

CNC obrábění a technologie přípravy tvarově složitých sendvičových jader

Tomáš Knot

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš KNOT**
Osobní číslo: **T08613**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **CNC obrábění a technologie přípravy tvarově složitých sendvičových jader**

Zásady pro vypracování:

1. Sendvičové kompozitní materiály - vlastnosti, technologie výroby, výhody
2. Popis sendvičových jader - PET, PVC, PUR pěny. Tvarovatelnost jader
3. Tvarové konfigurace sendvičových materiálů
3. Volba řezných podmínek, upínání, nástrojů. Vicedílné jádra
4. Možnosti 5 - ti osého obrábění. Výroba pěnových jader na 5 - osém obráběcím centru
5. Shrnutí dosažených poznatků při CNC obrábění sendvičových jader

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitu. Brno, 1999
- [2] Reinhart, T. J.: Engineered materials handbook. Composites. Vol. 1., ASM
- [3] Kořínek, Z.: Kompozity. dostupné na: www.volny.cz/zkorinek
- [4] Ehrenstein, G. W.: Polymérní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009
- [5] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 1988
- [6] <http://www.hexcel.com>
- [7] <http://www.diabgroup.com>

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: 13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 25. května 2012

Ve Zlíně dne 10. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: KNOT TOMÁŠ

Obor: TZ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně dne 21. 5. 2012


.....

¹² zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

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

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

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

¹³ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

¹⁴ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá sendvičovou konstrukcí a možnostmi výroby sendvičových jader, fyzikálním a chemickým způsobem, nebo mechanickým opracováním. Řeší jejich výhody a nevýhody, jejich vlastnosti a použití.

Praktická část bakalářské práce se zabývá výrobním procesem, tvarového jádra z PET pěny, pomocí obrábění na CNC frézce.

Klíčová slova: sendvičová konstrukce, sendvičové jádro, kompozitní materiál, CNC obrábění.

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with the construction sandwich and sandwich core manufacturing capabilities, physical and chemical means or mechanical processing. It addresses the advantages and disadvantages and their properties and uses.

The practical part of the thesis deals with the manufacturing process of the shape of the PET foam core by means of machining on the CNC milling machine .

Keywords: sandwich construction, sandwich core, composite materials, CNC machining.

Tímto bych chtěl co nejsrdečněji poděkovat doc. Ing. Soňi Rusnákové, Ph.D. vedoucí mé bakalářské práce, za její podporu, ochotu, vynaložený čas, trpělivost a především cenné rady, při odborné konzultaci.

Také bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. a Ing. Jakubovi Černému za pomoc, ochotu a cenné rady při řešení problematiky v praktické části.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SENDVIČOVÁ KONSTRUKCE	12
1.1 HISTORIE.....	12
1.2 DEFINICE A VLASTNOSTI	12
1.2.1 Tuhost a pevnost v ohybu	13
1.2.2 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni.....	14
1.3 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	14
1.3.1 Příklady konkrétních aplikací	14
1.4 VÝHODY A TECHNOLOGIE VÝROBY	16
1.4.1 Ruční laminace.....	17
1.4.2 RTM, Light RTM.....	17
1.4.3 Vakuové prosycování pod pružnou folii.....	18
1.4.4 Prepreg technologie, vytvrzování v autoklávu.....	19
2 JÁDROVÉ MATERIÁLY	21
2.1 STRUKTURA SENDVIČOVÝCH JADER A ROZDĚLENÍ JEJICH TVARŮ	21
2.2 PĚNOVÁ JÁDRA.....	24
2.2.1 Vlastnosti buněčných pěn	24
2.2.2 Výroba polymerních pěn.....	29
2.2.3 Použití buněčných pěn	29
2.2.4 Vybrané buněčné pěny	31
2.2.4.1 PVC.....	31
2.2.4.2 PET	32
2.2.4.3 PUR a PIR.....	33
2.2.4.4 SAN	33
2.3 DŘEVĚNÁ JÁDRA	34
2.3.1 Balza.....	34
2.4 VOŠTINOVÁ JÁDRA.....	35
2.4.1 Hliníkové voštiny	35
2.4.2 Nomex voštiny	36
2.4.3 Termoplastické voštiny	37
3 VOLBA NÁSTROJŮ, UPÍNÁNÍ A ŘEZNÝCH PODMÍNEK	38
3.1 OBRÁBĚNÍ PLASTŮ	38
3.1.1 Nástroje na obrábění termoplastů.....	38
3.1.1.1 Řezné podmínky	38
3.1.2 Nástroje na obrábění vyztužených a vrstvených plastů	39
3.1.2.1 Řezné podmínky	39
3.2 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	40
3.2.1 Nástroje	40
3.2.2 Řezné podmínky.....	41
3.3 UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ A OBROBKŮ	41
3.3.1 Upínání nástrojů a obrobků u frézování.....	41

4	CNC STROJE.....	44
4.1	VÝHODY.....	44
4.2	PROGRAMOVÁNÍ.....	45
4.3	3 A 5-TI OSÉ OBRÁBĚNÍ.....	45
4.4	SOUŘADNÉ SYSTÉMY.....	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
5	VÝROBNÍ PROCES.....	48
5.1	PŘÍPRAVA MATERIÁLU A NÁVRH TVARU	48
5.1.1	Příprava polotovaru.....	49
5.1.2	Návrh hrubého tvaru a volba technologie.....	49
5.1.3	Volba nástrojů.....	51
5.2	MODELOVÁNÍ V PROGRAMU CATIA V5R18	51
5.2.1	Vymodelování požadovaného tvaru.....	51
5.2.2	Převedení do formátu kompatibilním s NX7.5	52
5.2.3	Vytvoření výkresů.....	52
5.3	SIMULACE A VYGENEROVÁNÍ NC KÓDU POMOCÍ PROGRAMU NX7.5	52
5.3.1	Volba vhodných programových operací a jejich posloupnost.....	53
5.3.2	Volba rezných podmínek	55
5.3.3	Vygenerování programového kódu.....	56
5.4	OBRÁBĚNÍ NA CNC FRÉZCE HWT 442	57
5.4.1	Upnutí nástroje.....	58
5.4.2	Upnutí polotovaru	58
5.4.3	Načtení kódu	58
5.4.4	Volba počátku souřadného systému (nulový bod).....	58
5.4.5	Spuštění NC programu.....	59
	ZÁVĚR A DISKUZE.....	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
	SEZNAM TABULEK.....	67
	SEZNAM PŘÍLOH.....	68

ÚVOD

Sendvičové konstrukce se uplatňují převážně v leteckém a dopravním průmyslu, kde se využívá jejich hlavních předností, a to vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti, mezi další výhody patří únavová odolnost, odolnost proti šířením trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni a tepelná a akustická izolace. Sendviče však lze nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích, např. lodním, ve stavebnictví a neposledním řadě také ve sportovním odvětví.

Sendvič je materiál složený z vnější tenké tuhé desky a lehké výplně. Sendvičové jádro, je buď ve formě pěny, nebo voštiny a plní distanční funkci je silnější a zpravidla méně pevné, vnější vrstvy jsou tuhé a tenké. Voštinové jádra vykazují v porovnání s pěnovými jádry výrazně vyšší mechanické vlastnosti, ale nachází uplatnění zejména při jednodušších tvarových aplikacích. Při volbě druhu sendviče musíme vždy zohlednit vícero faktorů, jako je prostředí kde se bude nacházet, na mechanickém, chemickém či fyzikálním zatížení apd.

Tvarové sendvičové jádra lze vyrobit více způsoby. Jeden ze způsobů je pomocí vypěnění formy např. při výrobě PUR pěny, jsou použity dvě složky, izokyanát a polyok, které se smíchají ve zpěňovacích strojích s míchací hlavou. Vytvoří se homogenní kapalina, která se lije do forem, kde napění do potřebného tvaru.

Dalším způsobem je obráběním sendvičového jádra na obráběcích strojích na požadovaný tvar. Tento způsob je ale omezeno rozměry pracovního prostoru stroje. Proto se v praxi tato metoda používá, pro větší série a výrobky menších rozměrů.

V případě termoplastických pěn jsou i další možnosti, jako je Termoforming, metoda současného ohřevu jádra i potahu, které se lisují do požadovaných tvarů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SENDVIČOVÁ KONSTRUKCE

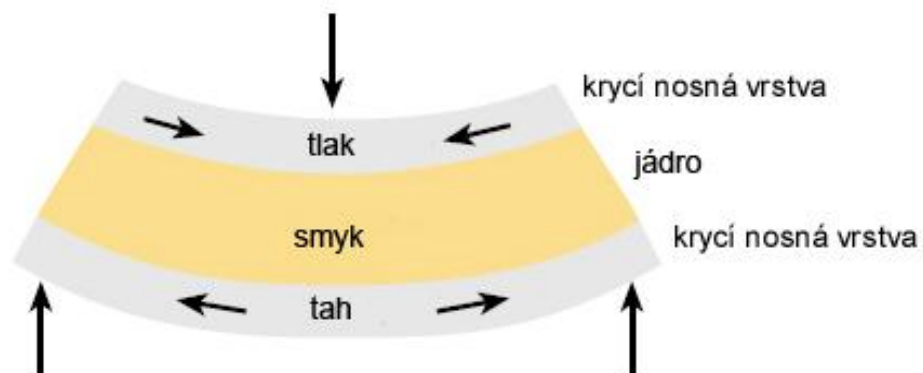
1.1 Historie

Historicky, hlavní využití dvou různých materiálů se vzdáleností mezi nimi, byl představen Delyem kolem 1820. První rozsáhlé použití sendvičových panelů bylo během 2. světové války. V Anglii během války, byly u letounů „de Havilland Mosquito“ použity sendviče, hlavně kvůli nedostatku jiných materiálů. Průčelí byla vyrobena z dýhy a jádro z balzového dřeva.

Během 2. světové války se také objevily první teoretické poznatky o sendvičích. V 50. letech byla výroba zaměřena na voštinové materiály. Voštinové jádro bylo hlavně využíváno jako základní materiál v leteckém průmyslu. Nicméně to mělo některá omezení, kupříkladu zde byly velké problémy s korozí. Na konci 50. a během 60. let byly vyráběny různé pěnové hmoty, místo voštinových materiálů. V začátcích výroby byly používány spíše měkké materiály pro jejich izolační vlastnosti, například polystyren a polyuretane. Později bylo možné vyrobit tvrdší pěnové hmoty s vyšší hustotou a od té doby se sendviče staly velmi užitečným a flexibilním řešením. V dnešní době existuje velké množství pěnových hmot, různé kvality pro výrobu jádrových materiálů. [1]

1.2 Definice a vlastnosti

Efektivní struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými potahy zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím smykové síly mezi potahy.



Obr. 1. Namáhání tahovými a tlakovými silami. [16]

Sendvičové konstrukce se uplatňují převážně v letecké a dopravní technice, kde se využívá jejich hlavních předností, a to vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Sendviče však lze nalézt i v ostatních průmyslových odvětvích. Ohybová tuhost a pevnost nejsou jejich jedinými přínosy. Mezi další výhody patří únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni, tlumení a akustická izolace. Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra. [2]

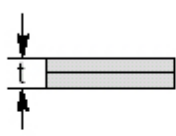
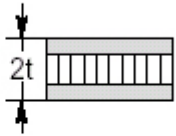
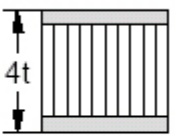
1.2.1 Tuhost a pevnost v ohybu

Ohybová tuhost sendviče je přímo úměrná druhé mocnině její tloušťky. Výhodou je, že se zvětšováním tloušťky sendviče dochází k velmi malému nárůstu jeho hmotnosti - zvětšuje se pouze tloušťka lehkého jádra, které obvykle má hustotu okolo $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pevnost v ohybu také roste se vzdáleností potahů, ale při dimenzování sendviče je nutné zároveň posuzovat smykovou pevnost jádra. Obecně lze říci, že pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou.

O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka potahů. Pevnost v tlaku jádra roste s jeho hustotou.

Z porovnání pevností pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě. Ovšem při volbě vhodného jádra sendviče je nezbytné zohlednit všechny faktory. [2]

Tab. 1. Příklad konstrukčních vlastností sendvičových panelů. [16]

	Celistvý materiál	Síla jádra t	Síla jádra $3t$
			
tuhost	1.0	7.0	37.0
pevnost v ohybu	1.0	3.5	9.2
hmotnost	1.0	1.03	1.06

1.2.2 Tepelná odolnost a odolnost proti ohni

Stejně jako na ostatní strojírenské výrobky i na sendviče jsou kladeny požadavky na tepelnou odolnost. Zde se však musí brát v úvahu tepelná odolnost všech složek sendviče, tj. potahů, jádra i spojovacího lepidla. U tepelné odolnosti také hraje velký vliv tepelná vodivost použitých materiálů. Při vysoké tepelné vodivosti použitých materiálů je ohřev sendviče nižší než při nízké tepelné vodivosti (při ohřevu sendviče pouze na jedné straně). Této vlastnosti se využívá při stavbě kosmických raket, kde se právě z tohoto důvodu používají hliníkové voštiny.

Při návrhu sendvičů pro dopravní techniku je nutné respektovat požadavky oborových konstrukčních předpisů na odolnost proti ohni. Všechny použité materiály musí mít atest, že splňují příslušné předpisy na odolnost proti ohni. [2]

1.3 Aplikace sendvičových konstrukcí

Sendviče jsou progresivní konstrukce s vysokou ohybovou pevností a tuhostí při nízké hmotnosti, ale mají i řadu dalších výhod. Uplatnění nacházejí nejen v letecké a dopravní technice, ale i v ostatních průmyslových odvětvích.

Sendvičové konstrukce řadíme k vrstevnatým konstrukcím. Ty jsou tvořeny různými jednoduchými či složenými materiály odlišného charakteru vzájemně pevně spojenými. [2]

1.3.1 Příklady konkrétních aplikací

Níže uvedené příklady konkrétních aplikací sendvičů jsou převzaty z výrobního programu firmy Letov-ATG.

Kryt hlavního podvozku letounu Aero Ae-270 je sendvič tvořený kompozitními potahy s uhlíkovými vlákny a pěnovým jádrem. Použití pěny si vynutil složitý tvar dílu s několika prolisy. Při výrobě je nejprve obrobena pěnové jádro na CNC stroji a jsou vlepeny duralové vložky v místech závěsů. Pak je pěnové jádro obaleno několika vrstvami uhlíkového prepregu. Díl je vytvrzen v jedné operaci v autoklávu. [2]



Obr. 2. Letoun Aero Ae-270. [20]

Voštinová jádra z hliníkové voštiny byla použita pro sendvičové panely pro nízkopodlažní tramvaj Astra, kde byla požadována vysoká tuhost při nízké hmotnosti. V tomto případě byla zvolena klasická koncepce duralových potahů přilepených k hliníkové voštině fóliovým lepidlem. Panel kryje výsuvnou plošinu, která tvoří bezbariérový vstup do tramvaje a tím umožňuje nájezd invalidního vozíku přímo z nástupiště. [2]



Obr. 3. Tramvaj Astra. [2]

1.4 Výhody a technologie výroby

Sendviče nemusí být pouze rovné desky, ale mohou tvořit i složité plochy s výstupky a prolisy. Pro složitě tvarované sendviče je použití kovových potahů velmi nákladné, proto se zde převážně používají kompozitní potahy.

Požadovaný tvar sendviče ovlivňuje volbu vhodného jádra; například pro zakřivené sendviče je obtížné použít voštinu s hexagonální buňkou, v tomto případě je vhodnější použít voštinu se speciálním tvarem buňky (obdélníkovým, lasturovitým apod.) nebo tepelně tvarovatelnou pěnu. [2]

Při výrobě kompozitů se v závislosti na tvaru výrobku využívá celé řady technologií od nejprimitivnější ruční laminace až po nejnáročnější technologie jako je např. kladení prepregů. Jejich srovnání je uvedeno v tabulce, kde nejsou zařazeny některé speciální technologie použitelné pouze pro výrobu určitých tvarů, kam patří např. pultruzie pro výrobu profilů. [3]

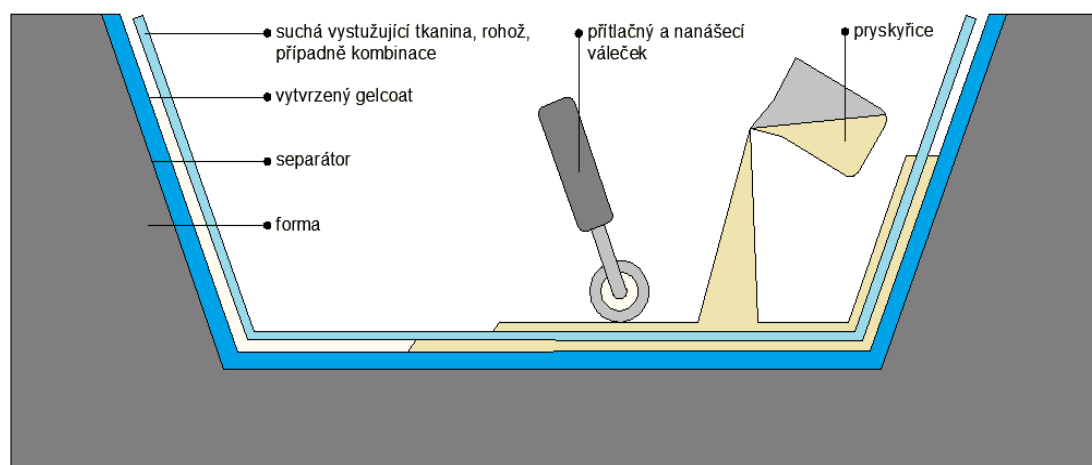
Tab. 2. Srovnání jednotlivých technologií výroby kompozitů. [3]

Technologie	Výhody	Nevýhody
Ruční laminace	Levné formy Levné suroviny Nenáročná na zařízení Vhodná i pro malé série Menší přesnosti Mokrý otevřený proces	Nízký obsah výztuže Velký obsah vzduchu Pracnost Obtížná opakovatelnost
RTM	Levné formy Levné suroviny Malá pracnost Uzavřený proces Vyšší obsah výztuže Sendviče s pěnou Vhodná i pro malé série	Dlouhý tok pryskyřice Mokrý proces
Vakuové prosycování pod pružnou folií	Vyšší obsah výztuže Lepší opakovatelnost	
Prepreg	Suchý proces Malá pracnost Velmi vysoký obsah výztuže Sendviče s pěnou i voštinou Minimální tok pryskyřice Výborná opakovatelnost	Velmi drahé zařízení Drahé formy Drahé suroviny Špatná dostupnost surovin Složitá logistika Vysoká teplota zpracování

1.4.1 Ruční laminace

Ručním kladením (hand lay-up) výztuže na otevřenou formu lze vyrobit i velmi rozměrné výrobky. Výztuž musí být v podobě tkaniny nebo rohože, pryskyřice při teplotě výroby musí téci. Prosyčování výztuže tekutou pryskyřicí je prováděno ručně (pomocí štětce, stěrky nebo válečku). Pro dokonalé prosycení výztuže jsou používány válečky složené z disků. Mezi disky je mezera, umožňující tok pryskyřice.

