

Návrh a výroba kompozitních forem pro zpracování kompozitu pomocí autoklávu

Bc. Vojtěch Ovesný

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Vojtěch Ovesný
Osobní číslo:	T23496
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh a výroba kompozitních forem pro zpracování kompozitu pomocí autoklávu

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše zabývající se problematikou forem pro výrobu kompozitních materiálů.
- Přehled kompozitních materiálů pro výrobu forem, výztužné systémy, vlastnosti.
- Návrh kompozitních aplikací s využitím předimpregnovaných materiálů.
- Konstrukční návrh výrobní formy pro zvolenu aplikaci, návrh modelu.
- Výroba formy, návrh a ověření zpracovatelských podmínek.
- Rámcový technologický postup pro výrobu formy, cenová kalkulace.
- Ověření zvoleného návrhu formy, výroba kompozitního prototypu, kontrola kvality a vyhodnocení.
- Závěr.

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

Seznam doporučené literatury:

- BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.
- ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8.
- ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.
- EHRENSTEIN G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Praha, SCIENTIA v Praze, 351s, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
- LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konštrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
- SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje návrhu kompozitní formy pro výrobu kompozitního dílu pomocí autoklávu. Teoretická část popisuje složení a vlastnosti kompozitních materiálů, typy výztuží a matric, a také prepregy, jejich výrobu, skladování a použití. Dále je popsán proces autoklávového vytvrzování a požadavky na formy, jejich dělení a použité materiály. Zmíněna je také metoda konečných prvků. V praktické části jsou navrženy nástřihy prepregu pro formu, technologický postup výroby formy a provedena cenová kalkulace. Funkčnost formy je ověřena výrobou páky, která zahrnuje přípravu formy, laminaci, debulking a vytvrzení v autoklávu.

Klíčová slova: kompozitní materiály, autokláv, forma, prepreg, uhlíkové vlákno

ABSTRACT

This master's thesis focuses on the design of a composite mold for the production of a composite part using an autoclave. The theoretical part describes the composition and properties of composite materials, types of reinforcements and matrices, as well as prepregs, including their manufacturing, storage, and application. It also outlines the autoclave curing process and the requirements for molds, their classification, and the materials used. The finite element method is also mentioned. The practical part includes the design of prepreg cut patterns for the mold, the technological procedure for mold production, and a cost calculation. The mold's functionality is verified by producing a composite lever, with the process including mold preparation, lamination, debulking, and autoclave curing.

Keywords: composite materials, autoclave, mold, prepreg, carbon fiber

Rád bych poděkoval doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za cenné rady a čas při vedení mé diplomové práce. Dále děkuji rodině a kamarádům za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	15
1.1 VÝHODY KOMPOZITŮ	15
1.2 NEVÝHODY KOMPOZITŮ	16
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	17
1.3.1 Vláknové kompozity	17
1.3.2 Laminátové kompozity.....	18
1.3.3 Částicové kompozity	18
1.4 VLÁKNA	18
1.4.1 Skleněné vlákno	19
1.4.2 Basaltové vlákno	20
1.4.3 Keramická vlákna.....	20
1.4.4 Uhlíková vlákna	20
1.4.5 Aramidová vlákna	21
1.4.6 Přírodní vlákna	22
1.5 MATRICE	22
1.5.1 Kompozity s polymerní maticí	22
1.5.2 Kompozity s keramickou maticí	23
1.5.3 Kompozity s kovovou maticí	23
2 PREPREG TECHNOLOGIE	24
2.1 TYPY PREPREGŮ	24
2.2 VÝROBA PREPREGŮ	25
2.3 SKLADOVÁNÍ A MANIPULACE S PREPREGY	26
2.4 DŮLEŽITÉ VLASTNOSTI PREPREGŮ	26
2.4.1 Důležité vlastnosti prepregů před vytvrzením	26
2.4.2 Důležité vlastnosti prepregů po vytvrzení.....	27
2.5 VÝHODY A NEVÝHODY PREPREGŮ	28
3 AUTOKLÁVOVÉ LISOVÁNÍ	30
3.1.1 Autokláv a jeho funkce	30
3.1.2 Výhody autoklávového lisování.....	30
3.1.3 Proces vytvrzování	31
4 FORMY PRO KOMPOZITY	33
4.1 POŽADAVKY NA FORMY	33
4.2 TECHNOLOGICKÝ POHLED NA VÝROBU FOREM.....	35
4.2.1 Výroba formy pro metodu ručního kladení.....	36
4.2.2 Další vylepšení formy	37

4.3	DĚLENÍ FOREM	38
4.3.1	Podle počtu částí.....	38
4.3.2	Podle geometrie a tvarové složitosti.....	38
4.3.3	Podle způsobu odformování.....	43
4.4	MATERIÁLY PRO VÝROBU FOREM.....	45
4.4.1	Kovové formy obecně	46
4.4.2	Hliníkové formy	46
4.4.3	Ocelové formy.....	47
4.4.4	Invarové formy (niklové slitiny)	47
4.4.5	Nekovové formy obecně	47
4.4.6	3D tisk forem.....	48
4.4.7	Grafitové formy.....	49
4.4.8	Keramické formy.....	50
4.4.9	Kompozitní formy	51
5	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	53
5.1	SÍŤOVÁNÍ.....	53
5.1.1	Přehled procesu	54
5.1.2	Důležitost síťování ve FEA	54
5.2	TYPY ELEMENTŮ SÍŤE	54
5.2.1	1D elementy	54
5.2.2	2D elementy (skořepiny).....	55
5.2.3	3D elementy (objemové).....	55
5.2.4	Výběr vhodného typu elementu	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST	57
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	58
7	DŮVOD VÝROBY KOMPOZITNÍ FORMY	59
8	NÁSTŘIHOVÝ PLÁN PRO FORMU.....	61
8.1	VYTVOŘENÍ SÍŤE.....	61
8.2	NASTAVENÍ MATERIÁLU	61
8.3	DEFINICE NÁSTŘIHŮ	63
9	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY FORMY	67
10	CENOVÁ KALKULACE VÝROBY FORMY.....	68
11	VÝROBA PÁKY.....	70
11.1	PŘÍPRAVA FORMY	71
11.2	POLOŽENÍ PRVNÍ VRSTVY A DEBULKING	72
11.3	POLOŽENÍ ZBYTKU VRSTEV A ZAVAKUOVÁNÍ	76
11.4	VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	77
11.5	VYJMUTÍ Z AUTOKLÁVU A ČIŠTĚNÍ	79
12	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY PÁKY	82

ZÁVĚR	83
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	85
SEZNAM OBRÁZKŮ	91
SEZNAM TABULEK.....	93
SEZNAM PŘÍLOH.....	94

ÚVOD

Kompozitní materiály jsou tvořeny kombinací dvou nebo více složek s odlišnými vlastnostmi, nejčastěji výztužného materiálu a pojiva. Tato kombinace umožňuje dosáhnout specifických mechanických a fyzikálních vlastností, které jednotlivé složky samostatně nemají. Mezi hlavní přednosti kompozitů patří vysoká pevnost a tuhost při relativně nízké hmotnosti, odolnost vůči korozi, dobrá únavová životnost a možnost přizpůsobení vlastností materiálu podle požadavků konkrétní aplikace. Díky těmto vlastnostem se kompozity využívají v leteckém, automobilovém, lodním či stavebním průmyslu, ale i ve sportovním vybavení a lékařském průmyslu.

Jedním ze způsobů výroby kompozitních dílů je autoklávové lisování, při kterém dochází k vytvrzení materiálu za zvýšené teploty a tlaku. Tento proces přispívá ke kvalitě výsledného dílu a jeho mechanickým vlastnostem. Pro výrobu kompozitních součástí je nutné použít vhodné formy, které umožňují přesné tvarování a zároveň odolávají podmínkám v autoklávu. Konstrukce formy, volba materiálu a způsob její výroby ovlivňují nejen výsledný tvar a povrchovou úpravu dílu, ale i efektivitu celého výrobního procesu.

Teoretická část diplomové práce se zabývá popisem kompozitních materiálů a jejich jednotlivými složkami, včetně vláken a matric. Dále jsou popsány prepregy včetně jejich výroby, skladování a vlastností. Následně je vysvětlena technologie autoklávového lisování se zaměřením na vytvrzovací proces. Poté jsou popsány formy pro kompozity včetně výrobních požadavků pro formy, dělení forem a materiálů, ze kterých se formy vyrábějí. V poslední kapitole teoretické části je popsána metoda konečných prvků.

Praktická část obsahuje návrh nástřihů na formu pro výrobu páky, technologický postup a cenovou kalkulaci výroby formy. Následně jsou navrženy nástřihy pro páku a funkčnost formy je ověřena výrobou samotné páky. Výroba páky zahrnuje celý postup včetně přípravy formy, přípravy pomocných materiálů, debulkingu a vytvrzování v autoklávu. Poslední kapitola je věnována shrnutí výroby páky pomocí technologického postupu.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Obecně se kompozitní materiály získávají kombinací dvou nebo více základních materiálů s odlišnými fyzikálními nebo chemickými vlastnostmi, čímž vzniká relativně homogenní materiál s vylepšenými vlastnostmi ve srovnání s původními složkami. Obvykle se používají dvě hlavní kategorie složek materiálu, a to matrice (také označovaná jako pojivo) a výztuž (např. vlákna). Základním principem těchto materiálů je, že kombinace složek nemění jejich individuální vlastnosti, ale spíše si vzájemně poskytují oporu, aby dosáhly požadovaných vlastností. [1]

Obecně vlákna zajišťují vysokou pevnost a tuhost kompozitního materiálu v podélném směru. Vlákna jsou však křehká a vyžadují podporu proti předčasnému lomu, aby kompozit splňoval své konstrukční požadavky. Proto se do kompozitu přidává matrice, která plní další kritické funkce, jako je udržování výztuže ve správné orientaci a poloze, ochrana proti oděru a vlivům prostředí, přenos nebo rozložení napětí mezi sousedními vlákny a částicemi, zabránění šíření trhlin a přispívání k elektrické vodivosti i tepelné stabilitě kompozitu. [1]

Vlastnosti matrice také obvykle určují odolnost kompozitu vůči většině degradačních procesů a poškození, které nakonec vedou k selhání struktury, včetně delaminace, absorpce vody, chemické odolnosti a tečení při vysokých teplotách. Matrice je proto obvykle nejslabším článkem ve vláknem vyztužených kompozitních strukturách. Výsledná struktura však zvyšuje odolnost proti poškození a houževnatost křehkých vláken s minimální ztrátou jejich příznivých mechanických a fyzikálních vlastností. [1]

1.1 Výhody kompozitů

Hlavní výhodou kompozitních materiálů je jejich vysoká měrná tuhost a pevnost. Díky tomu lze výrazně snížit hmotnost komponentů při použití kompozitů. Například pokud má být vyroben komponent s určitou nosností, bude kompozit se skleněnými vlákny vážit pouze jednu čtvrtinu hmotnosti ocelového ekvivalentu. Podobně, pokud je hlavním kritériem tuhost, kompozit s uhlíkovými vlákny bude vážit pouze jednu desetinu ocelového ekvivalentu. Snížení hmotnosti je klíčovým faktorem v leteckém a automobilovém průmyslu, a proto mají kompozitní materiály v těchto odvětvích značnou výhodu oproti konvenčním materiálům. [2]

Druhou výhodou kompozitů je jejich energetická účinnost. Většina aktuálně používaných kompozitů je na bázi polymerů. Tyto polymerní kompozity lze vyrábět při

pokojoyvé teplotě nebo jen mírně nad ní, případně při několika stovkách stupňů nad pokojovou teplotou. Díky tomu je výroba kompozitů energeticky nenáročná. Jak již bylo zmíněno, rozsáhlé využití polymerních kompozitů v letectví a automobilovém průmyslu snižuje celkovou hmotnost, a tím zvyšuje palivovou účinnost. [2]

Polymery obecně vykazují lepší odolnost vůči povětrnostním vlivům než kovové materiály. V polymerních kompozitech je prostředí vystavena pouze polymerní matrice, což zajišťuje dobrou odolnost těchto materiálů vůči vnějším podmínkám. [2]

Při výrobě vláknem vyztužených kompozitů je možné uspořádat vlákna v libovolném směru. Výsledný kompozit tak může mít směrově specifické vlastnosti a mechanické vlastnosti budou nejvyšší ve směru vláken. [2]

Kompozity umožňují snadnou výrobu složitých tvarů. Výrobní metody, zejména u polymerních kompozitů, jsou již dostatečně vyvinuté pro výrobu velmi komplexních tvarů. Kompozity mohou kombinovat různé požadované vlastnosti. Například u automobilových karoserií je nutné zajistit dobré mechanické vlastnosti, tepelnou izolaci a estetický vzhled. Polymerní kompozity splňují všechny tyto požadavky. U krytů elektronických součástek je žádoucí určitá elektrická vodivost, aby se zabránilo vzniku statického náboje. Přidáním vodivých materiálů do polymeru lze vytvořit kompozit s požadovanou elektrickou vodivostí. [2]

1.2 Nevýhody kompozitů

Kompozitní materiály jsou v porovnání s konvenčními materiály dražší z hlediska přímých nákladů. Na hmotnostní bázi jsou přibližně 5krát dražší než hliník a 20krát dražší než ocel. Nicméně jejich výkonnostní parametry jsou velmi vysoké. Kompozity se proto používají především v případech, kdy je vysoké zatížení hlavním kritériem při výběru materiálu. [2]

Vzhledem k tomu, že kompozity jsou tvořeny zcela odlišnými materiály, je vysoké riziko vzniku defektů na rozhraní mezi složkami. [2]

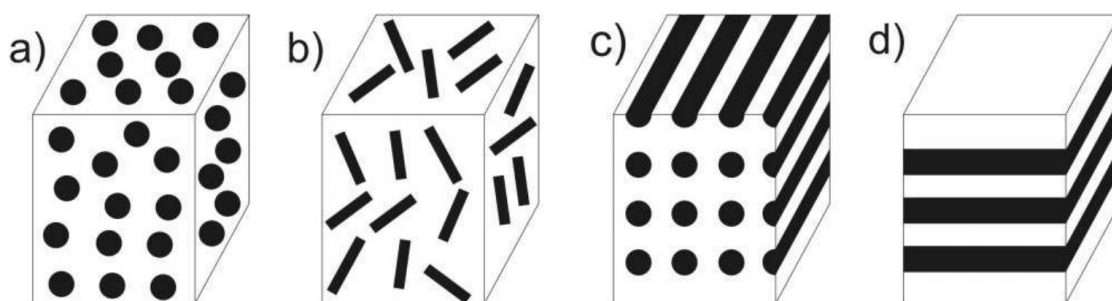
Většina vláknem vyztužených kompozitů je anizotropní. Vystavení vysokému napětí ve směru kolmém na vlákna může způsobit poškození materiálu. [2]

Rychlost výroby kompozitů je obecně nízká. Kvůli tomu nejsou příliš vhodné pro průmyslová odvětví s vysokým objemem výroby. Tento problém se však částečně řeší použitím termoplastických kompozitů a lisovacích směsí, díky kterým je možné dosáhnout výrobních rychlostí srovnatelných s konvenčními materiály. [2]

Výběr vhodného materiálu mezi konvenčními kovy je poměrně snadný díky dostupnosti rozsáhlých a obecně uznávaných databází mechanických a fyzikálních vlastností. Naopak u kompozitních materiálů obdobná databáze neexistuje, což představuje nevýhodu při jejich výběru a aplikaci. [2]

Další překážkou širšího využití kompozitů je jejich recyklace. Oproti konvenčním kovovým materiálům je recyklace kompozitů složitější. V současnosti existují různé metody recyklace kompozitů, avšak většina z nich je poměrně nákladná. [2]

1.3 Rozdělení kompozitů



Obrázek 1 Rozdělení kompozitů, a) částicové, b) s krátkými vlákny, c) s dlouhými vlákny, d) laminátové [3]

1.3.1 Vláknové kompozity

Dlouhá vlákna jsou obecně tužší a pevnější ve srovnání se stejným materiálem ve hmotné formě. Například obyčejné tabulové sklo se láme při napětí přibližně 20 MPa, zatímco skleněná vlákna dosahují pevnosti 2800–4800 MPa. Tento rozdíl v pevnosti je způsoben menším počtem defektů ve vlákně oproti hmotnému materiálu. [4]

Vláknem je individuální filament materiálu. Filament s poměrem délky k průměru vyšším než 1000 se nazývá vlákno. Vláknitá forma výztuže je široce využívána a může se vyskytovat ve dvou hlavních formách:

- Kontinuální vlákna – pokud jsou vlákna v kompozitu velmi dlouhá a nepřerušovaná nebo pouze částečně přerušovaná, jedná se o kompozit s kontinuálními vlákny.
- Krátká/sekaná vlákna – vlákna jsou nasekána na krátké úseky a poté použita při výrobě kompozitu. [4]

1.3.2 Laminátové kompozity

Laminátové kompozity se skládají z vrstev alespoň dvou různých materiálů spojených dohromady. Laminace se využívá k propojení nejlepších vlastností jednotlivých vrstev a spojovacího materiálu s cílem vytvořit užitečnější materiál. Vlastnosti, které lze laminací zlepšit, zahrnují pevnost, tuhost, nízkou hmotnost, odolnost proti korozi atd. [4]

Laminátové kompozity lze dále rozdělit do následujících kategorií:

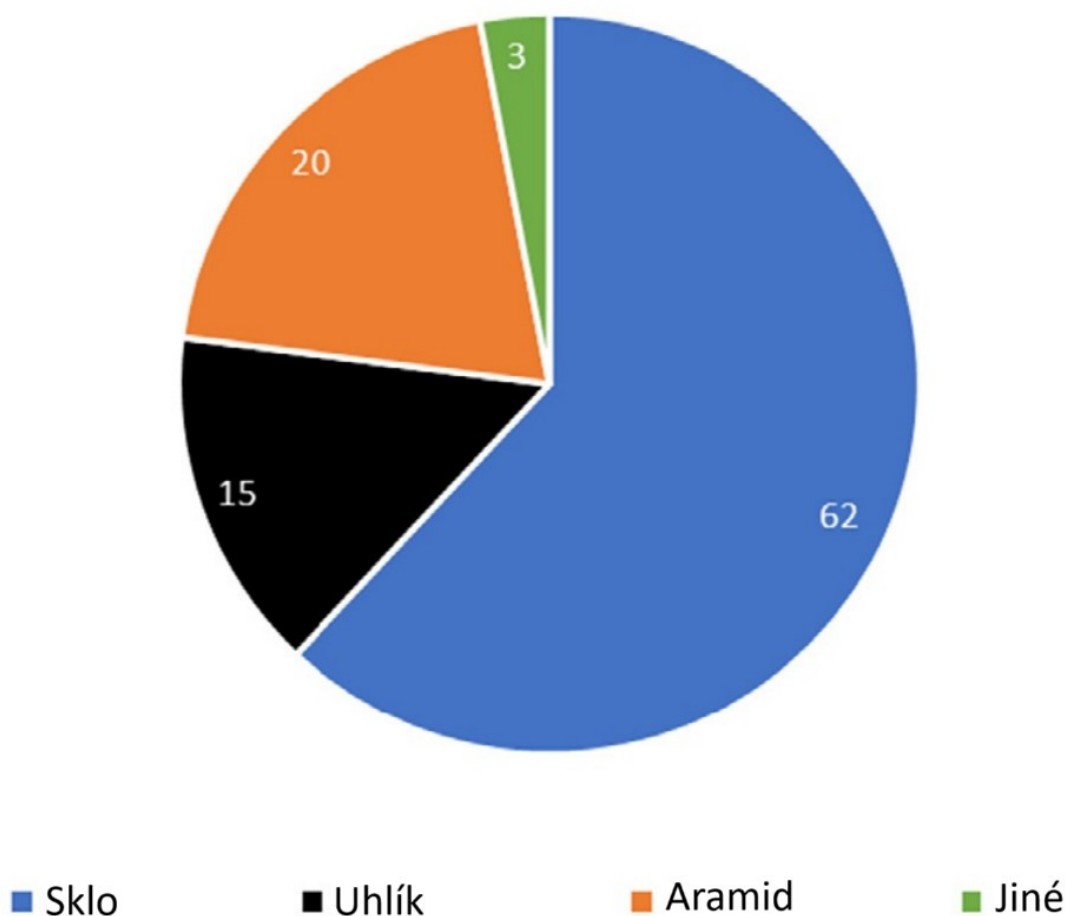
- Bimetaly
- Plátované kovy
- Laminované sklo
- Lamináty na bázi plastů [4]

