

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

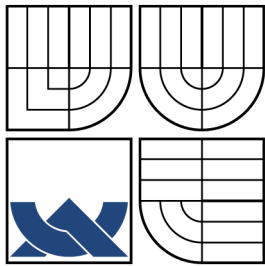
TECHNICKÁ DOKUMENTACE ČÁSTÍ VYROBENÝCH
Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DALIBOR VLČEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

TECHNICKÁ DOKUMENTACE ČÁSTÍ VYROBENÝCH
Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ
TECHNICAL DOCUMENTATION OF PARTS MADE FROM COMPOSITE
MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DALIBOR VLČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF KLEMENT, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Dalibor Vlček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Technická dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů

v anglickém jazyce:

Technical documentation of parts made from composite materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro konstrukci a technologii výroby letadel platí rozsáhlý soubor speciálních evropských leteckých norem. V konstrukci letadel se neustále zvyšuje podíl částí z kompozitních materiálů, jejichž technická dokumentace se liší od dokumentace částí z materiálů kovových.

Cíle bakalářské práce:

Zpracování stručné příručky vedení konstrukční a technologické dokumentace dílů leteckých konstrukcí vyrobených z kompozitních materiálů. Příručka bude využitelná ve výuce i v konstrukční praxi.

Seznam odborné literatury:

Příslušné speciální letecké normy podle přehledu na www.technicke-normy-csn.cz ve třídě 31.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Klement, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 20.11.2010

L.S.

prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje pravidla platná pro tvorbu technické dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů. V první části je stručně shrnuta charakteristika těchto materiálů. V dalších částech jsou uvedeny principy zpracování dokumentace dle souboru evropských norem EN 4408. Cílem této práce je shrnutí zásad platných pro vedení konstrukční a technologické dokumentace dílů leteckých konstrukcí vyrobených z kompozitních materiálů ve formě stručné příručky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technická dokumentace, kompozitní materiály, zobrazení na výkresu, laminát, část se sendvičovým jádrem, část vytvořená navinutím

ABSTRACT

This bachelor thesis describes the rules applicable for creation of technical documentation of parts made from composite materials. In the first part of this paper a brief characteristics of composite materials is introduced. In the subsequent parts the thesis deals with the basic principles of creating the documentation according to the European standard EN 4408. The main aim of this thesis is to summarize the rudimental conventions that refer to drawing of technical documentation of aircraft composite parts.

KEYWORDS

Technical documentation, composite materials, drawing representation, laminate, sandwich structure, parts obtained by winding

VLČEK, Dalibor *Technická dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2011. 47 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Josef Klement, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Technická dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno 19.05.2011

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za jeho odborné vedení a cenné rady při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Uríkovi, PhD. a Ing. Ondřeji Smrtkovi za jejich rady a pomoc. V neposlední řadě patří poděkování i mé rodině za podporu během celého mého studia.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A	tažnost
CMC	kompozitní materiál s keramickou maticí - Ceramics Matrix Composite
E	modul pružnosti v tahu
E_f	modul pružnosti v ohybu
FVF	objemový zlomek vláken - Fibre Volume Fraction, ozn. také jako V_f
IM	středně vysoký modul pružnosti v tahu - Intermediate Modulus
HM	vysoký modul pružnosti v tahu - High Modulus
HS	vysoká pevnost - High Strength
HT	vysoká tažnost - High Tenacity
LM	nízký modul pružnosti v tahu - Low Modulus
MKP	metoda konečných prvků
MMC	kompozitní materiál s kovovou maticí - Metal Matrix Composite
PA	polyamid
PEI	polyeterimid
PES	polyetersulfon
PMC	kompozitní materiál s polymerní maticí - Polymer Matrix Composite
PP	polypropylen
QI	kvaziizotropní uspořádání laminátu - Quasi Isotropic Laminate
R_m	mez pevnosti v tahu
tex	jednotka lineární hustoty vlákna - hmotnost v gramech / 1000 metrů
UD	jednosměrné uspořádání laminátu - Unidirectional laminate
UHM	velmi vysoký modul pružnosti v tahu - Ultra High Modulus
ρ	hustota
σ_f	mez pevnosti v ohybu

OBSAH

Seznam symbolů, veličin a zkratk	11
1 Úvod	15
2 Charakteristika kompozitních materiálů	17
2.1 Základní rozdělení	17
2.2 Kompozitní materiály používané v letectví	18
2.2.1 Vláknové kompozitní materiály s polymerní matricí	18
2.2.2 Další druhy kompozitních materiálů	23
3 Výkresy částí z kompozitních materiálů	25
3.1 Všeobecná pravidla	25
3.1.1 Pojmy a definice	25
3.1.2 Všeobecná pravidla pro kreslení kompozitních částí	26
3.2 Laminované části	27
3.2.1 Zásady kreslení laminovaných částí	27
3.2.2 Pravidla zobrazování	27
3.2.3 Schéma vrstvení a směrový klíč	30
3.3 Části se sendvičovým jádrem	33
3.3.1 Pojmy a definice	33
3.3.2 Kreslení částí se sendvičovým jádrem	34
3.4 Části vyrobené navinutím	40
3.4.1 Pojmy a definice	40
3.4.2 Kreslení částí vyrobených navinutím	41
4 Závěr	43
Literatura	45

1 ÚVOD

Tato práce se věnuje pravidlům platným pro zpracování konstrukční a technologické dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů. V konstrukci letadel se neustále zvyšuje podíl částí z těchto materiálů, přičemž jejich technická dokumentace se liší od dokumentace částí z materiálů kovových.

Při zpracování byly akcentovány části zabývající se vláknovými kompozity s polymerní maticí, které jsou z hlediska použití nejběžnější.

V první části je stručně shrnuta charakteristika těchto materiálů a uvedeno jejich základní rozdělení.

Druhá část je věnována pravidlům pro vedení technické dokumentace dle platné evropské normy EN 4408. Jedná se o popis všeobecných pravidel, shrnutí souvisejících technických norem a také zásad pro kreslení laminovaných částí, částí se sendvičovým jádrem a částí vytvořených navinutím.

2 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

2.1 Základní rozdělení

Kompozitní materiál je složen ze dvou strukturních fází, které jsou navzájem makroskopicky rozlišitelné. Společně tvoří konečné vlastnosti materiálu, které jsou významně odlišné od vlastností dílčích fází. Jedna z fází zpravidla zajišťuje pevnost a druhá slouží jako pojivo. V technické praxi jsou tyto fáze označovány jako:

- **Výztuž** pro zvýšení pevnosti a tuhosti konstrukce, může být ve formě **vláken** nebo **částic**
- **Matrice** pro ochranu výztuže před vnějšími vlivy a přenos zatížení mezi jednotlivými částmi výztuže

Podle druhu matrice mohou být kompozitní materiály rozděleny do tří hlavních skupin:

- **Kompozity s polymerní matricí** (Polymer Matrix Composites - PMC)
Jedná se o nejpoužívanější kompozity, označované také jako fiber reinforced polymers - vlákny vyztužené polymery. Jako matrice jsou použity polymerní pryskyřice. Je možné volit ze široké škály vláken, např.: vlákna skleněná, uhlíková, aramidová ad.
- **Kompozity s kovovou matricí** (Metal Matrix Composites - MMC)
Využití kovové - např. hliníkové - matrice a výztuže ve formě vláken (vlákna uhlíková) nebo částic (oxid hlinitý nebo karbid křemíku)
- **Kompozity s keramickou matricí** (Ceramic Matrix Composites - CMC)
Využití zejména v oblasti velmi vysokých teplot. Výztuž je tvořena krátkými vlákny nebo monokrystaly - whiskery z karbidu křemíku nebo nitridu boru.

Mezi **další kompozity** lze uvést kompozitní materiály s **uhlíkovou matricí**, **se skleněnou matricí** a **kompozity hybridní (vlákno-kovové lamináty)**.

Laminát je materiál tvořený dvěma a více vrstvami lamin tvořících kompozit.

Část se sendvičovým jádrem je druh laminátu s jádrem vloženým za účelem zvýšení ohybové tuhosti konstrukce, která je funkcí druhé mocniny tloušťky jádra. Hlavními požadavky na materiál jádra jsou nízká hustota a dostatečná pevnost ve smyku. Mezi základní typy jader patří jádra **pěnová** a **voštinová**.

2.2 Kompozitní materiály používané v letectví

Jak již bylo úvodem napsáno, bude v této práci kladen důraz zejména na konstrukční a technologické aspekty vláknových kompozitů s polymerní matricí. Z toho důvodu bude v následující části věnováno nejvíce prostoru právě tomuto druhu kompozitních materiálů.

2.2.1 Vláknové kompozitní materiály s polymerní matricí

V těchto materiálech přenášejí vlákna většinu zatížení a ovlivňují tak výsledné mechanické vlastnosti kompozitu. Tyto vlastnosti závisejí také na uspořádání vláken a jsou typicky **výrazně anizotropní**. Matrice váže vlákna dohromady, zajišťuje přenos zatížení mezi jednotlivými vlákny a chrání je před vnějšími vlivy, určuje tedy do značné míry teplotní a chemickou odolnost kompozitu, odolnost proti stárnutí atd. Platí zásada, že při tahovém namáhání se matrice nesmí porušit dříve než vlákno.

Dalším důležitým faktorem je **objemový zlomek vyjadřující množství vlákna v materiálu (Fibre Volume Fraction, FVF, V_f)**. Dosažení vysokých mechanických vlastností je podmíněno velkým podílem vláken v objemu kompozitu. Zároveň je však hodnota FVF omezena nutností dokonalého obklopení vlákna matricí a s tím souvisejícími možnostmi dané výrobní technologie. Hodnota FVF se pohybuje od 30-40% (ruční výroba) po 70% u přesných technologií.