Odpařování reaktivního rozpouštědla do ovzduší je možno potlačit použitím pryskyřic s vosky, vytvářejícími na povrchu stojící pryskyřice nepropustnou vrstvu (pryskyřice se sníženou emisí rozpouštědla). Při prosycování výztuže je však účinek vosku zanedbatelný. Vyrobené díly se vytvrzují nejčastěji za studena, tj. při pokojové teplotě a dotvrzují za zvýšené teploty (80 °C). Ruční kladení za mokra s pryskyřicemi UP a VE lze použít pouze tehdy, neklesne-li teplota pod 15°C. Proces vytvrzování závisí na použitém vytvrzovací systému. Dobu do želatinování pryskyřice (“gel time”) lze zmenšit použitím urychlovače (tří složkový systém). [4]



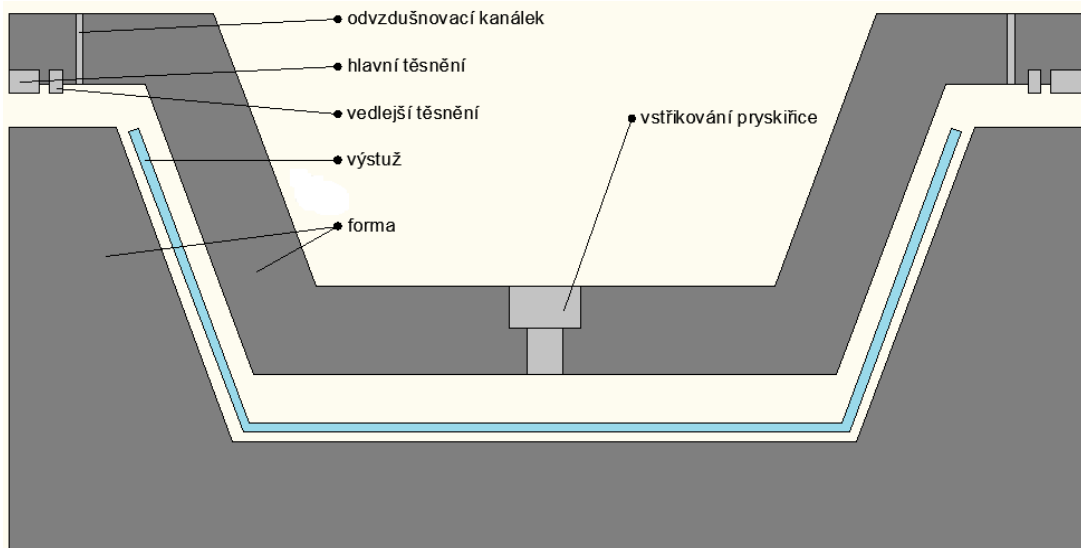
Obr. 4. Technologie ruční laminace. [5]

1.4.2 RTM, Light RTM

Princip výrobní metody RTM (Resin Transfer Moulding) spočívá v prosycení suché výztuže polotovaru (tzv. předlisku, předformy) kompozitního výlisku uloženého ve formě nízkoviskozním polymerním pojivem většinou na bázi epoxidu, polyesteru, kvanoesteru, apod. Charakteristikou metody RTM je, že prosycení tzv. infuzním procesem je dosaženo zavedením tlakového spádu v hodnotách řádově ve stovkách kPa mezi vstupními a výstup-

ními porty formy. Po úplném prosycení dílu následuje vytvrzení pojiva vytvrzovacím režimem stanoveným pro použité pojivo. Proces uzavírá otevření formy, odformování a začištění dílu.

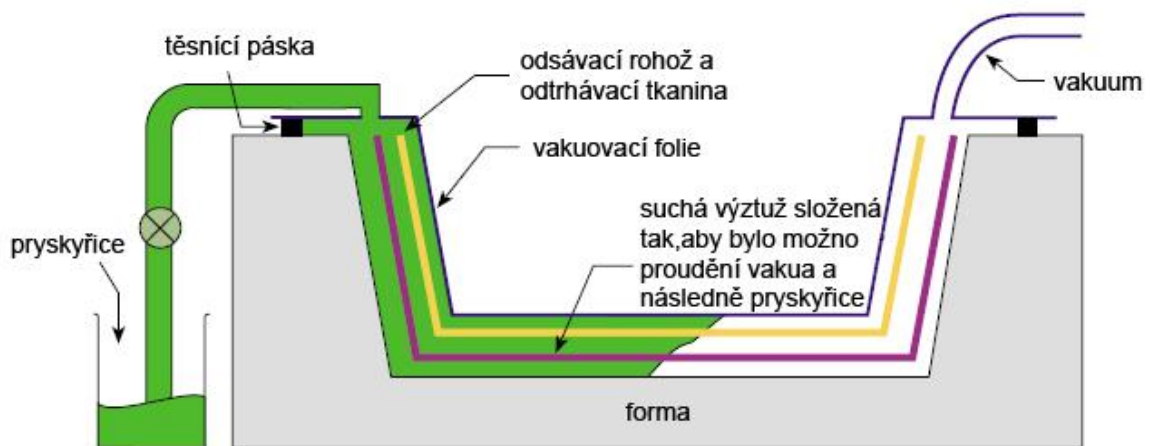
Výrobní metoda RTM je obecně vhodná pro díly spíše menší, tvarově komplikované, s vysokými požadavky na geometrickou přesnost a jakost povrchu. Umožňuje sestavit polotovar výlisku z několika samostatně zhotovených komponentů (předlisků) a následně celek proinjektovat pojivem v jediné operaci RTM. V porovnání s kvalitativně alternativní metodou lisování prepregu je RTM výhodnější i z hlediska materiálových a výrobních nákladů, a to téměř řádově. Na druhé straně určitou nevýhodou metody RTM je citlivost na zvládnutí tzv. strategie plnění, což může zvýšit riziko výskytu vad (plynové dutiny, nedokonalé prosycení). Zde se nabízí prostor pro simulace procesu RTM metodou konečných prvků. [3]



Obr. 5. Technologie RTM. [5]

1.4.3 Vakuové prosycování pod pružnou folií

Technologie má mnoho společného s RTM technologií. Spodní forma je klasického typu jako pro ruční kladení. Místo druhé části formy se používá pružná folie, která je k okrajům formy připevněna těsnícími pásky. Iniciované pojivo se přisává ze zásobníku, v případě velkorozměrných dílců se rozvádí perforovanými trubičkami až do vzdálenějších míst. Vakuum je aplikováno na obvodu formy pomocí kanálku, vytvořeného těsnícími profily. [5]

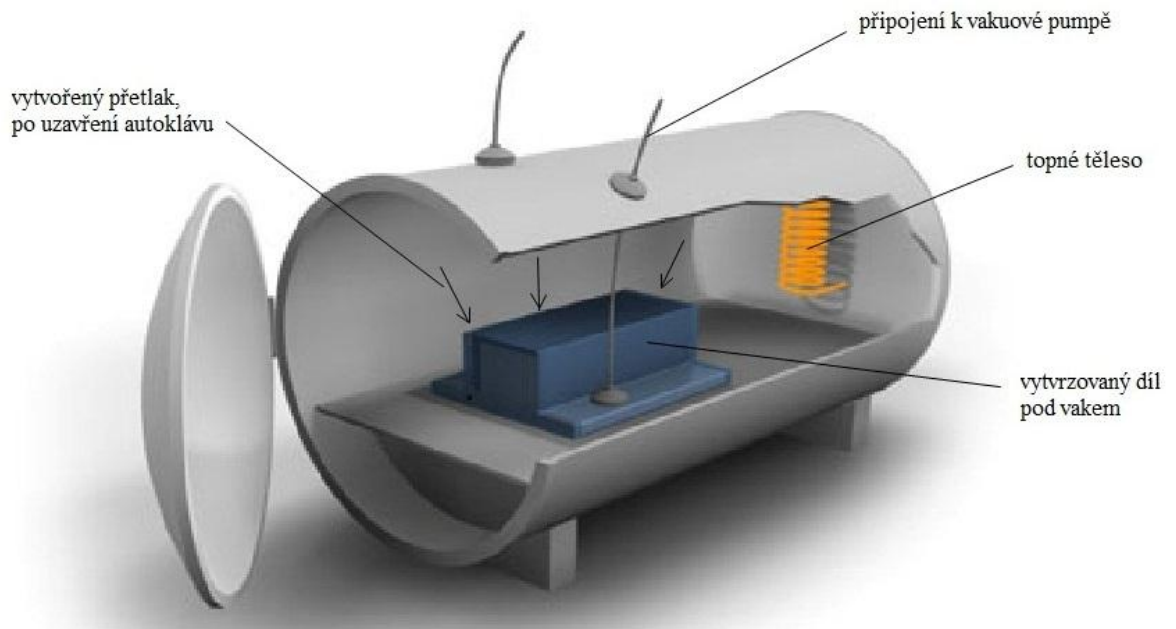


Obr. 6. Technologie vákuového prosycování. [16]

1.4.4 Prepreg technologie, vytvrzování v autoklávu

Jde o technologii vhodnou pro kusovou výrobu mechanicky namáhaných kompozitních dílů. Do otevřené formy opatřené vrstvou separátoru nebo neporézní fólií je vložena odtrhová vrstva tkaniny z vláken PET, PA. Tato vrstva chrání povrch kompozitu před znečištěním a je snímána před lepením nebo barvením. Dále jsou podle zvolené skladby laminátu do formy pokládány orientované nařezané prepregy. Aby se zvětšila lepivost prepregů, je možno je nahřívat horkým vzduchem. Po položení potřebného počtu vrstev je na vrchní vrstvu dílu položena opět odtrhová vrstva a poté vrstva umožňující průnik přebytečné pryskyřice do odsávací vrstvy (děrovaná fólie nebo tkanina). Odsávací vrstva má za úkol odsát přebytečnou pryskyřici (anglicky “bleeder”) a je obvykle vyrobena jako rohož z polymerních vláken (PET), snášejících teplotu vytvrzování. Stejnou funkci splňuje i jemná skleněná rohož nebo tkanina. Odsávací vrstva je překryta prodyšnou fólií (perforovaný film), na ní jsou položeny odvodušňovací vrstvy z polymerní nebo skelné rohože (eventuálně tkaniny), umožňující odsátí vzduchu (anglicky “breather”). Hermetičnost prostoru zajišťuje polymerní fólie (obvykle z PA) nebo pro opakované použití elastomerní vak ze silikonového kaučuku. V tlakové nádobě, tzv. autoklávu, je provedeno vakuování dílu. Po odsátí vzduchu z vaku přitlačuje jednotlivé vrstvy atmosférický tlak. Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice při (120° až 200°C). Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregů k sobě a je tak zaručen minimální obsah pryskyřice (přetlak je v desetinách MPa). Doba působení teploty a přetlaku se volí

podle rychlosti vytvrzování pryskyřice. Chladnutí dílu musí být pomalé, aby mohla relaxovat vnitřní pnutí v laminátu, vzniklá rozdílnou tepelnou roztažností složek kompozitu i různě orientovaných vrstev. [4]



Obr. 7. Schéma autoklávu. [19]

2 JÁDROVÉ MATERIÁLY

Balzové dřevo a překližky byli po mnoho let hodně používány ve výstavbě lodí. I když tyto materiály poskytují vynikající kompresní a tuhostní vlastnosti za poměrně nízkou cenu. Jejich hlavní nevýhodou je jejich váha, náchylnost k absorpci vody a následné degradaci.

Pěnové jádra mohou být mnohem lehčí, odolné proti plísním a neabsorbují vodu ani jiné tekutiny, se kterými se můžeme setkat v lodním průmyslu. Zde je také zřejmé, že pěnové jádra mají lepší odolnost proti únavě materiálu než balzové dřevo. Lamináty vyrobené s pěnového jádra vydrží déle a váží méně než dřevo a zajišťuje odpovídající vlastnosti.

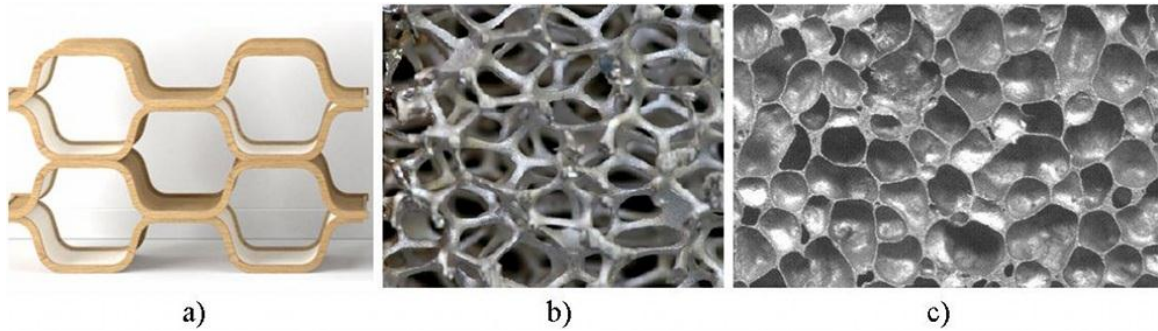
Dřevo je ale stále dobrý materiál, který může být použit v oblastech, kde působí velké kompresní zatížení, (např. pro zabudování motorů a kolem spojů), kde je potřeba vysoká hustota materiálu, a použití pěnového jádra zde může být příliš drahé.

Voštinové materiály, jako je např. Nomex (aramid papír a fenolové pryskyřice) a hliníkové voštiny jsou jádra používané v letecké oblasti vzhledem k jejich vysoké pevnosti, vysoké teplotní stabilitě a nízký hmotnosti. I když tyto vlastnosti dobře fungují pro letecké aplikace, mají určité nedostatky v lodním průmyslu. Voštiny mají relativně malý prostor pro sendvičové vazby. Otevřená buněčná struktura z voštiny je náchylná k proniknutí vody a degradaci materiálu. Také zpracování voštinového materiálu vyžaduje mnohem vyšší koncové zpracování materiálu a vybavení, jako jsou autokláv a epoxidem předimpregnovaný materiál. [1]

2.1 Struktura sendvičových jader a rozdělení jejich tvarů

Strukturu buněk tvoří buněčné tělesa nebo skořepinové elementy (struktury honeycomb), nebo prostorová síť tvořena hranami a stěnami tuhého materiálu (pevné pěny, zkráceně jen pěny).

Struktury honeycomb jsou inspirovány tvarem včelích plastů. Průřez buňky je mnohoúhelník (obvykle šestiúhelník) nebo do oblouků tvarovaný profil, který je po celé délce buňky stejný. Tvar buňky je tím pádem určen jen jednou rovinou, proto se také nazývají dvou-rozměrné buněčné tělesa. Příklad struktury honeycomb je na (obr. 8a).



Obr. 8. Struktura buněčných těles:

a) honeycomb, b) pěna s otevřenými buňkami, c) pěna s uzavřenými buňkami. [6]

Na rozdíl od struktury honeycomb jsou buňky pěn tvořeny sítí hran a stěn v prostoru, které vytvářejí již zmíněné dutiny. Tyto dutiny jsou buď od sebe odizolovány pevnými tenkými stěnami materiálu, nebo jsou mezi sebou průchodné, a to v případě, že buňka je tvořena pouze hranami. V prvním případě mluvíme o pěnách s uzavřenými buňkami (obr. 8c), v druhém případě o pěnách s otevřenými buňkami (obr. 8b). Otevřené nebo uzavřené propojení buněk je podmíněno zpěňováním materiálem a samotnou technikou výroby pěny. Vyskytují se také pěnové materiály s kombinací otevřených i uzavřených buněk. Pěny se také nazývají trojrozměrné buněčné tělesa. [6]

Jádro sendvičové konstrukce může být téměř jakýkoliv materiál nebo architektura, ale obvykle, se dělí do čtyř typů, které jsou znázorněny na obrázcích a) pěna, nebo pevné jádro, b) voštinové jádro, c) webové jádro, d) zvlněné nebo nosníkové jádro [7]



Obr. 9. Pěna, nebo pevné jádro. [16]



Obr. 10. Voštinové jádro. [16]



Obr. 11. Webové jádro.



