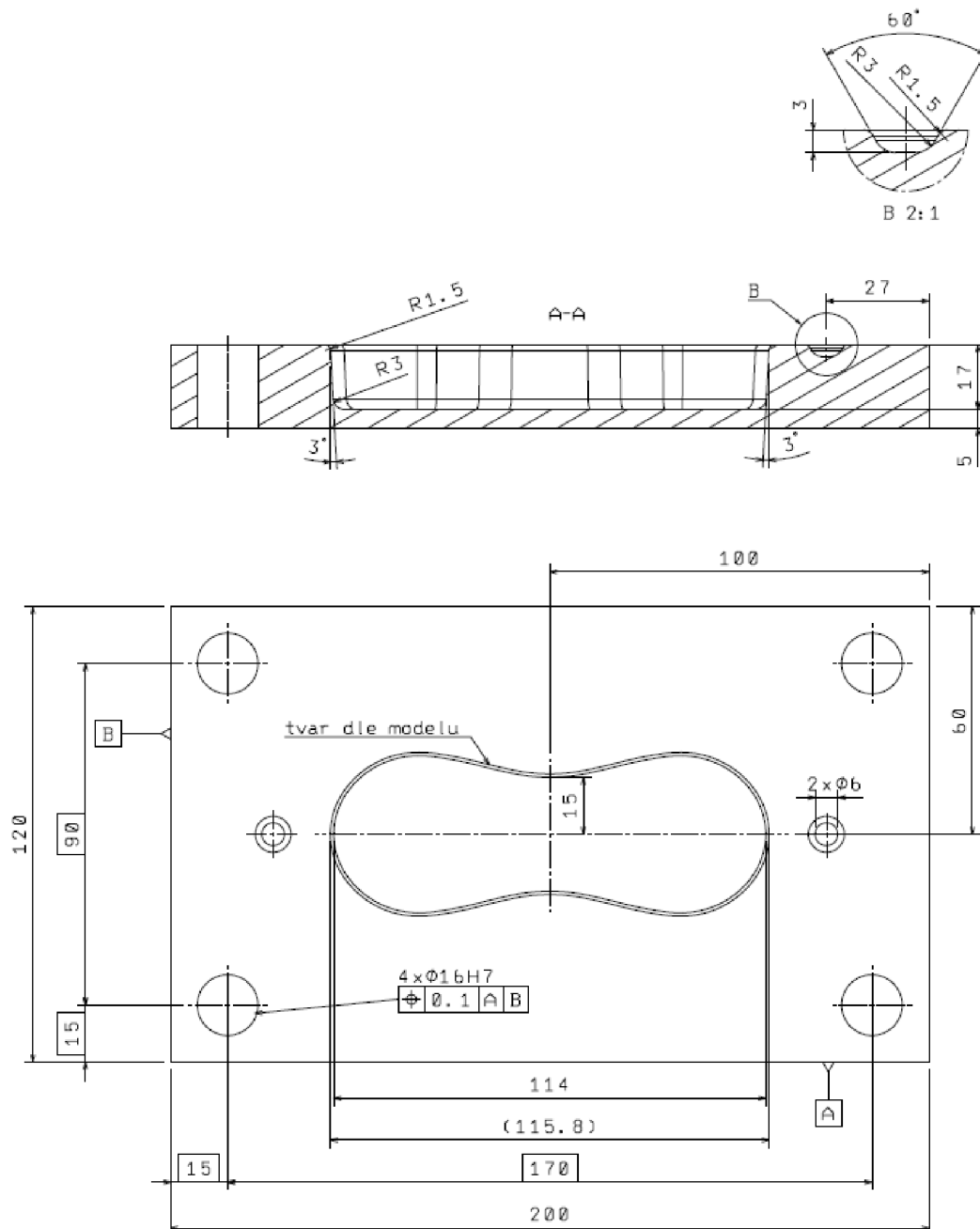
Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
D	[mm]	Průměr
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
F	[N]	Síla
R_{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R_{eH}	[MPa]	Horní mez kluzu
R_{eD}	[MPa]	Dolní mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
S	[m ²]	Plocha
T_{poč}	[°C]	Počáteční vytvrzovací teplota
m	[g]	Hmotnost
n	[min ⁻¹]	Otáčky
p	[Pa]	Tlak
\bar{t}	[mm]	Aritmetický průměr tloušťky vrstvy
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
α	[10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]	Součinitel teplotní roztažnosti
ρ	[g/cm ³]	Hustota