Vlákna

V kompozitních materiálech s polymerní matricí pro letecké aplikace se nejčastěji používají vlákna **skleněná, uhlíková a aramidová**. Průměr těchto individuálních vláken se pohybuje v rozmezí 5-20 μm . Dále se tato vlákna spojují do celků o velkém počtu vláken:

- **Pramenec** je svazek vzájemně nekroucených vláken.
- **Příze (yarn)** je spojitý svazek vzájemně zkroucených vláken nebo pramenců. Využití pro výrobu tkanin.
- **Roving** je soubor paralelních pramenců s malým nebo žádným zkroucením.

Vlákna mohou být buď **dlouhá** (označení C - continuous) nebo **krátká** (označení D - discontinuous). Dále mohou být uspořádána **jednosměrně** nebo **dvojsměrně** v podobě **tkaniny**. Tkanina je tvořena dvěma základními částmi:

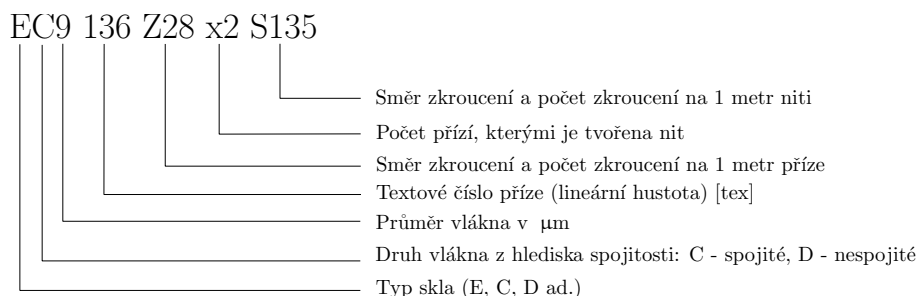
- **Osnova (warp)** je soustava rovnoběžných nití, do kterých je zanášen útek.
- **Útek (weft)** je nit proplétaná osnovou ve směru příčném (nejčastěji kolmém).

Tkaniny mohou mít různou vazbu nití - plátěnou, keprovou, saténovou. Na vazbě nití závisí tvarovatelnost tkaniny.

Skleněná vlákna se vyznačují mechanickými vlastnostmi srovnatelnými s kovy, mají však výrazně nižší hustotu. Jsou chemicky odolná a teplotně odolná do teploty 400 °C. Pro výrobu skleněných vláken se používají tyto druhy skla:

- **Sklo E**, které je nejčastěji využívaným materiálem, nízká cena, horší mechanické vlastnosti v porovnání se sklem S.
- **Sklo S** vhodné pro použití při vyšších nárocích na mechanické vlastnosti, 3x až 4x dražší než sklo E.
- **Sklo D** je borosilikátové sklo s dobrými dielektrickými vlastnostmi, užívané např. pro konstrukci radomů.

Pro označování skleněných vláken v praxi není využívána přesně zavedená konvence, avšak většina výrobců používá následující strukturu zápisu:



Obr. 2.1: Značení skleněných vláken, převzato a upraveno [5] a [6]

Aramidová vlákna (zkratka aramid z "aromatický polyamid") jsou charakteristická vysokou pevností, dobrou odolností proti tepelnému namáhání a malou teplotní roztažností. Mají však nízkou pevnost v tlaku. Další nevýhodou je pohlcování vlhkosti. Velmi dobře tlumí vibrace a absorbují energii. Nejznámějšími obchodními značkami jsou **Kevlar®** (výrobce DuPont, USA) a **Twaron®** (Teijin Aramid BV, Nizozemsko). Existuje označení typů dle velikosti modulu: **aramid LM** (Low Modulus), **aramid HM** (High Modulus) a **aramid UHM** (Ultra High Modulus). Často se používají v kombinaci s uhlíkovými nebo skleněnými vlákny, která eliminují nízkou tlakovou pevnost aramidových vláken.

V některých aplikacích se používají také **bórová vlákna**. Dříve byla využívána zejména v konstrukci vojenských letadel (F-14, F-15, B-1), nyní je jejich hlavním použitím vyztužování kovových matic, především hliníkových a hořčíkových slitin.

Uhlíková vlákna jsou nejrozšířenějšími vlákny užívanými pro primární letecké konstrukce. Vyznačují se velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a nízkou hustotou. Uhlíkové vlákno se vyrábí z ropných produktů nebo pyrolýzou organických vláken polyakrylonitrilu. Výhodou pyrolytického procesu je možnost jeho řízení a získání vláken s potřebnými vlastnostmi:

- **HT (High Tenacity), HS (High Strength) vlákno** - vysoká pevnost v tahu a tažnost, nižší modul pružnosti
- **IM (Intermediate Modulus) vlákno** - střední modul pružnosti, vysoká pevnost a dobrá tažnost
- **HM (High Modulus) vlákno** - vysoký modul pružnosti a nižší tažnost
- **UHM (Ultra High Modulus) vlákno** - velmi vysoký modul pružnosti a velmi nízká tažnost

Pro letecké aplikace se používají svazky o počtu vláken 3000 až 48000 (označení 3K až 48K). Mezi základní vlastnosti uhlíkových vláken patří vysoká pevnost, nízká hmotnost, vysoká únavová pevnost, velmi dobrá elektrická vodivost, nevýhodou je křehkost, nízká interlaminární pevnost a vysoká cena.

Tab. 2.1: Srovnání mechanických vlastností vybraných vláken

Vlákno						
Druh	Typ	R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]	ρ [$g \cdot cm^{-3}$]	
Skleněné vlákno	E \varnothing 5-20 μm	3400	76	4,6	2,54	
	S \varnothing 8-14 μm	4500	89	5,5	2,48	
Uhlíkové vlákno	IM 400	4100	290	1,3	1,81	
	IM 600	5400	290	1,7	1,80	
	HM 35	2350	358	0,6	1,79	
Aramidové vlákno	Kevlar 29	2800	83	4,0	1,44	
	Kevlar 49	3800	130	2,8	1,45	
	Kevlar 149	3450	180	1,9	1,47	

Převzato a upraveno [1]

Polymerní matrice

Polymerní matrice v leteckých kompozitních materiálech převažují. Nejdůležitějšími požadavky kladenými na polymerní matrice jsou **dobré adhezivní vlastnosti, pevnost a tuhost v tahu, únavová odolnost, odolnost proti vzniku mikrotrhlin a vodovzdornost**. Základní rozdělení:

1. **Reaktoplastové matrice**, které zahrnují:
 - Epoxidové pryskyřice
 - Fenolické pryskyřice
 - Polyimidové, bismaleimidové pryskyřice a další
2. **Matrice na bázi termoplastů**
 - Polyamid (PA)
 - Polypropylen (PP)

- Polyeterimid (PEI), Polyetersulfon (PES) a další

Epoxidové pryskyřice jsou nejrozšířenějším druhem polymerní matrice. Využití i pro primární nosné konstrukce - nosníky, žebra atd. Mezi hlavní výhody patří:

- dobré mechanické vlastnosti
- dobré kohezní vlastnosti
- velmi dobrá vodovzdornost
- malé smrštění při vytvrzování
- teplotní odolnost do 140 °C pro vlhké prostředí a 220 °C pro suché prostředí

Fenolické pryskyřice jsou primárně využívány při požadavcích na vysokou ohnivzdornost a samozhášivost. Vytvrzování na principu polykondenzace způsobuje vznik dutin a trhlin. Mají proto horší mechanické vlastnosti, které si ovšem udržují do vysokých teplot. Použití pro interiéry letadel a sendvičové panely.

Polyimidové pryskyřice vynikají vysokou teplotní odolností (až do 315 °C). V případě polykondenzovaných polyimidů je nevýhodou vznik vedlejších produktů a bublin zhoršujících mechanické vlastnosti. **Bismaleimidové pryskyřice** se také vyznačují vysokou teplotní odolností (180 °C za vlhka a 260 °C za sucha). Při vytvrzování nevznikají žádné vedlejší produkty. Jak polyimidové, tak bismaleimidové pryskyřice jsou používány pro vysokoteplotní části letadel, např. obrabeče tahu.

Matrice na bázi termoplastů mají oproti reaktoplastovým některé výhody, např. větší houževnatost, vyšší tažnost a schopnost snášet poškození.

V leteckých aplikacích roste význam **prepregů** (zkratka z pre-impregnated composite). Jedná se o kompozitní materiály v částečně vytvrzeném stavu, který však umožňuje dostatečnou tvarovatelnost. Výhodou jsou stabilní mechanické vlastnosti a jednoduchá výroba součástí. Důležitou vlastností prepregů je samovolné vytvrzování způsobující omezenou životnost, které lze zpomalit skladováním při nízkých teplotách.

Tab. 2.2: Mechanické vlastnosti vybraných polymerních matic

	Matrice	R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]	ρ [$g \cdot cm^{-3}$]
Reaktoplastové matrice	Epoxidová	50-95	3,1	4,0	1,15
	Fenolická	40-70	8,4	0,4	1,45
	Polyimidová	55-180	4,0	1-60	1,40
	Bismaleimidová	45-90	4,0	1-25	1,30
Termoplastové matrice	Polyamid (PA6/6)	97	3,0	30	1,18
	Polypropylen (PP)	24,8	1,1	200	0,91
	Polystyren (PS)	23-70	1,0-3,2	2-50	1,05

Převzato a upraveno [2]

Výsledné vlastnosti vláknových kompozitů

Výsledné mechanické vlastnosti vláknového kompozitního materiálu závisejí především na:

- typu použitého vlákna
- objemovém podílu vlákna (V_f , Fiber Volume Fraction, FVF)
- uspořádání vláken v kompozitu

Při **jednosměrném uspořádání** jsou všechna vlákna orientována ve stejném směru. Je zavedeno označení **UD - unidirectional**. Výsledný materiál má výrazně anizotropní mechanické vlastnosti, které dosahují maximálních hodnot ve směru vláken a minimálních ve směru kolmém na vlákna.