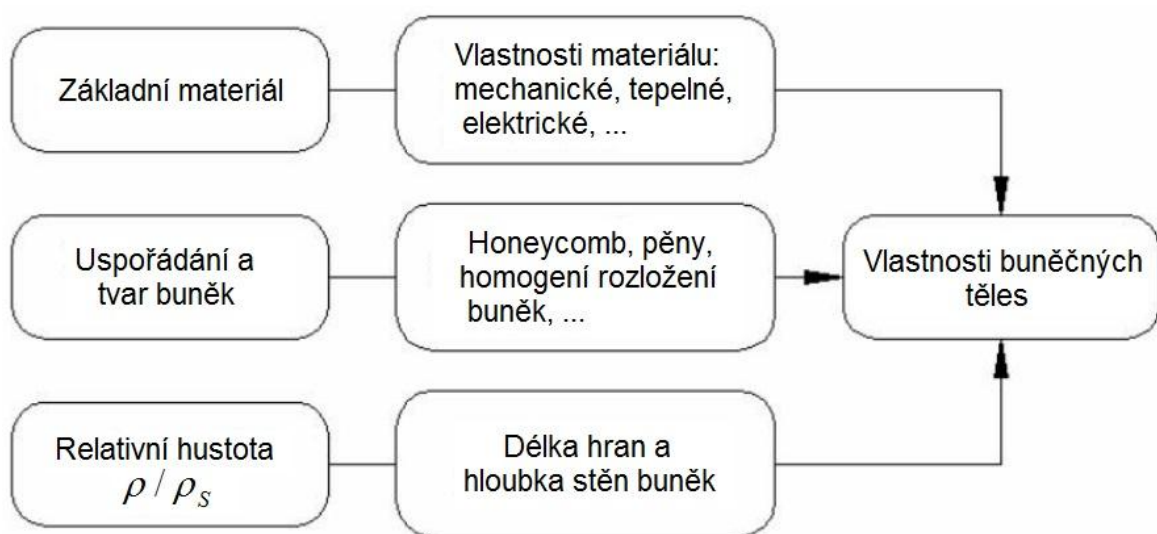
Obr. 12. Zvlněné nebo nosníkové jádro.

2.2 Pěnová jádra

Pěnové materiály vznikají tím, že jsou v matici uměle vytvořeny mikro dutiny, naplněné plynem. Tyto mikro dutiny jsou zpravidla přibližně kulovité, při malém množství jsou uzavřené a mohou obsahovat v podstatě libovolný plyn, většinou to bývá obyčejný vzduch, také vodík, dusík nebo vodní pára. Při větším množství se spojují dohromady a vznikají do většího prostoru otevřené mikropóry. [8]

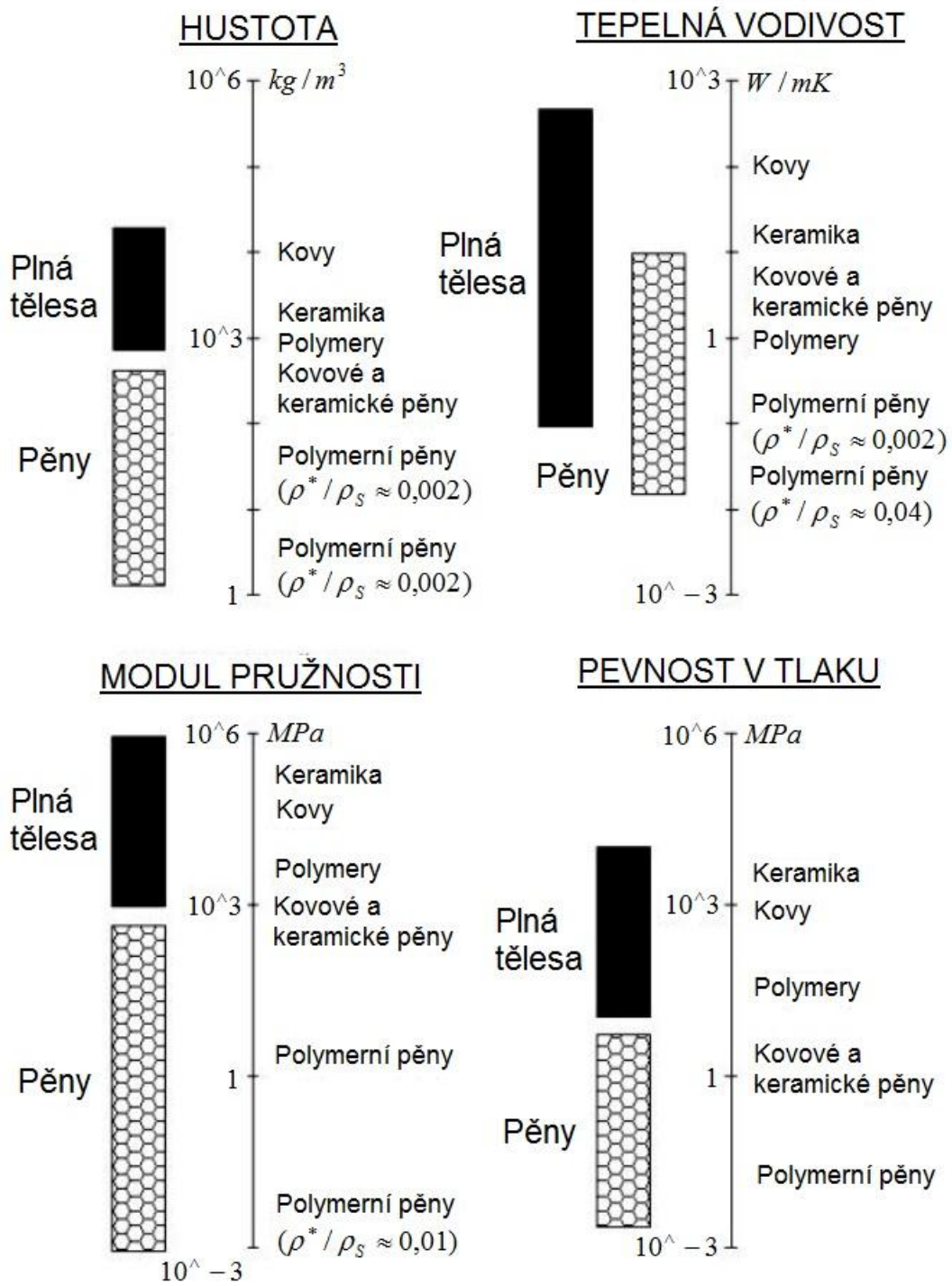
2.2.1 Vlastnosti buněčných pěn

Vlastnosti buněčných pěnových těles jsou výsledkem kombinace vlastností buněčné struktury a vlastností materiálu použitého na jeho výrobu. Tyto dva faktory spolu s relativní hustotou buněčných těles jsou určujícími parametry pro jejich fyzikální a mechanické vlastnosti, (obr. 14).



Obr. 13. Faktory ovlivňující vlastnosti buněčných těles. [6]

Na (obr. 15) je znázorněno srovnání čtyř vlastností: hustota, tepelná vodivost, Youngův modul pružnosti a pevnost v tlaku plných a buněčných materiálů.



Obr. 14. Porovnání vlastností pěnových a plných materiálů. [6]

1. Fyzikální vlastnosti

Hustota (měrná hmotnost):

Nízká hustota, tím pádem i hmotnost buněčných těles je dána buněčnou strukturou, obsahem dutin v buňkách je obvykle plyn. Důležitým parametrem při porovnávání buněčných těles je jejich tzv. relativní hustota:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1)$$

Relativní hustota představuje podíl hustoty pěnového materiálu a hustoty materiálu, ze kterého je pěna vyrobena. Míru volného místa vyplněného plynem nebo kapalinou charakterizuje pórovitost:

$$\phi = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2)$$

Obecně lze říci, že buněčné materiály mají relativní hustotu menší než 0,3, ultralehké pěny dokonce až 0,003. Hustota je určujícím faktorem, který ovlivňuje ostatní, ať už fyzikální nebo mechanické vlastnosti buněčných těles, proto se její změna používá k dosažení požadovaných vlastností, žádaných pro danou aplikaci použití pěn.

Vodivost (elektrická a tepelná):

Vodivost buněčných těles, ať už elektrická nebo tepelná je obecně nižší než u plných těleších. Důvodem je nízký podíl materiálu stěn a hran v objemu buněk a vysoký poměr plynových dutin v objemu buněčného tělesa. Tím je zřejmé, že vodivost narůstá s nárůstem hustoty buněčných těles. Při kovových pěnách je jejich tepelná vodivost zhruba 1/10 vodivosti kovu, ze kterého je vyrobena. Jejich tepelná vodivost se může ještě snížit dalším oxidačním zpracováním. Koeficient tepelné roztažnosti kovových pěn je stejný jako u plných kovů.

Zvukově, vibrační a izolační vlastnosti:

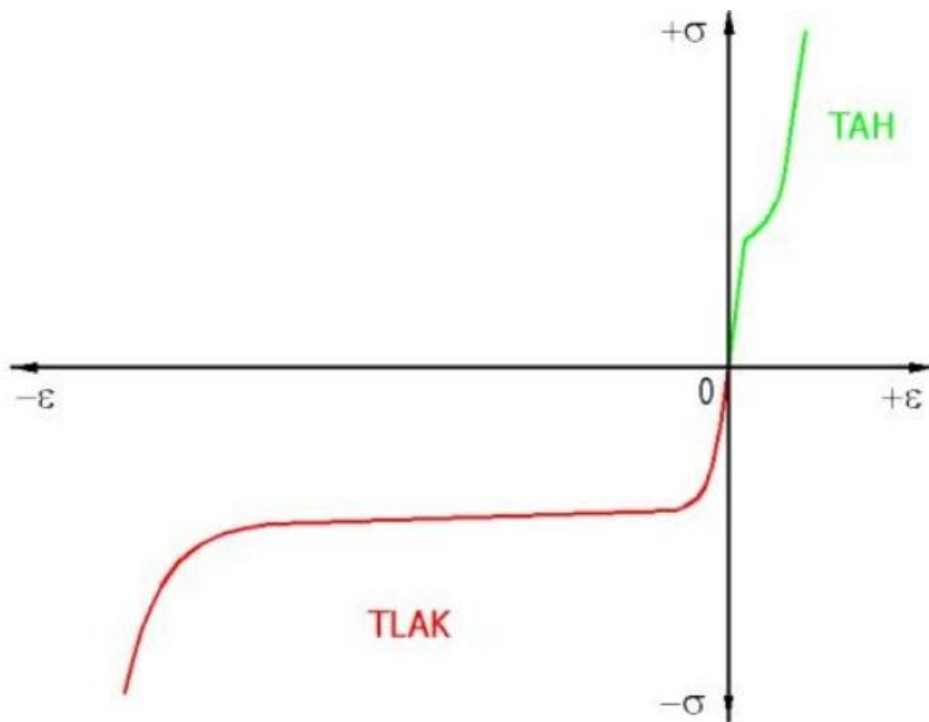
Zvukové vlny se v pěnách odrážejí od jejich nepravidelné struktury. Vibrační energie způsobuje deformaci stěn buněk a mění se na tepelnou energii. Proto intenzita odraženého zvuku klesá. Absorpční stupeň pohlcení lze zvýšit jemným a homogenním rozložením buněk v objemu materiálu.

2. Chemické vlastnosti

Chemickými vlastnostmi vynikají převážně kovové pěny. Jsou nehořlavé, nevylučují toxické plyny při ohřevu, ale korodují stejně jako plné kovy.

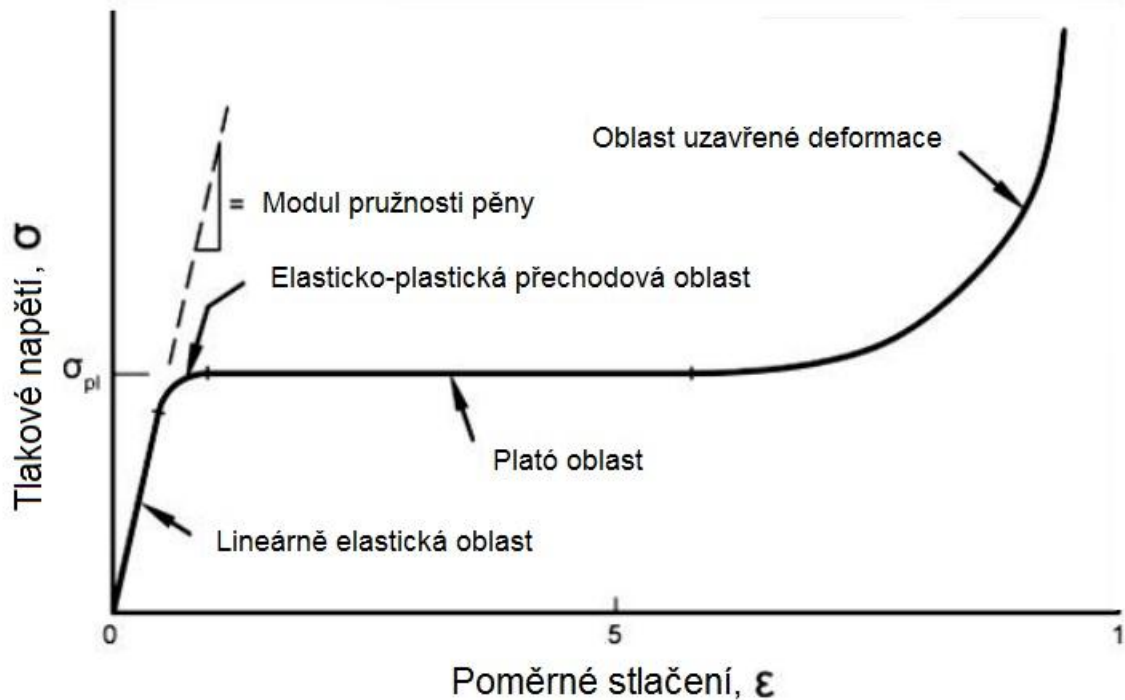
3. Mechanické vlastnosti

Podle pracovních diagramů je chování pěn v tahu a tlaku rozdílné. V tlaku je výrazná tzv. plató oblast, kde deformace rozsáhlé narůstají při minimální změně napětí (obr. 17), čímž se zvyšuje jejich schopnost pohlcovat energii, která se využívá při aplikacích pěn jako balící, absorpční a ochranný materiál. V tahu je tato oblast velmi slabě výrazná.



Obr. 15. Pracovní diagram pěn TAH - TLAK. [6]

Na (obr. 18) je znázorněn typický pracovní diagram pěn při tlakovém zatížení, který se skládá ze tří oblastí. Na začátku, při nízkých napětích, se pěny chovají lineárně elasticky, pak přecházejí do dlouhé oblasti plató (plateau), kde dochází k nevratné deformaci jejich buněk (kromě elastických pěn), a nakonec lze sledovat oblast s prudkým nárůstem napětí (oblast uzamknutí deformací).



Obr. 16. Charakteristický tvar tlakové křivky pěn. [6]

V lineární elastické oblasti dochází k ohybu hran buněk a při uzavřených buňkách se ještě navíc deformují stěny buněk, což způsobí nárůst tlaku uzavřeného plynu nebo kapaliny. Při namáhání v tlaku dochází v plató oblasti ke kolapsu buněk vlivem pružného vzpěru při elastických pěnách (např. guma, kaučuk), tvořením plastických zón při plastických pěnách (např. polymery a kovy) a křehkému porušení při křehkých pěnách jako jsou např. keramické pěny.

4. Absorpční vlastnosti

Rozhodujícím faktorem pro určení kvality obalového materiálu, ochranných materiálů a absorbérů nárazové energie je schopnost pohltit energii nárazu bez překročení kritického napětí v těchto materiálech nebo velikost zrychlení (zpomalení) chráněné hmoty, které nesmí překročit dovoleno hranice, aby nedošlo k jejímu poškození nebo poranění v případě osob. A právě buněčné materiály, ať už struktury honeycomb nebo pěny, jsou vhodnými pro tyto aplikace, protože při rostoucí tlakové deformaci udržují přibližně konstantní napětí - plató oblast. Tato oblast má největší vliv na pohlcení kinetické energie chráněné hmoty.

Mechanické vlastnosti buněčných těles, a tím pádem i plató oblast, při tlakovém namáhání lze ovlivňovat vhodným výběrem základního materiálu, strukturou buněk a samotnou hus-

totou pěnového materiálu. Pro každou aplikaci týkající se absorpce nárazové energie lze nalézt optimální hustotu buněčného tělesa. [6]

2.2.2 Výroba polymerních pěn

Polymery jsou zpěňované přidáním plynných bublin do tekutého monomeru nebo horkého polymeru. Tyto bubliny se nechají expandovat, stabilizovat a pak se těleso ochladí, aby ztuhlo. Bubliny se přidávají mechanickým mícháním nebo přimícháním zpěňovacího materiálu (zpěňovadla) do polymeru. Zpěňovadlo může být na bázi fyzikální nebo chemické.