1.3.3 Částicové kompozity

Výztuž je ve formě částic o průměru v řádu několika mikrometrů. Částice se obvykle přidávají za účelem zvýšení modulu pružnosti a snížení tažnosti matricových materiálů. V tomto případě je zatížení sdíleno jak částicemi, tak matricí, přičemž částice nesou podstatně větší podíl zatížení než samotná matrice. Například v automobilovém průmyslu se uhlíková čerň (částicová výztuž) přidává do pryže (matrice). [4]

1.4 Vlákna

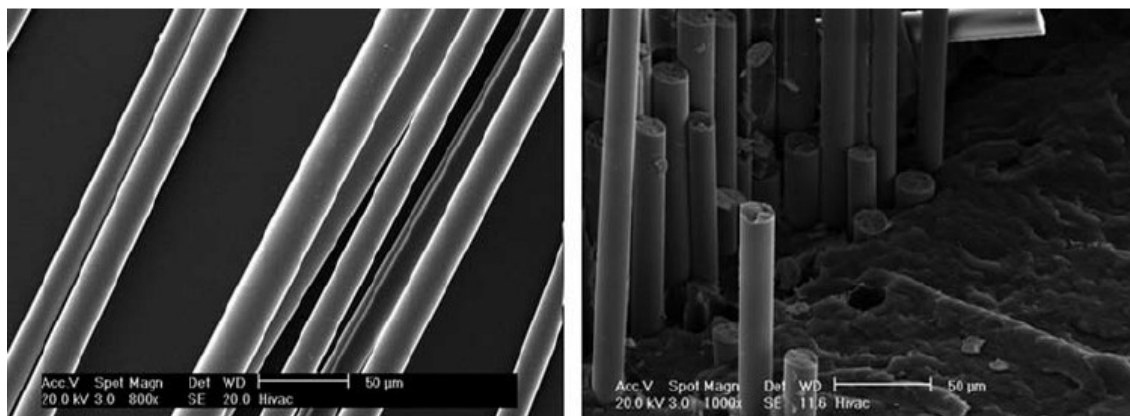
V kompozitech vyztužených vlákny se používá široká škála různých materiálů. Z hlediska objemu je zdaleka nejběžnějším materiálem skleněné vlákno. Nicméně s rostoucím tlakem na snižování hmotnosti jako prostředku ke snížení energetické spotřeby roste poptávka po uhlíkových vláknech, zejména pro konstrukční díly. [5]



Obrázek 2 Globální trh konstrukčních kompozitů v roce 2019 [5]

1.4.1 Skleněné vlákno

Nejběžnějším typem vláknité výztuže je skleněné vlákno, což je amorfni anorganický materiál, tvořený převážně oxidem křemičitým a oxidem hlinitým, doplněný dalšími prvky pro úpravu vlastností a snížení teploty tavení, což usnadňuje výrobu. E-sklo se komerčně vyrábí jako kontinuální vlákno již od roku 1938 a dodnes zůstává nejrozšířenějším typem skleněného vlákna používaného ve vláknových kompozitech. Má relativně vysokou pevnost v tahu (2000–5200 MPa), která je však omezená přítomností povrchových trhlin – proto je nutná ochrana při manipulaci. Modul pružnosti je střední (70–90 GPa), což vede k podobné hodnotě měrného modulu jako u hliníku. Intenzivní výzkum se zaměřuje na zlepšení těchto vlastností, zejména na zvýšení modulu pružnosti. [5]



Obrázek 3 E-sklo v polypropyleny [38]

1.4.2 Basaltové vlákno

Basaltová vlákna jsou specifickým druhem skleněného vlákna, které se vyznačuje relativně vysokým obsahem železa. Basaltová vlákna se ukázala jako užitečný materiál pro vysoké teploty a potenciální náhrada azbestu. V poslední době našla basaltová vlákna specifické uplatnění ve výztužích betonu, díky vysokým specifickým vlastnostem v porovnání s ocelí a dobré odolnosti vůči silně alkalickým podmínkám cementu. I když je basalt jednosložkový materiál, složení se může mezi těžebními lokalitami výrazně lišit, což může znamenat problémy s konzistencí produktu. [5]

1.4.3 Keramická vlákna

Existuje řada krystalických vláken, která se používají pro výztuž, včetně boru, křemíku, karbidu křemíku, zirkonia a oxidu hlinitého. Tato vlákna mohou být vyráběna v kontinuální nebo krátké formě a poskytují velmi vysokou odolnost proti vysokým teplotám. Obvykle se používají v kompozitech bez polymerní matrice. Boron/epoxidové pásy se používají v leteckém průmyslu k opravám hliníkových struktur, ale velký průměr vláken (100–200 µm) a vysoká tuhost při ohybu ve srovnání s uhlíkovými vlákny znamenají, že jsou častěji používána jako krátká vlákna v kompozitech s kovovou maticí. [5]

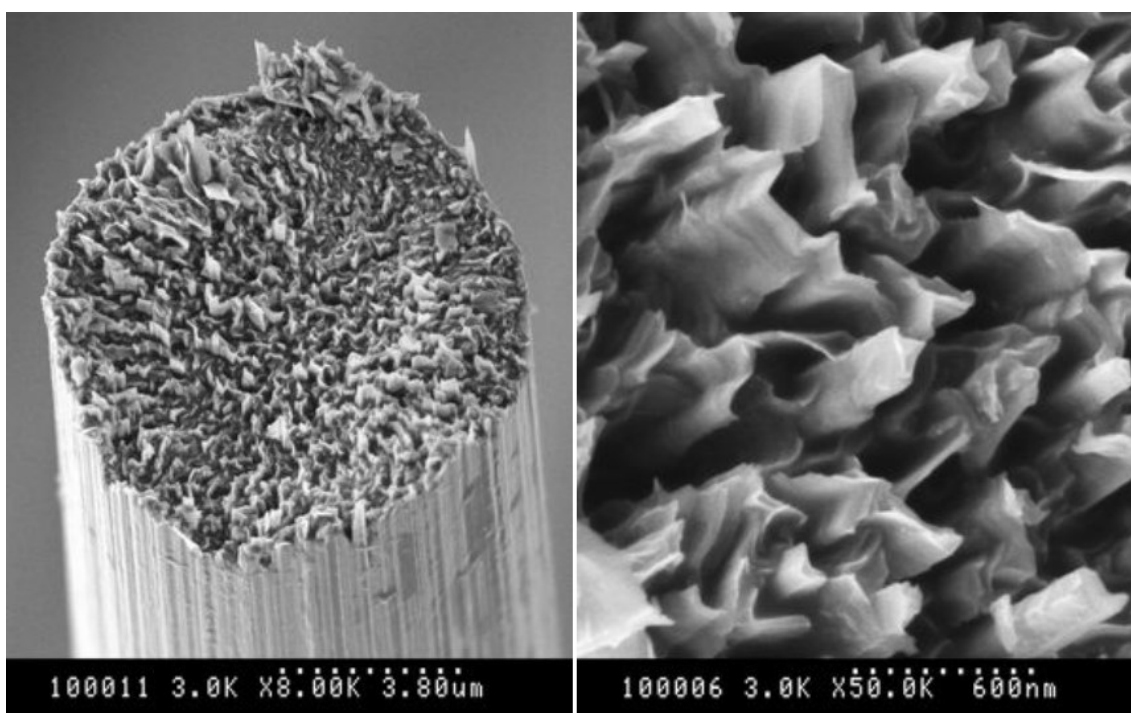
1.4.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost, velmi vysoký modul pružnosti a nízkou hustotu. Vyrábějí se zahříváním polymerních vláken v prostředí bez kyslíku, což vede k převládající přeměně na uhlík (92–99 %). Nejčastější surovinou je polyakrylonitril (PAN), který tvoří 96% produkce vláken. Vysoká teplota a proces grafitizace zvyšují mechanické vlastnosti,

přičemž na vyšších teplotách dochází k vyšší hustotě a lepší struktuře krystalů grafitu, což zvyšuje modul pružnosti. [5]

Vlákna mají průměr 5–10 μm a jsou elektricky vodivá, což je výhoda v některých aplikacích, ale i výzva při výrobě kvůli tvorbě prachu. Nejčastěji se používají v letectví, automobilovém průmyslu a ve výrobě větrných turbín. Ceny uhlíkových vláken jsou však stále vysoké, což omezuje jejich aplikace na průmysly, kde cena není hlavním faktorem. [5]

Alternativní suroviny, jako polyethylen (PE) a lignin, se zkoumají jako levnější a udržitelnější možnosti. Tyto materiály poskytují nižší mechanické vlastnosti než PAN, ale přidání ligninu k PAN ukazuje na ekologičtější výrobu. Kromě toho se zkoumá biovýroba za použití řas a kvasinek pro výrobu uhlíkových vláken, což by mohlo snížit emisní stopu. [5]



Obrázek 4 Uhlíkové vlákno pod mikroskopem [6]

1.4.5 Aramidová vlákna

Aramid je pravděpodobně jedním z nejznámějších typů polymerních vláken, přičemž zahrnuje "balistickou" tkaninu Kevlar a tepelně odolný Nomex. Aramidová vlákna byla vyvinuta v 70. letech a jedná se o polymer s extrémní pevností, přibližně 3 GPa. Jsou velmi odolná vůči nárazům a opotřebení i při nízkých teplotách, a používají se v kompozitech pro ochranné struktury vozidel při nehodách, lopatky vrtulníků a další části letadel a sportovního vybavení. Aramidová vlákna jsou velmi obtížně řezatelná, což může způsobit problémy ve

výrobě. Vlákná je také nutné chránit před ultrafialovým zářením a mohou absorbovat vlhkost (až 6 %), pokud nejsou uzavřena vhodnou matricí. Aramidová vlákna se někdy kombinují s uhlíkovými vlákny pro výrobu kompozitů s vylepšenou odolností proti nárazům nebo vibracím během řezání. [5]

1.4.6 Přírodní vlákna

V poslední době roste zájem o využití přírodních vláken získaných z rostlin, především z hlediska udržitelnosti. Tato vlákna mají nízkou hustotu, což zajišťuje relativně vysokou specifickou pevnost a modul pružnosti, ale původní surovina (rostliny) je kvalitativně proměnlivá. Mohou absorbovat vodu (a tím bobtnat) a představují obtíže při vytváření dobrého spoje mezi vrstvami. Existuje také limit zpracovatelské teploty, protože přírodní vlákna začínají degradovat nad 200 °C. Vlákná z konopí a lenu, mohou poskytovat specifické vlastnosti vláken na úrovni E-skla, ale musí být převedena na přízi nebo tkaniny, pro použití v kompozitech. [5]

Jejich udržitelnost, nízké náklady a nízké opotřebení při zpracování vedly k použití přírodních vláken v automobilovém průmyslu k výrobě dveřních panelů, opěradel sedadel, polic a dalších skořepinových konstrukcí. Přírodní vlákna se také významně používají ve stavebnictví pro lehké konstrukční komponenty, jako jsou podlahy a rámy dveří/oken. [5]

1.5 Matrice

Úloha matrice je udržet výztužné částice nebo vlákna na správném místě. Matrice udržuje výztuž pro vytvoření požadovaného tvaru, zatímco výztuž zvyšuje celkové mechanické vlastnosti matrice. Matrice je monolitní materiál, do kterého je obvykle výztuž zapuštěna a musí být rovnoměrně distribuována v celé matici. Jako matrice mohou být použity materiály jako hliník, hořčík, nikl, titan nebo kobalt. [7]

1.5.1 Kompozity s polymerní matricí

V kompozitech s polymerní matricí je matrice obvykle zesílena keramickými vlákny, protože mají vyšší pevnost v porovnání s materiálem matrice. Matrice sestávají z termoplastu nebo termosetu. [7]

Termosety jsou ideální pro aplikace, které musí odolávat vysokým nárazovým zátěžím. Po počátečním zahřátí se jejich fyzikální a chemické vlastnosti ustálí a zůstávají neměnné,

což zajišťuje výjimečnou trvanlivost, strukturální integritu a v mnoha případech mohou předčit kovové materiály. [8]

Na rozdíl od termosetů, při aplikaci tepla na termoplasty dojde k přechodu z pevného do kapalného stavu. Termoplasty jsou ideální volbou pro flexibilní aplikace s nízkým napětím, které musí odolávat vyšším teplotám, aniž by ztratily své chemické vlastnosti. [8]

1.5.2 Kompozity s keramickou maticí

Keramické matrice mají výjimečnou odolnost proti korozi, vysoké teplotní tání, vynikající tlakovou pevnost a stabilitu při vysokých teplotách. Keramické matrice jsou běžně volbou pro aplikace ve vysokých teplotách, jako jsou písty, lopatky a rotory v částech plynových turbín. Keramické matrice mohou také efektivně fungovat v korozivních prostředích. Hlavním cílem výroby kompozitů s keramickou maticí je zlepšit houževnatost, protože keramika je křehká, ale má vysokou tuhost a pevnost. Zesílení pomocí částic a vláken vede k nárůstu houževnatosti. Hlavními nevýhodami jsou lomy při nízkém namáhání. [7]

1.5.3 Kompozity s kovovou maticí

Kompozity s kovovými maticemi mají lepší vlastnosti než konvenční materiály, zejména v oblasti mechanických a tepelných vlastností, jako je dobrá odolnost proti opotřebení a výjimečná tepelná vodivost. V současnosti jsou běžnými kovovými maticemi hliník, měď, železo, hořčík, nikl a titan. Hliníkové slitiny se často používají v automobilovém a leteckém průmyslu pro strukturální aplikace díky dobrým vlastnostem tváření a spojování, nízké hustotě, vynikající pevnosti a odolnosti proti korozi. Keramické částice se přidávají k vytvoření kompozitního materiálu, který zvyšuje pevnost hliníku a jeho slitin. Kompozity na bázi titanu mají širokou aplikaci, zejména jako materiál pro vysokoteplotní struktury. Titanové slitiny se běžně používají v leteckých komponentech kvůli vyšší pevnosti při vysokých teplotách a dobré odolnosti proti korozi, i když tento materiál je nákladný. Hořčík je nejlehčí z nekovových kovů, běžně se používá v elektronickém zařízení, krytech motorů řetězových pil a skříních převodovek pro letecké aplikace. Měď se snadno odlévá a tvaruje, měděné kompozitní materiály mají vynikající odolnost proti opotřebení a používají se v elektronice jako elektrické kontakty a prvky elektronických systémů. [7]

2 PREPREG TECHNOLOGIE

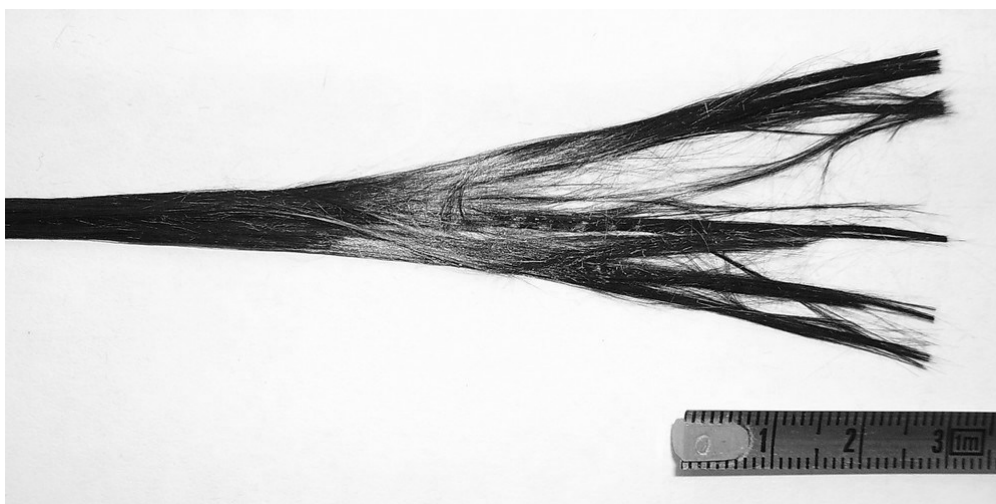
Prepreg je polotovar obsahující buď jednosměrná vlákna, nebo tkanou textilií impregnovanou předem stanoveným množstvím částečně vytvrzené termosetové polymerní matrice. Epoxidová pryskyřice je nejčastěji používanou matricí pro předimpregnované polotovary, i když pro aplikace s vysokou teplotní odolností se používají také jiné termosety, jako například bismaleimidové pryskyřice. Existují i prepregy s termoplastickou matricí. [9]

Prepregy se dodávají ve formě rolí, přičemž šířka může být od méně než 25 mm až po více než 457 mm. Tloušťka jedné vrstvy vytvrzeného prepregu se obvykle pohybuje mezi 0,125–0,25 mm. Hmotnostní obsah pryskyřice v komerčně dostupných prepregách je mezi 30–45 %. [9]

2.1 Typy prepregů

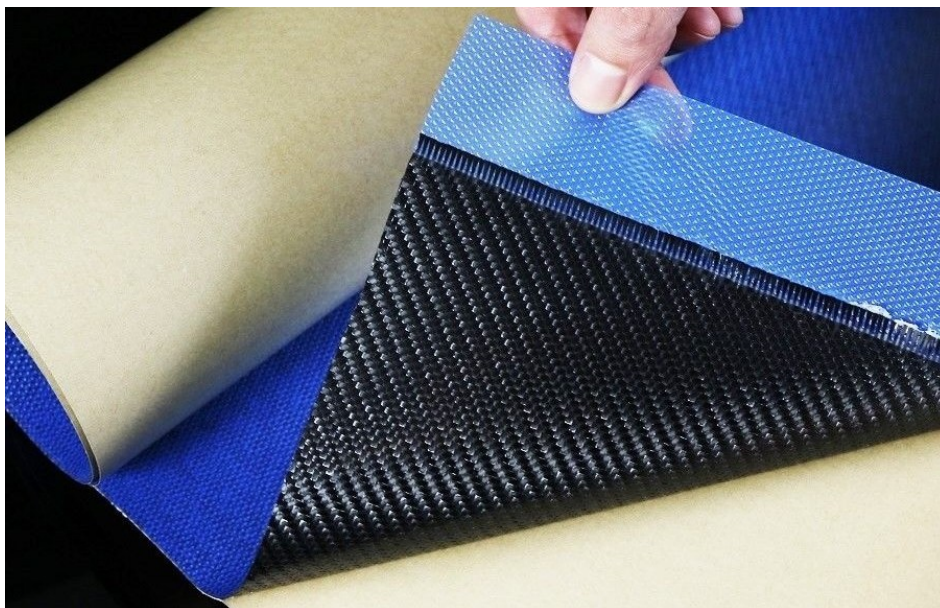
Prepregy jsou obvykle dodávány ve formě rolí nevytvrzeného materiálu v následující podobě:

- Jednosměrné rovingy (angl. tow) představují pramence, které byly impregnované pryskyřicí.