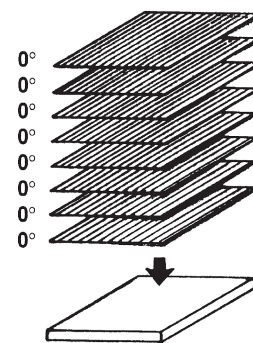
V případě výztuže ve formě **tkaniny** jsou vlastnosti v obou směrech podobné, avšak kolmo k rovině výztuže zůstávají nízké. V případě potřeby lze orientaci vláken v jednotlivých vrstvách upravit tak, aby materiál vykazoval ve všech směrech podobné mechanické vlastnosti - hovoří se o tzv. **kvaziizotropním laminátu**.

Jednosměrné (UD) uspořádání vláken v laminátu

Tab. 2.3: Mechanické vlastnosti UD laminátu uhlík-epoxid a bór-epoxid

Směr	Uhlík-epoxid		Bór-epoxid	
	R_m [MPa]	E [GPa]	R_m [MPa]	E [GPa]
$[0^\circ]$	1219,5	110,9	2101,4	215,6
$[\pm 15^\circ]$	799,2	95,8	943,9	162,9
$[\pm 45^\circ]$	259,7	15,6	235,6	17,4
$[90^\circ]$	194,3	13,1	211,5	20,5

Převzato a upraveno [3]



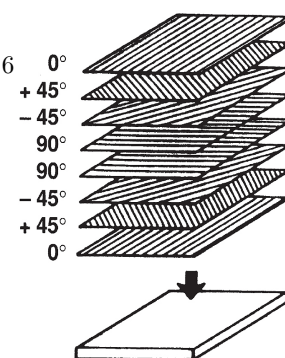
Obr. 2.2: UD laminát; převzato [5]

Kvaziizotropní (QI) laminát

Tab. 2.4: Mechanické vlastnosti kvaziizotropního laminátu uhlík-epoxid, $V_f = 0,6$

Konfigurace lamin	Tahová zkouška		Zkouška v ohybu	
	R_m [MPa]	E [GPa]	σ_b [MPa]	E_b [GPa]
$[0 / \pm 45 / 90^\circ]$	506,3	48,23	219,5	68,9
$[90 / \pm 45 / 0^\circ]$	405,8	45,47	141,2	18,6
$[45 / 0 / -45 / 90^\circ]$	460,9	46,85	263,9	47,54

Převzato a upraveno [3]



Obr. 2.3: QI laminát; převzato [5]

Pro výpočet pevnostních hodnot kompozitních materiálů se spojitými vlákny se používají vztahy **teorie laminátů**, popř. **metoda konečných prvků (MKP)**. Pro jednosměrné uspořádání lze využít také výpočtů založených na znalosti mechanických vlastností vlákna a matrice a jejich objemového podílu V_f .

2.2.2 Další druhy kompozitních materiálů

V následující části je uveden velmi stručný přehled dalších druhů kompozitních materiálů, které však nejsou předmětem této práce zabývající se technickou dokumentací částí vyrobených z vláknových kompozitních materiálů s polymerní maticí.

Kompozitní materiály s kovovou maticí

Kovové matrice umožňují použití kompozitních materiálů za značně vyšších teplot. Podle použité výztuže je lze rozdělit na:

- **kontinuálně zpevněné** - dlouhá vlákna
- **diskontinuálně zpevněné** - krátké vlákna, částice - particles, monokrystaly - whiskery

Výběr vláken pro kontinuálně zpevněné kompozity je omezený z důvodu vzniku intermetalidů na rozhraní matrice - výztuha, které zhoršují mechanické vlastnosti.

Tab. 2.5: Příklady kontinuálně zpevněných kompozitů s kovovou maticí

Materiál		Vlastnosti			
Matrice	Vlákno	V_f [%]	R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]
2024-T6	bór	64	1924	276	0,76
AZ91C +AZ31B	uhlík (P55)	23,3	543	135	0,48
Ti-6Al-4V	SiC	35	1755	240	1,09

Převzato a upraveno [1]

Výhodami diskontinuálně zpevněných kompozitů je jejich nižší výrobní cena a prakticky izotropní mechanické vlastnosti. Zatížení na rozdíl od vláknových kompozitů přenáší matrice. Výztuha (částice, whiskery ad.) brání pohybu dislokací a tím zlepšují výsledné vlastnosti.

Tab. 2.6: Příklady diskontinuálně zpevněných kompozitů s kovovou maticí

Materiál		Vlastnosti			
Matrice	Výztuha	$V_{w,p}$ [%]	R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]
2124-T6	SiC _w (whisker)	15	718	114	5,3
AZ91D	SiC _p (částice)	20	390	71	1,3
Ti-6Al-4V	TiC _p (částice)	20	959	139	0,3

Převzato a upraveno [1]

Kompozitní materiály s uhlíkovou maticí

Kombinace uhlíkového vlákna a uhlíkové matrice je využívána při požadavcích na vysokou teplotní odolnost (použití až do teploty 2200 °C). C-C kompozity se také vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi a nízkou hustotou. Typickou aplikací jsou tepelné štíty raketoplánů, trsyky raketových motorů a brzdové systémy.

Kompozitní materiály s keramickou maticí

Pod pojmem keramika se rozumí vysoce čisté **oxidy, nitridy, karbidy a boridy**. Výhodami jsou žáruvzdornost, stabilita a extrémní tvrdost. Nevýhodami křehkost a nezaručené vlastnosti při tepelném cyklování. Rozdělení:

- **vláknové kompozity** - využívány jsou především systémy C/SiC (uhlíková vlákna a SiC matrice) a SiC/SiC
- kompozity **zpevněné whiskery** - jako whisker především SiC, matrice např. Si_3N_4 nebo Al_2O_3

Tyto materiály jsou vhodné pro použití při teplotách vyšších jak 1000 °C. Při 1200-1300 °C však nastává progresivní degradace vlastností.

Vláknovo-kovové lamináty

Vláknovo-kovové lamináty jsou kombinací vrstev kompozitního a kovového materiálu. Cílem je odstranění nedostatků samostatně použitých kovových nebo kompozitních materiálů. Nejběžněji jde o kombinaci hliníkové slitiny a vláknového kompozitu s epoxidovou maticí. Tyto materiály mají vynikající odolnost proti šíření únavové trhliny. Mezi nejznámější komerčně vyráběné vláknovo-kovové lamináty patří ARALL a GLARE.

3 VÝKRESY ČÁSTÍ Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

3.1 Všeobecná pravidla

Pravidla pro zpracování technické dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů jsou uvedena v souboru evropských norem EN 4408, který je do české technické normy převzat pod označením ČSN EN 4408. Tento soubor se dále dělí na šest částí:

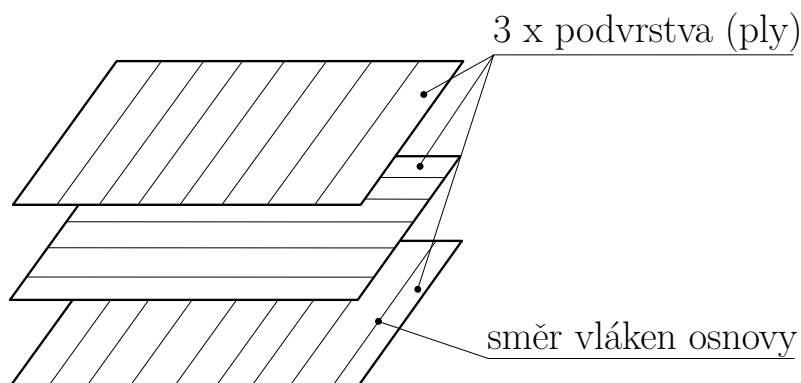
- EN 4408-001 Část 1: Všeobecná pravidla
- EN 4408-002 Část 2: Laminované části
- EN 4408-003 Část 3: Části se sendvičovým jádrem
- EN 4408-004 Část 4: Části vytvářené navinutím
- EN 4408-005 Část 5: Spojování
- EN 4408-006 Část 6: Předběžně tvarované části

V rámci této práce bude kladen důraz na první čtyři části, které jsou z hlediska tvorby technické dokumentace nejdůležitější.

3.1.1 Pojmy a definice

Pro účely normy ČSN EN 4408 jsou užity následující pojmy a definice:

- **Směrový klíč** (direction key) je způsob označení směru vrstev podle schématu použitý na výkresech (viz. kap. 3.2.3)
- **Laminát** (laminates) je dvě nebo více vrstev lamin tvořících kompozit
- **Laminování** (laminating) je proces nebo operace, při které vzniká laminát
- **Oblast laminování** (laminates area) umožňuje detailní rozlišení rozdílně uspořádaných vrstev (tloušťek) laminovaného dílu
- **Motiv laminátu** (laminates motif) je podskupina tvořená několika vrstvami
- **Schéma vrstvení** (lay-up diagram) obsahuje požadavky konstruktéra na dílec vzhledem k požadované funkci, určuje vzájemné uspořádání vrstev, udává jejich orientaci a doplňuje výkres a směrový klíč
- **Vrstva** (layer) je prvek nebo sada prvků v určité úrovni; vrstva se může skládat z několika podvrstev
- **Podvrstva** (ply) je základním prvkem laminátu obsahujícím vlákna (v případě tkaniny vlákna osnovy) pouze v jednom směru. Jako podvrstva může být označen tentýž prvek před laminováním



Obr. 3.1: Vrstva a podvrstva, převzato [3]

3.1.2 Všeobecná pravidla pro kreslení kompozitních částí

Tato pravidla uvádí norma EN 4408-1. Výkresy částí zhotovených z kompozitních materiálů musejí být v souladu s **všeobecnými pravidly pro zobrazování** uvedenými v normách:

- ISO 128: Technické výkresy - pravidla zobrazování
- ISO 129-1: Technické výkresy - kótování a tolerování
- ISO 3098-2: Technická dokumentace - písmo
- ISO 5455: Technické výkresy - měřítko
- ISO 5456: Technické výkresy - metody promítání

Předpis **mezních úchylek rozměrů v popisovém poli** musí odpovídat požadavkům norem:

- ISO 406: Technické výkresy. Tolerování délkových a úhlových rozměrů. Předepisování na výkresech.
- ISO 1101: Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení

Předepsané délkové rozměry se vztahují **na nezamontovanou součást za těchto podmínek**:

- teplota prostředí $20 \pm 0,5$ °C
- relativní vlhkost 50 ± 10 %

Pro úplnou srozumitelnost mohou být požadavky upřesněny formou **poznámek** umístěných přednostně nad popisovým polem.