Fyzikální zpěňovadla jsou inertní plyny nebo uhlík, vodík a dusík. Tyto plyny se zavádějí do horkého polymeru pod vysokým tlakem a jejich růst v materiálu je řízen redukcí tlaku. Jinou alternativou je přimíchání do polymeru tekutiny s nízkým bodem varu (např. chlorfluoruhlovodíky nebo dichlormethan). Tyto se ohřevem odpaří, čímž uvolňují plynové bubliny. Chemické zpěňovadla jsou přísady, které se teplem rozkládají, nebo které vzájemnou chemickou reakcí uvolňují plyny. Polymerové pěny s nízkou hustotou lze také vyrábět přimícháním polymerového gelu do tekutiny, která se následně nechá odpařit. Nejvíce používanými polymerními pěny jsou pěny polyuretanové (PUR), polystyrenové (EPS), polypropylenové (EPP) a polyetylenové (PE). [6]

2.2.3 Použití buněčných pěn

Enormní rozsah vlastností nabízí širokou oblast využití materiálů s buněčnou strukturou tam, kde by se klasické materiály těžko uplatnily. Nízká hustota a tím i hmotnost dovoluje vytvářet lehké a tuhé komponenty jako například vyplněné profily a velké přenosné konstrukce v automobilovém, leteckém a stavebním průmyslu. Pro nízkou tepelnou vodivost jsou pěnové materiály levným a spolehlivým tepelným izolátorem. Pěny se také využívají jako výplňový materiál pro jejich nízkou tuhost, např. polyuretanové pěny se standardně používají jako výplň sedadel (obr. 17b).



a)



b)

Obr. 17. a) absorbér s pěnovou výplní, b) pěnová výplň autosedačky. [6]

Mezi hlavní oblasti použití buněčných materiálů patří (v závislosti na vlastnostech zpěňování materiálu):

- samonosné lehké panely pro dopravní a stavební konstrukce,
- jádra pro sendvičové struktury nebo přímo sendviče s izotropními vlastnostmi,
- konstrukční a obkladový materiál v hotelech, obchodních domech a jiných veřejných prostorách s tepelně a zvukově izolačním účinkem, nezátěžující významně životně prostředí,
- alternativa k dřevu kvůli nehořlavosti (kovové pěny), rozměrové stabilitě, odolnosti vůči parazitům a plísním, snadné recyklovatelnosti a pod.,
- lehké součásti strojů s vysokou tuhostí a dobrými tlumíciemi vlastnostmi,
- trvalé jádra odlitků,
- vyztužování dutých profilů v nejvíce namáhaných průřezech,
- deformační části automobilů na ochranu pasažérů před nárazem
- bezpečnostní deformační zóny pro zdvihací a manipulační systémy [6]

2.2.4 Vybrané buněčné pěny

2.2.4.1 PVC

PVC pěna je technicky Interpenetrating Polymer Network (IPN) z PVC a polyurea. Vzájemné působení těchto polymerů dává pěně své jedinečné vlastnosti. I když, je pěna z termosetu, může být stále tvarovatelná (za tepla). Navíc je odolná vůči řadě rozpouštědel včetně styrenu a většiny paliv a můžeme ji použít s většinou lepidel a laminačních pryskyřic. PVC pěna s uzavřenými póry má velmi nízkou absorpci vlhkosti. Další vynikající vlastností je odolnost proti opotřebení a dlouhá životnost.

PVC pěny jsou k dispozici v různých hustotách od 45 kg/m^3 do 400 kg/m^3 . Na rozdíl od polyuretanové pěny, PVC pěna není dvousložková. Výrobní proces je mnohem komplikovanější. Potřebné suroviny se smíchají za kontrolovaných podmínek a plní se do formy. Plná forma je pak uzavřena ve velkém lisu a zahřívá se na požadovanou teplotu. Po dokončení tohoto procesu, se materiál vkládá do horké vodní lázně. Dále je po vysušení řezán na desky o požadované tloušťce.

PVC pěny lze formulovat v tuhých nebo tvárných strukturách. Pevné PVC pěny, někdy označované jako síťované, mají vyšší tepelnou odolnost než tvárné pěny. Navíc, fyzikální vlastnosti jsou obvykle 20 až 40% vyšší. Smykové napětí pro tuhé pěny z PVC se liší hustotou mezi 12-30%. Tvárné PVC pěny, někdy označované jako lineární, mají vyšší smykovou tažnost, typicky nad 40%. Nicméně, tvárné pěny mají nižší fyzikální vlastnosti, a tepelnou odolnost pro danou hustotou.

PVC pěny jsou široce používány jako základní materiály v námořní, pozemní dopravě, letectví a průmyslu větrné energie, díky jejich konzistentní hustotě, vysoké odolnosti proti vlhkosti a vynikající fyzikálním vlastnostem. [9]

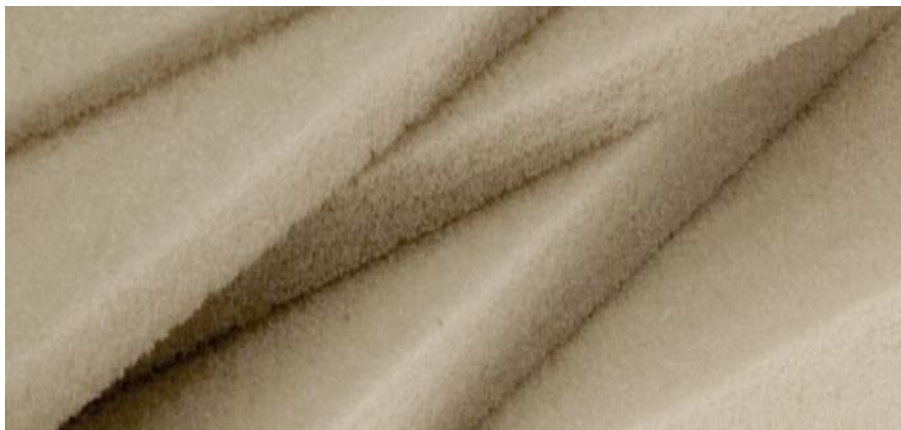


Obr. 18. Desky z PVC pěny. [18]

2.2.4.2 PET

PET (polyethylen-tereftalát) je velice známý materiál, u spotřebitelů spíše známý v podobě PET lahví. Ale to je jen jedna z oblastí aplikací pro tento lehký, recyklovatelný termoplast. PET pěnová deska má zajímavý poměr hustoty a stability. Tato pěna je lehká, stabilní a flexibilní, nabízí velkou pevnost a je odolná vůči vyšším teplotám.

Nízká hmotnost a vysoká mechanická pevnost ve spojení se zbytkovou pružností a maximální životnost - to jsou hlavní požadavky na materiály pro moderní kompozitní materiály. V posledních letech, byly PET pěny schopny zajistit si místo mezi základními materiály pro sendvičové konstrukce. Díky svým dobrým technickým vlastnostem a pořizovací cenou, polyetylentereftalátové pěny jsou stále více atraktivní pro širokou škálu aplikací. [10]



Obr. 19. Desky z PET pěny. [18]

2.2.4.3 PUR a PIR

Polyuretan (PUR) a polyisocyanurate (PIR) pěny mají dobrou pevnost v tlaku a středně fyzikální vlastnosti při vyšších hustotách, ale mají tendenci být křehké, (nízká odolnost proti opotřebení) a mají relativně nízkou únavovou životnost. Vzhledem k tomu jsou tyto pěny obvykle používány, jako protihlukové a izolační panely. Tyto pěny jsou v provedení o vyšší hustotě a menší drobivosti, značně používány na výrobu traverz (kvůli jejich vysoké pevnosti v tlaku), zatímco hmoty s nižší hustotou se používají jako segmenty nebo podélníky. [1]



Obr. 20. Jádro z PUR pěny. [16]

2.2.4.4 SAN

Tato pěna je založena na termoplastickém Styren AcryloNitrilu (např. Corecell). Hlavní důvody pro používání těchto materiálů jsou: vysoká houževnatost, dobrá odolnost proti nárazu, nízká spotřeba energie, dobrá odolnost proti únavě materiálu, a uzavřená buněčná struktura. Některé nevýhody použití těchto pěn jsou: poměrně nižší pevnost a tuhost, nízká tepelná odolnost. [1]



Obr. 21. Desky ze SAN pěny. [18]

2.3 Dřevěná jádra

Dřevo může být popsáno jako " přírodní včelí plástve ", protože má strukturu, která je v mikroskopickém měřítku podobná buněčné hexagonální struktuře syntetických voštin. Při použití u sendvičových konstrukcí, běží vlákna kolmo k rovině potahu, výsledný komponent má podobné vlastnosti jako, syntetické nebo umělé voštiny. Nicméně, přes různé chemické ošetření, které jsou dnes k dispozici, jsou všechny dřevěné jádra náchylná k absorpci vlhkosti a hnilobě, pokud nejsou dobře uzavřeny v laminátu nebo pryskyřici. [9]

2.3.1 Balza

Jádra z balzového dřeva se poprvé objevily v roce 1940 v leteckém průmyslu, při konstrukci trupů, kde byly balzové jádra potaženy hliníkem, aby vydržely opakované přistání na vodě. Tento úspěch balzu začlenil do námořního průmyslu, kde se začala používat jako základní materiál v konstrukci FRP. Kromě svých vysokých tlakových vlastností, má další přednosti, např. je dobrým tepelným izolantem, nabízí také vynikající akustickou izolaci. Materiál se nedeformuje při zahřívání a působí jako izolační vrstva a má vyšší odolnost proti ohni, při srovnání s ostatními jádry. Nabízí snadné zpracování, jednoduchými nástroji a zařízením.

Balzové jádro je k dispozici v tvarových deskách, od 3 až 50 mm tlustých na podložce tkaniny a pevných deskách do tloušťky 100 mm. Tyto desky mohou být připraveny pro vakuové laminování, prepregy nebo výrobní procesy, jako je RTM. Jednou z nevýhod balzy je její vysoká minimální hustota, a to 100kg/m³. Tento problém ještě zhoršuje sku-

tečnost, že balza může absorbovat velké množství pryskyřice při laminování, kterou ale můžeme, při použití těsnicí pěny snížit. Jeho použití je proto obvykle omezena na projekty, kde se úsporu hmotnosti nevyžaduje, nebo ve vysoce namáhaných oblastech. [9]



Obr. 22. Tvarované desky z balzy. [18]

2.4 Voštinová jádra

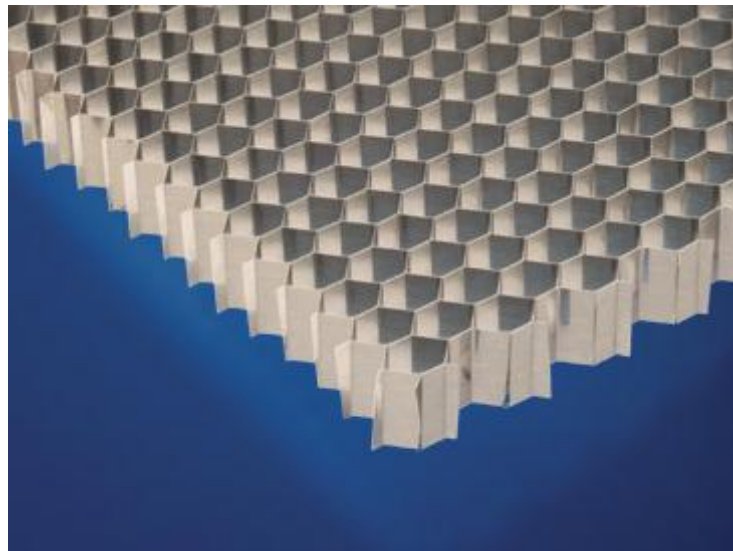
Voštinové jádra jsou pro sendvičové konstrukce k dispozici z různých materiálů. Ty se pohybují od papíru a kartónu při nízké pevnosti a tuhosti, pro aplikace s nízkým zatížením (jako jsou jádra vnitřních dveří) až po vysokou pevnost a tuhost, extrémně lehké komponenty pro letecké konstrukce. Voštiny mohou být zpracovány do rovinných a zakřivených kompozitních struktur, a mohou být vyrobeny do odpovídajících tvarů, bez použití nadměrné mechanické síly nebo topení. [9]

2.4.1 Hliníkové voštiny

Hliníkové voštiny nabízejí jeden z nejvyšších poměrů pevnosti a hmotnosti, pro konstrukční materiály. Existují různé konfigurace na lepení hliníkových fólií, které může vést k mnoha geometrickým buněčným tvarům (obvykle šestihran). Jejich vlastnosti lze také upravit, změnou velikosti buněk a tloušťky folie.

Přes jejich dobré mechanické vlastnosti a relativně nízkou cenu, je nutno hliníkovou voštinu používat u některých aplikací s opatrností, např. u velkých lodních konstrukcí, kvůli možným problémům s korozí v prostředí se slanou vodou. Další nevýhodou hliníkové

voštiny je, že nemají 'mechanickou paměť'. Při rázu na voštinový laminát, se bude voština nezvratně deformovat i vzhledem k tomu, že odolný plášť, se vrátí zpět do svého původního stavu. To může v prostoru s pláštěm vést k poškození spoje s voštinou a tím dojde ke zhoršení mechanických vlastností. [9]

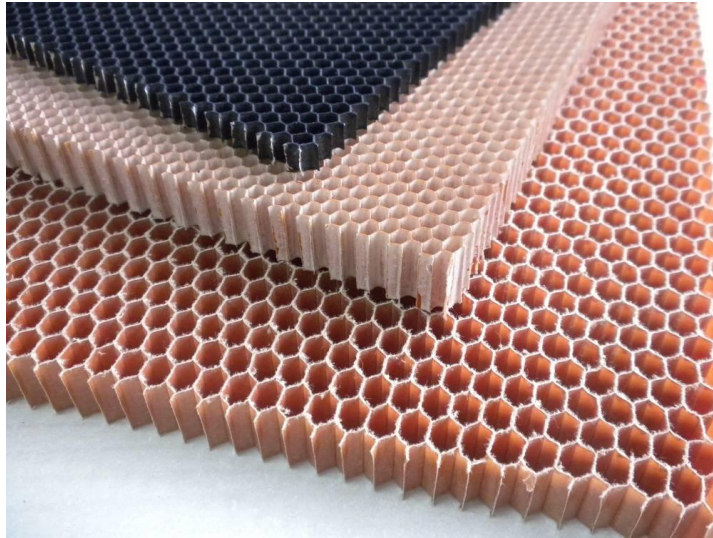


Obr. 23. Hliníková voština. [11]

2.4.2 Nomex voštiny

Nomex voština je vyrobena z papíru Nomex – Jde o určitou formu papíru, který je tvořen Kevlarovým vláknem, někdy se také používá celulózové vlákno. Papírová voština se obvykle ponoří do fenolové pryskyřice a tím vznikne voštinové jádro s vysokou pevností a velmi dobrou protipožární odolností. U letadel se často používají jako lehké interiérové panely, ve spojení s pláštěm, pomocí fenolových pryskyřic. Speciální třídy pro použití v aplikacích s nehořlavou úpravou (např. veřejná doprava, interiéry). Voštinové buňky mohou být také naplněny fenolickou pěnou, pro větší odolnost vazby a lepší izolační vlastnosti.

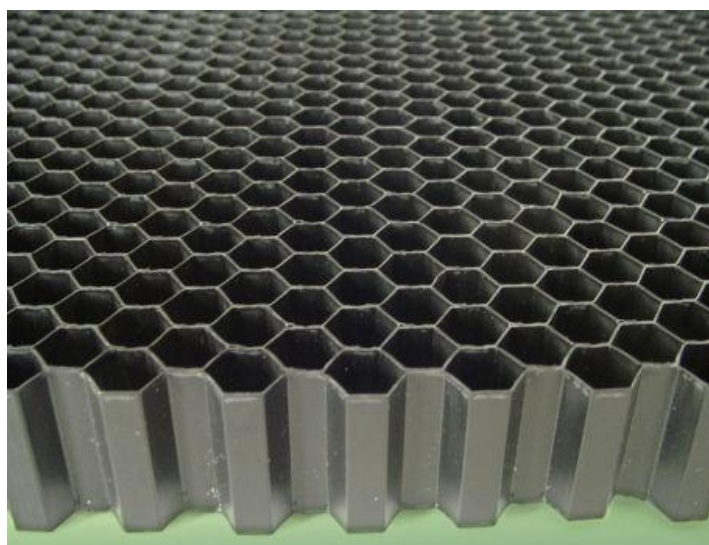
Nomex voština se stává stále používanějším materiálem u více namáhaných komponentů, díky svým výborným mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dobré dlouhodobé stabilitě. Nicméně, je podstatně dražší než jiné základní materiály. [9]



Obr. 24. Nomex voština. [11]

2.4.3 Termoplastické voštiny

Konstrukční plástve z termoplastu (např. PlastiCell), poskytuje ideální řešení pro letectví a dalších odvětví, které se snaží snížit hmotnost při zachování vysoké úrovně pevnosti a tuhosti. Jejich hlavní nevýhodou je obtížné dosáhnout dobré vazby mezi pláštěm a termoplastickou voštinou při použití lepidel, proto se používá svařování laserem, podél tratí na kontaktních místech pro dosažení lepšího propojení. Na konci životnosti lze plně recyklovat a poskytuje další výhody oproti tradičním fenolicko-aramidovým a hliníkovým voštinám. Materiál odolává poškození při nárazu a nebude nadále deformovaný náhodnými vlivy při obrábění. Může pracovat nepřetržitě až do 220 °C. [9], [11]



Obr. 25. Termoplastická voština. [11]

3 VOLBA NÁSTROJŮ, UPÍNÁNÍ A ŘEZNÝCH PODMÍNEK

3.1 Obrábění plastů

Při obrábění plastů se používají především operace frézování, soustružení, vrtání, řezání závitů a broušení. Druhy nástrojů a obráběcí stroje jsou stejné jako při obrábění kovů nebo dřeva. Při volbě geometrie břitu nástroje a řezných podmínek je nutné vzít v úvahu specifické vlastnosti plastů a podle toho volit zejména úhel čela, úhel sklonu ostří, úhel hřbetu, řeznou rychlost, posuv a hloubku řez.