Obrázek 5 Roving z uhlíkových vláken [10]

- Pásky (angl. tape) označují velké množství spojených jednosměrných rovingů.
- Tkané textilie (angl. woven fabric) jsou tkaniny impregnované pryskyřicí. [9]



Obrázek 6 Tkaninový prepreg [11]

Dále lze prepregy rozdělit podle typu použité polymerní matrice na dvě hlavní skupiny:

- Termosetové prepregy
- Termoplastové prepregy

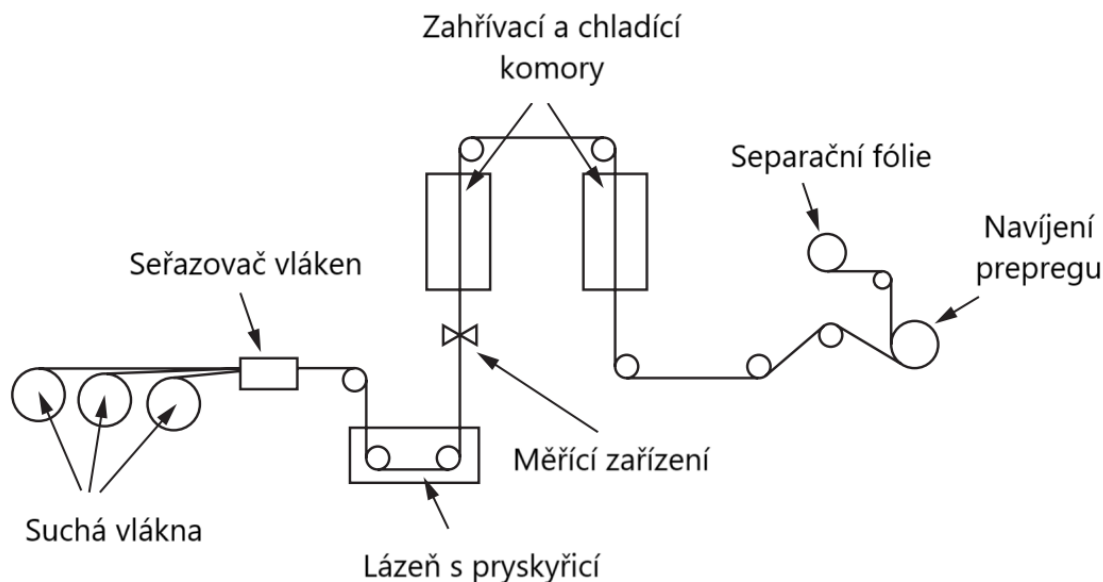
Termoplastové prepregy jsou polotovary impregnované termoplastickou pryskyřicí. Mohou být dodávány jako jednosměrné pásy nebo jako tkaniny. Hlavní rozdíl oproti termosetovým prepregům spočívá v tom, že termoplastické prepregy jsou stabilní při pokojové teplotě a obvykle nemají omezenou skladovatelnost. Nicméně běžněji používaným typem prepregů jsou termosetové prepregy. [9]

2.2 Výroba prepregů

Jednosměrné prepregy se vyrábějí tažením paralelně uspořádaných rovingů pryskyřičnou lázní, která obsahuje emulzi epoxidové pryskyřice a tužidla v rozpouštědle. Obsah rozpouštědla a teplota lázně jsou nastaveny tak, aby viskozita pryskyřice umožnila dobré smáčení a impregnaci vláken. [12]

Po průchodu pryskyřičnou lázní procházejí rovingy měřicím zařízením, které reguluje obsah pryskyřice (např. válce pro regulaci tloušťky vrstvy). Následuje komora pro zahřívání a chlazení, kde se zahříváním odstraní rozpouštědlo a zahájí se částečné vytvrzení. V chladicí komoře se reakce zpomalí a pryskyřice dosáhne tzv. B-stupně vytvrzení, což znamená, že je částečně vytvrzená, ale stále lepivá a schopná přilnout k sobě i k dalším povrchům. Prepreg je poté pokryt ochrannou odtrhovou fólií nebo voskovým papírem a namotán do role. [12]

Separční vrstva zabraňuje slepení jednotlivých vrstev během skladování a přepravy. Role prepregu je uložena do polyetylenového vaku a skladována v mrazicím boxu až do doby použití. [12]



Obrázek 7 Metoda rozpouštědlového máčení [12]

2.3 Skladování a manipulace s prepregy

Před použitím se musí prepreg vyjmout z mrazáku a nechat ohřát na pokojovou teplotu, což může trvat až 48 hodin. Běžná skladovatelnost prepregů při 23 °C je 6–8 dní, zatímco při –18 °C může být 6–12 měsíců. Pokud je prepreg ponechán mimo mrazák příliš dlouho, pryskyřice pokračuje ve vytvrzování, což může vést k nadměrné tuhosti a ztrátě lepivosti, což znemožní jeho použití. [12]

2.4 Důležité vlastnosti prepregů

2.4.1 Důležité vlastnosti prepregů před vytvrzením

- Lepivost

Schopnost částečně vytvrzené vrstvy přilnout k formě a dalším vrstvám. Prepreg s příliš malým množstvím pryskyřice má nízkou lepivost a může vyžadovat zahřátí během skládání vrstev. Naopak prepreg s nadbytkem pryskyřice na povrchu se může při vrstvení oddělovat. [12]

- Tvárnost

Schopnost prepregu přizpůsobit se tvaru formy bez posunutí vláken nebo vzniku vrásek. Tvárnost závisí na seřazení vláken, tloušťce prepregu a viskozitě pryskyřice. [12]

2.4.2 Důležité vlastnosti prepregů po vytvrzení

Mechanické vlastnosti prepregů určují jejich pevnost, tuhost, houževnatost a další charakteristiky ovlivňující jejich výkon při zatížení. [13]

- Pevnost v tahu – Maximální tahové napětí, které materiál vydrží před porušením.
- Pevnost v ohybu – Schopnost materiálu odolávat ohybovým silám bez zlomení.
- Rázová houževnatost – Odolnost materiálu vůči nárazům a rázovým zatížením bez porušení.
- Tuhost – Odolnost materiálu proti deformaci při zatížení.

Mechanické vlastnosti prepregů se liší v závislosti na typu vláken, matrici, objemovém podílu vláken a jejich uspořádání. [13]

Elektrické vlastnosti prepregů určují jejich vodivost, dielektrickou konstantu a další charakteristiky ovlivňující jejich použití v elektrotechnických aplikacích. [13]

- Vodivost – Schopnost materiálu vést elektrický proud.
- Dielektrická konstanta – Schopnost materiálu uchovávat elektrická pole.
- Izolační odpor – Odolnost materiálu proti průchodu elektrického proudu.

Elektrické vlastnosti prepregů se odvíjejí od typu matrice a vláken a mohou být ovlivněny přídatnými látkami nebo povrchovými úpravami. [13]

Chemické vlastnosti prepregů určují jejich odolnost vůči kyselinám, zásadám, rozpouštědlům a dalším chemikáliím. [13]

- Odolnost vůči kyselinám a zásadám – Schopnost materiálu odolávat působení kyselých a zásaditých látek bez degradace.
- Odolnost vůči rozpouštědlům – Schopnost materiálu odolávat rozpouštění či poškození při styku s rozpouštědly.
- Odolnost proti korozi – Schopnost materiálu odolávat korozním vlivům, což je zvláště důležité v agresivních prostředích.

- Chemická stabilita a inertnost – Schopnost materiálu zachovat své vlastnosti a nereagovat s jinými chemickými látkami za různých podmínek.

Chemické vlastnosti prepregů závisí na volbě matricového materiálu a případných povrchových úpravách. [13]

Tepelná vodivost prepregů určuje jejich schopnost přenášet a rozptylovat teplo, což je klíčové v aplikacích vyžadujících odvod nebo izolaci tepla. Tepelná vodivost prepregů se liší v závislosti na typu vláken, matrici a jejich uspořádání a může být ovlivněna přídavnými látkami nebo povrchovými úpravami. [13]

2.5 Výhody a nevýhody prepregů

Výhody:

- Vysoký objemový podíl vláken – Umožňuje výrobu lehkých a pevných kompozitních dílů s optimálním poměrem vláken a pryskyřice.
- Snadná manipulace a zpracování – Prepregy jsou připravené k okamžitému použití, lze je snadno řezat, tvarovat a pokládat do forem bez nutnosti samostatně míchat vlákna, pryskyřici a tvrdidlo.
- Čistší a efektivnější pracovní proces – Prepregy eliminují náročný proces spojený s tekutými pryskyřicemi, odpadá nutnost jejich míchání, práce s lepidly nebo manipulace se složitými infuzními systémy. Prepregy také výrazně snižují nároky na pracovní čas a zvyšují efektivitu výroby.
- Opakovatelnost – Přesně stanovený obsah pryskyřice zajišťuje konzistentní mechanické vlastnosti a vysokou kvalitu finálních dílů.
- Lepší konzistence a přesnost tvarování – Díky snadnému dělení a přesnému tvarování vrstev se prepregy snadno přizpůsobí povrchu formy bez rizika deformací. To usnadňuje celý proces vakuování a vytvrzování. [9,12,14]

Nevýhody:

- Vyšší pořizovací náklady – Prepregy jsou dražší než samostatná tkanina a pryskyřice. Náklady rostou nejen kvůli složité výrobě, ale také kvůli nutnosti speciálního skladování. Přesto mohou být ekonomicky výhodné v aplikacích s vysokými nároky na opakovatelnost procesu, zejména při sériové výrobě.

- Nutnost řízeného skladování – Prepregy musí být skladovány v mrazicích boxech při teplotách kolem $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby si zachovaly své vlastnosti. Pokud jsou uchovávány při pokojové teplotě příliš dlouho, začnou předčasně vytvrzovat a mohou se stát nepoužitelnými.
- Potřeba specializovaného vybavení – Pro zpracování prepregů je nutné mít nejen mrazicí zařízení, ale také pec nebo autokláv schopný přesného řízení teplot pro správné vytvrzení. Nákup a provoz tohoto vybavení výrazně zvyšuje počáteční investici i celkové náklady na výrobu. [12,14]

Prepregy jsou široce využívány v letectví, automobilovém průmyslu, sportovním vybavení a dalších oblastech, kde jsou klíčové pevnost, nízká hmotnost a vysoká kvalita materiálů. [9]

3 AUTOKLÁVOVÉ LISOVÁNÍ

Autoklávové lisování je důležitá technologie používaná při výrobě kompozitů vyztužených uhlíkovými, aramidovými nebo skleněnými vlákny. Tato metoda využívá prostředí s vysokým tlakem a teplotou k optimalizaci procesu vytvrzování termosetových pryskyřic. Použití autoklávu umožňuje řízenou aplikaci tepla a tlaku, což zajišťuje důkladnou impregnaci výztuže pryskyřicí a minimalizuje výskyt dutin a defektů v materiálu. [15]



Obrázek 8 Autokláv [16]

3.1.1 Autokláv a jeho funkce

Autokláv je tlaková nádoba navržená tak, aby odolávala extrémním podmínkám nutným pro zpracování kompozitů. Obvykle je vyroben z oceli nebo jiných odolných materiálů a udržuje řízenou atmosféru, která je klíčová pro dosažení optimálního vytvrzení pryskyřice. Proces začíná sestavením kompozitního laminátu, kdy jsou vrstvy výztuže umístěny do formy a impregnovány pryskyřicí. Poté je tento systém utěsněn ve vakuovací fólii a umístěn do autoklávu. [15]

Průmyslové autoklávy, pro lisovací proces, dříve využívaly vzduch. Vzhledem k tomu, že kyslík je při vysokých teplotách hořlavý, je nutné používat inertní plyn. V současnosti se v autoklávovém lisování preferuje dusík před kyslíkem díky jeho vyšší bezpečnosti, nižším nákladům a lepší konzistenci výroby. [17]

3.1.2 Výhody autoklávového lisování

- Pevnější kompozity – díky použití vysokých teplot a tlaků autoklávové lisování výrazně zlepšuje poměr pevnosti k hmotnosti kompozitů. Navíc takto vytvrzené

kompozity vykazují zvýšenou odolnost vůči tepelnému a chemickému rozkladu, což je činí ideálními pro využití v odvětvích jako je letecký a námořní průmysl.

- Vyšší kvalita produktů – autoklávové lisování zajišťuje výrobky s minimem defektů a zároveň generuje podstatně méně odpadu ve srovnání s jinými metodami.
- Rychlejší výroba prototypů – autoklávové lisování urychluje vývoj produktů a zkracuje testovací cykly tím, že umožňuje rychlou výrobu funkčních prototypů.
- Nižší hmotnost – v odvětvích, kde by vyšší hmotnost mohla být nebezpečná, musí výrobci najít způsoby, jak vyrábět lehké, ale vysoce odolné produkty. K tomu je autoklávové lisování ideální metodou.
- Lepší kontrola – použití autoklávů umožňuje precizní regulaci vytvrzovacího procesu, což usnadňuje efektivní výrobu dílů se složitým tvarem. Programovatelné průběhy vytvrzování navíc umožňují opakovatelné a kontrolované procesy. [17]

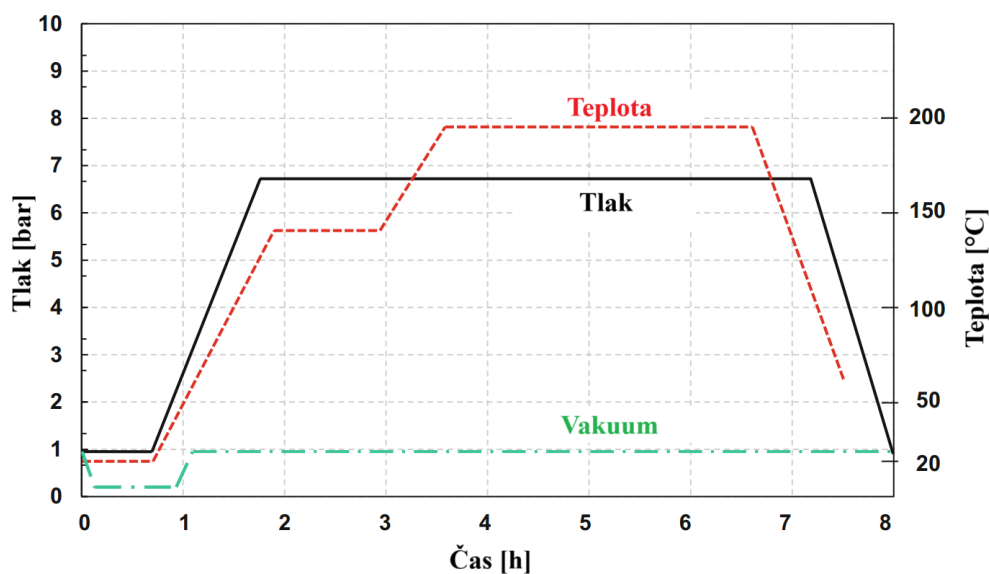
3.1.3 Proces vytvrzování

Teplota v autoklávu může překročit 400 °C a tlak může přesáhnout 30 barů, avšak pro většinu případů vytvrzování termosetových epoxidových prepregů se používá 180 °C a 7 barů. [18]

Povrchy uhlíkových prepregů jsou obvykle pokryty perforovanou odtrhovou fólií, která umožňuje během vytvrzování odsátí vzduchu nebo pryskyřice. Odtrhová tkanina je po vytvrzení a před následným zpracováním odstraněna a pomáhá připravit povrchy dílů pro následné lepení nebo nanášení povlaků. V závislosti na typu použitého prepregu (s přebytkem pryskyřice nebo bez něj) a na procesních parametrech může být nutné použít odsávací rohož. Jedná se o obvykle těžkou polyesterovou tkaninu, která zachytí přebytečnou pryskyřici během vytvrzování. Nakonec se přes celou sestavu umístí vakuovací fólie, například polyamidová, a flexibilní lepicí páskou se obvodově utěsní. Vakuovací fólie musí být dostatečně pružná, aby zajistila rovnoměrné rozložení tlaku během vytvrzování. Síly působící během odsávání vzduchu i během aplikace tlaku v autoklávu vedou k vytvarování dílu, přičemž v závislosti na tloušťce a velikosti dílu může dojít k velkým deformacím (řádově v milimetrech až centimetrech). Typická tolerance tloušťky vytvrzeného dílu z uhlíkových vláken je 10 %. V případě nedostatečné pružnosti vakuovací fólie by mohlo dojít k nedostatečnému tlaku na vytvrzovaný díl, nebo by se fólie mohla roztrhnout, což by vedlo ke zmetkovitosti. [18]

Před přemístěním zabalené sestavy do autoklávu se pečlivě testuje těsnost vakuovací fólie. Vzduch pod vakuovací fólií se odsává pomocí vývěvy a výsledný tlak se monitoruje. Vývěvy se obvykle vypínají ve chvíli, kdy se v autoklávu aplikuje tlak, aby se zabránilo jejich poškození horkým plynem v případě selhání vakuové fólie. V mnoha případech se aplikuje tlak 7 barů nebo více, aby se zajistilo úplné vytvrzení výrobku na požadovanou tloušťku, požadovaný obsah vláken a požadovaná kvalita impregnace. Teplota dílu, kterou je nutné monitorovat pomocí termočlánků, se v různých částech dílu liší, protože přenos tepla není homogenní. Kvůli tepelné setrvačnosti následuje teplota dílu teplotu inertního plynu s určitým zpožděním během ohřevu i ochlazování. [18]

Jakmile díl vychladne na přijatelnou teplotu, forma se vyjme z autoklávu a díl se rozbálí. Tento krok je opět manuálně a finančně náročný, přičemž pomocné materiály (vakuovací fólie, odsávací rohož, těsnicí páska atd.) jsou jednorázové a skončí v odpadu. Nové vývojové trendy se zaměřují na alternativní opakovaně použitelné vakuovací fólie. [18]



Obrázek 9 Průběh vytvrzování [18]

4 FORMY PRO KOMPOZITY

Prepregy jsou dvourozměrné polotovary, které jsou dodávány výrobcí ve formě rolí. Pro přeměnu těchto polotovarů na předem určený tvar a jejich vytvrzení jsou zapotřebí rozměrově stabilní formy. V podstatě vzniká kompozit ve chvíli, kdy se dostávají do kontaktu matrice a vlákna. Proces tváření tedy probíhá téměř současně se vznikem kompozitu, což představuje zásadní rozdíl oproti tradičním materiálům, jako je dřevo nebo kovy. Přestože i tyto materiály lze tvarovat pomocí vhodných forem, během procesu tváření tyto materiály nevznikají. Přesnost a opakovatelnost tváření ve formě významně ovlivňují vlastnosti kompozitů, protože i drobné narušení orientace vláken nebo porozity vede ke snížení pevnosti a tuhosti materiálu. [19]

Termín „tools“ se často používá ve spojitosti s výrobou vláknem vyztužených kompozitů a označuje formy, které kompozit tvarují během jeho vytvrzování. V některých případech se používají specifické formy pro správné umístění vrstev prepregu. Formy se používají v různých průmyslových odvětvích, která zpracovávají a využívají kompozitní a prepreg materiály. Odvětví zahrnují například letectví, větrné elektrárny, stavby lodí a automobilový průmysl. [19]