Tloušťka části se na výkresu **neudává**, protože vyplývá z počtu vrstev, zpracování a výroby. Tloušťky jednotlivých vrstev jsou uvedeny ve schématu vrstvení.

3.2 Laminované části

Pravidla pro kreslení laminovaných částí jsou obsažena v normě EN 4408-002. Laminovaná část je základním prvkem konstrukce vyrobené z kompozitního materiálu. Norma, existující v anglickém znění, zavádí pravidla pro zobrazení a označení těchto částí.

3.2.1 Zásady kreslení laminovaných částí

Pravidla pro kreslení laminovaných částí jsou značně odlišná od pravidel pro kreslení částí z konvenčních konstrukčních materiálů. Především je nutno na výkresu zajistit **přesné zobrazení a specifikaci jednotlivých vrstev**, kterými je daná část tvořena. K tomuto účelu slouží tři základní náležitosti výkresu:

- zobrazení části
- schéma vrstvení
- směrový klíč

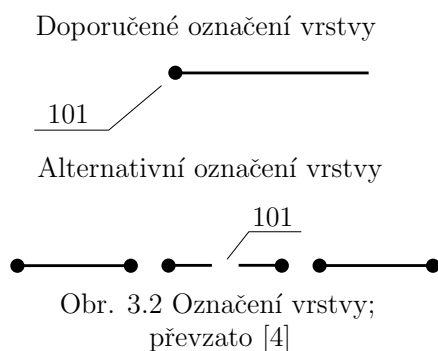
3.2.2 Pravidla zobrazování

Zobrazení části vyrobené z kompozitního materiálu je zpravidla provedeno:

- v pohledech
- pro jednoznačné zobrazení je dále možno použít
 - místní a částečný pohled
 - řez
 - zobrazení v perspektivě

Část je zobrazena v **neobrobeném stavu**.

Každá vrstva je zobrazena jako **spojitá tlustá čára**. Konec vrstvy je zobrazen jako **kruhový bod**. K označení vrstev se užívají trojčíferná čísla, první použité číslo je **101** a další čísla jsou číslem předchozím zvětšeným o 5, tj. **106**, **111**, **116** atd. Tato čísla jsou uvedena na odkazové čáře k dané vrstvě, viz tab. 3.1 a obr. 3.2.



Tab. 3.1: Rozměry prvků pro označení vrstvy

	Formát výkresu	
	A4, A3, A2	A1, A0, X
Tloušťka čáry	0,5 mm	0,7 mm
Průměr kruhového ukončení vrstvy	1,0 mm	2,0 mm

Převzato a upraveno [4]

V konstrukci s využitím kompozitních materiálů je nutné zajistit správné **spojení jednotlivých kompozitních částí**, a to především s ohledem na přenos projektovaného zatížení. Spojení je možné provést dvěma způsoby:

- překrytím (overlapping)
- tupým spojením okraj - okraj (edge to edge)

Způsob zobrazení takového spojení je naznačen v tab. 3.2:

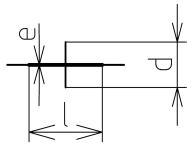
Tab. 3.2: Spojení podvrstev

Zobrazení		Poznámka
Spojení překrytím		
Doporučené		Poznámka udává délku překrytí v mm; platí pro délku překrytí $\leq L$
		Platí pro délku překrytí $> L$
Pozn.: Hodnota L je stanovena konstruktérem		
Alternativní		Poznámka musí obsahovat informaci o druhu spojení (překrytí) a délce překrytí
Spojení okraj - okraj		
Doporučené		—
Alternativní		Poznámka musí obsahovat informaci o druhu spojení (okraj - okraj)

Převzato a upraveno [4]

Pro označení spojení překrytím o délce menší než L (viz tabulka 3.2) platí rozměry prvků uvedené v tabulce 3.3. Dále je nutno v poznámce uvést délku překrytí.

Tab. 3.3: Rozměry prvků označení pro spoj překrytím $\leq L$

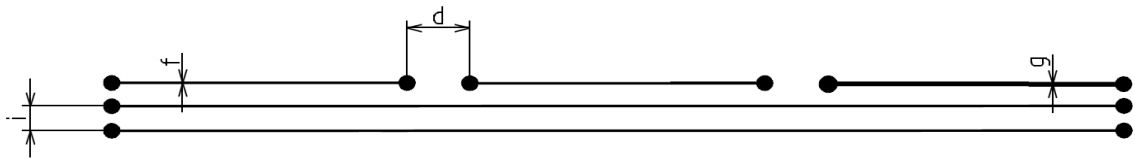


Obr. 3.3: Spojení překrytím; převzato [4]

	Formát výkresu	
	A4, A3, A2	A1, A0, X
Tloušťka čáry e	1,0 mm	1,5 mm
Délka d	5,0 mm	2,0 mm
Délka l	2,0 mm	4,0 mm

Převzato a upraveno [4]

Pro značení spojení okraj - okraj, uvedené na obrázku 3.4, jsou normou dány hodnoty uvedené v tabulce 3.4:



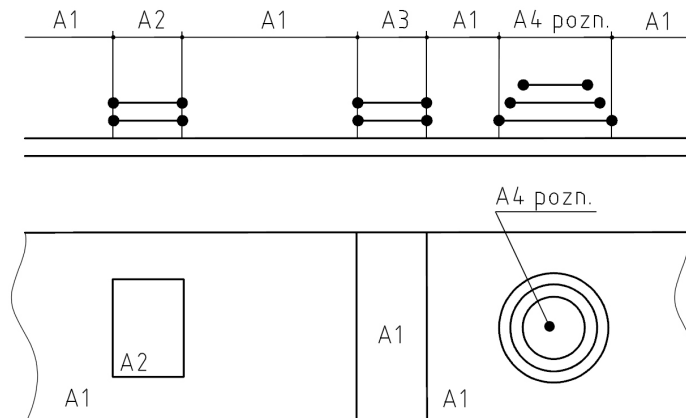
Obr. 3.4: Spojení okraj - okraj, převzato [4]

Tab. 3.4: Způsob označení spojení okraj - okraj

	Formát výkresu	
	A4, A3, A2	A1, A0, X
Tloušťka čáry e	1,0 mm	1,5 mm
Délka d	5,0 mm	2,0 mm
Délka i	2,0 mm	4,0 mm
Tloušťka čáry označující motiv laminátu g	2,0 mm	4,0 mm

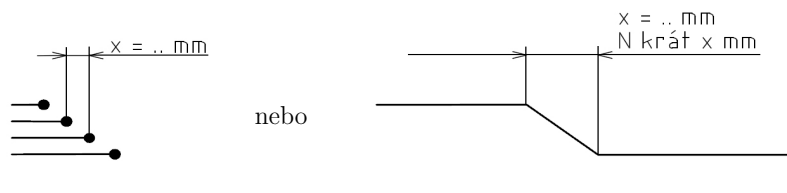
Převzato a upraveno [4]

Označení laminovaných oblastí je provedeno písmenem a číslem, např. A1, A2, A3 atd. Pokud je součást zobrazena v řezu, je označení vrstev provedeno ve formě kót. Příklad označení je uveden na obr. 3.5:



Obr. 3.5: Označení ploch laminátu; převzato [4]

V místě postupné změny tloušťky (plocha A4 na obr. 3.5) je nutno výkres doplnit schematickým znázorněním přechodové oblasti a poznámkou - viz obr. 3.6.

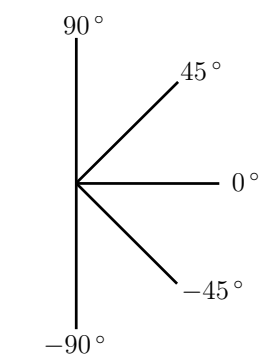


POZN.: SCHODOVITÉ USPOŘÁDÁNÍ VRSTEV; X = .. mm

Obr. 3.6: Zobrazení oblasti s postupnou změnou tloušťky, převzato a upraveno [4]

3.2.3 Schéma vrstvení a směrový klíč

Důležitou součástí výkresu laminované části je **schéma vrstvení**, které charakterizuje jednotlivé vrstvy laminátu - jejich orientaci, tloušťku a materiál. Nedílnou součástí je také **směrový klíč** (obr. 3.7), který udává směr vláken osnovy. Směr 0° klíče je volen konstruktérem, ostatní směry vyplývají z orientace pravotočivé soustavy souřadnic. Ve schématu vrstvení jsou používány standardizované symboly pro označení druhu vrstvy. Tyto symboly jsou shrnuty v tabulce 3.5.