3.1.1 Nástroje na obrábění termoplastů

Obrábění termoplastů je možné provádět všemi nástroji, je však nutné dbát na dobrý odvod tepla z místa řezu (zejména při obrábění PVC). Nástroje musí mít ostré tenké břity, aby nedocházelo k nalepování materiálu obrobena břit nástroje.

3.1.1.1 Řezné podmínky

Tab. 3. Řezné podmínky pro obrábění termoplastů. [12]

Operace	Nástroj	Řezná rychlost	Posuv
Soustružení	RO	max. 300 m.min ⁻¹	max. 0,3 mm na ot.
Soustružení	SK	max. 800 m.min ⁻¹	max. 0,3 mm na ot.
Frézování	RO	120 až 200 m.min ⁻¹	0,3 až 1 mm na ot.
Frézování	SK	160 až 270 m.min ⁻¹	0,2 až 0,8 mm na ot.
Vrtání	RO	15 m.min ⁻¹	0,3 mm na ot.
Vrtání	SK	220 m.min ⁻¹	0,3 mm na ot.

RO – nástroj s břity z rychlořezné oceli

SK – nástroj s břity ze slinutých karbidů

Pro operace soustružení, frézování a vrtání se používá jako chladicí kapalina mýdlový roztok, vzduch, terpentýn, strojní olej nebo líh. Pro získání přesných rozměrů s úzkými tolerancemi je vhodné nejprve opracovat obrobek s malým přídavkem, vložit ho na 24 až 48

hodin do vody o teplotě 20°C, stejnou dobu ho sušit při teplotě cca 70°C a pak teprve načisto.

Při broušení na pásové brusce je řezná rychlost $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Při broušení broušícími kotouči je řezná rychlost 20 až $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, posuv 0,2 až 0,4 mm na otáčku.

Broušení probíhá bez chlazení ale je nutné dokonalé odsávání vzniklých prachových částic.

3.1.2 Nástroje na obrábění vyztužených a vrstvených plastů

Pro obrábění vyztužených nebo vrstvených plastů (laminátů) jsou nejvhodnější nástroje s břity ze slinutých karbidů nebo ze syntetického diamantu. Lze použít i nástroje s břity z rychlořezných ocelí, které však musí být dokonale naostřeny.

Velikost přípustného opotřebení břitu nástroje se zde volí podstatně menší než u nástrojů pro obrábění kovů, neboť opotřeбенý břit vyvolává značné zvýšení teploty v místě obrábění, což vede k přehřátí a zhnědnutí obrobeného povrchu.

Řezné síly nesmí působit ve směru kolmém na jednotlivé vrstvy, ze kterých je materiál složen. Pokud je např. nutné vrtat díru kolmo na vrstvy, je nutné podstatně snížit posuv.

3.1.2.1 Řezné podmínky

Tab. 4. Řezné podmínky pro obrábění vyztužených a vrstvených plastů. [12]

Operace	Nástroj	Řezná rychlost	Posuv
Soustružení	RO	450 m.min-1	0,1 až 1 mm na ot.
Soustružení	SK	700 m.min-1	0,2 až 0,7 mm na ot.
Frézování ¹⁾	RO	max. 200 m.min-1	max. 0,03 mm na zub
Frézování ²⁾	RO	300 až 350 m.min-1	0,1 až 0,2 mm na ot.
Frézování ¹⁾	SK	250 až 300 m.min-1	0,2 až 0,5 mm na ot.
Frézování ²⁾	SK	400 až 450 m.min-1	0,1 až 0,2 mm na ot.
Vrtání	RO	20 až 60 m.min-1	0,07 až 0,2 mm na ot.
Vrtání	SK	100 až 140 m.min-1	0,2 až 0,3 mm na ot.

Řezání	Pásová pila	25 až 28 m.min-1	
Řezání	Kotoučová pila	10 až 12 m.min-1	0,2 až 1 mm na ot.
Broušení ³⁾	Broušící kotouče	26 až 30 m.s-1	0,4 až 0,6 mm na ot.
Broušení	Broušící pás	200 až 300 m.min-1	

¹⁾ souhlasně s vrstvami,

²⁾ kolmo na vrstvy,

³⁾ bez chlazení, hloubka řezu 0,1 až 0,15 mm.

Při obrábění vyztužených nebo vrstvených plastů se pro chlazení používá tlakový vzduch. Je vhodné ještě vzniklé třísky z místa řezu odsávat. [12]

3.2 Obrábění kompozitních materiálů

Kompozitní materiály s matricí na bázi pryskyřice nebo polymeru patří do skupiny materiálů se specifickými vlastnostmi, jejichž použití spolu s požadavky na nástroje neustále vzrůstá. Obrábění kompozitních materiálů je obtížné a volba vhodných rezných nástrojů vyžaduje zpravidla selektivní postup a velkou pečlivost. K nejrozšířenějším obráběcím operacím při zpracování těchto materiálů patří řezání (dělení), soustružení, frézování a zejména vrtání (výroba děr pro různé spojovací součásti). [2]

3.2.1 Nástroje

Pro obrábění kompozitních materiálů se používají především nástroje s břity ze slinutých karbidů, kubického nitridu boru nebo ze syntetického diamantu. Důvodem je velký abrazivní účinek kompozitních materiálů na břit nástroje. Lze sice použít nástroje z rychlořezných ocelí, při jejich použití je však nutné očekávat nižší hodnoty trvanlivosti a s tím spojenou častou výměnu a přeastřování nástroje. Nejčastějším způsobem, jak zvýšit odolnost proti opotřebení a tím i trvanlivost nástrojů z rychlořezných ocelí, je aplikace různých otěru vzdorných povlaků. I v tomto případě je však intenzita opotřebení poměrně vysoká.

Nejlepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují nástroje z polykrystalického diamantu. Především vysoká tvrdost, která umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu účinku vláken, a vynikající tepelná vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu, jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeného povrchu a dlouhou trvanli-

vost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší (až stonásobně) než u nástrojů ze slinitých karbidů. [12], [2]

3.2.2 Řezné podmínky

Kromě nástroje samotného mají hlavní vliv na kvalitu obrábění kompozitních materiálů i řezné podmínky. Záleží na správně zvoleném posuvu, na otáčkách a na zajištění dokonalého řezu, to znamená na zamezení tření nástroje o povrch obrobku. Neřeže-li nástroj správně, dochází k delaminaci materiálu nebo k lomu vláken.

Velmi nízká tepelná vodivost obráběného materiálu způsobuje, že vzniklé teplo přechází do obráběného materiálu a třísky pouze v zanedbatelném rozsahu, a musí být tedy v maximální míře odvedeno nástrojem, případně řeznou kapalinou (pokud vůbec může být použita). Nadměrné tepelné zatížení nástroje tak velmi výrazně zvyšuje intenzitu jeho opotřebení.

Kompozity mají nízkou tepelnou odolnost, při vyšších teplotách (100 - 300 °C) nejsou stálé. Proto je třeba volit takové řezné podmínky, aby nebyla překročena tzv. kritická teplota, kdy dochází k degradaci pryskyřičné matrice a na obrobeném povrchu se začnou objevovat spálené oblasti. [2]

3.3 Upínání nástrojů a obrobků

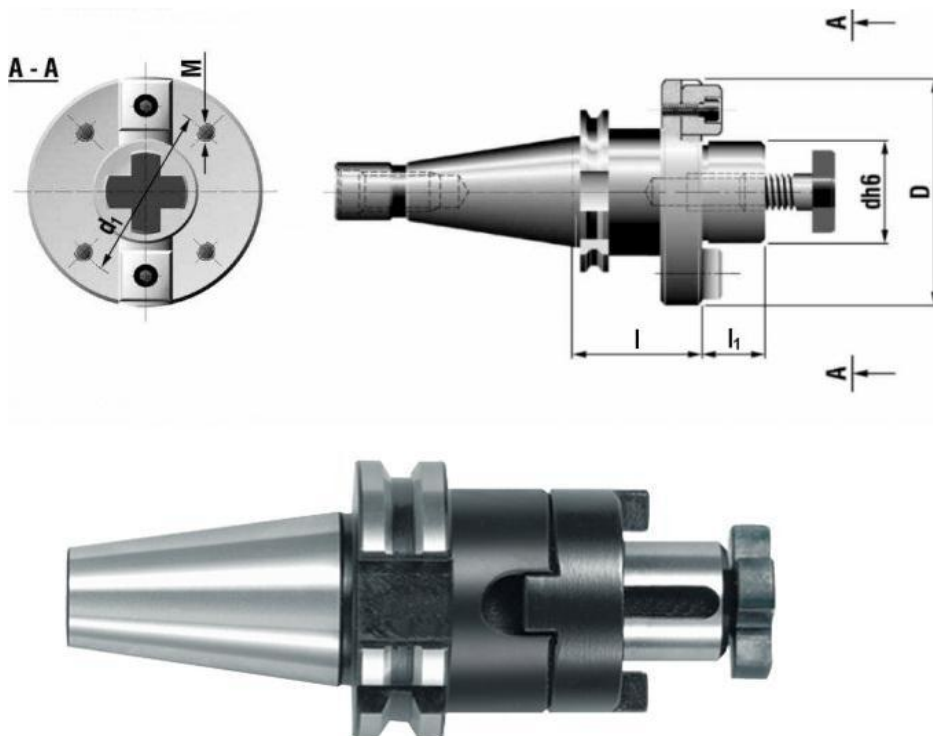
3.3.1 Upínání nástrojů a obrobků u frézování

Pro dosažení vysokých úběrů obráběného materiálu je nutné, aby frézovací nástroje pracovaly s vysokými hodnotami řezných i posuvových rychlostí. Vysoká řezná rychlost vyžaduje vysoké otáčky vřetena obráběcího stroje (zejména u nástrojů menších průměrů), vysoká posuvová rychlost má za následek velké ohybové namáhání nástrojové sestavy (zejména při obrábění s velkým vyložením nástroje). To všechno klade extrémní nároky na použitý upínač, který musí splňovat mnoho základních předpokladů - musí mít vysokou pevnost v ohybu, být dokonale dynamicky vyvážen, zajišťovat vysoké upínací síly schopné přenést velké krouticí momenty, zaručovat přesné upnutí s minimálním obvodovým házením nástroje, mít schopnost tlumit vibrace, přivádět řeznou kapalinu přímo do místa řezu, umožňovat krátké časy upínání i uvolňování nástroje, dosahovat vysokou životnost při

nízkých provozních nákladech a v neposlední řadě i vytvářet předpoklady pro snadnou a bezpečnou obsluhu.

Pro upínání nástrčných fréz se používají frézovací trny. Trn je ukončen kuželem ISO nebo Morse, který přenáší točivý moment z upínacího trnu na frézu perem nebo kameny.

Frézy se stopkou Morse se upínají do vřetene přímo nebo pomocí redukce a jistí se stejně jako frézy se stopkou ISO. Točivý moment se přenáší pouze třením.



Obr. 26. Frézovací trn [21]

Frézy s válcovou stopkou se upínají do vřetena frézky při použití sklíčidla s upínacím pouzdem, nebo do různých druhů kleštín. Sklíčidla a kleštiny mají kuželovou stopku, nebo jsou pomocí různých systémů spojeny se základním držákem s kuželovou stopkou.

Frézy s kuželovou stopkou ISO se upínají buď přímo, nebo s redukcí do vřetene frézky. Redukční pouzdro se použije také tehdy, neshoduje-li se typ kužele frézovacího trnu s typem kužele vřetena. Upnutí je jištěno šroubem, procházejícím vrtáním vřetene. Točivý moment se přenáší třením a unášecími kameny.

Čelní nástrčné frézy a frézovací hlavy s vyměnitelnými břitovými destičkami se nejčastěji upínají na krátké upínací trny. Tyto trny jsou pak různými systémy spojeny se základním

držákem, který je pomocí své kuželové stopky upnutý ve vřetenu obráběcího stroje. Některé krátké upínací trny mají vlastní kuželovou stopku pro letmé upnutí ve vřeteně frézky. Frézy a frézovací hlavy menších průměru jsou často vybaveny šroubovým dřikem pro upnutí v prodlužovacích nástavcích.

Speciální upínání:

Polygonální upínací systém **TRIBOS** firmy Schunk využívá pro upnutí nástroje s válcovou stopkou pružnou deformaci tělesa upínače. V uvolněném stavu má upínací díra přibližně polygonální průřez, působením vnějších sil F_v od hydraulického upínacího zařízení dojde k deformaci upínače a průřez díry se změní na kruhový, to zajistí pevné upnutí stopky nástroje.

Hydraulické upínače **CoroGrip** firmy Sandvik Coromant, pracují na hydromechanickém principu, kdy je tlaková kapalina používána pouze na posuv upínacího pouzdra (při upínání i uvolňování nástroje), jinak je celý mechanismus samosvorný a po upnutí nástroje v něm nezůstává žádný tlak.

Hydraulické upínače **TENDO** firmy Schunk pracují na principu deformace vnitřní stěny upínací díry, na kterou působí hydraulický tlak kapaliny, vyvozený posuvem pístu a ručně ovládaného upínacího šroubu. Upínače zaručují opakovatelnou přesnost vystředění upínacího nástroje.

Monolitní frézy s válcovou stopkou o průměru 3 až 50 mm, vyrobené z rychlořezných ocelí nebo slinutých karbidů, se v současné době velmi často upínají pomocí tepelně smrštitelných upínačů, jejichž princip je založený na změně objemu materiálu, úměrné změně teploty.

Obrobek se upíná na pracovní stůl frézy. Upínání musí být dostatečně tuhé, aby zaručilo nehybnost obrobku a odolnost proti vzniku chvění. Obrobek však nesmí být upínací silou deformován.

K upnutí se používají: strojní svěráky ovládané ručně, pneumaticky nebo hydraulicky, upínky se šrouby a opěrkami, jednoúčelové upínací přípravky, stavebnicové upínací přípravky.

Při navrhování upnutí obrobku je třeba uvažovat předpokládaný směr působení řezné síly, její velikost a proměnlivost. [12], [13]

4 CNC STROJE

Číslicově řízené obráběcí stroje jsou stroje, které opracovávají součásti některou z technologií obrábění (např. soustružení, vrtání, frézování atd.) a jejich činnosti jsou řízeny automaticky zadáváním povelů v číselné podobě z počítačového programu.

Každé obrábění na číslicově řízeném stroji má obdobný sled činností jako při obrábění na konvenčním, tj. univerzálním stroji. Např. se součást musí ustavit do vhodné polohy, pevně upnout, do vřetene se musí upnout příslušný nástroj, spustí se hlavní řezný pohyb umožňující odebrání třísky a pohybuje se součástí či vřetenem stroje tak, aby v příslušné interakci nástroje se součástí bylo uskutečněno opracování požadovaných ploch (na předepsaný rozměr a tvar). Tento cyklus se automaticky opakuje v různých obměnách nástrojů, řezných podmínek, poloh obrobku apod.

Současné počítačem řízené číslicové stroje – CNC (Computer Numerical Control) – obráběcí stroje jsou natolik automatické, že většina činností, které u konvenčního stroje vykonává obsluha, je řízena automaticky počítačovým programem. Příkazem z programu jsou řízeny pohyby součástí či nástroje, změna řezných podmínek, výměna nástroje aj. [21]

4.1 Výhody

Použití CNC strojů přináší tyto výhody:

- Automatizaci, tzn. Minimální vliv obsluhy na výrobní proces (většina operací nebo celý výrobní cyklus může probíhat bez zásahu obsluh), což přináší snížení počtu chyb, stálost pracovního cyklu (zkrácení času na výrobu) a možnost obsluhy pouze zaškoleným pracovníkem;
- Je zaručena přesnost každého výrobku (opakovatelná přesnost operací se měří na mikrometry), vše závisí na kvalitě příslušného programu;
- Pružnost – změna výrobního sortimentu (přizpůsobitelnost novému výrobku) je snadná, spočívá ve změně programu a vybavení vhodnými nástroji a upínači. [21]

4.2 Programování

Zápis programu k řízení pohybů může být provedeno ve dvojitým tvaru:

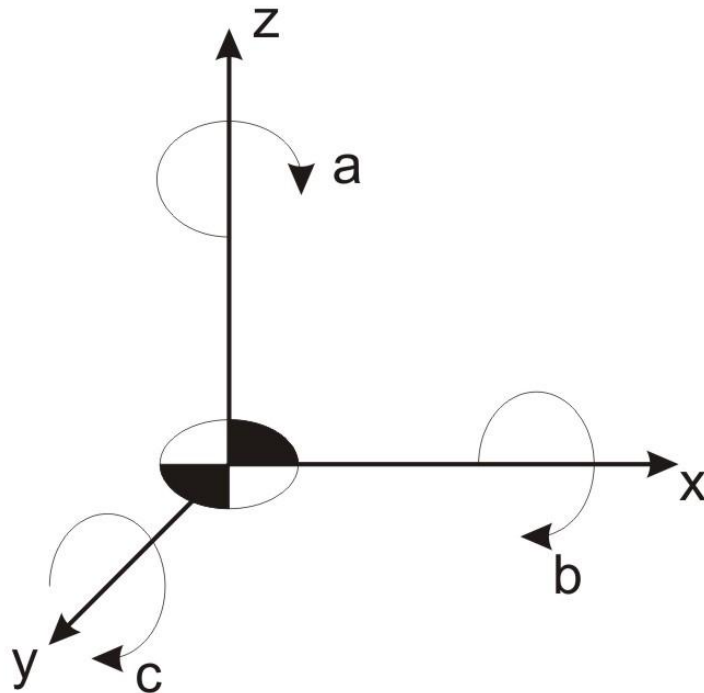
- V absolutním - tj. s údaji vztaženými k jedinému počátku souřadnic, což je běžnější.
- V přírůstkovém - inkrementálním tvaru. Řízení pohybu po přírůstcích znamená zadávat a vykonávat pohyb vždy o určitý zadaný přírůstek od předchozí dasažené polohy. Obvykle nejmenší přírůstky pohybu v osách jsou u obráběcích strojů 0,001 mm.