Výběr formy závisí na technologii zpracování, počtu kusů a velikosti součástek, které mají být vyrobeny. Dále je třeba zohlednit požadavky na kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost. [19]

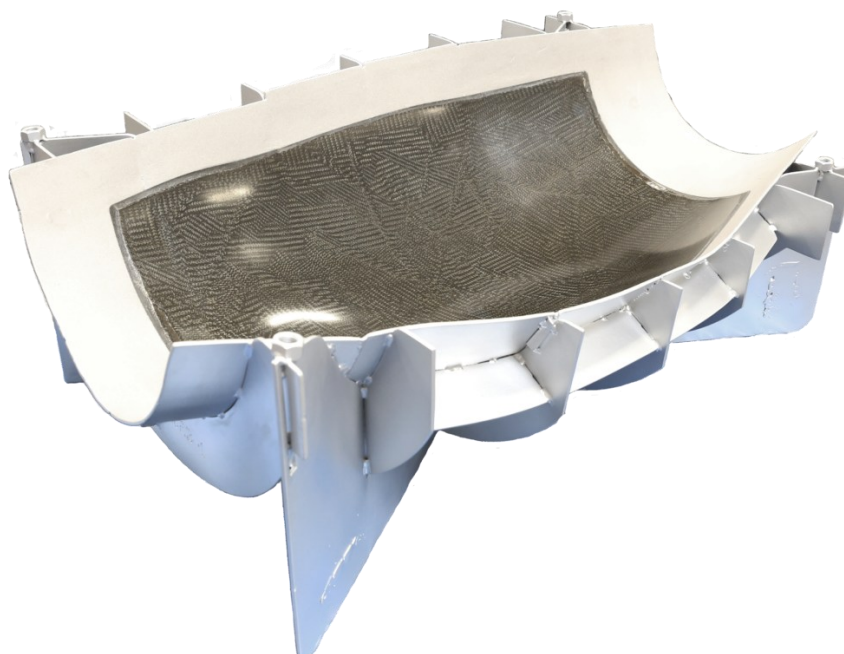
4.1 Požadavky na formy

Formy pro zpracování prepregů musí splňovat řadu požadavků a vlastností, které jsou nezbytné k zajištění výroby vysoce kvalitních kompozitních součástek. Tepelné vlastnosti forem používaných při vytvrzování prepregů ovlivňují nejen kvalitu laminátu, ale také dobu potřebnou k vytvrzení, například v autoklávu. Čím těžší je forma, tím větší je její tepelná setrvačnost během zahřívací fáze. To vede k pomalejšímu zahřívání formy i samotného výrobku. Materiál formy zároveň určuje přenos tepla do laminátu. Proto je vhodné používat lehké a/nebo tenkostěnné formy, aby byl vytvrzovací cyklus kratší a ekonomičtější. [19]

Aby bylo možné dosáhnout neporézních výrobků a tím i kvalitního laminátu, je důležité zajistit vakuovou těsnost forem. Vzhledem k tomu, že vytvrzování prepregů v autoklávu probíhá za vysokého tlaku (7 až 10 barů), je nutné zajistit, aby tlak v autoklávu nepronikl do vakuovací fólie. Prevence vzniku vnitřních dutin v laminátu je obvykle spojena s vysokou

kvalitou povrchu na straně formy. Tato kvalita minimalizuje časově náročné dokončovací operace, jako je broušení a „priming“. Kvalita formy tak přímo ovlivňuje jeho nákladovou efektivitu při výrobě kompozitních komponent. [19]

Dalšími důležitými požadavky na formy jsou dobré vlastnosti při odformování a čištění, možnost oprav povrchu a nízká hmotnost. Některé z těchto vlastností spolu souvisí. Čím jednodušší je odformování komponentu a čištění povrchu formy, tím méně se forma opotřebovává, a tím menší je pravděpodobnost potřeby oprav. Nízká hmotnost formy navíc usnadňuje nejen rychlé vytvrzování, ale také snižuje náklady na manipulaci, například při jejím přesunu pomocí jeřábu, kolejového systému nebo jednoduchého vozíku. Zavedení jeřábového systému bývá typicky nákladnější než využití kolejového systému. [19]



Obrázek 10 Hybridní forma z invaru a kompozitu [39]

Další ekonomické aspekty zahrnují výrobní náklady na formy a jejich životnost, které závisí na použitém materiálu, jeho dostupnosti a odolnosti. Odolnost vybraného materiálu je obzvláště důležitá u forem vkládaných do autoklávu, které musí odolávat vysokým cyklickým teplotním a tlakovým zatížením. [19]

Nejdůležitější vlastností forem během vytvrzovacího procesu je jejich rozměrová stálost, která je klíčová pro zajištění výroby vysoce kvalitních kompozitních komponentů. To znamená, že rozměry nástrojů se mohou během fází vytvrzování a chlazení měnit pouze v definovaných mezích. Změny rozměrů závisí na použitém materiálu a jeho koeficientu tepelné roztažnosti. [19]

Zatímco účinek rozměrových změn forem je minimální u plochých laminátů, jeho význam se výrazně zvyšuje u kompozitních struktur obsahujících mnoho křivých ploch. Například v nejhorším případě se kompozitní komponent může smršťovat na formu (forma ve tvaru tvárníku), a/nebo smršťování může způsobit deformaci nebo prohnutí formy (forma ve tvaru tvárnice), nebo může dojít k poškození součásti kvůli tvorbě trhlin v laminátu. [19]

Tabulka 1 Požadavky na formy [19]

Požadavky	Charakteristiky
Tepelné charakteristiky	- Nízká tepelná kapacita pro krátké vytvrzovací cykly - Tenkostěnné formy
Tvarová přesnost během procesu	Materiál s nízkou teplotní roztažností nebo formy s předem vypočítanou změnou geometrie v důsledku teplotní roztažnosti
Vysoká kvalita povrchu formy i kompozitního dílu	- Odolné povrchy forem proti opotřebení - Dobré vlastnosti při odformování
Vysoká kvalita výrobku	Vakuová těsnost
Dobrá manipulovatelnost	- Snadné čištění - Možnost oprav - Nízká hmotnost
Nákladová efektivita	- Nízké výrobní náklady forem - Dobrá dostupnost materiálů pro výrobu forem - Vysoká odolnost vůči cyklickému zatížení teplotou a tlakem

4.2 Technologický pohled na výrobu forem

Tvar formy je možné vyrobit klasickým obráběním. Nicméně, při tomto postupu se objevuje několik komplikací. Za prvé, forma musí být vyrobena jako zrcadlový obraz součásti. Z logického hlediska to často představuje problém, protože tento postup vyžaduje reverzní myšlení a lidské chyby jsou běžné. Za druhé, náklady na obrábění formy jsou vysoké a

obvykle vyžadují použití drahých strojů a nástrojů. Za třetí, opotřebení formy může být značné. Z těchto důvodů je vhodnější použít jiný způsob výroby formy. [20]

Tvar, který zahrnuje veškerou geometrii jednoho z povrchů dílu, se nazývá šablona (angl. master model). Šablona může být vyrobena z různých materiálů, ale materiál musí umožňovat přesné obrábění. Dnes je nejčastější metodou obrábění použitím víceosého CNC frézovacího stroje. Pro dokončování se však často provádějí i ruční úpravy. [20]

Povrch modelu je obráběn tak, aby přesně odpovídal povrchu dílu. Smrštění matrice během vytvrzování způsobí, že díl bude menší než šablona. U některých dílů může být šablona vyrobena o něco větší, aby se kompenzovalo smrštění. Přesná velikost smrštění je složitá a závisí na typu matrice, obsahu vláken, teplotě zpracování a dalších faktorech. Šablona je také upravena tak, aby se dutina formy mírně zvětšila, což umožní snadné odformování. To se provádí vytvořením úkosů přibližně 2° na bočních stěnách. Někdy se na šablonu nanáší speciální tvrdý povrchový nátěr, což zvyšuje její odolnost. Jakmile je šablona upravena do požadovaných rozměrů, na její povrch je nanesen separační prostředek. [20]

4.2.1 Výroba formy pro metodu ručního kladení

Výrobní forma může být vytvořena přímo ze šablony. Ve skutečnosti se však často jedná o zjednodušení, protože forma vyrobená ze šablony může být pouze mezistupněm, z níž se vyrábějí další šablony a formy. [20]

Šablona slouží jako základ, na který je forma položena. Na povrch se nanáší gelový nátěr podobně jako při procesu laminování, avšak v tomto případě se používá speciální gelový nátěr pro zvýšení odolnosti formy. Po vytvrzení gelového nátěru se na šablonu pokládají výztuže a nanáší se pryskyřice. Tato vrstva se vytvrzuje a poté se aplikují další vrstvy, aby byla dosažena požadovaná tloušťka. K zajištění dlouhé životnosti formy se často používají speciální laminovací pryskyřice. Epoxidové pryskyřice jsou běžné díky své vyšší výkonnosti ve srovnání s polyesterovými pryskyřicemi. Forma se často vytvrzuje za zvýšené teploty nebo je následně dodatečně vytvrzována, aby se dosáhlo vysoké hodnoty zesíťování, což také přispívá k její odolnosti. Forma je poté sejmuta ze šablony a po odpovídající přípravě povrchu je připravena k použití při výrobě. [20]

Pokud je požadován povrch odolný vůči vyšším teplotám, může být na povrch nanesena epoxidová tvarovací směs (angl. seamless molding paste), která se vytvrdí a následně opracuje. [20]

4.2.2 Další vylepšení formy

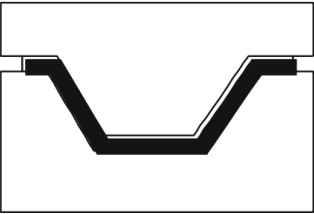
Někteří výrobci forem používají kovový povrch, obvykle nikl nanášený metodou naprašování, pro zvýšení odolnosti povrchu formy. Tento postup je nákladný, a tedy výhodný pouze při vysokých objemech výroby. [20]

Formy mohou mít podpůrnou konstrukci nebo výztuhy. Podpůrné konstrukce zajišťují snadnou manipulaci s velkými formami a dodávají formě rozměrovou stabilitu. Podpůrná konstrukce může být vytvořena zesílením formy, ale to často vede k těžkým formám. Alternativně lze použít síť výztuh, která podpírá povrch formy, zajišťuje rozměrovou stabilitu a zároveň umožňuje pohodlné uchopení při zvedání a manipulaci. Tato výztuž má často křížový vzor podobný tvaru vajíčkového kartonu, proto se tento systém anglicky nazývá „egg-crate mold“. Jiný systém výroby forem zahrnuje použití fluidního lože, do kterého je zatlačena šablona. Lože se zpevní tak, aby si uchovalo tvar šablony. Poté, co je šablona odstraněna, lze povrch lože upravit a použít jako formu. [20]

4.3 Dělení forem

4.3.1 Podle počtu částí

Tabulka 2 Rozdělení forem podle tvaru a počtu částí [21]

Typ	Vlastnosti
Formy ve tvaru tvárníku 	- Nižší náklady, široké možnosti použití - Dobrá kvalita vnitřních povrchů dílu, nižší kvalita vnějších povrchů - Snadná aplikace vakuovací fólie
Formy ve tvaru tvárnice 	- Omezené použití kvůli úhlům rohů na zakřivených površích - Dobrá kvalita vnějšího povrchu dílu, nižší kvalita vnitřního povrchu - Možnost vytvoření mostu vakuovací fólie
Oboustranné formy 	- Vysoké výrobní náklady - Dobrá kvalita vnitřních i vnějších povrchů - Snadná kontrola tloušťky dílu - Vysoká přesnost lícování mužských a ženských forem, možné částečné vnitřní defekty kvality - Větší tepelná kapacita, pomalejší rychlost zahřívání

4.3.2 Podle geometrie a tvarové složitosti

- Formy pro ploché díly**

Formy pro ploché díly lze použít k výrobě kompozitního bloku nebo desky skládáním více vrstev, jejich vytvrzením a následným obráběním tohoto polotovaru do finálního tvaru. Forma je ve tvaru desky a není tedy specifická pro konkrétní díl a může být znovu použita pro různé komponenty. Tento přístup je užitečný v případech, kdy je nutné přesné obrábění, například pokud jsou detaily na součásti příliš jemné nebo složité na to, aby mohly být vyráběny čistě lisováním. Tato metoda se používá při výrobě polotovarů pro následné obrábění. Z těchto polotovarů se vyrábí například ozubená kola. [22]

- **Navíjecí formy**

Navíjení vláken (angl. filament winding) využívá rotující trn jako formu. Rotace trnu táhne vlákna z cívky, která se pohybuje podél osy rotace, čímž se řídí orientace vláken. Tato metoda využívá buď prepregy (angl. dry winding), nebo s vlákny procházejícími lázni s pryskyřicí (angl. wet winding). Tato technologie je vhodná pouze pro výrobu dutých dílů. Ty mohou být osově symetrické nebo složitějších tvarů, jako jsou lopatky turbín. [23]

Forma může být vyrobena z materiálů jako je kov nebo kompozit (pro opakované použití), nebo z rozpustných materiálů jako je sůl, písek, keramika či sádra s pojivem (pro jedno použití). Debulking se provádí napětím vláken, díky čemuž není zapotřebí dalších nástrojů pro debulking jako u jiných technologií. Pokud jsou vlákna orientována kolmo na osu rotace, je napětí velmi účinné pro debulking. S rostoucím úhlem vláken k ose rotace se tento proces stává obtížnějším na debulking. V případě potřeby dodatečného debulkingu lze použít rozpínací formu, vakuový vak nebo autokláv. Obecně však není autoklávové zpracování nutné. [23]

Navíjení vláken je automatizovaná a opakovatelná technologie, která umožňuje dosáhnout vysokého obsahu vláken a nízkého materiálového odpadu. U technologie wet winding jsou navíc materiálové náklady nízké. Hlavní nevýhodou této metody je omezení na osově symetrické díly. [23]



Obrázek 11 Tlaková nádoba vyrobená technologií navíjení vláken [24]

- **Formy pro duté díly**

Duté díly, zejména ty, které vyžadují vysokou jakost povrchu zevnitř i ze vnějšku, představují výzvu při dosažení sjednocení materiálu zevnitř. Pokud má díl dostatečně velký otvor umožňující přístup vzduchu, lze použít nafukovací rukáv. Existují společnosti specializující se na výrobu rukávů, které jsou dostatečně pevné pro nanášení vrstev materiálu, mají řízenou expanzi pro lepší sjednocení materiálů, změknou nebo se smrští při určité teplotě během vytvrzovacího cyklu, poté mohou být znovu nafouknuty, ochlazeny na pokojovou teplotu a opakovaně použity – to vše při zachování opakovatelné rozměrové přesnosti. [22]

Nafukovací rukávy používané v kompozitním průmyslu jsou buď elastické, nebo termoplastické materiály, které mohou být deformovány do složitého tvaru. I když jsou opakovaně použitelné, opotřebují se po 2 až 30 vytáhnutích. Kromě toho mají vysoké hodnoty teplotní roztažnosti. Odstranění může být obtížné v závislosti na vlastnostech materiálu rukávu a na geometrii dílu. [25]



Obrázek 12 Nafukovací rukáv [26]

Během přípravy se prepreg pokládá kolem nafukovacího rukávu. Poté se kompozit umístí do formy, kde se rukáv nafoukne na požadovaný tlak. Forma se následně zahřeje na požadovanou teplotu, aby došlo k vytvrzení dílu. [27]

Tlak lze regulovat nezávisle na teplotě vytvrzování. Nevýhodou je nutnost použití pece nebo autoklávu. Technologie tvarování pomocí rukávu vyžaduje někdy složité formy, které mohou zahrnovat zabudovaná ohřívací pásma. Tato technologie je vhodná pro komerční využití díky své všestrannosti. Umožňuje výrobu dílů jak z prepregů, tak ze suchých uhlíkových vláken. [27]

Některé geometrie dílů jsou extrémně složité a nemají jediný směr, ze kterého by mohla být forma uvolněna. Příklady zahrnují složité vzduchovody a potrubí pro letecké motory a auta ve Formuli 1. Různé typy rozpustných jader vložených do formy mohou být vhodnou volbou pro tyto složité díly. Rozpustná jádra mohou být buď obráběna, nebo 3D tištěna, a poté vyhlazena a utěsněna, v některých případech ponořením. Suché vlákno nebo prepreg může být omotán kolem, a dokonce protažen skrz jádro. Sestava je umístěna do uzavřené formy, nebo pokud jsou vnitřní rozměry důležitější než vnější vzhled dílu, obalena ve fólii, která bude fungovat jako vnější plocha formy. Jakmile je díl vytvrzen a ochlazen, odstranění rozpustného jádra obvykle probíhá praním nebo chemickým rozpouštěním. Díl může být umístěn do vodní lázně, nebo odstranění jádra může zahrnovat vrtání otvoru nebo otvorů do jádra v místě vhodném pro proplachování a odvodnění. Použitá matrice musí být dostatečně voděodolná. [22]

Firma Stratasys Direct Manufacturing vyrábí jádra na 3D tiskárně tak, že jádro je vytištěno s podporami, které jsou následně odstraněny ručně. Výsledkem je jádro, které se rozpustí ve vodě. [22]

Výhoda 3D tištěného jádra je, že jakmile je návrh hotový, proces výroby je rychlý a opakovatelný a v porovnání s časem potřebným na výrobu velmi složité tvrdé formy může být ekonomický i pro velký počet dílů. [22]



Obrázek 13 Rozpustné jádro vyrobené technologií 3D tisku [28]

Při použití rozpustných jader je potřeba zvážit několik aspektů výroby. Například je potřeba použít materiál dostatečně odolný vůči vysokým teplotám a tlakům v autoklávu. Dále je potřeba použít epoxidovou pryskyřici, protože polyesterové pryskyřice nejsou

kompatibilní s roztokem, který rozpouští FDM jádra. Konstrukčně se vyplatí navrhnout jádro s vnitřní strukturou ve formě mřížky nebo včelího plástu. Je to z důvodu rychlejšího rozpouštění jádra. [29]

Sádrová jádra se široce používají v kompozitním průmyslu. Sádra má výhodu nízké ceny a snadného lití do složitých tvarů. Nicméně sádrová jádra je nutné důkladně vysušit a jejich povrchy jsou porézní. Porézní povrchy jsou nežádoucí, protože může dojít k infiltraci pryskyřice během laminování kompozitu. Dále je koeficient teplotní roztažnosti sádry relativně velký. Pro složité díly je odstranění sádry složité. K jejímu odstranění je nutné použít vysoké hodnoty mechanických sil, které mohou poškodit díl, což může vést k odpadu nebo ztrátám. [25]

Eutektické soli jsou dalším materiálem, který se používá k formování složitých kompozitních geometrických tvarů a vnitřních kanálů. Běžné soli zahrnují dusičnan sodný a dusičnan draselný. Hlavní výhodou eutektických solí je jejich rozpustnost ve vodě, což umožňuje jejich odstranění ze složitých dílů. Nicméně eutektické soli mají také několik vlastností, které činí jejich použití obtížným. Patří sem vysoká teplota při zpracování (lití se provádí při vysoké teplotě $\sim 260^\circ\text{C}$), vysoká hustota, korozivní odpad, vysoký smrštění při ztuhnutí ($\sim 20\%$) a pomalý čas proplachování (na několik dní). [25]

Zatímco pěny jsou někdy používány jako trvalá jádra, protože mohou poskytovat zpevnění nebo tlumicí vlastnosti, polymerové pěny mohou být odstraněny rozpouštědly nebo pískováním. Agresivní rozpouštědla mohou potenciálně poškodit kompozitní matici. Pískování může také způsobit nežádoucí erozi kompozitu. [25]