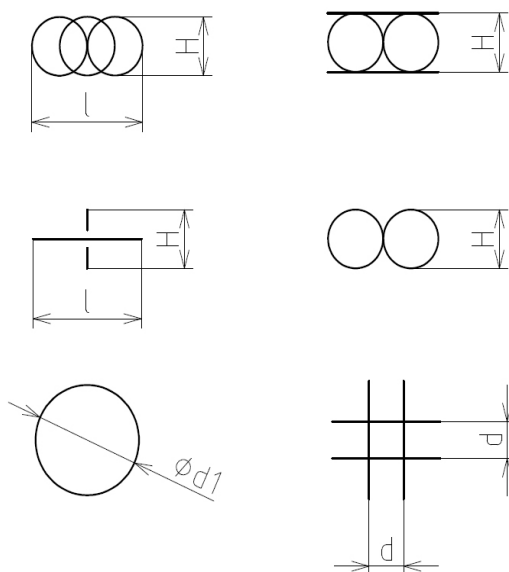
Obr. 3.7: Směrový klíč; převzato [4]

Tab. 3.5: Význam symbolů ve schématu vrstvení

Význam	Symbol
Netkaná tenká síťka	
Síťka nebo roving	
Tkanina, orientovaná ve směru osnovy	
Tkanina, orientovaná ve směru útku	
Vyvážená tkanina	
Vyvážená vrstvená tkanina	
Směr výztuhy není podstatný	
Strukturální lepidlo	
Nedefinovaná vrstva	
Motiv laminátu	

Převzato a upraveno [4]

Velikost symbolů pro schéma vrstvení je uvedena v následujícím obrázku a tabulce:



Obr. 3.8: Velikost symbolů ve schématu vrstvení, převzato [4]

Tab. 3.6: Velikost symbolů ve schématu vrstvení

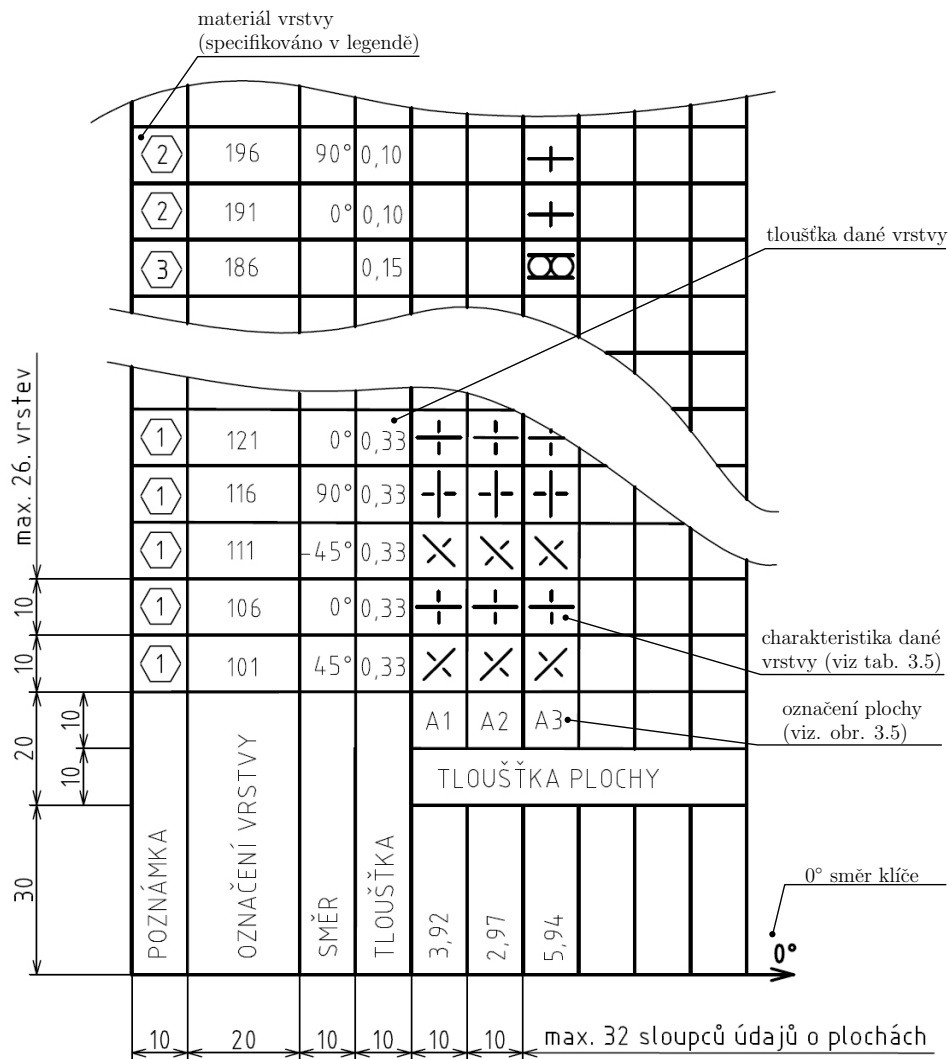
	Formát výkresu	
	A4, A3, A2	A1, A0, X
Tloušťka čar	0,5 mm	0,7 mm
Délka l	5,0 mm	7,0 mm
Výška H	3,0 mm	5,0 mm
Průměr d1	4,0 mm	4,0 mm
Délka d	1,0 mm	1,5 mm

Převzato a upraveno [4]

Ve **schématu vrstvení** jsou pro každou plochu (viz obr. 3.5) uvedeny jednotlivé prvky (vrstvy), ze kterých se tato vrstva skládá. Každá vrstva je definována těmito parametry:

- označení vrstvy (viz obr. 3.2)
- materiál vrstvy (tkanina, výztužný materiál, použitá matrice, příp. lepidlo)
- směr vrstvy
- tloušťka vrstvy

Na obrázku 3.9 je uveden příklad schématu vrstvení.



Legenda

- ① Uhlík. tkanina, polyimidová pryskyřice
- ② E-sklo tkanina, epoxidová pryskyřice
- ③ Lepidlo Redux 322

Obr. 3.9: Schéma vrstvení; převzato a upraveno [4]

Praktický příklad aplikace laminátu T300/BSL914 (uhlík - epoxid) použitého pro konstrukci panelu křídla turbovrtulového dopravního letounu ATR 72 francouzského výrobce Aérospatiale [7]:

- 0°: 6 vrstev
- 45°: 4 vrstvy
- -45°: 4 vrstvy
- 90°: 6 vrstev

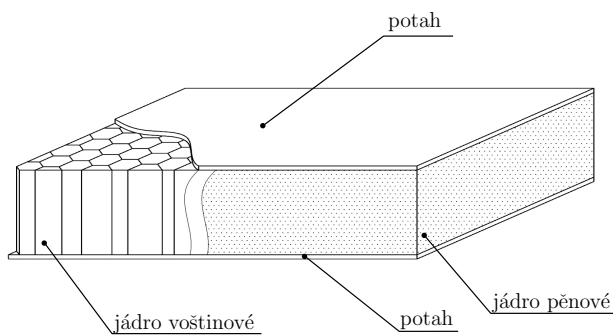
Celková tloušťka dílce je $20 \times 0,13 \text{ mm} = 2,6 \text{ mm}$.

3.3 Části se sendvičovým jádrem

Části se sendvičovým jádrem jsou logickým rozšířením aplikace laminátů. Pravidla pro kreslení sendvičových částí jsou obsažena v normě EN 4408-003. Mezi dvě vrstvy laminátu (**potah**) je vložena **výplň (jádro)** - pěna nebo voština (obr. 3.10). Účelem je zvýšení ohybové tuhosti dané konstrukce, která je funkcí druhé mocniny tloušťky dílu. Hlavními požadavky na materiál jádra jsou:

- nízká hustota
- dostatečná pevnost ve smyku
- nízký modul pružnosti

Nejčastěji využívanými materiály jádra jsou hliníkové slitiny, aramidový papír (obch. značka Nomex), skleněná vlákna ad.



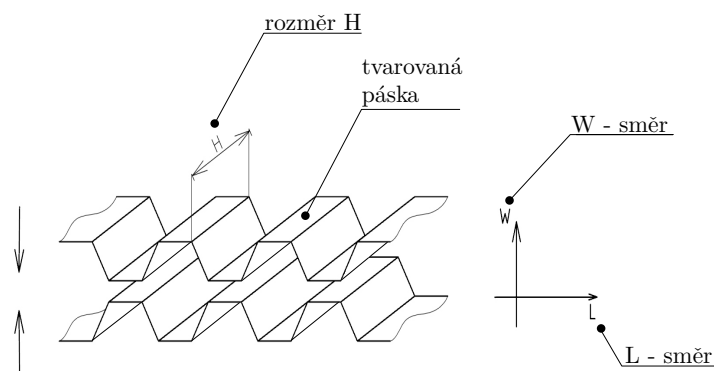
Obr. 3.10: Schéma sendvičové konstrukce

3.3.1 Pojmy a definice

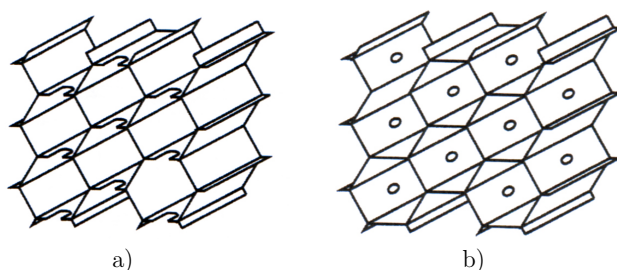
Pro účely normy jsou zavedeny následující pojmy:

- **alveolární materiál** je systém tvarovaných a částečně spojených pásek tak, aby tvořily opakující se geometrické útvary (obr. 3.11)
- **buňka** je základní jednotkou alveolárního materiálu tvořenou dvěma po sobě jdoucími páskami, její velikost je charakterizována průměrem vepsané kružnice
- **čelní plocha** je plocha jádra, která je ve styku s potahem
- **buňka s otvory na okraji** - otvory při jedné nebo obou čelních plochách brání zadržování kapaliny uvnitř buněk (obr. 3.12a)
- **perforovaná buňka** - otvory uprostřed brání vzniku tlakových diferencí způsobujících zvýšené namáhání konstrukce (obr. 3.12b)
- **voština** je nejběžněji používaným druhem alveolárního materiálu zpravidla se šestiúhelníkovým tvarem buněk
- **L-směr** je směr pásky tvořící alveolární materiál (obr. 3.11)
- **W-směr** je směr kolmý na L-směr (obr. 3.11)
- **pěna** je přibližně izotropní druh alveolárního materiálu