Většina systémů CNC používá pro formu zápisu programu tzv. adresný formát. Program sestává ze sledu příkazů, kde každý příkaz sestává ze slov, jež obsahují adresu (písmeno) a číselnou hodnotu (****). [21]

4.3 3 a 5-ti osé obrábění

Třiosé řízení umožňuje řídit souvisle tři souřadné osy X, Y, Z a další parametry technologického procesu jako jsou posuvy (F), otáčky (S), volba nástroje (T) atd. Nástroj u třiosého řízení se pohybuje mezi dvěma prostorově definovanými body po přímkové, kruhové, spirálové atd. dráze. Tento způsob řízení nástroje umožňuje obrábění otevřených prostorových tvarů v následujících technologiích – vrtání, závitování, frézování rovinných a prostorových tvarů na CNC frézách nebo CNC obráběcích centrech.

Pětiosé řízení umožňuje řídit souvisle tři souřadné osy X, Y, Z (schéma odpovídá principu na obrázku 35) a naklonění nástroje souřadnicemi podle dvou rotačních os např.: X, Y v souřadnicích A, B nebo místo naklonění nástroje je instalován pomocný otočný stůl se dvěma rotačními osami podle obrázku 35. Nástroj se u pětiosého řízení pohybuje mezi dvěma prostorově definovanými body po přímkové, kruhové, spirálovité aj. dráze. Tento způsob řízení nástroje umožňuje obrábění nástrojových tvarů z pěti stran objektu pomocí následujících technologií – Vrtání, soustružení, závitování, srážení hran, frézování rovinných a prostorových tvarů na CNC frézách nebo CNC obráběcích centrech. [14]



Obr. 27. Souřadnicový systém. [17]

4.4 Souřadné systémy

Popis pohybů stroje (v rovině nebo v prostoru) se definuje v určitém systému souřadnic a to podle konstrukce stroje. Nejčastěji se používá kartézský (pravoúhlý) systém souřadnic, lze použít i cylindrický systém, či polární systém souřadnic. Při označování směru os se řídíme tzv. pravidlem pravé ruky. Kladný směr otáčení je (v pohledu kladného směru osy) ve směru otáčení hodinových ručiček.

Systém souřadnic zvolený u jednotlivých obráběcích strojů závisí na jejich konstrukčním uspořádání i složitosti a prakticky se stroj od stroje může lišit. Společnou charakteristikou je, že osa vřetene je vždy osou s kladným směrem od obrobku a osa x je vždy vodorovnou osou. [14]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VÝROBNÍ PROCES

Je soubor na sobě nezávislých činností, při kterých se přetváří výchozí materiál v hotový výrobek. Výrobní proces je realizován technologickými postupy, které dávají skutečný návod zpracování polotovaru v součást nebo hotový výrobek a dělí se obecně na technologické postupy hlavní a pomocné. K hlavním patří technologické postupy součástí a montáže finálních výrobků z nich. K pomocným pak výroba a ostření náradí, oprava zařízení, vnitrozávodní doprava apod.

Technologický postup určuje potřebné výrobní zařízení, náradí řezní, upínací, měřicí a pracovní podmínky potřebné pro danou operaci tak, aby dílec nebo celý výrobek byl podle daného technologického postupu hospodárně vyrobitelný a splňoval kvalitní a kvantitativní požadavky dané technickou dokumentací.

Komplexní technologický postup musí obsahovat:

- výrobní prostředky, tj. výrobní zařízení, přípravky, nástroje a měřidla
- sled operací včetně popisu práce
- počet výrobních kusů
- technologické podmínky včetně režimů práce strojů
- jednotlivé operační rozměry
- odměny za vykonanou práci
- časy jednotlivé práce t_A u jednotlivých operací

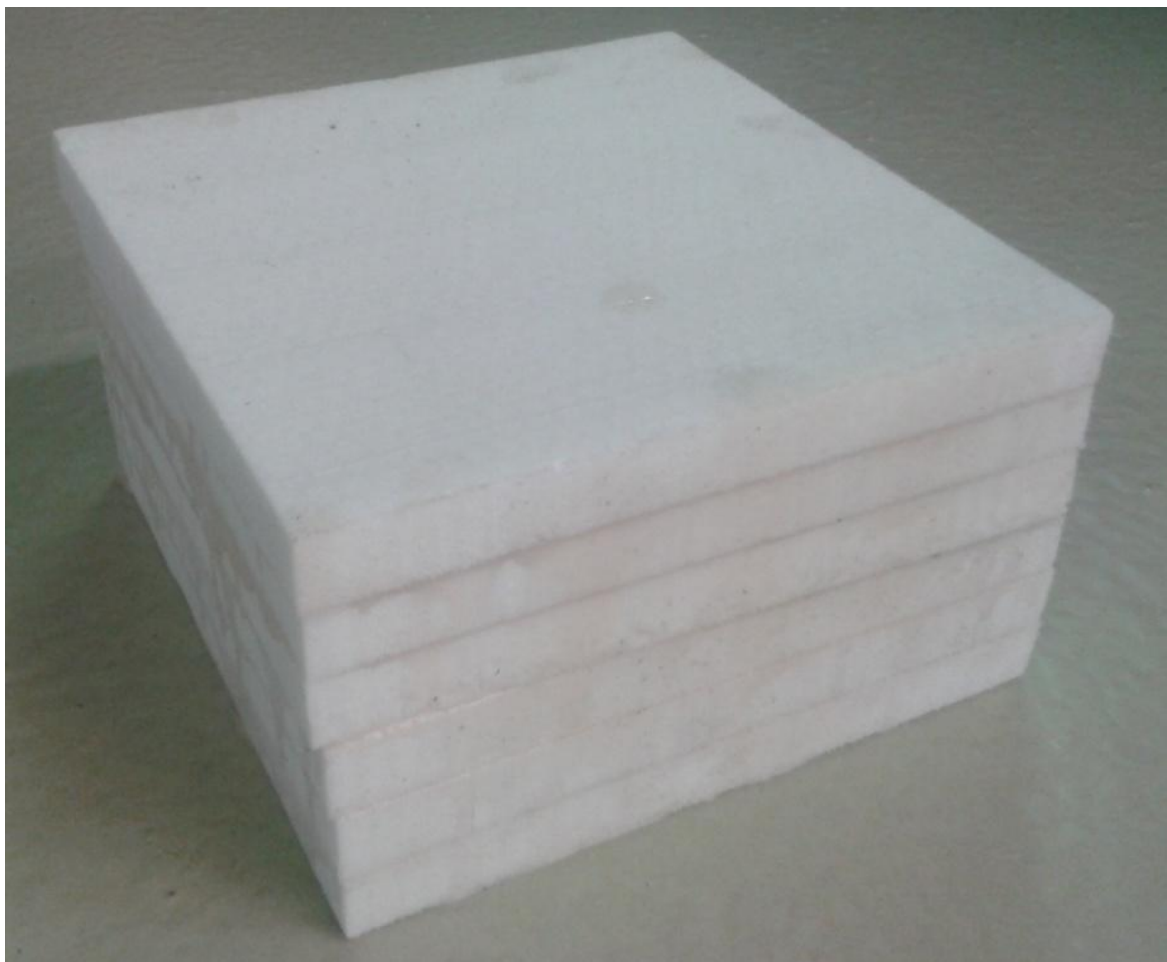
Technologický postup je pro výrobu závazný, tj. stejně platný jako technický výkres. Svévolné porušení technologických podmínek se kvalifikuje jako porušení technologické kázně. [15]

5.1 Příprava materiálu a návrh tvaru

Jako materiál byla zvolena PET pěnová deska. Struktura a vlastnosti této pěny jsou popsány v teoretické části bakalářské práce.

5.1.1 Příprava polotovaru

Materiál z PET pěnové desky o tloušťce 20mm, byl nařezán na čtverce o rozměrech 200x200mm, ty byly navrstveny na sebe na celkovou výšku 115mm a spojeny polyesterovou pryskyřicí Aeropol G 105 E s následným zavákuováním.



Obr. 28. PET pěnové desky navrstvené pomocí polyesterové pryskyřice.

5.1.2 Návrh hrubého tvaru a volba technologie

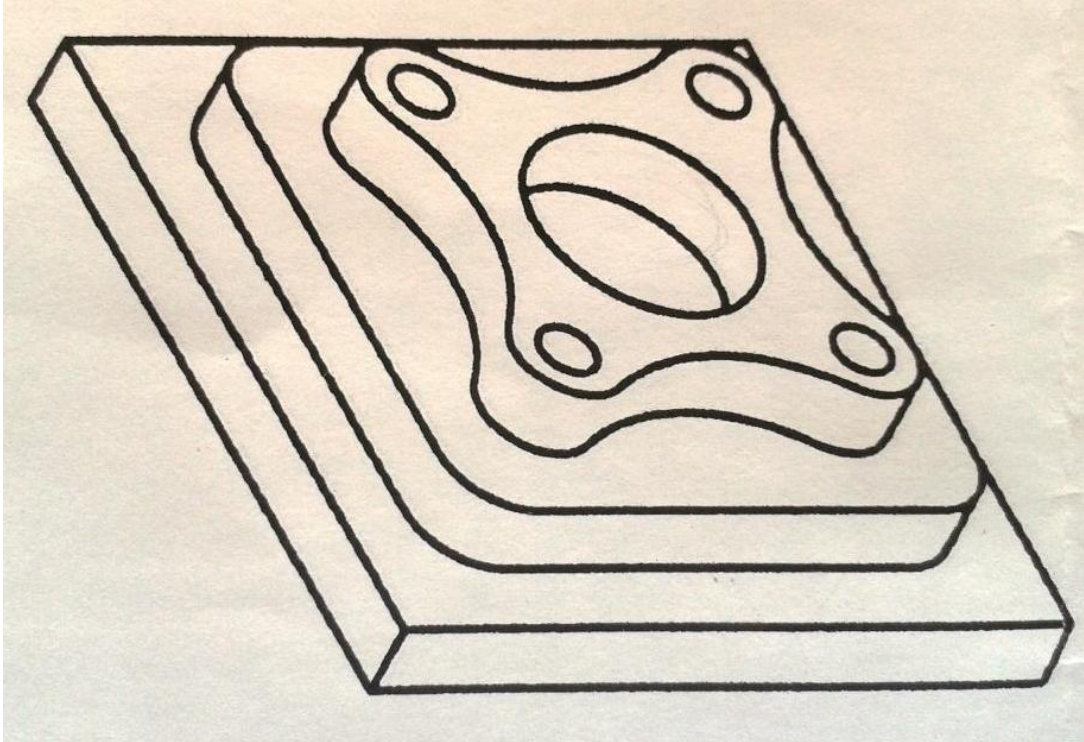
Návrh hrubého tvaru a technologičnost konstrukce je široký pojem obsahující komplexní souhrn požadavků, které má splnit konstrukce výrobku pro zajištění funkční způsobilosti a požadované životnosti při maximální hospodárnosti výroby. Obecně můžeme hlavní požadavky na konstrukci z hlediska technologičnosti uvést do následujících zásad:

- vysoká využitelnost materiálu (malý odpad, vhodné profily, odlehčení nezátěžovaných částí);

- přizpůsobení konstrukce technologii výroby, která musí být volena s ohledem na objem výroby;
- nízká cena, nízký počet druhů materiálů;
- využití hromadně vyráběných polotovarů a dílů;
- volba tvaru a rozměrů s ohledem na technologii výroby (tloušťky stěn, otvory, dutiny, drážky, úkopy, výstupky, žebra, dělicí plochy, zaoblení atd.);
- přiměřené nároky na drsnost, přesnost, výskyt vad, rozptyl mechanických vlastností atd.; jednoduchá, krátká a nenákladná příprava výroby;
- co nejmenší spotřeba speciálních nástrojů – přípravků, strojů a zařízení;
- co nejmenší počet a nejnižší složitost operací;
- co nejkratší doba a průběžný čas výroby a montáže;
- co nejjednodušší manipulace a doprava;
- co nejmenší spotřeba výrobních a skladovacích ploch;
- využívání typizace a unifikace;
- využívání dědičnosti (přebírání osvědčených dílů a konstrukčních prvků);
- možnost nenáročné recyklace výrobku.

Jak je na první pohled patrné, je třeba zvažovat celé spektrum často protichůdných požadavků. Proto je cesta k optimální konstrukci zpravidla velmi složitá a náročná. Hlavní práci musí proto provést konstruktér sám již ve svém návrhu. Tím se tedy stává konstruktér prvním a nejdůležitějším činitelem ve výrobním procesu. [2]

Navržený tvar byl navržen tak, aby na něm mohlo být vyzkoušeno obrábění různých tvarových profilů, děr, zaoblení a zkosení, při volbě technologie obrábění, na 3-osém CNC stroji



Obr. 29. Návrh tvaru.

5.1.3 Volba nástrojů

Pro obrábění byly zvoleny dva nástroje. Na hrubování a dokončování ploch a stěn byla zvolena dvoubřitá válcová fréza a pro dokončení zkosení v díře, dvoubřitá válcová fréza s kulovým čelem. Obě frézy jsou od firmy Seco a mají průměr 10 mm.

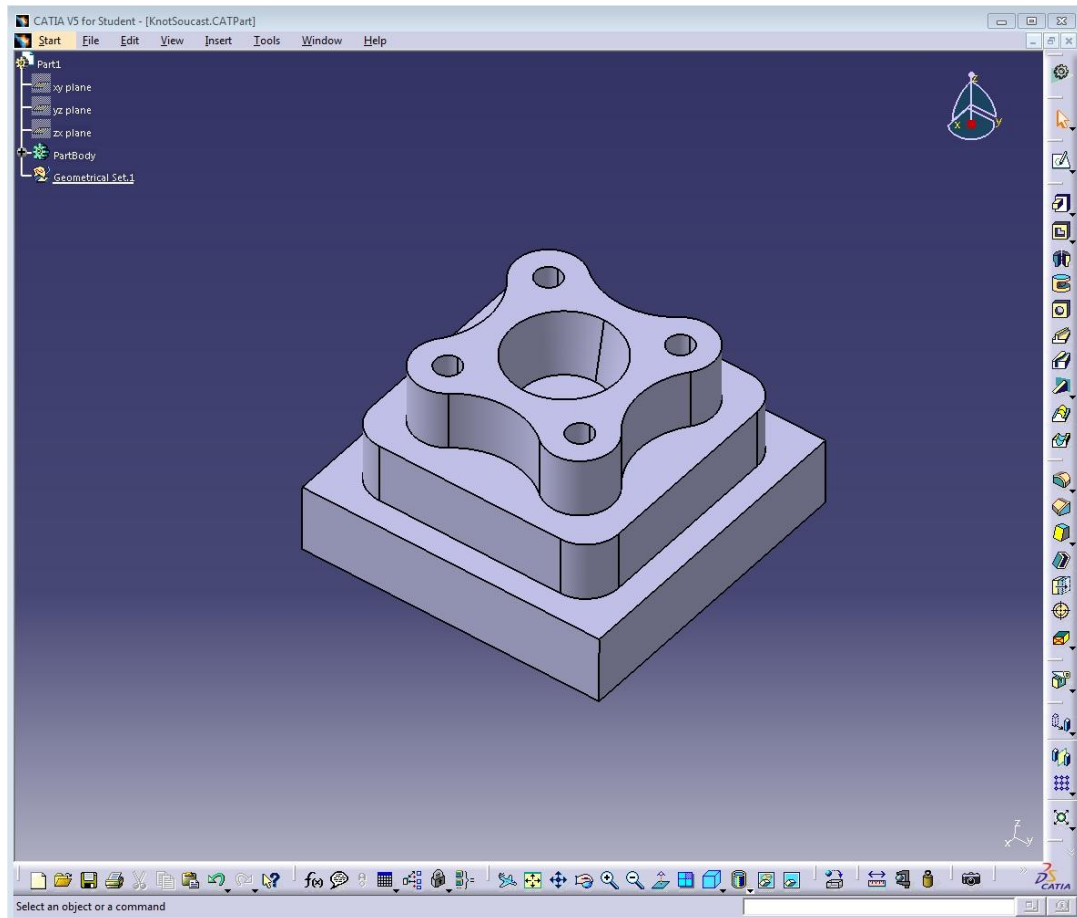
5.2 Modelování v programu CATIA V5R18

Program CATIA V5 je produkt francouzské firmy Dassault Systemes. Je to software pro počítačovou podporu technické přípravy výroby ve 3D v oblastech CAD/CAM/CAE/PDM.