Jako příklad využití rozpustných jader při výrobě dutých kompozitních dílů lze uvést studii inženýrů Nottinghamské Univerzity. V této práci byl vyvinut levný a snadno odstranitelný materiál jádra na bázi chloridu sodného (NaCl) s pojivem rozpustným vodou. Po vytvrzení kompozitu lze jádro snadno rozpustit ve vodě, čímž vznikne přesný dutý prostor uvnitř dílu. Autoři demonstrovali tuto metodu na příkladu výroby duté výztuhy s integrovanými žebry, což ukazuje praktické využití této technologie pro lehké a pevné kompozitní konstrukce. [46]

4.3.3 Podle způsobu odformování

- **Pevné formy**

Forma musí být dostatečně tuhá, ve srovnání s dílem, aby odolala ohybovým momentům vznikajícím z tlakových sil způsobených smršťováním, které by jinak způsobily, že se forma zdeformuje. Forma musí odolávat těmto silám po celou dobu výrobního procesu. Nízká pórovitost je obzvláště důležitá při cyklech s vysokým tlakem v autoklávech. U forem z kovů je pevnost dosažena dostatečnou tloušťkou před obráběním. [22]

- **Flexibilní formy**

Flexibilní forma může někdy eliminovat nebo snížit potřebu rozebíratelné formy. Silikonové formy lze vyrobit poměrně rychle vrstvením silikonu. Pro zvýšení odolnosti lze přidat různé textilie. Nevýhodou silikonových forem je zhoršení schopnosti odformování při vícenásobném použití s epoxidovými pryskyřicemi. Nicméně nyní existují speciální povrchové úpravy, které mohou být nanесeny na formu k obnovení vlastností odformování. [22,30]

- **Rozebíratelné formy**

Někdy je geometrie dílu taková, že uvolnění z jedné strany není možné. Poté je potřeba použít dělenou formu, která se bude oddělovat a uvolňovat od dílu samostatně. Při návrhu pro dělené formy je klíčové umístění dělicí linie. Ideálně by měla být umístěna na místě, které není vzhledově důležité, protože dělicí linie obvykle vyžaduje přebroušení po odformování. V mnoha případech je třeba, aby dělicí linie byla přímo uprostřed symetrie dílu. Dělené formy přidávají složitost a riziko do procesu tváření, zejména tam, kde jsou vyžadována těsnění, např. RTM nebo vakuové RTM. [22]



Obrázek 14 Rozebíratelná forma [31]

Pro opakovanou a přesnou montáž každé části formy obsahuje každá část kromě otvorů pro šrouby i určitý zámkový systém. To se často dělá pomocí výřezů na deskách. Po sestavení je třeba dělicí linii utěsnit, aby se zabránilo úniku pryskyřice. Nejjednodušší je to provést pomocí modelíny, kterou lze snadno odstranit z dílu před dokončovacím procesem. Na míru vyrobené silikonové profily dělicí linie jsou elegantnější volbou. Mohou být přesně umístěny do prohlubně dělicí linie a poskytují konzistentní profil pro otisk dělicí linie, který lze snadněji vyleštit. Mají také výhody v tom, že jsou opakovaně použitelné, což znamená větší udržitelnost pro životní prostředí a méně odpadu. Komplexnější vícedílné formy, zejména přímo obráběné formy, mohou mít vhodné gumové, polyuretanové nebo jiné teplotně odolné těsnění natrvalo namontované v obráběné drážce. [22]

4.4 Materiály pro výrobu forem

Tabulka 3 Požadavky na materiály forem [21]

Charakteristiky	Požadavky
Povrchy forem	• Celý povrch formy musí být hladký, rovný, a bez trhlin. • Musí být zajištěna těsnost pomocí vakuovací fólie. • Na okraji formy by měl být dostatečně široký okraj pro utěsnění vakuovací fólie. • Povrch formy by měl být ohraničen obrysovými čarami, popřípadě by měl obsahovat značky pro díry. • Přípojky pro odsávání vzduchu by měly být správně umístěny.
Slícování, koordinace a polohování	• U souběžně vytvrzovaných nebo lepených dílů je nutné ověřit, zda polohy vytvrzených komponent odpovídají požadovaným rozměrům, protože vysoké teploty v autoklávech mohou ovlivnit jejich polohu. • Je třeba také zvážit rovnoměrné rozložení tlaku mezi jednotlivými součástmi dílu.
Distribuce teploty	• Formy používané v autoklávech by měly mít tenkostěnnou konstrukci a odvětrání na podpůrných rámech, což pomáhá snížit hmotnost formy a zajistit rovnoměrné rozložení teploty. • Je důležité zabránit deformacím forem způsobeným nerovnoměrnou teplotou při zahřívání nebo chlazení.
Tuhost formy	• Nedostatečná tuhost může vést k deformaci formy, zejména během integrovaného procesu vytvrzování při vysokých teplotách.
Odformování	• Vysoký procesní tlak může způsobit pevné přilnutí kompozitního dílu k formě. • Konstrukce formy by měla umožnit snadné uvolnění dílu. • U dílů s žebry je nutné navrhnout rozebíratelnou formu, aby bylo možné po vytvrzení snadno vyjmout hotový díl.

4.4.1 Kovové formy obecně

Kovové formy poskytují vysokou pevnost, což je činí vhodnými pro procesy s vysokým mechanickým zatížením. Kovové formy lze používat po stovky výrobních cyklů s minimální údržbou, avšak jejich výroba a manipulace jsou časově náročné a nákladné. [32]

Tradiční kovové formy pro pokládání prepregů se primárně vyrábějí z hliníku, oceli nebo slitiny invar. Často se jedná o složité svařované konstrukce, které vyžadují více operací – tváření, svařování, obrábění a tepelnou úpravu – aby bylo dosaženo požadované geometrie. [32]

4.4.2 Hliníkové formy

Výhody:

- Poskytují vysokou jakost výrobků.
- Jsou snadno obrobitelné, často dosahují konečné povrchové jakosti již po jediné obráběcí operaci s minimálními dodatečnými úpravami.

Nevýhoda:

- Koeficient teplotní roztažnosti hliníku je příliš vysoký, což neumožňuje přesnou výrobu dílů s vysokými tolerancemi při vysokých vytvrzovacích teplotách.
- Mají nižší odolnost než ocel a invar. [32]



Obrázek 15 Hliníková forma [33]

4.4.3 Ocelové formy

Výhody:

- Nabízejí vyšší odolnost a delší životnost než hliník.
- Jsou cenově dostupné díky nízkým nákladům na surovinu.

Nevýhoda:

- Přestože mají nižší teplotní roztažnost než hliník, stále nejsou vhodné pro aplikace s extrémními požadavky na toleranci, například v leteckém průmyslu.
- Jsou méně obrobitelné než hliník, ale mohou dosáhnout jemného povrchu přidavným obráběním. [32]

4.4.4 Invarové formy (niklové slitiny)

Výhody:

- Nabízejí nejlepší vlastnosti v oblasti teplotní stability a odolnosti.
- Jsou standardním řešením pro kovové formy tam, kde je vyžadována vysoká přesnost a dlouhá životnost.

Nevýhody:

- Vysoké pořizovací náklady.
- Zdlouhavý výrobní proces neumožňuje rychlou produkci, což může být nevýhodné zejména v letectví.
- Velká hustota materiálu vede k vyšší hmotnosti, větší tepelné kapacitě a složitější manipulaci. [32]

4.4.5 Nekovové formy obecně

Standardní formy jsou nezbytné pro výrobu velkého množství dílů s minimální potřebou povinné údržby nebo oprav. Proto je odolnost forem zásadní. Naopak formy mimo sériovou výrobu, jako jsou prototypové formy nebo formy určené k opravám, se využívají k výrobě menšího počtu dílů. V těchto případech lze zvážit méně odolné, ale cenově dostupnější varianty, a to i přesto, že jejich životnost je nižší než u standardních forem. Mezi tyto materiály patří kompozity, keramika nebo grafit, jejichž nižší trvanlivost v tomto případě nepředstavuje problém. [32]

4.4.6 3D tisk forem

Kovové formy vyžadují značné obrábění, a tím pádem vysoké náklady, ztráty materiálu a dlouhé dodací lhůty i pro relativně jednoduché tvary dílů. FDM tisk snižuje náklady na obrábění a zároveň umožňuje rychlou a snadnou iteraci, i když jsou požadovány složité geometrie. [34]

Při výrobě kompozitů ve formách je velmi důležitá kompatibilita materiálů, aby nedocházelo k problémům s odformováním. Například PET-G (polyethyléntereftalát-glykol) je silně doporučován díky své schopnosti oddělit se od epoxidové pryskyřice, zatímco formy z ABS (akrylonitrilbutadienstyren) jsou méně vhodné kvůli obtížnému odformování. [34]

V roce 2016 spolupracovala Oak Ridge National Laboratory s průmyslovými partnery na 3D tisku a obrábění několika velkých forem a jejich testování v autoklávech společnosti Boeing. Formy z termoplastu přežily vysoké teploty a tlaky v autoklávu, který se používá k vytvrzování kompozitních dílů pro letecký průmysl. Úspěšné testování vedlo k výrobě kompozitních dílů v leteckém průmyslu. [34]



Obrázek 16 Forma vyrobená technologií 3D tisku [35]

Inženýři Polytechnické Univerzity Marche v Anconě navrhli dvoudílnou formu pro výrobu aerodynamické klapky pro automobilový průmysl. Forma byla vyrobena 3D tiskem z polyamidu vyztuženým krátkými uhlíkovými vlákny. Forma je určena pro výrobu dílů v autoklávu. [40]



Obrázek 17 3D tisk formy pro klapku [41]

Společnost CEAD se zabývá výrobou průmyslových 3D tiskáren, které dokážou zpracovat širokou škálu materiálů. Existuje několik materiálů, které jsou vhodné pro použití v autoklávech. Při výrobě v autoklávu je potřeba zohlednit různé aspekty jako je cyklus autoklávu, maximální teplota a dostupný rozpočet. [36]

Při výrobě je jedním z hlavních požadavků, aby materiál pro 3D tisk používaný k výrobě forem splňoval požadavky na toleranci pro letecký průmysl. To zajišťuje, že konečné komponenty splňují přísné standardy spolehlivosti a bezpečnosti. Dále je třeba zvážit tyto faktory:

- Vyztužení vláky – díky vyztužení materiálu pro 3D tisk vlákny dosahuje materiál nižšího koeficientu teplotní roztažnosti a zlepšení mechanických vlastností.
- Maximální teplota – jelikož výroba v autoklávu zahrnuje zvýšené teploty, materiál pro 3D tisk by měl těmto teplotám odolávat (140 °C až 180 °C).
- Nákladová efektivita – vzhledem k vysokým požadavkům na materiály vhodné pro použití v autoklávech jsou tyto materiály obvykle nákladnější než standardní materiály pro 3D tisk. [36]

4.4.7 Grafitové formy

Grafitové formy jsou v praxi používány již několik desetiletí a představují nejrozšířenější nekovový materiál pro výrobu malých forem.

Výhody:

- Grafit je snadno obrobitelný, což umožňuje rychlou výrobu forem s nízkými náklady na suroviny.

- Grafit nabízí dobrý koeficient teplotní roztažnosti vůči uhlíkovým vláknům, což přispívá k dosažení vysoké přesnosti při výrobě kompozitních dílů.
- Nízká hustota a dobrá teplotní vodivost, což umožňuje rychlejší ohřev při nižší spotřebě energie.

Nevýhody:

- Nízká mechanická odolnost – snadno se láme a vyžaduje časté opravy povrchu před opakovaným použitím.
- Prašnost při obrábění – grafitový prach představuje zdravotní riziko a musí být účinně odsáván, aby se minimalizovala expozice pracovníků i strojů.
- Poréznost materiálu – problematické udržení těsnosti vakua během vytvrzovacího procesu → běžným řešením je aplikace povrchového tmelu, který zlepšuje těsnost i kvalitu povrchu. [32]

4.4.8 Keramické formy

Výhody:

- Odolnější varianta oproti grafitu, keramika umožňuje výrobu forem s nízkou teplotní roztažností.
- Možnost dosažení vysoké jakosti povrchu, která je vhodná pro přesnost výroby.

Nevýhody keramických forem:

- Obtížná obrobiteľnosť – väčšina keramických materiálov je príliš tvrdá pre konvenčné obrábacie metódy a je nutné použiť špecializované broušenie, rezanie vodným paprskom alebo ultrazvukové obrábění.
- Nízké rychlosti úběru materiálu – snižují produktivitu výroby a zvyšují celkové náklady na výrobu forem.
- Špatná teplotní vodivost – vede k delšímu zahřívání forem, což může být překážkou při výrobě. Řešením mohou být vestavěné topné prvky, ale ty zvyšují hmotnost, složitost i náklady.
- Variabilita vlastností – keramické materiály mají rozdílné vlastnosti v závislosti na hustotě a chemickém složení. Nižší hustota zlepšuje obrobiteľnosť, ale zároveň

zvyšuje pórovitost, což může negativně ovlivnit zpracovatelnost a vakuovou těsnost.
[32]

4.4.9 Kompozitní formy

Kompozitní formy pro letecký průmysl jsou obvykle vyrobeny z epoxidové nebo bismaleimidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými nebo grafitovými vlákny.

Výhody:

- Formy z kompozitních materiálů jsou vyrobeny ze stejných nebo podobných materiálů jako finální kompozitní díly. Díky tomu je koeficient teplotní roztažnosti téměř nulový, což eliminuje problémy s teplotní expanzí během vytvrzovacího cyklu.
- Bismaleimidové pryskyřice nabízí vyšší tepelnou stabilitu, menší mikropraskání a lepší rozměrovou stabilitu než epoxidové pryskyřice, ale zároveň jsou dražší a náročnější na zpracování.

Nevýhody:

- Nízká mechanická odolnost – vyžadují častou údržbu, broušení a leštění, aby si udržely vysokou jakost povrchu.
- Obtížná obrobiteľnosť – uhlíková a grafitová vlákna jsou abrazivní, což způsobuje vysoké opotřebení obráběcích nástrojů. Je tedy nutné použít diamantové řezné nástroje.

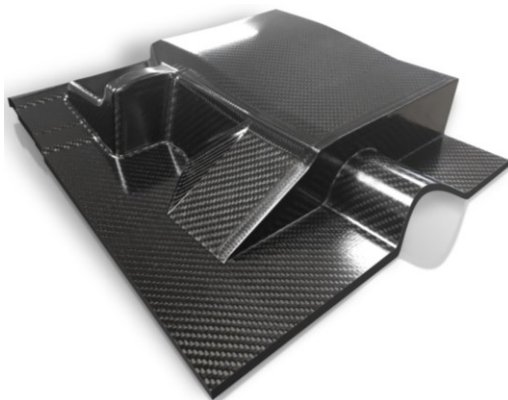
Faktory ovlivňující životnost kompozitních forem:

- Typ pryskyřice – ovlivňuje tepelnou stabilitu, odolnost vůči vlhkosti a oxidaci.
- Výrobní proces – zahrnuje teplotní a tlakové podmínky během výroby, vytvrzování v autoklávu a provozní prostředí.
- Obrábění a údržba – řezání, odformovací procesy, ochrana proti UV záření, čištění a správné skladování.

Časté typy poškození kompozitních forem:

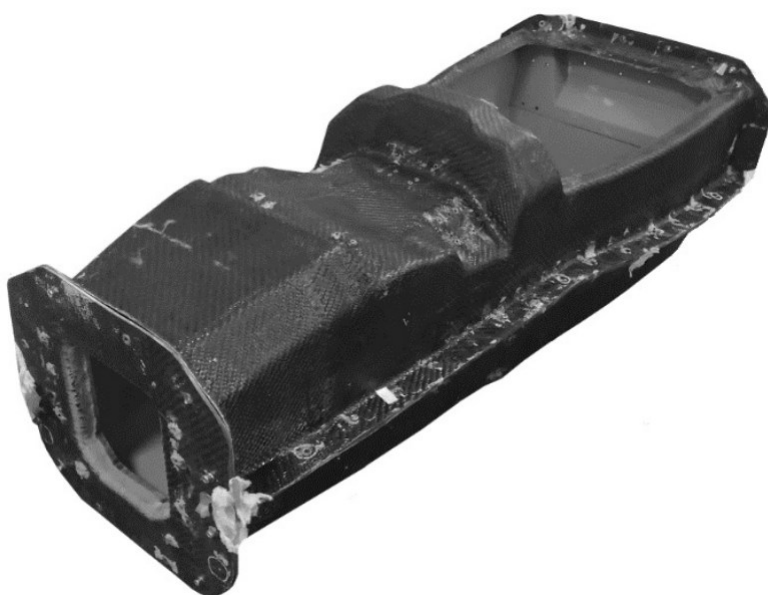
- Řezy, škrábance a promáčknutí způsobené mechanickým namáháním.
- Delaminace vznikající v důsledku přehřátí, UV záření nebo vlhkosti.

- Je důležité poznamenat, že každá kompozitní forma vyžaduje na výrobu svou vlastní formu (anglicky master mold), která je nezbytná pro výrobu primární formy. Toto je dodatečný náklad, který je třeba zohlednit při rozhodování o použití kompozitních forem. [32]



Obrázek 18 Kompozitní forma z uhlíkového prepregu [37]

Jako příklad použití kompozitních forem lze uvést práci inženýrů ze Západočeské Univerzity v Plzni, kteří navrhli vícedílnou formu pro výrobu většího dílu z uhlíkových vláken. Jednalo se o část karoserie malého závodního auta – tzv. monokok. Forma byla rozdělena do několika částí, aby se dala snadno rozebrat po vytvrzení dílu. Výroba probíhala ručním kladením vrstev uhlíkové tkaniny a zalitím epoxidovou pryskyřicí. Forma byla navržena tak, aby vydržela teploty v autoklávu. [42]



Obrázek 19 Kompozitní forma pro monokok [42]

5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Analýza metodou konečných prvků, běžně označovaná jako FEA (angl. Finite Element Analysis), je numerická metoda používaná pro analýzu strukturálních a tepelných problémů ve výrobním procesu.

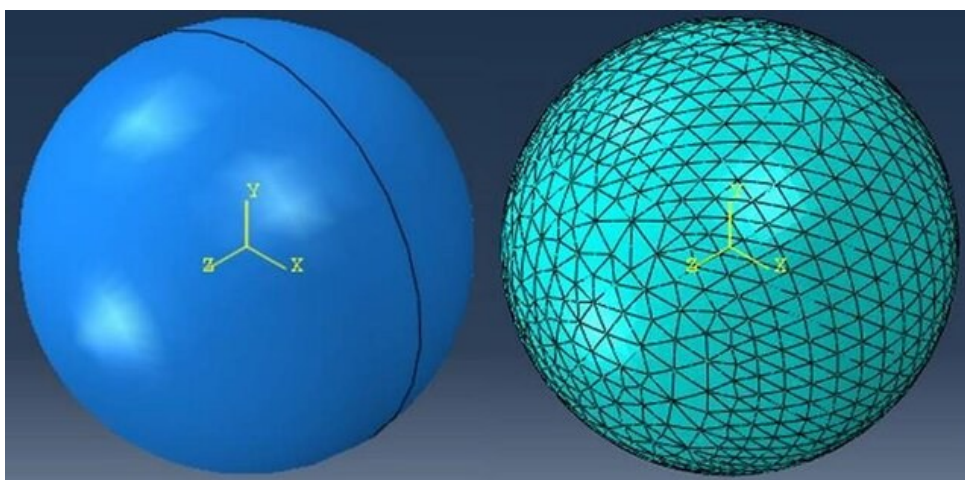
Návrhová analýza je proces zkoumání určitých vlastností součástí nebo sestav. Tato analýza může být prováděna na reálném objektu nebo na modelech, které reprezentují určité aspekty reálného objektu. Pokud jsou místo reálného objektu použity modely, lze analýzu provést dříve v návrhovém procesu – ještě předtím, než jsou vytvořeny fyzické prototypy.