- **rozměr H** je definován jako tloušťka jádra



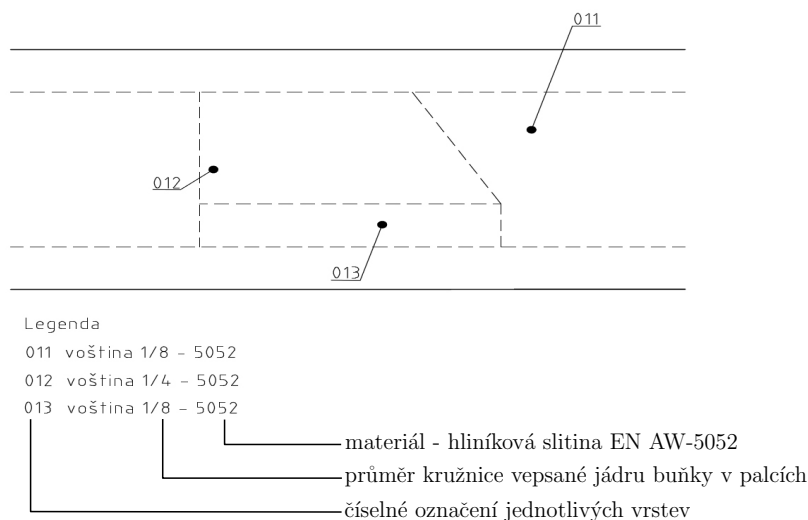
Obr. 3.11: Vznik alveolárního materiálu (konkrétně voštiny)



Obr. 3.12: Buňka s otvory na okraji (a) a perforovaná buňka (b), převzato a upraveno [4]

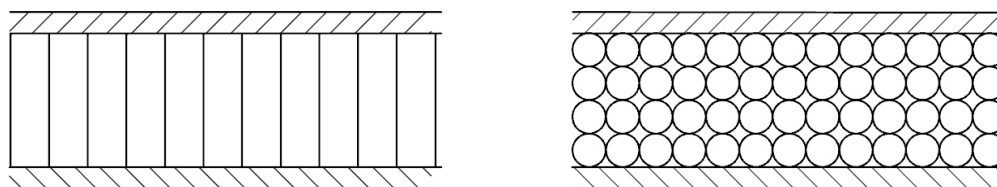
3.3.2 Kreslení částí se sendvičovým jádrem

Pro zobrazení platí obecná pravidla uvedená v kapitole 3.1.2. Zobrazení části se sendvičovým jádrem je možné provést v pohledu nebo řezu. Každá oblast je označena **trojčísle** **číslem**, první číslicí je přitom 0. Prvním číslem z použitelné řady je tedy **011**, následuje **012**, **013** atd. **V pohledu** je oblast se sendvičovou výplní zobrazena **tenkou přerušovanou čarou** (obr. 3.13).



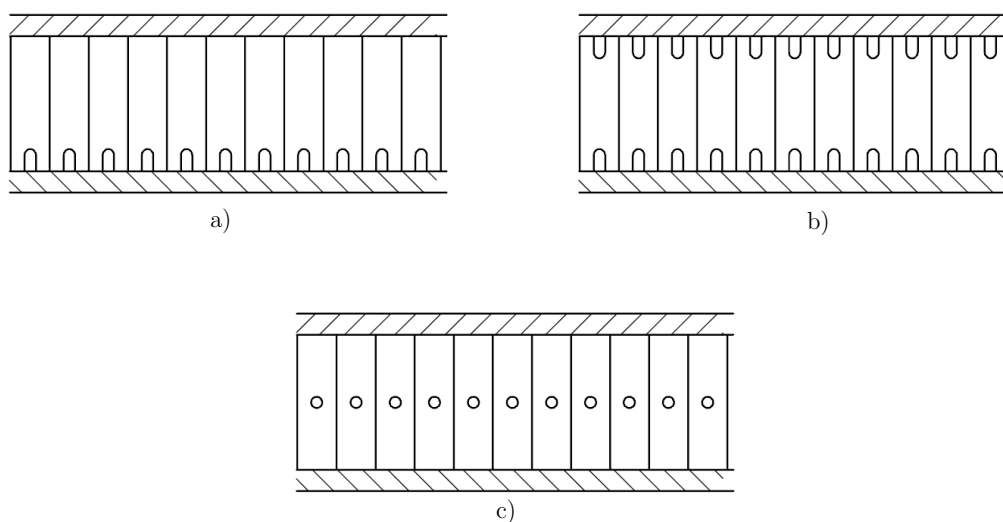
Obr. 3.13: Zobrazení sendvičové konstrukce v pohledu (převzato a upraveno [4])

Pro zobrazení **v řezu** je zavedena konvence naznačená na obázku 3.14. Alveolární materiál je zobrazen tlustými čarami kolnými k rovině potahu. Pěna je zobrazena kružnicemi.



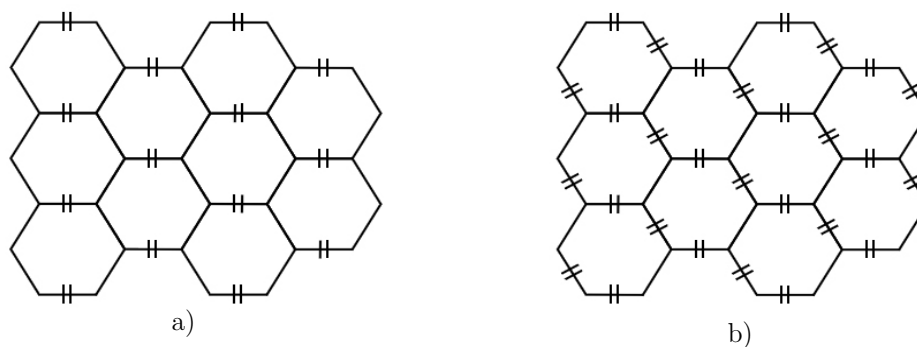
Obr. 3.14: Zobrazení sendvičové konstrukce v řezu: a) voština b) pěna (převzato a upraveno [4])

Zobrazení alveolárního materiálu s otvory na okrajích, příp. s vnitřní perforací je provedeno dle obr. 3.15.



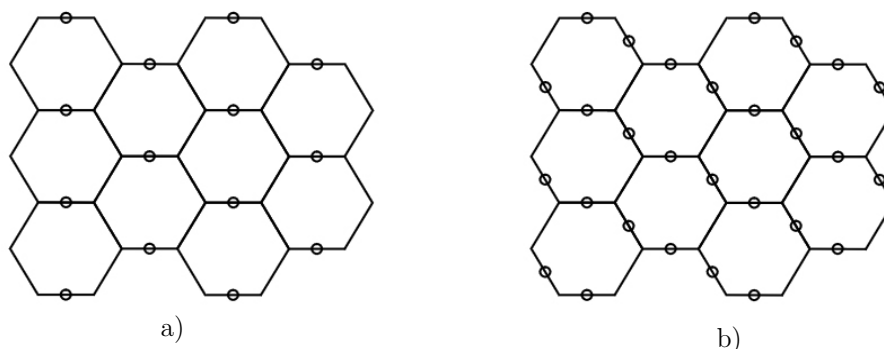
Obr. 3.15: Zobrazení alveolárního materiálu s otvory: a) na jedné b) na obou stranách nebo c) perforovaného materiálu (převzato [4])

V některých aplikacích je nutno přesně stanovit místa, ve kterých mají být tyto otvory provedeny. V takovém případě je třeba část sendvičové výplně zobrazit jako zvětšený detail a otvory označit dvěma rozvoběžnými úsečkami (dle obr. 3.16).



Obr. 3.16: Zobrazení alveolárního materiálu s otvory: a) v jednom b) ve dvou směrech (převzato [4])

V případě perforovaných buněk je situace obdobná, k značení jsou ovšem místo úseček použity kružnice (obr. 3.17)

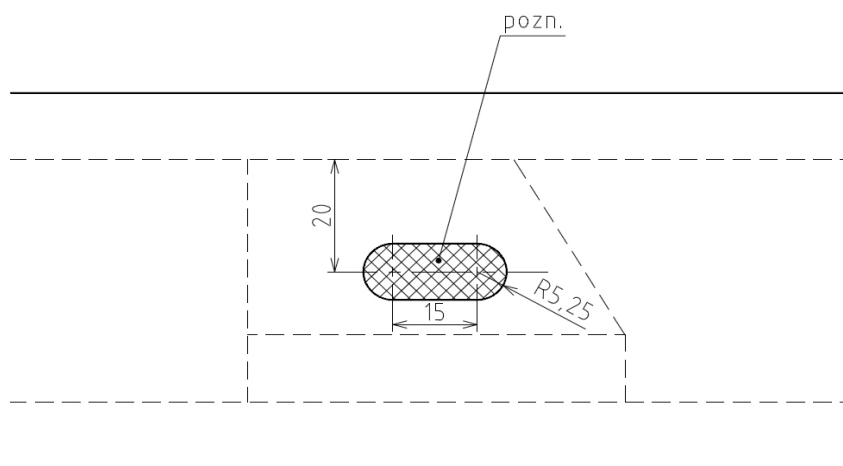


Obr. 3.17: Zobrazení alveolárního materiálu s perforací: a) v jednom b) ve dvou směrech (převzato [4])

V některých případech je vhodné vyplnit buňky materiálem. Jedná se o technologicky i ekonomicky nenáročný zlepšení vlastností kompozitní struktury, především z hlediska odolnosti proti poškození. Výplň je realizována např. polymerními pěny a nedochází k podstatnému zvýšení hmotnosti konstrukce [8]. Jedná se typicky o:

- místa přechodu dvou druhů alveolárních materiálů
- výplň okraje sendviče
- výplň buněk v obecném místě sendvičové konstrukce