Umožňuje pokrytí celého procesu životního cyklu produktu od návrhu, přes konstrukci, analýzu až po vlastní výrobu po vlastní výrobu. [14]

5.2.1 Vymodelování požadovaného tvaru

Při modelování v objemovém modeláři CA systému CATIA V5 je prvním krokem k vytvoření prostorového modelu skica, která je pomocí funkcí objemového modeláře proměněna v model. [14]



Obr. 30. Model obrobku vymodelovaný v programu CATIA V5R18.

5.2.2 Převedení do formátu kompatibilním s NX7.5

Soubor byl uložen ve formátu kompatibilním s programem NX7.5. Pro uložení byl zvolen formát s koncovkou -stp.

5.2.3 Vytvoření výkresů

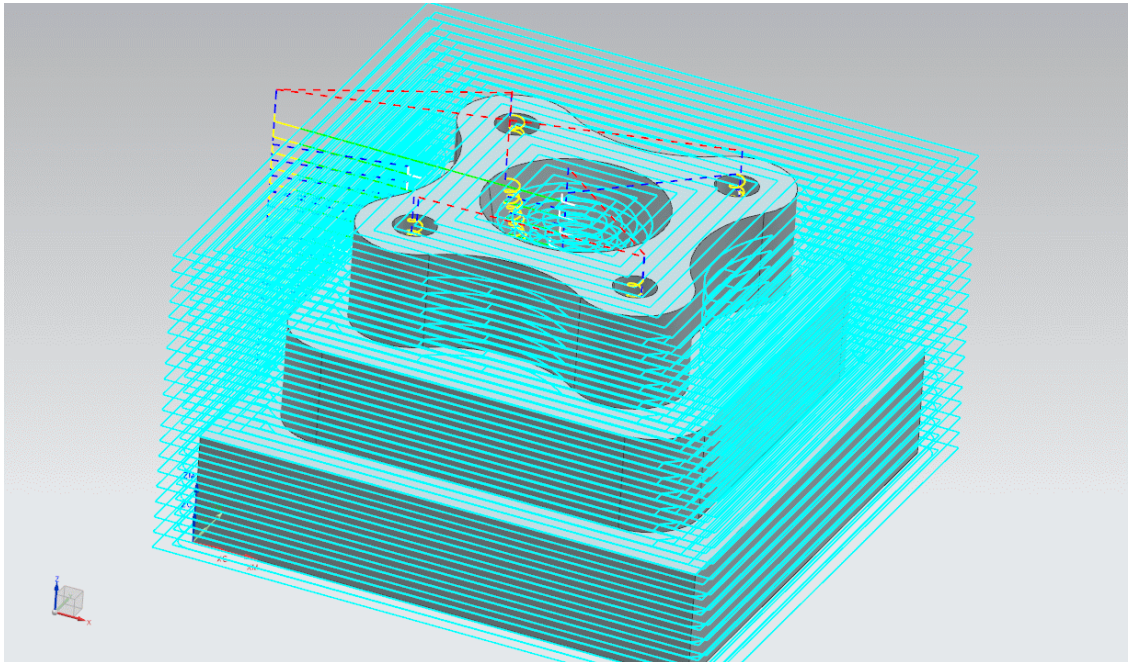
Výkresová dokumentace byla v programu CATIA V5R18 vytvořena pomocí modulu Mechanical Design - Drafting. Je přiložena jako příloha.

5.3 Simulace a vygenerování NC kódu pomocí programu NX7.5

Program NX7.5 od firmy siemens pokrývá celý rozsah vývojových procesů v oblasti designu produktů, výroby a simulace. Umožňuje simulovat průběh obrábění pomocí nástroje Motion Simulation, který pomáhá najít a odstranit kolize či problémy dynamického rázu ještě před výrobou tak, jako by pracoval ve skutečných výrobních podmínkách.

5.3.1 Volba vhodných programových operací a jejich posloupnost

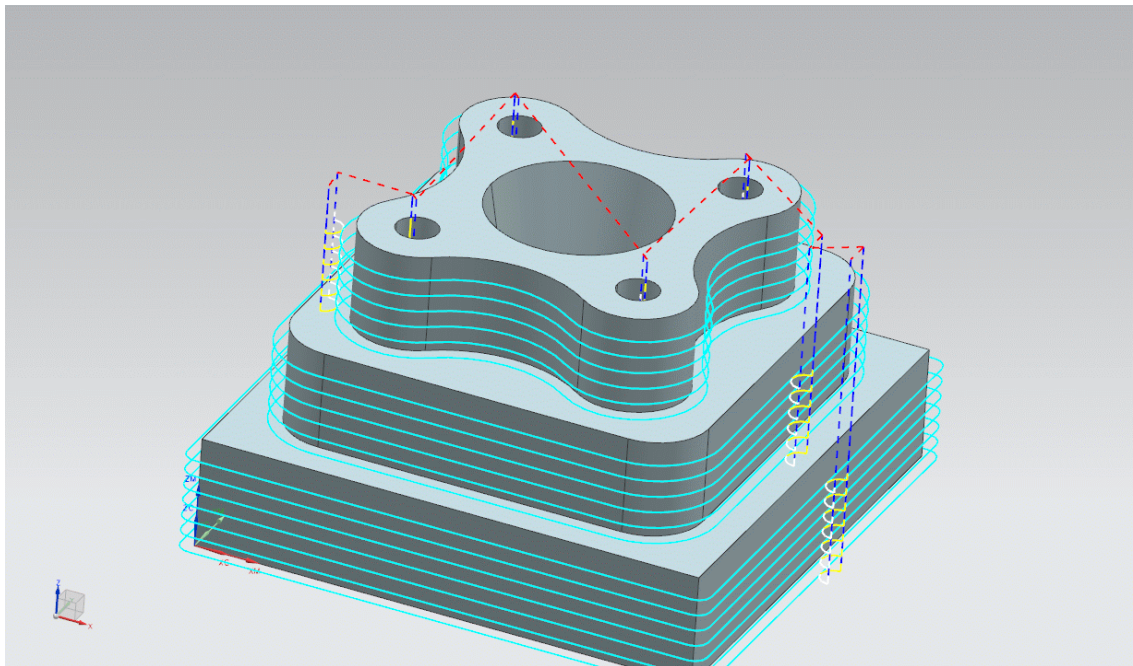
Jako první byla zvolena operace CAVITY MILL pro obrobek hrubého tvaru. Bylo nutné naprogramovat ji tak, aby vyhrubovala celý obrobek včetně děr a zkosení. Dráha nástroje je zobrazena na obrázku 31. Jako nástroj byla zvolena dvoubřítá válcová fréza o průměru 10 mm, která byla použita i pro operace ZLEVEL PROFILE 1 a FACE MILLING AREA.



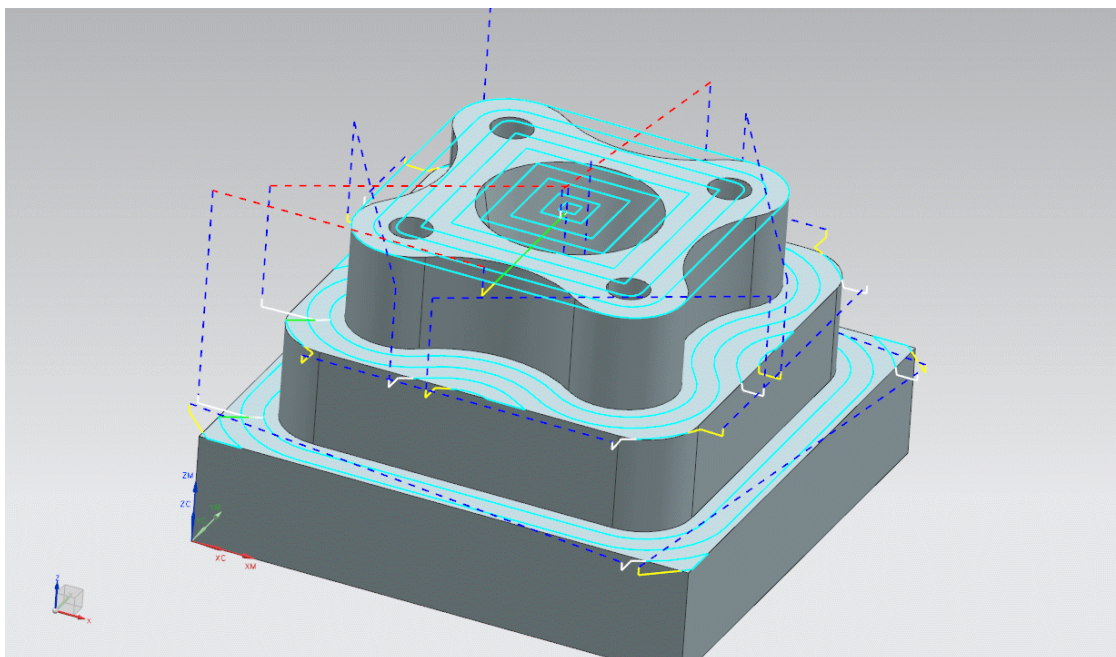
Obr. 31. Simulace obrobek pomocí funkce CAVITY MILL.

Operace ZLEVEL PROFILE 1 je použita pro dokončení svislých ploch obrobku včetně děr. Tato operace je znázorněna na obrázku 32.

Na obrázku 33., je zobrazeno obrobek vodorovných ploch, pro které, byla zvolena funkce FACE MILLING AREA.

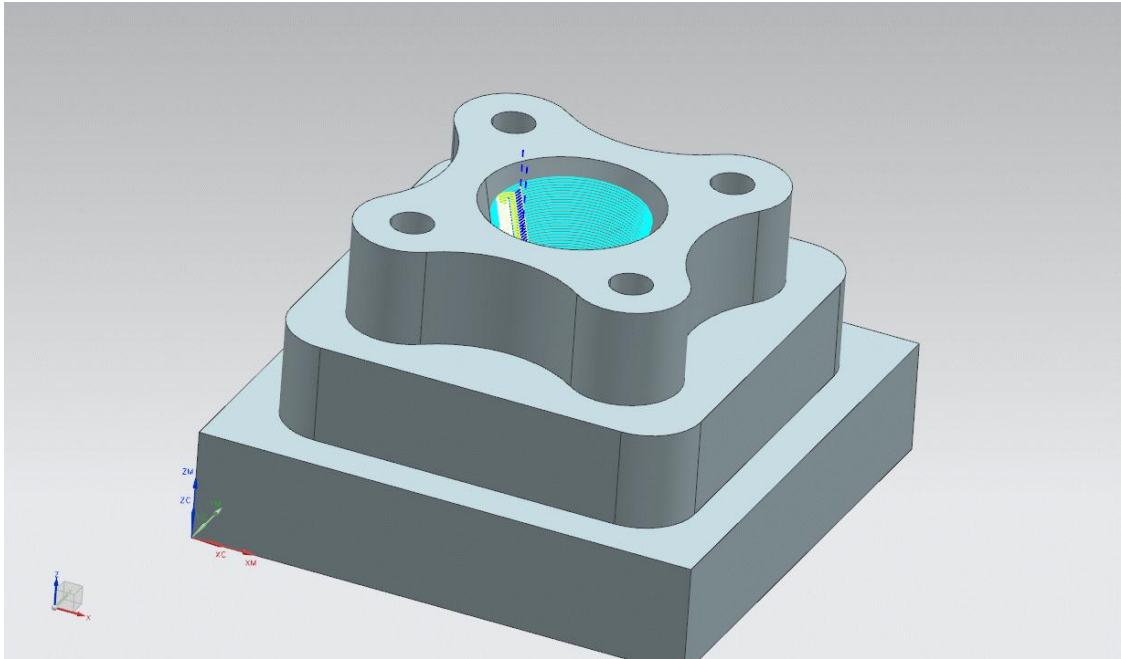


Obr. 32. Simulace obrobění pomocí funkce ZLEVEL PROFILE 1.



Obr. 33. Simulace obrobění pomocí funkce FACE MILLING AREA.

V poslední řadě bylo nutné zvolit vhodnou operaci pro dokončení zkosené díry, pro kterou byla vybrána operace ZLEVEL PROFILE 2. Bylo také nutné zvolit nový nástroj a to dvoubřitou válcovou frézu s kulovým čelem o průměru 10 mm.



Obr. 34. Simulace obrobení pomocí funkce ZLEVEL PROFILE 2.

5.3.2 Volba řezných podmínek

Při volbě řezných podmínek vycházíme zejména z nutnosti dodržení následujících zásad:

- řezné podmínky musí zajistit splnění kvalitativních a kvantitativních požadavků na obráběný dílec
- velikost průřezu třísky musí být v souladu s tuhostí soustavy
- složky řezného odporu nesmějí překročit maximálně přípustné síly v jednotlivých směrech
- výkon řezání musí být menší než užitečný výkon elektromotoru stroje
- nesmí být překročena řezivost nástroje
- musí být dodržena minimálně přípustná výrobnost stroje za časovou jednotku
- řezné parametry musí být v mezích přípustných intervalů
- při obrábění na čisto nesmí být překročena limitní hodnota posuvu, daná požadovanou drsností povrchu. [15]

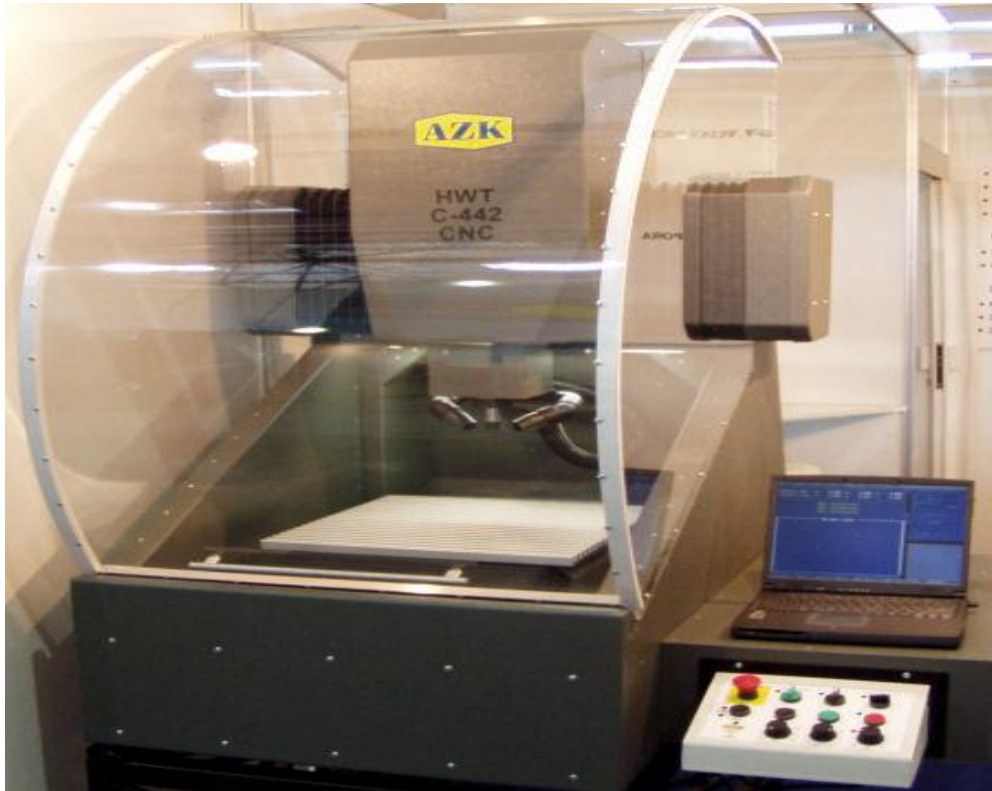
Tab. 5. Řezné podmínky.

Název operace	CAVITY MILL	ZLEVEL PROFILE 1	FACE MILLING AREA	ZLEVEL PROFILE 2
Typ operace	Cavity Milling	Z-Level Milling	Face Milling	Z-Level Milling
Typ řezu	Follow Periphery	Profile	Follow Part	Profile
Úhel řezu	0°	0°	180°	0°
Průměr frézy	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
Poloměr zaoblení	0 mm	0 mm	0 mm	5 mm
Přídavek na obrábění	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Tolerance obrábění	0.03 mm	0.03 mm	0.03 mm	0.03 mm
Stepover	50%		50%	
Z step size	6 mm	6 mm		0.5 mm
Rychlost posuvu	2500 ot/min	2500 ot/min	2500 ot/min	2500 ot/min

5.3.3 Vygenerování programového kódu

Programový kód bylo nutné vygenerovat rozdělený na dvě části a to pro válcovou frézu, která je použita pro první tři operace a na druhou část pro frézu se zaoblenou hlavou. Tento kód lze vygenerovat pomocí Postprocesoru, ta nám vytvoří programový kód, který je uložen ve formátu ANC, kompatibilním s CNC strojem. Formát ANC lze pro náhled otevřít v poznámkovém bloku v systému windows. Soubor s vygenerovaným kódem je přiložen na CD.

5.4 Obrábění na CNC frézce HWT 442



Obr. 35. CNC frézka HWT442. [17]

Tab. 6. Parametry CNC frézky HWT 442. [17]

Obráběcí prostor (X×Y×Z)	400 mm × 400 mm × 200 mm
Velikost upínací plochy (X×Y)	500 mm × 500 mm, 8 mm T-drážky
Programovatelná rychlost posuvu	max. 3 m/min
Programovatelný krok	0,00625 mm
Otáčky vřetene	2000-25000 ot./min
Max. upínací průměr nástroje	10 mm
Motor vřetene	1000 W univerzální
Řídící jednotka	PC
Napájení	230 V/50 Hz
Příkon	2300 VA

Vnější rozměry (š×h×v)	1200 mm × 1000 mm × 1400 mm
Hmotnost	410 kg
Materiál obrobku	grafit, plasty, dřevo, barevné kovy
Max. hmotnost obrobku	20 kg

5.4.1 Upnutí nástroje

Fréza s válcovou stopkou se upnula do vřetene frézky s použitím kleštiny.