Modely mohou být buď fyzické (zmenšené modely, makety), nebo matematické. Jednoduché matematické modely lze řešit analyticky. Složitější modely však vyžadují použití numerických metod. FEA je jednou z numerických metod používaných k řešení složitých matematických modelů.

Metoda FEA má široké využití ve vědě a inženýrství. Někdy se FEA označuje také jako FEM (angl. Finite Element Method). [43]

5.1 Sít'ování

Sít'ování (angl. meshing) v analýze metodou konečných prvků (FEA) je proces rozdělení jedné složité geometrie na více menších prvků – tzv. sít'. Tento proces umožňuje převést složité struktury na konečný soubor rovnic, které je možné řešit pomocí počítače. Sít' tvoří páteř celého procesu FEA – poskytuje rámec, na němž jsou prováděny výpočty napětí, deformací, přenosu tepla a dalších fyzikálních vlastností. [43]



Obrázek 20 Model koule před a po sít'ování [44]

5.1.1 Přehled procesu

Proces generování sítě začíná definováním geometrie objektu nebo prostoru, který je předmětem zkoumání. Tato geometrie je následně rozdělena na jednotlivé prvky, přičemž každý prvek představuje určitou část celku. Proces zahrnuje rozhodnutí o typu, velikosti a hustotě prvků, přičemž tato volba je výrazně ovlivněna povahou řešeného fyzikálního problému. Po vytvoření sítě se na model aplikují okrajové podmínky a materiálové vlastnosti, což umožňuje simulaci co nejvěrněji napodobit reálné podmínky. Složitost sítě často přímo ovlivňuje přesnost simulace, což zdůrazňuje důležitost této fáze v rámci FEA. [43]

5.1.2 Důležitost síťování ve FEA

Síťování představuje zásadní fázi v procesu FEA, jelikož má přímý vliv na přesnost a věrohodnost výsledků simulace. Kvalitně vytvořená síť umožňuje detailní popis fyzikálního chování modelu, čímž přispívá k získání spolehlivých a přesných výstupů. Naopak nevhodně navržená síť může způsobit výrazné nepřesnosti, zkreslení výsledků nebo dokonce způsobit selhání celé simulace. Úroveň provedení síťování určuje, jak přesně simulace vystihne reálné podmínky, a z toho důvodu je tento krok neoddelitelnou součástí analýzy konečnými prvky. [43]

5.2 Typy elementů sítě

5.2.1 1D elementy

Jednorozměrné elementy jsou nejjednodušší formou elementů v metodě konečných prvků. Jsou ideální pro modelování konstrukčních prvků, kde výrazně dominuje jeden rozměr – například nosníky, pruty nebo sloupy. Tyto elementy jsou definovány dvěma uzly – každý představuje jeden konec elementu – a mezi nimi se předpokládá lineární chování. Díky této jednoduchosti jsou velmi efektivní pro analýzu lineárního zatížení, ale jejich využití je omezené u složitějších tvarů nebo nelineárních jevů. [43]

Hlavní výhodou 1D elementů je výpočetní nenáročnost – spotřebovávají podstatně méně výpočetních prostředků než 2D a 3D elementy, což je výhodné při simulaci rozsáhlých konstrukcí, kde není nutná detailní analýza každé části. [43]

5.2.2 2D elementy (skořepiny)

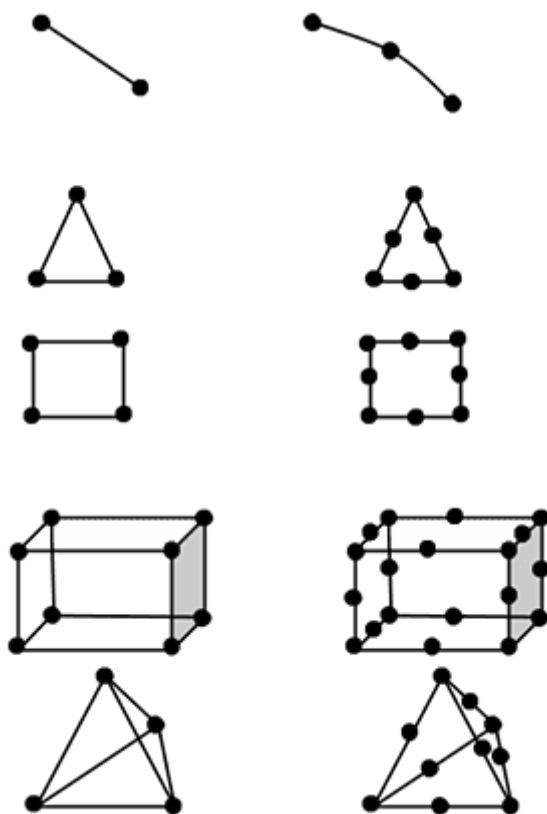
Dvourozměrné elementy se používají pro modelování například tenkostěnných struktur, desek nebo skořepin. Tyto elementy jsou tvořeny třemi nebo více uzly, které definují plochý či zakřivený povrch. Jsou efektivní při analýze napětí, deformací a vibrací v konstrukcích jako křídla letadel, karoserie automobilů nebo tlakové nádoby.

Výhodou 2D elementů je dobrý kompromis mezi výpočetní náročností a schopností modelovat složité chování – dokážou věrně simulovat ohyb, tah i smyk. Klíčovým aspektem při jejich použití je ale správné zadání tloušťky a zakřivení, protože na těchto parametrech závisí přesnost výsledků. Přestože jsou univerzální, vyžadují pečlivý přístup, zejména u nepravidelných a zakřivených ploch. [43]

5.2.3 3D elementy (objemové)

Trojrozměrné elementy jsou určeny pro modelování těles s významnou hloubkou, šířkou i výškou. Jsou nezbytné při analýze těles, kde napětí a deformace probíhají ve více směrech. Definovány jsou čtyřmi nebo více uzly a mají tvar čtyřstěnů, šestistěnů nebo jiných prostorových mnohoúhelníků.

3D elementy umožňují simulaci složitého chování – včetně nelineárních materiálových vlastností, velkých deformací nebo kontaktů mezi tělesy. Tento vysoký stupeň věrnosti realitě si ale vyžaduje značné výpočetní kapacity, zejména při jemném síťování. Jsou nepostradatelné tam, kde 1D a 2D elementy nedokáží dostatečně zachytit složité rozložení napětí. [43]



Obrázek 21 Typy elementů [45]

5.2.4 Výběr vhodného typu elementu

Správný výběr typu elementu je pro úspěšnou FEA analýzu zásadní. Záleží na geometrii tělesa, typu zatížení, okrajových podmínkách a požadované přesnosti výsledků. U jednoduchých konstrukcí pod běžným zatížením mohou postačovat 1D elementy, zatímco složitější konstrukce s nerovnoměrným zatížením vyžadují použití 2D nebo 3D elementů.

Výběr závisí i na dostupných výpočetních prostředcích a požadované úrovni detailu. Například 3D elementy poskytují nejpodrobnější výsledky, ale jsou výpočetně náročné – v rozsáhlejších projektech proto může být efektivní kombinace 1D a 2D elementů, která zajistí rovnováhu mezi přesností a efektivitou výpočtu. [46]

II PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je navrhnout postup výroby kompozitní formy pro vybraný dílec a výroba samotného kompozitního dílce. Dílec je v tomto případě kompozitní páka.

Nástřihový plán byl vytvořen pomocí programu NX od firmy Siemens.

Cíle diplomové práce:

1. Návrh nástřihového plánu pro výrobu formy
2. Cenové kalkulace výroby formy
3. Technologický postup výroby formy
4. Návrh nástřihového plánu pro výrobu páky
5. Výroba páky
6. Technologický postup výroby páky
7. Závěr diplomové práce

7 DŮVOD VÝROBY KOMPOZITNÍ FORMY

Původní forma na výrobu páky byla z epoxidové desky. U formy z tohoto materiálu se objevil problém ve formě tvarových defektů na hranách formy, které vznikly při odformování výrobku.



Obrázek 22 Opravený defekt na epoxidové formě



Obrázek 23 Opravený defekt na hraně epoxidové formy

Z tohoto důvodu byla nejprve vyrobena kompozitní šablona (negativ formy). Poté byla pomocí šablony vyrobena kompozitní forma, která měla stejný tvar jako původní forma z epoxidové desky.



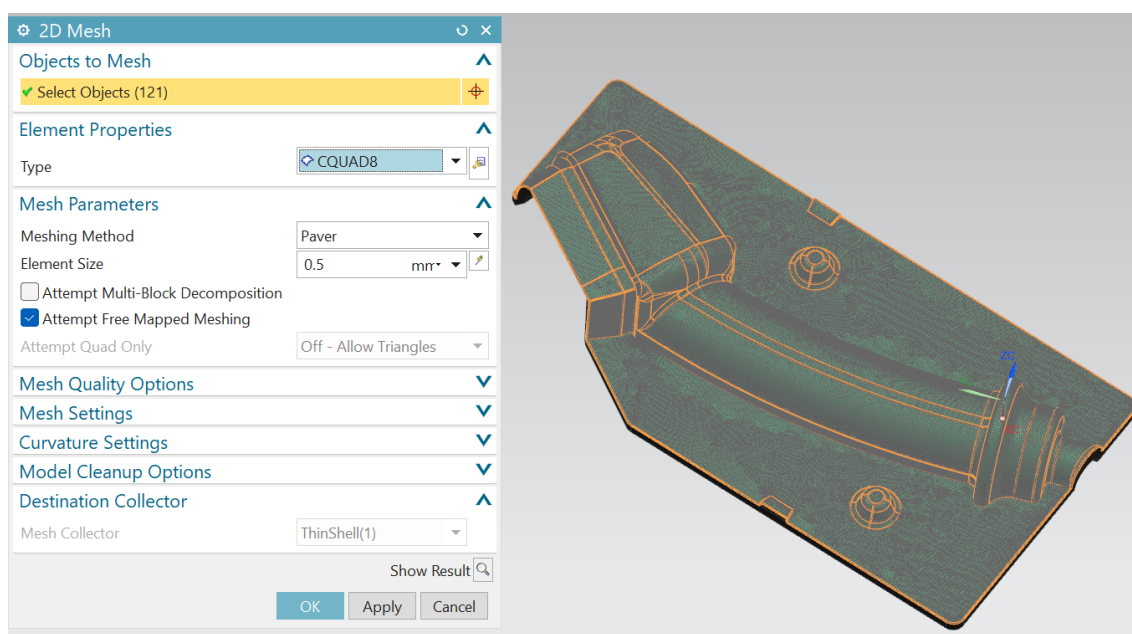
Obrázek 24 Kompozitní šablona

8 NÁSTŘIHOVÝ PLÁN PRO FORMU

Obě poloviny formy byly vymodelovány v programu Autodesk Fusion podle modelu výrobku zaslaného firmou. Program Autodesk Fusion byl zvolen k modelování jednotlivých částí formy, protože poskytuje vytváření složitých tvarů pomocí ploch. Poté byly modely importovány do programu NX od firmy Siemens.

8.1 Vytvoření sítě

Prvním krokem bylo importování modelu formy do programu. Poté byla vytvořena simulace a v ní byla na výrobku vytvořena 2D síť.



Obrázek 25 Nastavení 2D sítě

Při tvorbě sítě dochází k rozdělení 3D modelu na konečný počet prvků. Důležitým aspektem při jejím návrhu je volba typu elementů a jejich velikosti, která přímo ovlivňuje počet uzlů. Obecně platí, že čím jemnější síť (více menších elementů), tím vyšší přesnost výsledků analýzy. Z důvodu rozměrů výrobku a požadované přesnosti byl zvolen skořepinový čtyřúhelníkový element typu CQUAD8 o velikosti 0,5 mm.

8.2 Nastavení materiálu

Pomocí *Ply Materials* v záložce *Laminate* lze nastavit vlastnosti vláken a matrice. Na obrázcích níže lze vidět nastavení matrice G ANGELONI IMP503Z a vláken GG 240 T.

Isotropic Material

Property View

All Properties

Name - Description

G ANGELONI IMP503Z/GG 240 T, 245g/m2, kepr2/2, 45%, šíře 100 cm

Label 1

Description

Categorization

Properties

Mass Density (RHO) 1.42 g/cm³

Mechanical

Strength

Durability

Formability

Elastic Constants

Young's Modulus (E) 238000 N/mm²(MPa)

Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) 0.2

Card Name MAT1

OK Cancel

Obrázek 26 Nastavení matrice

Laminate Ply Material

Name

Woven1

Label 1

Basic Information

Matrix Material G ANGELONI IMP503Z/GG 240 T

Matrix Volume Fraction 0.45

Warp Fiber Material G ANGELONI IMP503Z/GG 240 T

Weft Fiber Material G ANGELONI IMP503Z/GG 240 T

Fiber Volume Fraction 0.55

Balance Coefficient 0.5

Finished Thickness 0.28 mm

Ply Color

Ply Failure Theory Maximum Stress

Interlaminar Failure Theory Transverse Shear

Lock Angle 90

Draping Path Geodesic

Zone Angle Tolerance 15

Obrázek 27 Nastavení prepregu

8.3 Definice nástrihů

Pomocí záložky *Global Layup* byly nadefinovány jednotlivé nástrihy, včetně tloušťky vrstvy a použitého prepregu.

Layup Definition

Layup Name: Layup 2

Stacking Recipe: Regular

Paste Repetition: 1

Reverse Plies and: [Dropdown]

Global ...	Composition	Thickness	Angle	Status	Description	Solid Property
5	G ANGELONI...	0.28	0	Up-to-d...		Layered
2	G ANGELONI...	0.28	0	Up-to-d...		Layered

Global ply id: 5 ☐ Ply Material: [Color]

Material: G ANGELONI IMP503Z/GG 24

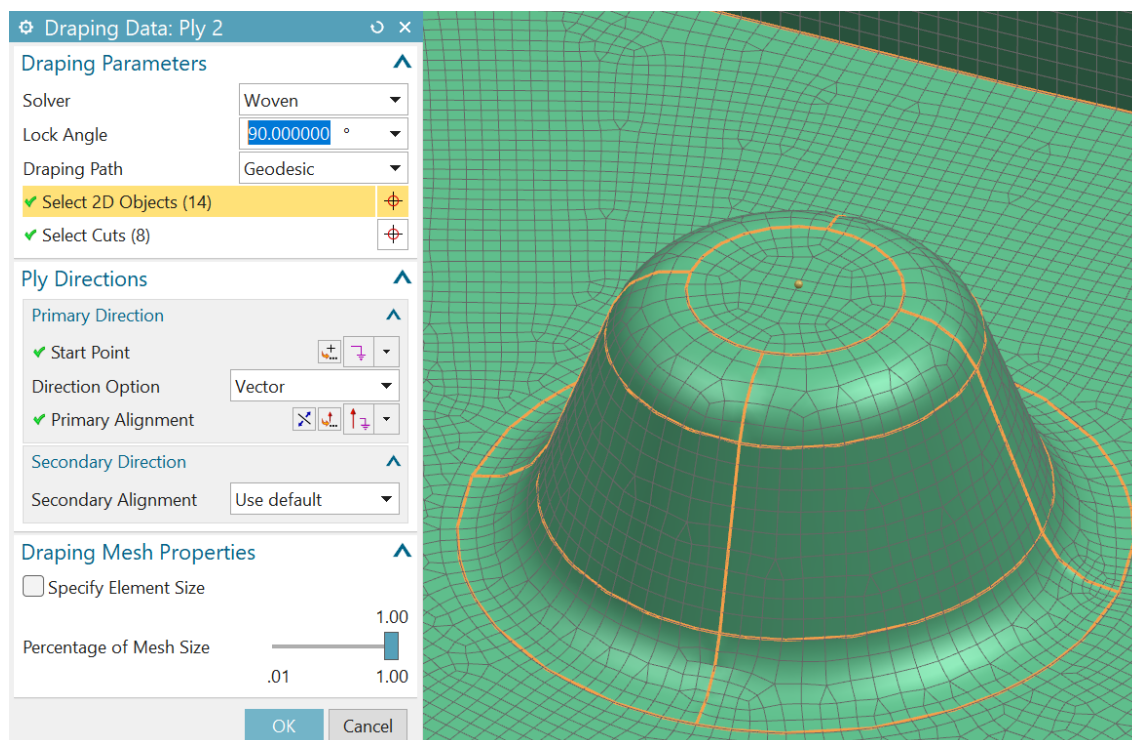
Thickness: 0.28 mm

Angle: 0 °

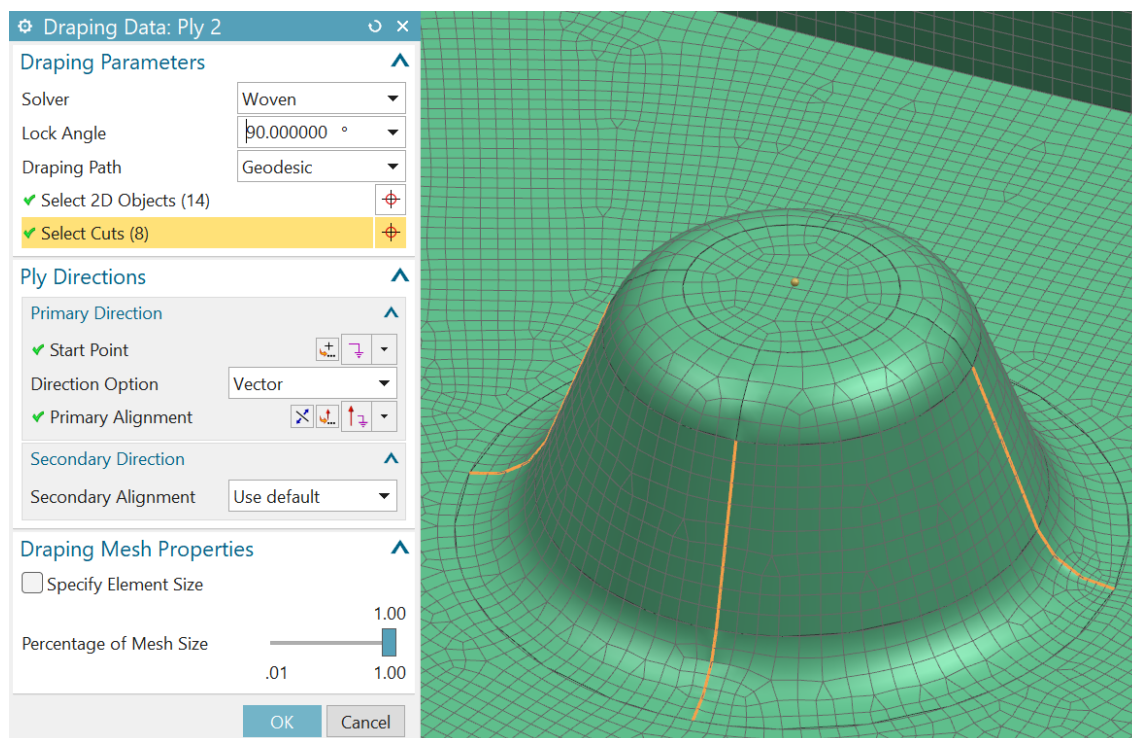
Description: [Text Box]

Obrázek 28 Nastavení vrstev

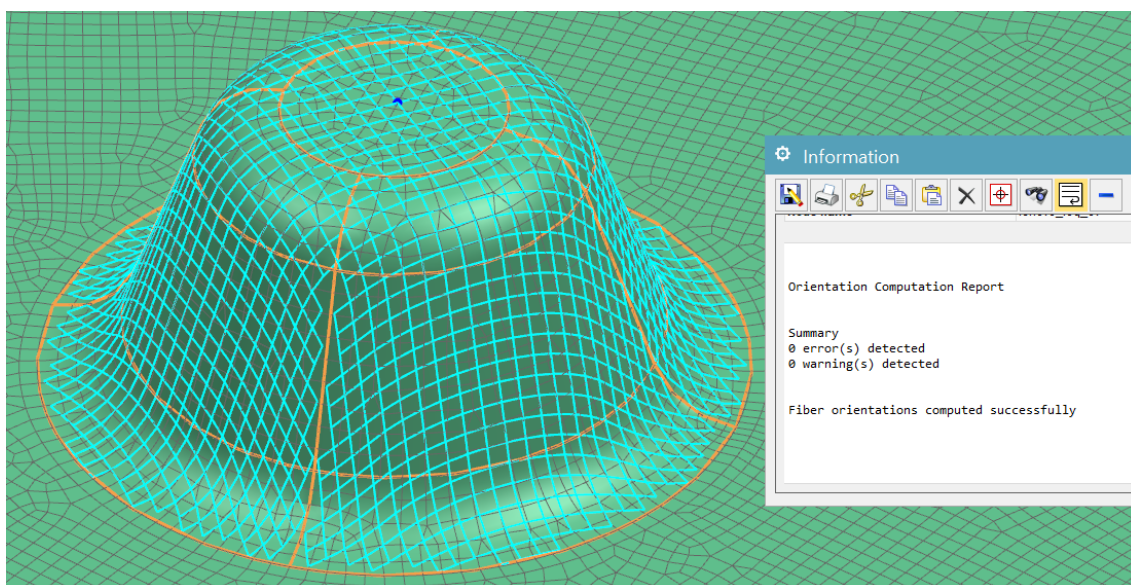
Kvůli složitosti dílu bylo potřeba více nástrihů, tedy více „Layupů“. Dále bude ukázán postup pro jeden tvarový prvek na formě, který tvoří jeden nástrih. V sekci *Define Draping Input* byly nejprve určeny požadované plochy. Ty lze vidět na Obrázku 22.