V pohledu **se nezobrazuje** výplň v místě přechodů ani výplň okraje sendviče. Zobrazuje se **pouze výplň buněk v obecném místě** sendvičové konstrukce, a to tlustou plnou čarou. Oblast ohraničená touto čarou je vyšrafována (obr. 3.18):

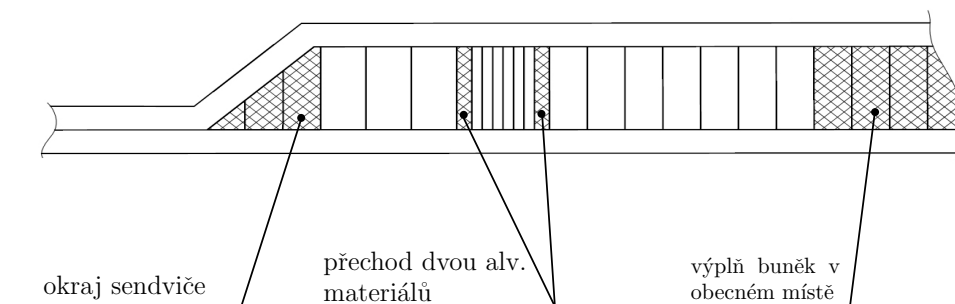


POZNÁMKA

Výplň PVC pěna Divinycell H

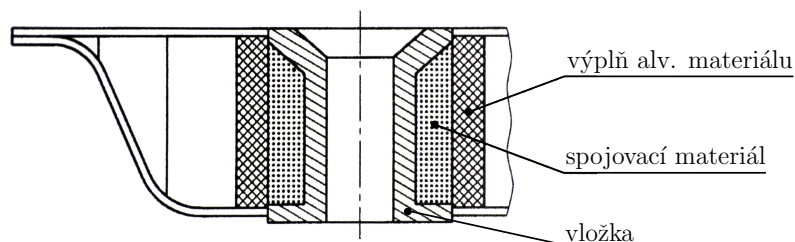
Obr. 3.18: Zobrazení výplně buněk v pohledu (převzato z [4] a upraveno dle [9])

V řezu jsou zobrazeny všechny výše uvedené druhy výplně (obr. 3.19).



Obr. 3.19: Schematické zobrazení výplně buněk v řezu (převzato a upraveno [4])

V případě, že je konstrukce doplněna **vložkou**, je nutné celou situaci náležitě zobrazit v řezu (obr. 3.20). Platí, že materiál sendviče musí být na rozhraní kompozit - vložka vyplněn. V pohledu je zobrazena pouze výplň dle obr. 3.18., vložka je prokreslena jen v řezu.



(pozn.: rozměry a tvar vložky mohou být zobrazeny a zakótovány v řezu, popř. na zvláštním výkresu)

Obr. 3.20: Zobrazení vložky v řezu (převzato a upraveno [4])

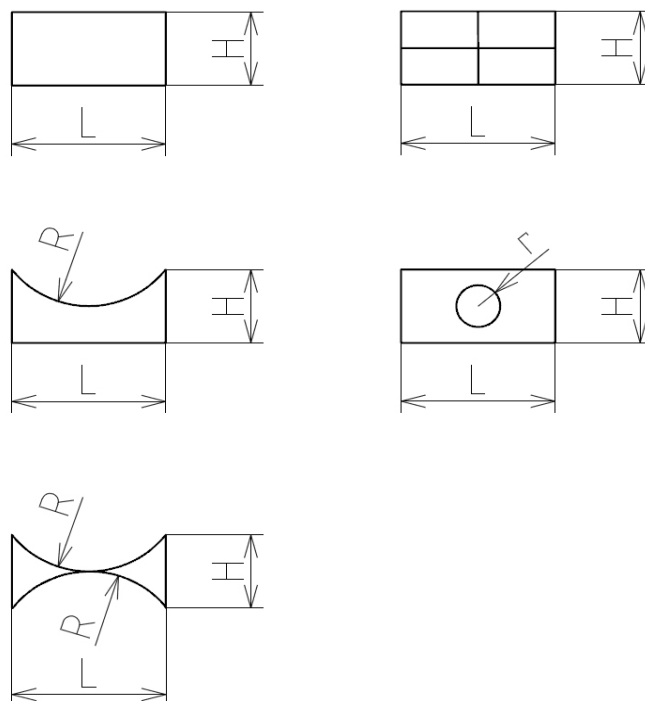
Schéma vrstvení části se sendvičovým jádrem je principiálně stejné jako schéma pro obyčejnou laminovanou část (kap. 3.2.3). Každému prvku sendvičové konstrukce je určen jeden řádek. Pro materiály jádra je zavedeno označení v tab. 3.7:

Tab. 3.7: Symboly pro materiál jádra ve schématu vrstvení

Význam	Symbol
Alveolární materiál bez perforace a otvorů (delší strana obdélníku značí L směr)	
Alveolární materiál s otvorem na jedné straně (zakřivená část značí stranu s otvorem)	
Alveolární materiál s otvory na obou stranách	
Perforovaný alveolární materiál	
Pěna	

Převzato a upraveno [4]

Velikost symbolů pro schéma vrstvení je uvedena v následujícím obrázku a tabulce:



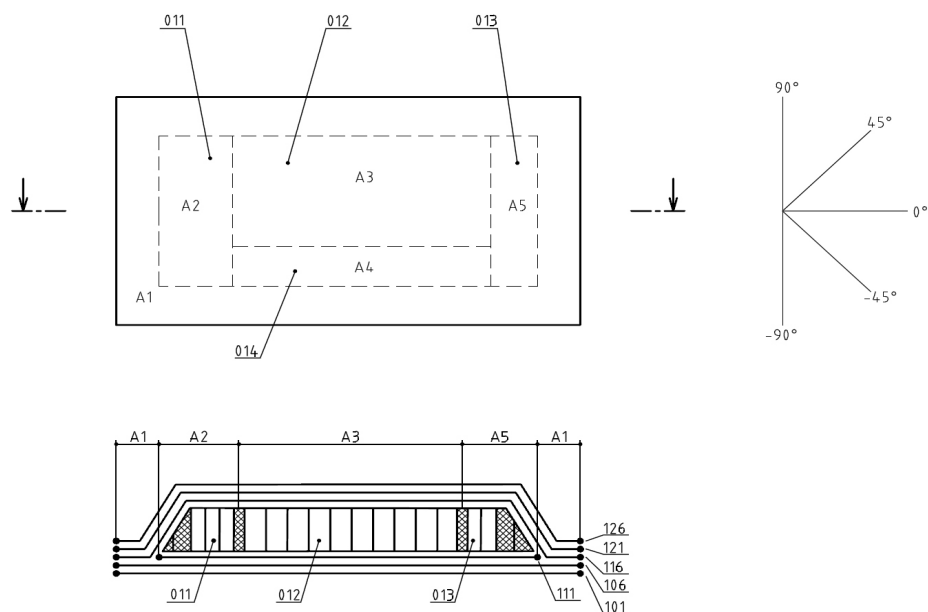
Obr. 3.21: Velikost symbolů ve schématu vrstvení, převzato [4]

Tab. 3.8: Velikost symbolů pro jádro ve schématu vrstvení

	Formát výkresu	
	A4, A3, A2	A1, A0, X
Tloušťka čar	0,5 mm	0,7 mm
Délka L	5,0 mm	7,0 mm
Výška H	3,0 mm	5,0 mm
Poloměr R	3,0 mm	4,0 mm
Poloměr r	1,0 mm	2,0 mm

Převzato a upraveno [4]

V následujících dvou obrázcích (obr. 3.22 a obr. 3.23) je ukázán jednoduchý příklad zobrazení a schématu vrstvení kompozitní konstrukce se sendvičovým jádrem. Oba obrázky vzájemně korespondují. Materiály jednotlivých vrstev jsou opět specifikovány v poznámce pod schématem vrstvení. Na rozhraní laminátového potahu a materiálu jádra - voštiny je aplikováno lepidlo. V poli udávajícím tloušťku jednotlivých ploch stojí za povšimnutí výrazné zvětšení tloušťky dílce v místech, kde bylo vloženo jádro.



Obr. 3.22: Zobrazení části se sendvičovým jádrem na výkrese (převzato a upraveno [4])

①	126	45°	0,33	✗	✗	✗	✗	✗	
①	121	0°	0,10						
②	116		0,15	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
③	014	90°	15,0				□		
③	013	-45°	15,0					◇	
④	012	0°	15,0			□			
③	011	90°	15,0		□				
②	111		0,15		⊗	⊗	⊗	⊗	
①	106	0°	0,33						
①	101	45°	0,33	✗	✗	✗	✗	✗	
POZNÁMKA	OZNAČENÍ VRSTVY A DALŠÍCH ELEMENTŮ	SMĚR	TLOUŠŤKA	A1	A2	A3	A4	A5	
				TLOUŠŤKA PLOCHY					
				1,47	16,62	16,62	16,62	16,62	90°

Legenda

- ① Skleněná tkanina, epoxidová pryskiřice
- ② Lepidlo Redux 322
- ③ voština 1/8 - 5052
- ④ voština 1/4 - 5052

Obr. 3.23: Schéma vrstvení části se sendvičovým jádrem na výkrese (převzato a upraveno [4])