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 **Návrhový výkres spodní části formy**
- Příloha 2 **Návrhový výkres horní části formy**
- Příloha 3 **Záznam přítlačné síly hydraulického lisu ZD40/400kN**

PŘÍLOHA 1

Návrhový výkres spodní části formy



Název: Spodní část formy

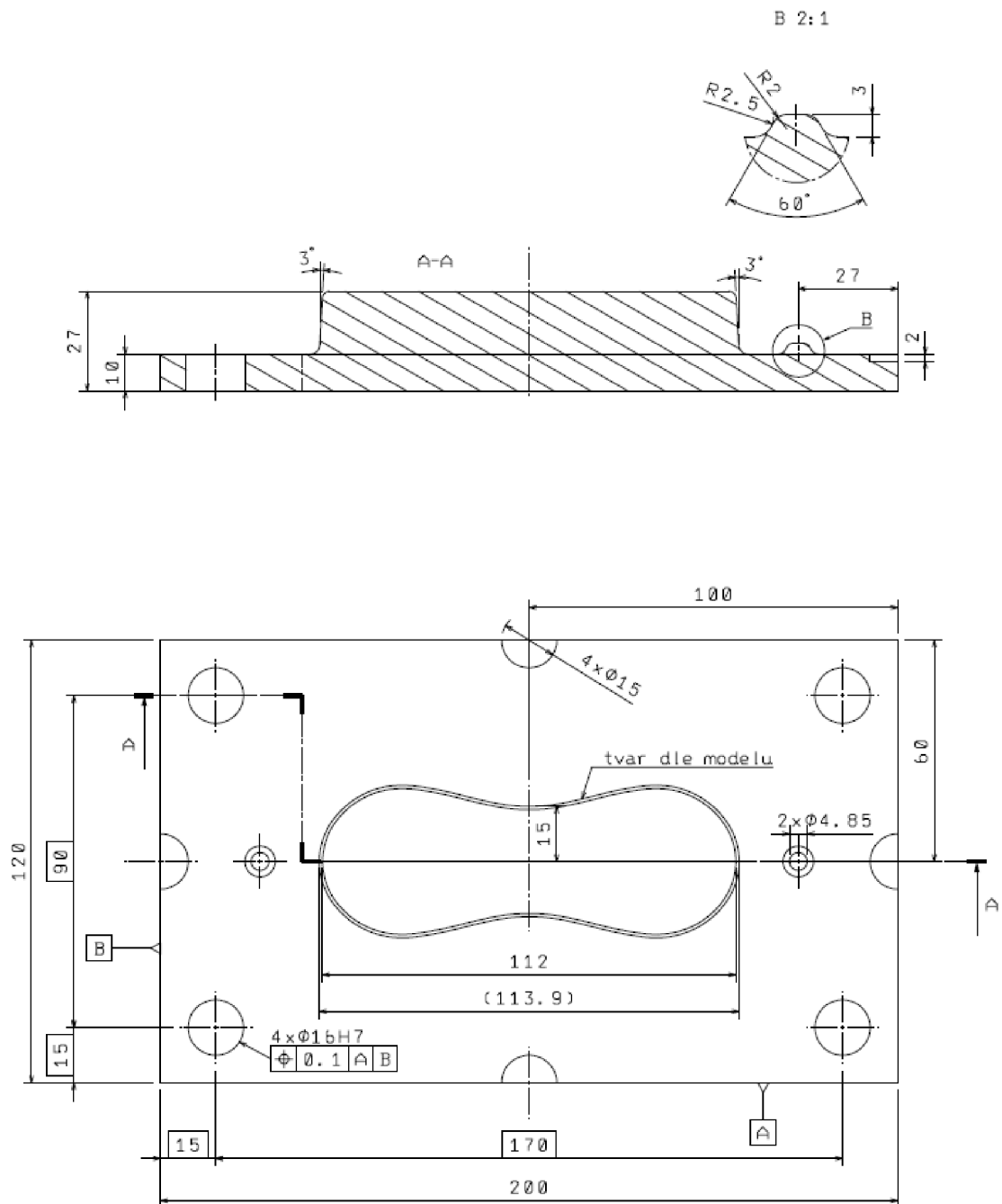
Číslo výkresu: dp_forma_spodni

Jméno: Pavel Příkryl

Datum: 7.3.2019

PŘÍLOHA 2

Návrhový výkres horní části formy



Název: Horní část formy
Číslo výkresu: dp_forma_horni
Jméno: Pavel Přikryl
Datum: 7.3.2019

Záznam přítlačné síly hydraulického lisu ZD40/400kN