Obrázek 29 Výběr ploch v *Define Draping Input*

Aby bylo možné skutečný nástřih prepregu pro tvarový prvek vložit do formy, je potřeba použít stříhy v tkanině a určit počáteční bod. Definované stříhy a počáteční bod lze vidět na Obrázku 23.

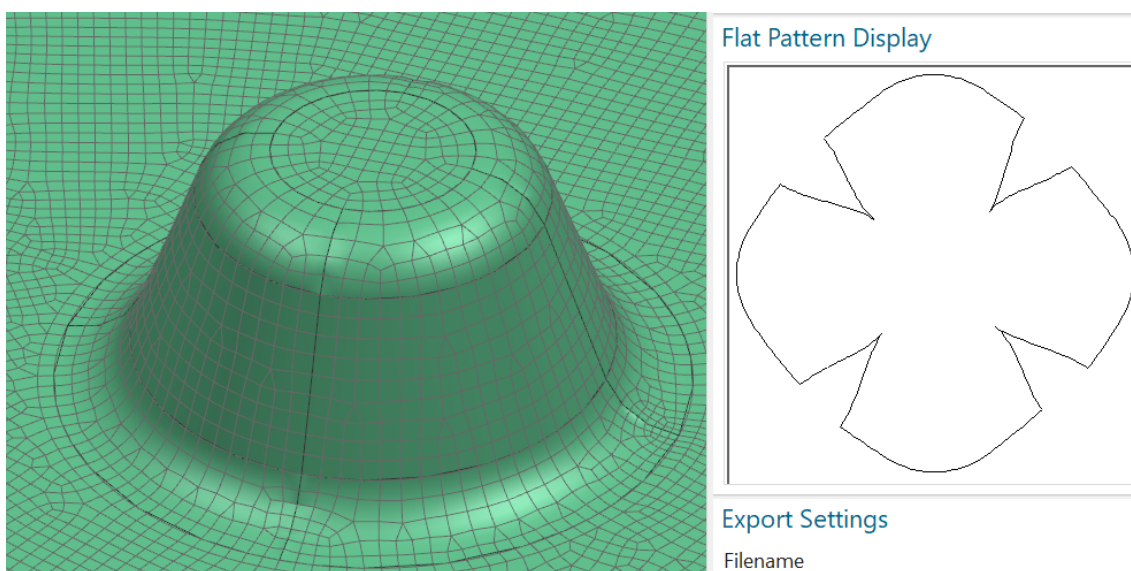
Obrázek 30 Výběr stříhů v *Define Draping Input*

Posledním krokem bylo pomocí tlačítka *Update* simulovat nástřih prepregu. Cílem předchozích kroků byla úspěšná simulace, bez varování.



Obrázek 31 Dokončená simulace nástřihu

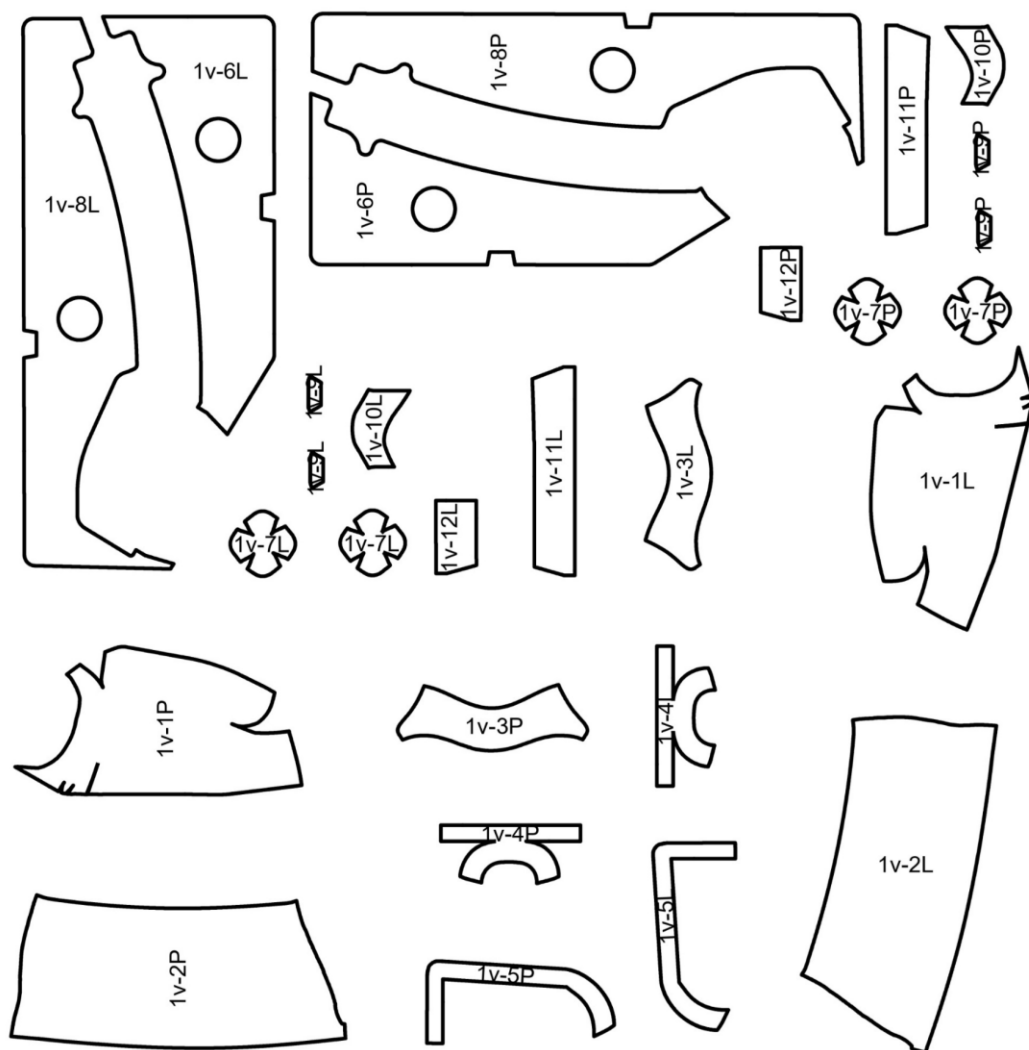
Po úspěšné simulaci si lze zobrazit 2D nástřihový plán, který lze exportovat do různých CAD formátů pro vyřezání na laseru.



Obrázek 32 Zobrazení nástřihu pro jeden tvarový prvek

Všechny nástřihy byly převedeny do formátu .dwg a upraveny v programu Autodesk AutoCAD 2024. Celý nástřihový plán první vrstvy pro obě poloviny lze vidět na Obrázku 26. U kompozitních forem je nejdůležitější první vrstva nástřihů, protože je v dotyku

s výrobkem a musí mít tedy přesný tvar. Další vrstvy jsou méně důležité a mohou být vyrobeny ze zbytků prepregu.



Obrázek 33 Nástřihový plán pro první vrstvu formy

9 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY FORMY

Tabulka 4 Technologický postup výroby formy

č.o.	Operace	Pomůcky
1.	Čištění formy	Láh, hadřík
2.	Separace formy	Separátor, ubrousek
3.	Kontrola správnosti separace	Lepicí páska
4.	Pokládání první vrstvy prepregu	Váleček, různé pomůcky
5.	Aplikace vakua na první vrstvu (debulking)	Odtrhová fólie, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnící páska, vývěva, rezervoár, ventil, hadice
6.	Pokládání dalších vrstev prepregu podle potřeby	Váleček, různé pomůcky
7.	Zavakuování	Vakuovací rukáv, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnící páska, vývěva, rezervoár, ventil, hadice
8.	Vytvrzení v autokláv	Autokláv
9.	Odformování	Speciální pomůcky
10.	Ořezání dílu	Kotoučová pila
11.	Leštění dílu	Leštící pasta, hadřík
12.	Lakování dílu	Lakovací pistol

10 CENOVÁ KALKULACE VÝROBY FORMY

Do cenové kalkulace výroby není zahrnuta cena plotteru, autoklávu a vývěvy. Hodinová sazba pracovníka byla určena na 400 Kč/h a režie (výrobní, skladovací a energie) byly určeny na 800 Kč/h.

Tabulka 5 Ceny materiálů

Materiál	Cena [Kč]
Prepreg za m ² [Kč]	1800
Vakuovací fólie za m ² [Kč]	110
Odsávací rohož za m ² [Kč]	65
Těsnící páska za m [Kč]	10
Plnič pórů za 3,31 kg [Kč]	10000
Separátor za 1 kg [Kč]	1700

Tabulka 6 Odhadované náklady na suroviny

Materiál	Cena [Kč]
Celková cena prepregu (10 vrstev)	3168
Vakuovací fólie (2 m ²)	220
Odsávací rohož (2 m ²)	130
Těsnící páska (2 m)	20
Rukavice	16
Plnič pórů (4 vrstvy)	60
Separátor (5 vrstev)	17

Tabulka 7 Časy jednotlivých operací

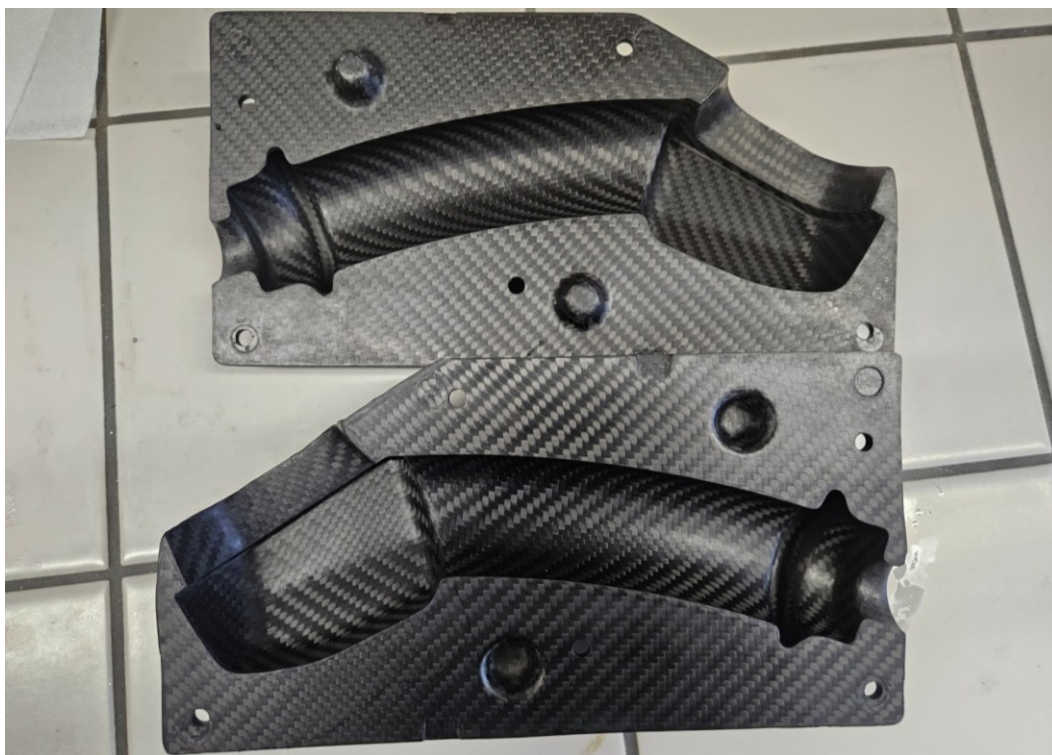
Operace	Čas [min]	Cena [Kč]
Separace	180	1200
Řezání prepregu	30	400
Příprava pomocných materiálů	15	100
Pokládání první vrstvy	30	200
Debulking	45	300
Pokládání dalších vrstev	90	600
Zabalení a utěsnění	30	200
Vytvrzování	180	2400
Odformování	15	100
Ořez výrobku	30	200

Tabulka 8 Celkové náklady výroby

Výdaje	Cena [Kč]
Práce	2900
Odvody	957
Režie	2800
Materiály	3631
Součet	10288

11.1 Příprava formy

Prvním krokem bylo naseparování formy. K tomuto úkolu byly použity dva prostředky. Prvním prostředkem byl plnič pórů Zyvox Sealer GP. Na obě strany formy byly nanесeny čtyři vrstvy plniče pórů. Druhým prostředkem byl separátor Chemlease A2191W. Na obě strany formy bylo nanесeno pět vrstev separátoru.



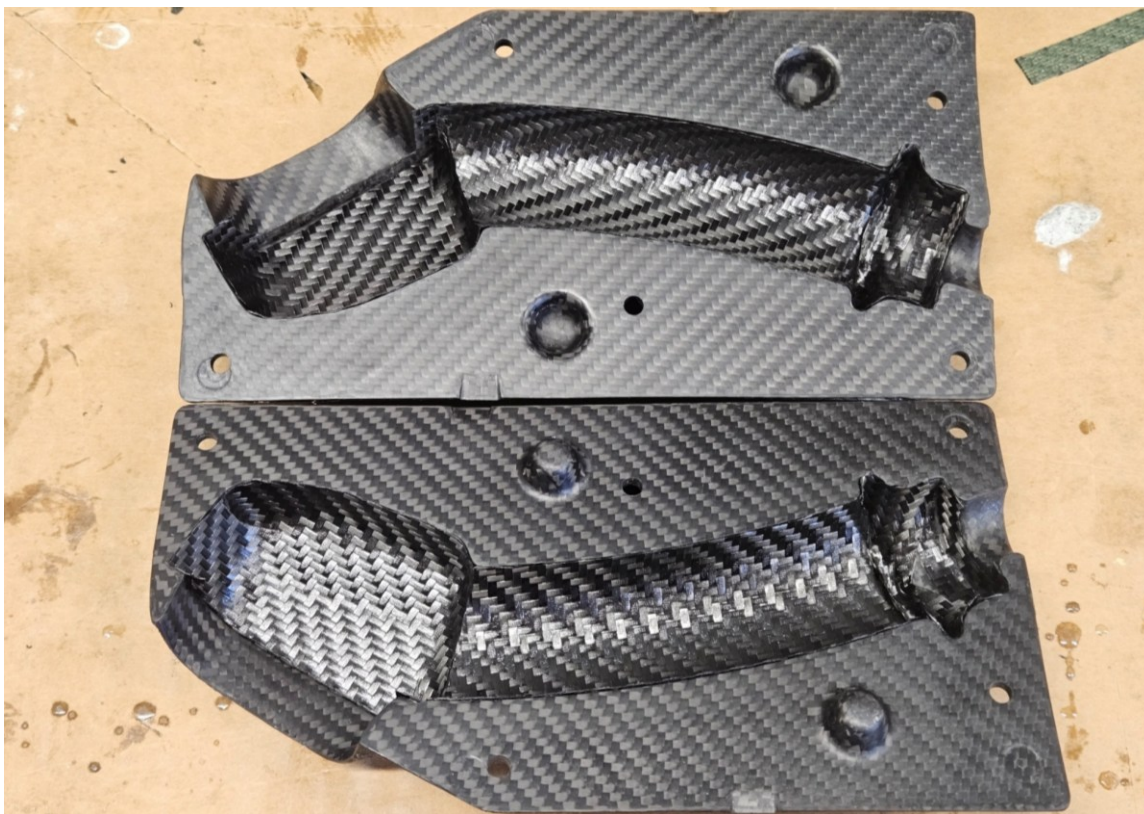
Obrázek 35 Kompozitní forma



Obrázek 36 Plnič pórů a separátor

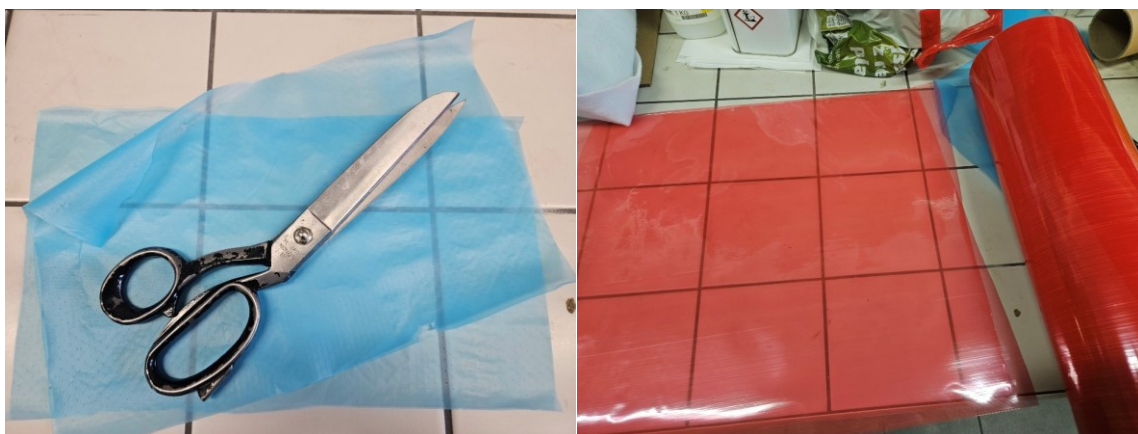
11.2 Položení první vrstvy a debulking

Po dostatečné době od nanesení plniče póru a separátoru byla do formy vložena první vrstva nástřihů.