3.4 Části vyrobené navinutím

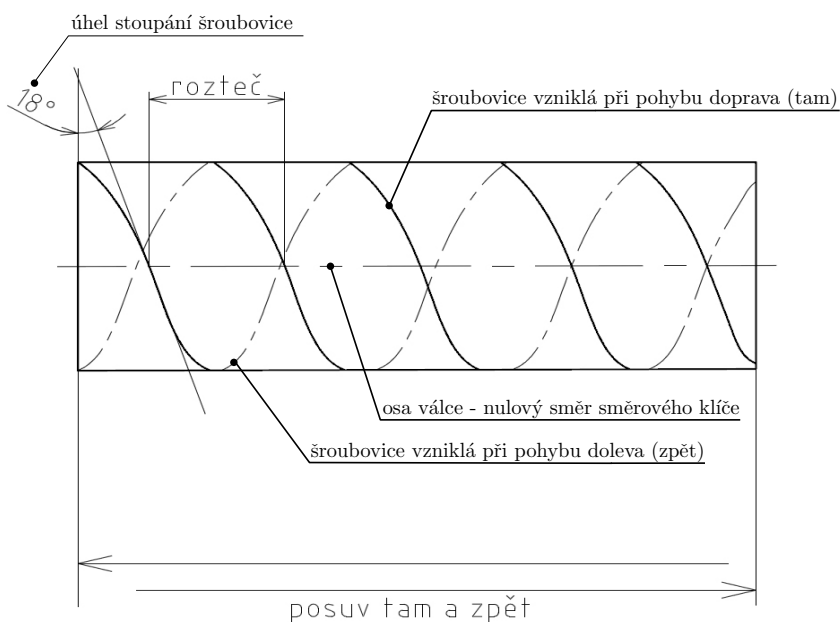
Problematikou částí vyrobených navinutím se zabývá norma EN 4408-004. Tato norma popisuje pouze výkresovou dokumentaci válcových částí vytvořených navinutím. Z důvodu rozmanitých konstrukčních požadavků na geometrii součástí má proto značně omezené použití. Prakticky lze normu aplikovat v případě tvorby konstrukční dokumentace částí:

- vzniklých šroubovitým navíjením vláken příze
- navíjením vrstev

3.4.1 Pojmy a definice

Pro potřeby normy EN 4408-004 jsou zavedeny jisté pojmy, z nichž ty podstatné z hlediska pochopení vzniku navíjené součásti jsou uvedeny níže:

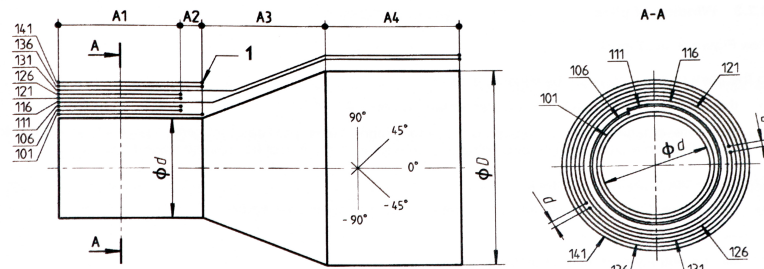
- **Úhel stoupání šroubovice** je úhel, který svírá dané vlákno nebo vrstva s 0° směrem směrového klíče, který je volen shodný s osou symetrie válce. Tento úhel je proto analogický úhlu stoupání šroubovice např. u šroubů
- **Rozteč šroubovice** je osová vzdálenost dvou bodů daného vlákna na úseku odpovídajícímu jedné otáčce šroubovice
- **Páskou** se rozumí prepregový element dodávaný v různých šířkách a mající vlákna uspořádaná jednosměrně ve směru pásky
- **Posuv tam a zpět** (to-and-fro) je základní pohyb vykonaný při vytváření navíjené struktury. Odpovídá navinutí jedné šroubovice na válec konečné délky ve směru tam i zpět.



Obr. 3.24: Znázornění jednotlivých pojmů pro část vytvořenou navinutím

3.4.2 Kreslení částí vyrobených navinutím

V případě výroby pomocí **navíjení vláken** je daná vrstva ve schématu vrstvení doplněna symbolem @. Tento symbol se vyskytuje v poli užívaném pro specifikaci daného materiálu. Na obr. 3.25 je naznačen postup při tvorbě výkresu části vzniklé navinutím.



znak určující, že daná vrstva bude vytvořena navinutím

@	1	141	90°	0,38						2 x ROVING
@	1	136	90°	0,38						2 x ROVING
@	1	131	90°	0,38						2 x ROVING
	2	126	45°	0,31		×				
	2	121	0°	0,31		+				
@	1	116	V±		V±					3 x ROVING POSUV TAM A ZPĚT 29x
@	2	111	0°	0,31		+				počet posuvů tam a zpět (to-and-fro) potřebných k vytvoření vrstvy
@	2	106	0°	0,31		+				
@	1	101	90°	0,38						2 x ROVING
POZNÁMKA	OZNAČENÍ VRSTVY A DALŠÍCH ELEMENTŮ	SMĚR	TKANINA	PŘÍŽE	A1	A2	A3	A4	TLOUŠŤKA PLOCHY	
					4,04	2,80	V	0,98		
										0°

směr se mění (V - Variable)

tloušťka vrstvy se mění (V - Variable)

Legenda

- 1 Uhlíková vlákna
- 2 Vyvážená tkanina

Obr. 3.25: Nástin zpracování technické dokumentace části vytvořené navíjením (převzato a upraveno [4])

4 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce si kladla za cíl vytvořit stručnou příručku vhodnou pro vedení technické dokumentace částí vyrobených z kompozitních materiálů. První část popisující strukturu a vlastnosti kompozitních materiálů tvoří úvod do celé problematiky. V následujících kapitolách byla na základě souboru evropských norem EN 4408 přeložena a vhodně doplněna vysvětlujícími poznámkami a schémata úvodní část EN 4408-001, část EN 4408-002 zabývající se kreslením laminovaných částí, EN 4408-003 zabývající se částmi se sendvičovým jádrem a konečně EN 4408-004 pojednávající o částech vytvořených navinutím. Je nutno podtknout, že celá problematika tvorby výkresové dokumentace kompozitních částí je značně složitá, v této práci bylo pojednáno pouze o určitém základu majícím oporu v platných normách. Tento základ však může být jistým východiskem pro tvorbu reálné výkresové dokumentace.

LITERATURA

- [1] KLEMENT, J. *Přednášky z předmětu Letecké materiály*. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2010.
- [2] DANIEL, I. M., ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford: Oxford University Press, 1994. 384 s. ISBN 0-19-507506-4
- [3] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. 3rd ed. New York: CRC Press, 2007. 616 s. ISBN 978-0-8493-4205-9
- [4] ČSN EN 4408. *Letectví a kosmonautika - Technické výkresy - Kreslení částí vyrobených z kompozitních materiálů*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 100 s.
- [5] *Faserverbundwerkstoffe Handbuch, Edition 06/2009*. Waldenbuch: RG Faserverbundwerkstoffe GmbH, 2009. 237 s.
- [6] *Skloláknový roving*. Litomyšl: Saint-Gobain Vertex, s.r.o., 2008. 5 s.
- [7] *Composite stress manual*. Toulouse: Aérospatiale Aéronautique, 1999. 699 s.
- [8] BURLAYENKO, V. N, SADOWSKI T., *Application of Homogenization FEM Analysis to Aluminum Honeycomb Core Filled with Polymer Foams*. Charkov: National Technical University 'KhPI', 2010. 2 s.
- [9] *Divinycell H60 - Supercharged H Grade*. Desoto, Texas: Diab, Inc., 2010. 4 s.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1: Značení skleněných vláken
- Obr. 2.2: UD laminát
- Obr. 2.3: QI laminát
- Obr. 3.1: Vrstva a podvrstva
- Obr. 3.2: Označení vrstvy
- Obr. 3.3: Spojení překrytím
- Obr. 3.4: Spojení okraj - okraj
- Obr. 3.5: Označení ploch laminátu
- Obr. 3.6: Zobrazení oblasti s postupnou změnou tloušťky
- Obr. 3.7: Směrový klíč
- Obr. 3.8: Velikost symbolů ve schématu vrstvení
- Obr. 3.9: Schéma vrstvení
- Obr. 3.10: Schéma sendvičové konstrukce
- Obr. 3.11: Vznik alveolárního materiálu
- Obr. 3.12: Buňka s otvory na okraji a perforovaná buňka
- Obr. 3.13: Zobrazení sendvičové konstrukce v pohledu
- Obr. 3.14: Zobrazení sendvičové konstrukce v řezu
- Obr. 3.15: Zobrazení alveolárního materiálu s otvory
- Obr. 3.16: Zobrazení alveolárního materiálu s otvory v jednom a dvou směrech
- Obr. 3.17: Zobrazení alveolárního materiálu s perforací
- Obr. 3.18: Zobrazení výplně buněk v pohledu
- Obr. 3.19: Schematické zobrazení výplně buněk v řezu
- Obr. 3.20: Zobrazení vložky v řezu
- Obr. 3.21: Velikost symbolů ve schématu vrstvení
- Obr. 3.22: Zobrazení části se sendvičovým jádrem na výkrese
- Obr. 3.23: Schéma vrstvení části se sendvičovým jádrem
- Obr. 3.24: Znázornění jednotlivých pojmů pro část vytvořenou navinutím
- Obr. 3.25: Nástin technické dokumentace části vytvořené navíjením

SEZNAM TABULEK

- Tab. 2.1: Srovnání mechanických vlastností vybraných vláken
- Tab. 2.2: Mechanické vlastnosti vybraných polymerních matic
- Tab. 2.3: Mechanické vlastnosti UD laminátu uhlík-epoxid a bór-epoxid
- Tab. 2.4: Mechanické vlastnosti kvaziizotropního laminátu uhlík-epoxid
- Tab. 2.5: Příklady kontinuálně zpevněných kompozitů s kovovou maticí
- Tab. 2.6: Příklady diskontinuálně zpevněných kompozitů s kovovou maticí
- Tab. 3.1: Rozměry prvků pro označení vrstvy
- Tab. 3.2: Spojení podvrstev
- Tab. 3.3: Rozměry prvků označení pro spoj překrytím $\leq L$
- Tab. 3.4: Způsob označení spojení okraj - okraj
- Tab. 3.5: Význam symbolů ve schématu vrstvení
- Tab. 3.6: Velikost symbolů ve schématu vrstvení
- Tab. 3.7: Symboly pro materiál jádra ve schématu vrstvení
- Tab. 3.8: Velikost symbolů pro jádro ve schématu vrstvení