5.4.2 Upnutí polotovaru

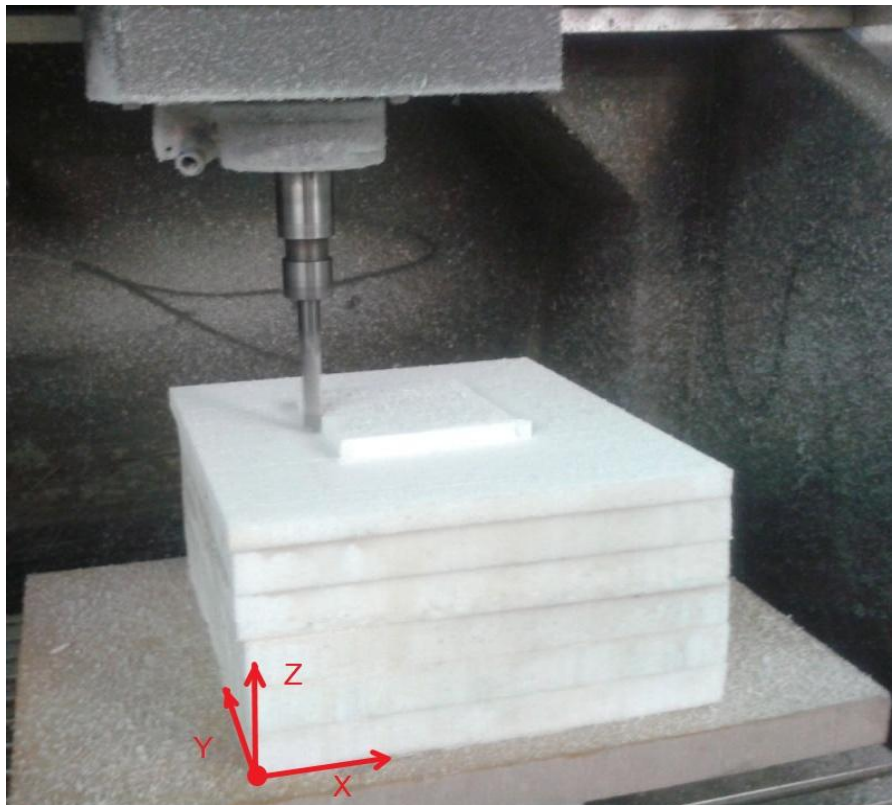
PET pěnový polotovar, nebylo možné upnout do ručního svěráku ani do jiných upinacích přípravků, kvůli možnému vzniku deformací. Toto upnutí by také neumožňovalo obrobení celé jeho plochy, proto byl použit individuální způsob upnutí. A to přilepení jeho spodní strany polotovaru k PUR desce, která byla upnuta v ručním svěráku.

5.4.3 Načtení kódu

CNC kód byl načten z přenosného flash disku, připraveného pomocí programu NX7.5.

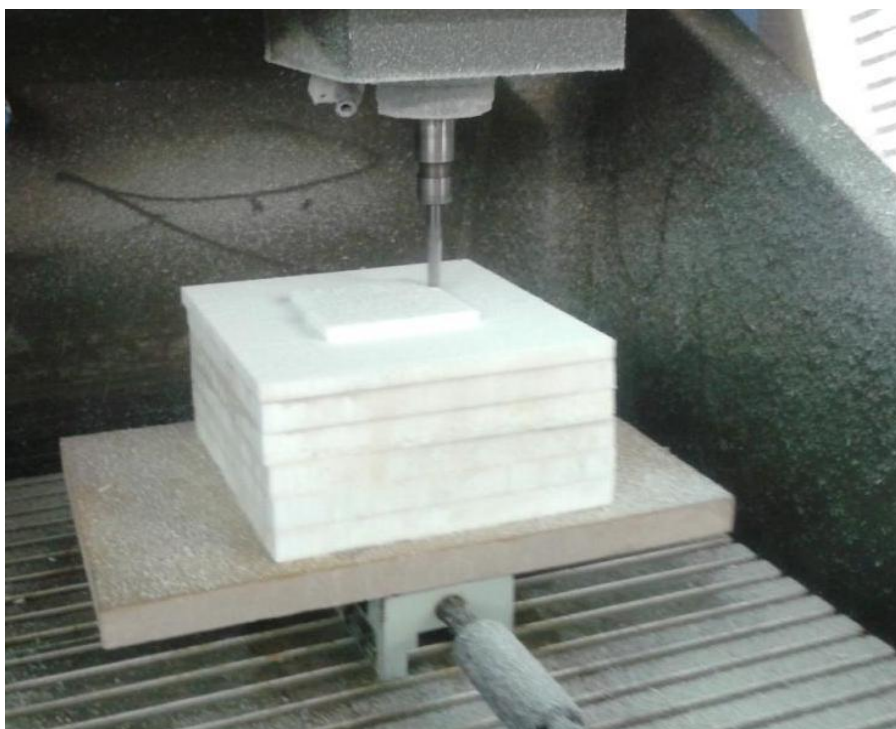
5.4.4 Volba počátku souřadného systému (nulový bod)

Volba počátku souřadného systému (nulový bod) umožňuje programátorovy vhodně definovat počátek souřadného systému s ohledem na způsob kótování výkresu, způsob upnutí, tvar obrobku atd. Počátek souřadného systému musí programátor volit tak, aby při seřizování stroje byl tento bod dosažitelný a aby umožnil seřizovači pokud možno jednoduché seřízení stroje (nulování). U součásti nerotační neupnuté do přípravku by měla mít nulový bod v nejbližším rohu obrobku na nejvyšším čele (obrázek 42.). Součást nerotační upnutá do přípravku by měla mít nulový bod orientovaný s ohledem na dorazy přípravku např. v nejbližším rohu obrobku na dosedací ploše. Dalším hlediskem, které je nutno respektovat je přesnost výroby polotovaru a tolerance rozměrů např. v ose Z. Jak vyplývá z výše uvedeného textu je volba polohy nulového bodu značně variabilní, je však nutno splnit následující obecné zásady: snadný přístup k tomuto bodu při nulování, zabezpečení jednoznačné orientace obrobku vůči nulovému bodu. [14]



Obr. 36. Nastavený lokální souřadný systém stroje.

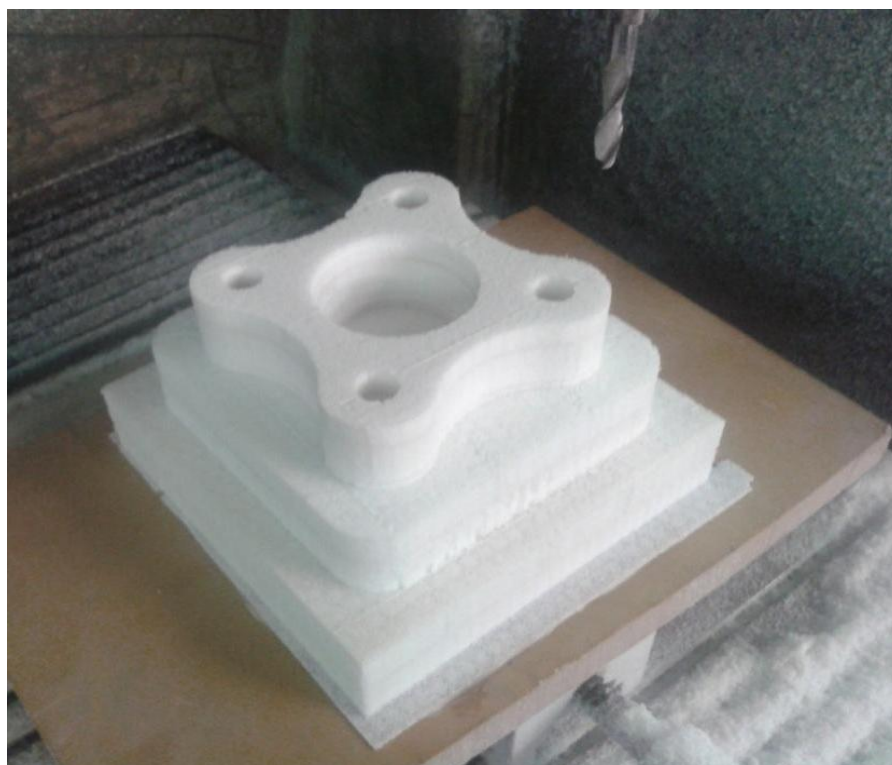
5.4.5 Spuštění NC programu



Obr. 37. Obrábění na CNC frézce HWT 442.



Obr. 38. Obrobek před dokončením vnitřního zkosení díry.



Obr. 39. Ukončení procesu obrábění.

ZÁVĚR A DISKUZE

Při návrhu tvaru pěnového jádra byl využit 3D software CATIA V5R18, ve kterém byla vytvořena výkresová dokumentace a model jádra. Tento model nám následně posloužil jako předloha pro programování v CAM programu NX7.5. V tomto programu proběhlo naprogramování dráhy nástroje, pomocí vybraných operací a proběhla simulace obrábění, kde byly odstraněny možné chyby a kolize nástroje s obrobkem. Samotné obrábění bylo provedeno v dílnách UTB U5 na CNC frézce HWT 442, tento proces trval cca. 2 hodiny. Pro obrábění byly použity dva nástroje: dvoubřitá válcová fréza pro hrubování a dokončení ploch, zaoblení a děr, jako druhý nástroj jsem použil dvoubřitou válcovou frézu s kulovým čelem pro dokončení zkosení.

Obrobení proběhlo úspěšně, výsledkem bakalářské práce je vyrobené tvarové sendvičové jádro z PET pěny. Při pohledu na výrobek je patrné, že byly správně zvoleny řezné podmínky, a posloupnost jednotlivých zvolených operací. Při obrábění nedošlo k degradaci materiálu ani k jeho tavení, způsobené nadměrným zahříváním. V některých místech jsou plochy na výrobku hrubší, to bylo zapříčiněno použitím fréz pro běžné kovové materiály. Pro odstranění těchto nedostatků je potřeba použít nástroje se syntetickým diamantem, nebo snížení rychlosti posuvu při obrábění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *FOAM CORE MATERIALS IN THE MARINE INDUSTRY*. [online]. 2004 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.diabgroup.com>
- [2] *MM Průmyslové spektrum: Sendvičové konstrukce*, [online]. 2001 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/archiv.html>
- [3] *Transfer: Výzkum a vývoj pro letecký průmysl* [online]. 2007 [cit. 2012-05-22]. ISSN 1801 - 9315. Dostupné z: <http://www.vzlu.cz/download.php?file=67>
- [4] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity: Technologie* [online]. 2008 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [5] *Technologie jejich popis a schémata* [online]. 2005 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [6] GOGA Vladimír. *Bunkové telesá* [online]. 2010 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/>
- [7] VINSON, Jack R. *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Vyd. 1. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co., c1999, xvi, 378 p. Knižnice strojírenské technologie. ISBN 15-667-6699-0.
- [8] DAŇOUREK, K. *Kompozitní materiály: Druhy a jejich užití*. Liberec, 2007. Publikace. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Technologická.
- [9] *Netcomposites. Core Materials* [online]. 2011 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/composite-guide-core-materials.html>
- [10] *Armacell-core-foams. PET Foams* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.armacell-core-foams.com/>
- [11] *Aerospace engineering. Structure material* [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.sae.org/mags/aem/TOOLS/8061>
- [12] ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl - Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha, Scientia, spol. s r.o., 2000. 256 s. ISBN 80-7183-207-3.

- [13] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: ZÁKLADNÍ METODY OBRÁBĚNÍ – 1. část*. Brno, 2004. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1. *Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [14] JANDEČKA, Karel. *Postprocesory a programování NC strojů. Vyd. 1.* Ústí nad Labem: UJEP, FVTM, 2007, 244 s. Knižnice strojírenské technologie. ISBN 978-80-7044-870-0.
- [15] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění. Vyd. 1.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [16] RUSNÁKOVÁ, Soňa. Interní dokumenty. Zlín, 2011.
- [17] ČERNÝ, Jakub. Interní dokumenty. Zlín, 2010.
- [18] *Core materials*. [online]. 2009 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.corematerials.3acomposites.com/fileadmin/pdf/Introduction_to_cores.pdf
- [19] *Composites*. [online]. 2009 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.composites.ch/co-cfk/opera/hs-pol-composites-m-fert-pr.htm>
- [20] *Jetphotos*. [online]. 2009 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://jetphotos.net/showphotos.php?aircraft=Aero%20Ae-270%20Ibis>
- [21] *Pilanamct*. [online]. 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.pilanamct.cz/cz/frezovaci-trny-pro-frezovaci-hlavy-53.html>
- [22] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3. 2. vyd.* Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-718-3336-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

RTM	Resin Transfer Moulding
PET	Polyethylentereftalát
PA	Polyamid
PUR	Polyuretan
EPS	Polystyren
EPP	Polypropylen
PE	Polyethylen
PIR	Polyisocyanurate
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styren Akrylonitril
IPN	Interpenetrating Polymer Network
RO	Nástroj s břity z rychlořezné oceli
SK	Nástroj s břity ze slinutých karbidů
CNC	Computer Numerical Control
3D	Tří dimensionální (prostorový)
CA	Computer Aided (s počítačovou podporou)
CAD	Computer Aided Design (systém počítačové podpory při konstruování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (systém počítačové podpory výroby)
CAE	Computer Aided Enginnering (systém počítačové podpory prováděných analýz)
PDM	Product Data Management (systém správy výrobní dokumentace)
A, B	Otáčení kolem osy x, y, z
X, Y, Z	Pohyby ve směru osy

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Namáhání tahovými a tlakovými silami. [16]</i>	12
<i>Obr. 2. Letoun Aero Ae-270. [20]</i>	15
<i>Obr. 3. Tramvaj Astra. [2]</i>	15
<i>Obr. 4. Technologie ruční laminace. [5]</i>	17
<i>Obr. 5. Technologie RTM. [5]</i>	18
<i>Obr. 6. Technologie vákuového prosycování. [16]</i>	19
<i>Obr. 7. Schéma autoklávu. [19]</i>	20
<i>Obr. 8. Struktura buněčných těles:</i>	22
<i>Obr. 9. Pěna, nebo pevné jádro. [16]</i>	22
<i>Obr. 10. Voštinové jádro. [16]</i>	23
<i>Obr. 11. Webové jádro.</i>	23
<i>Obr. 12. Zvlněné nebo nosníkové jádro.</i>	23
<i>Obr. 13. Faktory ovlivňující vlastnosti buněčných těles. [6]</i>	24
<i>Obr. 14. Porovnání vlastností pěnových a plných materiálů. [6]</i>	25
<i>Obr. 15. Pracovní diagram pěn TAH - TLAK. [6]</i>	27
<i>Obr. 16. Charakteristický tvar tlakové křivky pěn. [6]</i>	28
<i>Obr. 17. a) absorbér s pěnovou výplní, b) pěnová výplň autosedačky. [6]</i>	30
<i>Obr. 18. Desky z PVC pěny. [18]</i>	32
<i>Obr. 19. Desky z PET pěny. [18]</i>	32
<i>Obr. 20. Jádro z PUR pěny. [16]</i>	33
<i>Obr. 21. Desky ze SAN pěny. [18]</i>	34
<i>Obr. 22. Tvarované desky z balzy. [18]</i>	35
<i>Obr. 23. Hliníková voština. [11]</i>	36
<i>Obr. 24. Nomex voština. [11]</i>	37
<i>Obr. 25. Termoplastická voština. [11]</i>	37
<i>Obr. 26. Frézovací trn [21]</i>	42
<i>Obr. 27. Souřadnicový systém. [17]</i>	46
<i>Obr. 28. PET pěnové desky navrstvené pomocí polyesterové pryskyřice.</i>	49
<i>Obr. 29. Návrh tvaru.</i>	51
<i>Obr. 30. Model obrobku vymodelovaný v programu CATIA V5R18.</i>	52
<i>Obr. 31. Simulace obrobení pomocí funkce CAVITY MILL.</i>	53
<i>Obr. 32. Simulace obrobení pomocí funkce ZLEVEL PROFILE 1.</i>	54

<i>Obr. 33. Simulace obrobení pomocí funkce FACE MILLING AREA.</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 34. Simulace obrobení pomocí funkce ZLEVEL PROFILE 2.</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 35. CNC frézka HWT442. [17].....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 36. Nastavený lokální souřadný systém stroje.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 37. Obrábění na CNC frézce HWT 442.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 38. Obrobek před dokončením vnitřního zkosení díry.</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 39. Ukončení procesu obrábění.....</i>	<i>60</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Příklad konstrukčních vlastností sendvičových panelů. [16]</i>	13
<i>Tab. 2. Srovnání jednotlivých technologií výroby kompozitů. [3]</i>	16
<i>Tab. 3. Řezné podmínky pro obrábění termoplastů. [12]</i>	38
<i>Tab. 4. Řezné podmínky pro obrábění vyztužených a vrstvených plastů. [12]</i>	39
<i>Tab. 5. Řezné podmínky.</i>	56
<i>Tab. 6. Parametry CNC frézky HWT 442. [17]</i>	57

SEZNAM PŘÍLOH

P I: CD obsahující:

- 3D Model a výkresovou dokumentaci v programu Catia V5
- Textovou část bakalářské práce