Obrázek 37 Položená první vrstva ve formě

Následně byly nachystány dodatečné materiály pro debulking – odtrhová fólie, vakuovací fólie a odsávací rohož. Odsávací rohož byla vystřižena do přibližného tvaru dutiny formy.



Obrázek 38 Odtrhová fólie a vakuovací fólie



Obrázek 39 Nastříhané části odsávací rohože

Poté byla na obě strany formy aplikována odtrhová fólie, která byla vytvarována podle dutiny formy. Dále byly obě poloviny formy zabaleny do odsávací rohože a vloženy do vakuovací fólie. Konce vakuovací fólie byly spojeny pomocí oboustrannné těsnící pásky.



Obrázek 40 Odtrhová fólie před debulkingem



Obrázek 41 Zabalené poloviny formy v odsávací rohoži

Debulking je proces, při kterém se pomocí vývěvy odstraní vzduchové kapsy vzniklé mezi první vrstvou a formou nebo mezi jednotlivými vrstvami. Pomocí vývěvy a rezervoáru vznikl ve vakuovací fólii podtlak $-0,9$ Bar. Poté byla sestava na Obrázku 40 ponechána na dobu 15 minut v podtlaku. V posledním kroku debulkingu byla forma vyjmuta z vakuovací fólie a z pomocných materiálů.



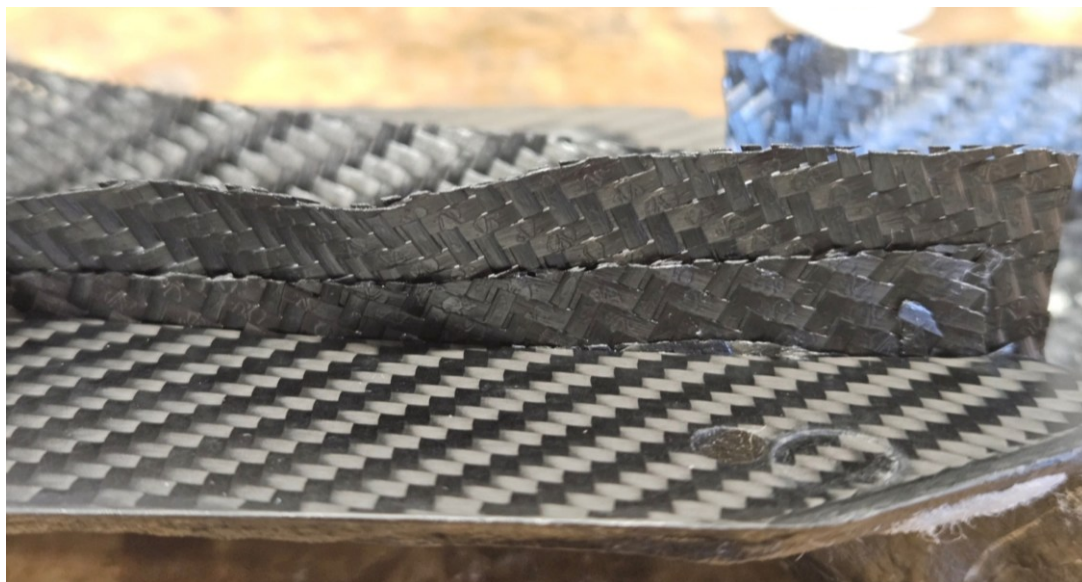
Obrázek 42 Debulking



Obrázek 43 Odtrhová fólie po debulkingu

11.3 Položení zbytku vrstev a zavakuování

Po debulkingu byly položeny do formy zbylé dvě vrstvy. Na Obrázku 42 je ukázáno překrytí druhé a třetí vrstvy na levé straně formy.



Obrázek 44 Překrytí druhé a třetí vrstvy prepregu

Následně byl vložen do formy vakuovací rukáv a obě poloviny formy byly spojeny šrouby.



Obrázek 45 Vložený rukáv ve formě

Poté byla forma zabalena do odsávací rohože a vložena do vakuovací fólie. Konce fólie a rukávu byly spojeny oboustrannou těsnicí páskou a zavakuovány. Pomocí vývěvy a rezervoáru vznikl ve vakuovací fólii opět podtlak -0,9 Bar. Sestava na Obrázku 47 byla ponechána na dobu 15 minut v podtlaku a sledována na vnik vzduchu do fólie. Tlak vzduchu se zvýšil pouze minimálně, a tedy fólie byla dostatečně utěsněna.



Obrázek 46 Zavakuovaná fólie s rukávem

11.4 Vytvrzování v autoklávu

Vytvrzování v autoklávu probíhalo v budově Centra polymerních systémů UTB Zlín. Použitý autokláv byl OP Panini S.r.l., model G00300572.



Obrázek 47 Autokláv OP Panini S.r.l

Sestava formy a vakuovací fólie byla připojena přes ventil k vakuovacímu systému autoklávu. Rukáv po odstranění vzduchu tlačil na dutinu formy, a tedy zevnitř začal tvarovat páku.

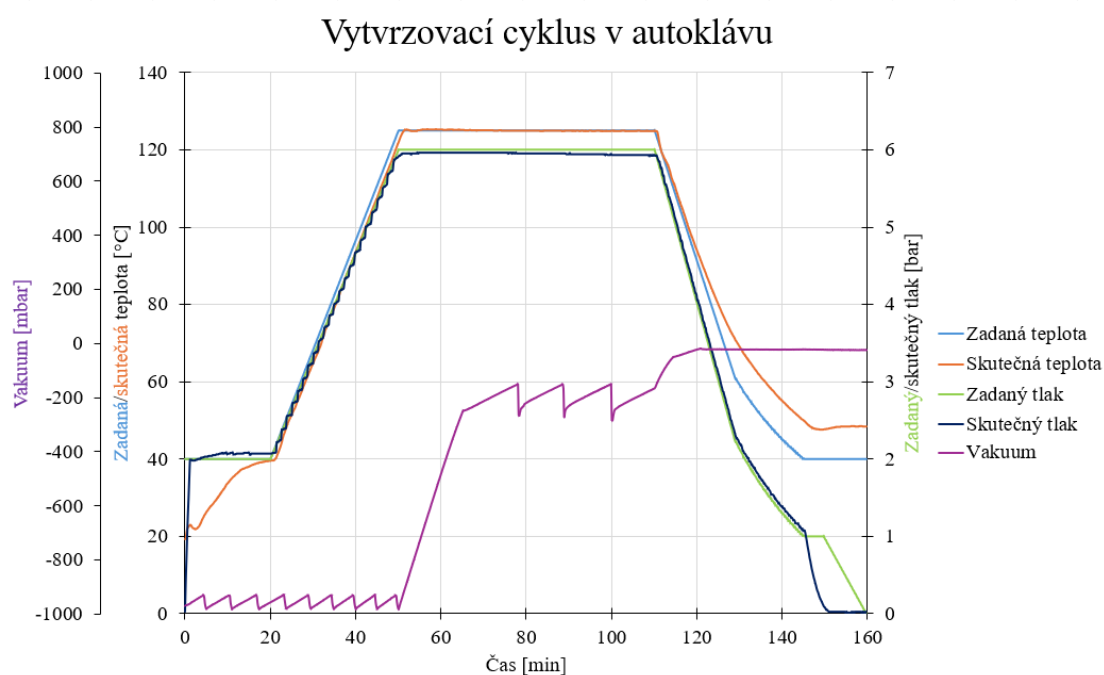


Obrázek 48 Forma připojená k autoklávu

Poté byl nastaven cyklus vytvrzování včetně časů, teplot, tlaku a vakua. Průběh vytvrzování lze vidět na Obrázku 48. Na levé straně grafu se nachází osa pro nastavenou a skutečnou teplotu (ve °C) a osa pro vakuum (v mbar). Na pravé straně grafu se nachází osa pro nastavený a skutečný tlak v barech. Na dolní vodorovné ose je znázorněn čas (v min).

PAKA		RESET		30% 00:00		CO	
IDLE							
10:36:52				PAKA			
SP	Start	ohrev_1	vydrz_va	chlaz_1	finish		
	00:20:00	00:30:00	01:00:00	00:25:00	00:10:00		
PHASE	S to 2.1	S to 2.1	S to 3.0	S to 4.0	S to 7.0		
TEMP	S to 40.0	R to 125.0	D	R to 40.0	D		
TAMB_LIM	S to 200.0	R to 200.0	R to 200.0	R to 200.0	D		
PRESS	S to 2.0	R to 6.0	D	R to 1.0	R to 0.0		
dT_Amb	S to 5.0	S to 5.0	S to 10.0	S to 10.0	D		
dT_Pz	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	D		
dT_CF	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	D		
Vuoto_Co	S to -980	S to -980	S to -200	S to 0.0	S to 0.0		
Ventilat	S to 50.0	D	D	D	S to 0.0		

Obrázek 49 Nastavení cyklu



Obrázek 50 Vytvrzovací cyklus v autoklávu

11.5 Vyjmutí z autoklávu a čištění

Po dokončení vytvrzování byla forma vyjmuta z autoklávu a následně byly z formy odstraněny všechny pomocné materiály (fólie, odsávací rohož, těsnící páska).



Obrázek 51 Sestava s formou po vyjmutí z autoklávu

V dalším kroku byla forma rozdělena pomocí šroubováku a páka byla vyjmuta z formy.



Obrázek 52 Odformování

V posledním kroku byl z páky vyjmut vakuovací rukáv a páka byla očištěna od zbytků separátoru.



Obrázek 53 Páka po vyjmutí z formy

Na jedné straně páky byl nalezen malý defekt ve formě absence vláken. Tento defekt nejspíše vzniknul kvůli přílišnému roztažení vláken v místě stříhu při pokládání nástřihů. Defekt lze tedy eliminovat pečlivějším pokládáním nástřihů, jako se podařilo ve stejné části páky na druhé straně.



Obrázek 54 Defekt na výrobku

12 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY PÁKY

Tabulka 9 Technologický postup výroby páky

č.o.	Operace	Pomůcky
1.	Čištění formy	Láh, hadřík
2.	Separace formy	Plnič pórů, separátor, ubrousek
3.	Kontrola správnosti separace	Lepicí páska
4.	Pokládání první vrstvy prepregu	Váleček, různé pomůcky
5.	Aplikace vakua na první vrstvu (debulking)	Odtrhová fólie, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnicí páska, vývěva, rezervoár, ventil, hadice
6.	Pokládání druhé a třetí vrstvy prepregu	Váleček, různé pomůcky
7.	Zavakuování	Vakuovací rukáv, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnicí páska, vývěva, rezervoár, ventil, hadice
8.	Vytvrzení v autoklávu	Autokláv
9.	Odformování	Různé pomůcky
10.	Očištění dílu	Brusný papír

ZÁVĚR

Diplomová práce se věnovala návrhu kompozitní formy včetně nástřihů, technologického postupu a cenové kalkulace. Dále se zabývala návrhem nástřihů a výrobou kompozitního dílu. Dílem je v tomto případě kompozitní páka.

Teoretická část diplomové práce se zabývala popisem kompozitních materiálů a jednotlivými složkami, které je tvoří, včetně vláken a matric. Dále byla popsána technologie prepregů včetně jejich výroby, skladování a vlastností. Následně byla vysvětlena technologie autoklávového lisování se zaměřením na vytvrzovací proces. Poté byly popsány formy pro kompozity včetně výrobních požadavků pro formy, dělení forem a materiálů, ze kterých se formy vyrábějí.

Kovové formy se používají pro sériovou výrobu kompozitů. Poskytují vysokou přesnost a dlouhou životnost. Jejich výhodou je vysoká tepelná vodivost, rozměrová stabilita a odolnost vůči tlaku i teplotě, nevýhodou pak vysoké pořizovací náklady a hmotnost. 3D tištěné formy se uplatňují zejména pro rychlé prototypování nebo výrobu jednoúčelových forem, např. pro jednorázové laminace nebo tvarově složité díly. Jejich výhodou je rychlá výroba, nízké náklady a možnost komplexních tvarů, naopak nevýhodou je omezená mechanická a tepelná odolnost, což omezuje jejich použití v autoklávech nebo při vysokých teplotách. Kompozitní formy se hodí pro malosériovou výrobu a prototypy. Nevýhodou je nižší životnost a menší rozměrová přesnost, zejména při cyklech v autoklávu, kde je vysoký tlak a teplota.

V poslední kapitole teoretické části byla pobrána metoda konečných prvků.

V praktické části byly nejprve navrženy nástřihy na formu pro výrobu páky pomocí programů NX Siemens a Autodesk AutoCAD 2024. Dále byl uveden technologický postup výroby formy a následně cenová kalkulace výroby formy.

V dalším kroku byly navrženy tři vrstvy nástřihů pro páku obdobným způsobem jako nástřihy pro formu. Aby došlo k překrytí vrstev, a tedy ke spojení dílu, byly nástřihy ve druhé a třetí vrstvě zvětšeny o 10 mm a 20 mm. Nástřihy druhé vrstvy byly natočeny o 45° z důvodu zvýšení pevnosti ve více směrech.

Další část praktické části byla věnována výrobě samotné kompozitní páky pomocí navržené formy. Nejprve byla forma naseparována a poté do ní byla položena první vrstva nástřihů. Poté byl proveden tzv. debulking, při kterém se pomocí vývěvy odstranily

vzduchové kapsy vzniklé mezi první vrstvou a formou. Po debulkingu byly do formy položeny zbylé dvě vrstvy a forma byla spojena šrouby a zabalena do pomocných materiálů.

Po kontrole těsnosti vakuovací fólie byla forma vložena do autoklávu, kde byla páka vytvrzena. V poslední části byla páka odformována. Na páce byl nalezen malý defekt ve formě absence vláken. Tento defekt nejspíše vzniknul kvůli přílišnému roztažení vláken v místě stříhu při pokládání nástřihů. Defekt lze tedy eliminovat pečlivějším pokládáním nástřihů, jako se podařilo ve stejné části páky na druhé straně.

Poslední kapitola praktické části je zaměřena na krátké shrnutí výroby páky ve formě technologického postupu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZHONG, Shuncong a NSENGIYUMVA, Walter. Nondestructive Testing and Evaluation of Fiber-Reinforced Composite Structures. Online. Springer Singapore, 2022. ISBN 978-981-19-0848-4. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-19-0848-4>. [cit. 2025-02-18].
- [2] BALASUBRAMANIAN, M. Composite materials and processing. Boca Raton: CRC Press, [2014]. ISBN 978-1-4398-8054-8. Dostupné také z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/natl-ebooks/detail.action?docID=1416272>.
- [3] PASTUSZAK, Przemysław D. a MUC, Aleksander. Application of Composite Materials in Modern Constructions. Online. Key Engineering Materials. 2013, roč. 542, s. 119-129. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.542.119>. [cit. 2025-02-18].
- [4] SHARMA, Sumit. Composite materials: mechanics, manufacturing and modeling. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2021. ISBN 978-0-367-68755-7.
- [5] HARPER, Lee a CLIFFORD, Mike (ed.). Design and Manufacture of Structural Composites. Online. Woodhead Publishing, 2023. ISBN 978-0-12-819161-3. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128191606/design-and-manufacture-of-structural-composites>. [cit. 2025-02-18].
- [6] THE JAPAN CARBONFIBER MANUFACTURERS ASSOCIATION. What is Carbon Fibers? Online. The Japan CarbonFiber Manufacturers Association. Dostupné z: <https://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/what.html>. [cit. 2025-02-18].
- [7] SHARMA, Dr & BHANDARI, Rakesh & AHERWAR, Amit & RIMASauskiene, Ruta. (2019). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. Materials Today: Proceedings. 21. 1559-1562. 10.1016/j.matpr.2019.11.086. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319337691?via%3Dihub> [cit. 2025-02-18].
- [8] COMPOSITES ONE. Understanding Thermoset and Thermoplastics. Online. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/understanding-thermoset-and-thermoplastics/>. [cit. 2025-02-18].

- [9] SAHA, Pradip K. *Aerospace manufacturing processes*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2017]. Dostupné z: <https://doi.org/9781315367965>.
- [10] HATTON, Gemma. *Tech Explained: Carbon Fibre Prepreg*. Online. 2 Feb 2018. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-carbon-fibre-prepreg/>. [cit. 2025-02-18].
- [11] CASTRO COMPOSITES. *What are Prepregs?* Online. Dostupné z: <https://castrocomposites.com/en/technical-information/what-are-prepregs/>. [cit. 2025-02-18].
- [12] MALLICK, P. K. *Processing of polymer matrix composites*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2018]. ISBN 978-1-4665-7822-7.
- [13] VON ROLL. *Prepregs: Key Technology for Innovative Fiber Composite Materials*. Online. 21 June 2024. Dostupné z: https://composites.vonroll.com/en/prepregs-schlueseltechnologie-fuer-innovative-faserverbundwerkstoffe/#Properties_of_Prepregs. [cit. 2025-02-18].
- [14] COMPOSITE ENVISIONS LLC. *WHAT IS PREPREG - EXPLANATION, ADVANTAGES AND DISADVANTAGES*. Online. 2022. Dostupné z: https://compositeenvisions.com/document/what-is-prepreg-explanation-advantages-and-disadvantages/?srsId=AfmBOops40p9ZmHUZm2cGr_CNiiQu7ZoVMsczqq6Wt8YcQqmodbP1rfu. [cit. 2025-02-19].
- [15] PAWAN, Dr.; MESHRAM, D.; VISHWARAJ SUPADU TAYADE, Mr. a CHANDRAKUMAR, Mr. *Manufacturing Techniques for Advanced Composite Materials*. Online. RK Publication, 2024. ISBN 9789348020307. Dostupné z: https://www.google.cz/books/edition/Manufacturing_Techniques_for_Advanced_Co/ojUtEQAAQBAJ?hl=cs&gbpv=0. [cit. 2025-02-19].
- [16] Online. Dostupné z: <https://www.aschome.com/index.php/en/products/autoclaves>. [cit. 2025-02-19].
- [17] DHAVAMANI, Dr. C. a RAJAN, Dr. A. B. K. *Composite Materials On Aerospace Engineering*. Online. Academic Guru Publishing House, 2023. ISBN 9788119843961. Dostupné z:

- https://www.google.cz/books/edition/Composite_Materials_On_Aerospace_Engineering/dpTrEAAAQBAJ?hl=cs&gbpv=0. [cit. 2025-02-19].
- [18] BREUER, Ulf Paul. *Commercial aircraft composite technology*. [Cham]: Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-31917-9.
- [19] LENGSELD, H. et al. *Composite Technology - Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.
- [20] STRONG, A. Brent. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods, and applications*. 2nd ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, c2008. ISBN 978-0-87263-854-9.
- [21] YI, Xiao-Su; DU, Shanyi a ZHANG, Litong (ed.). *Composite Materials Engineering, Volume 2*. Online. Springer Singapore, 2018. ISBN 978-981-10-5690-1. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-5690-1>. [cit. 2025-02-19].
- [22] KEEN, Nigel; JOB, Stella a BLAND, Richard. *Mould Tooling for Fibre-Reinforced Polymer Composites*. Online. 2023. Dostupné z: <https://compositesuk.co.uk/industry-support/good-practice-guides/>. [cit. 2025-02-19].
- [23] *An Introduction to Advanced Composite Fabrication*. Online. 26 May 2020. Dostupné z: <https://www.engineering.com/an-introduction-to-advanced-composite-fabrication/>. [cit. 2025-02-19].
- [24] Dawn, Com&Sens and ESA partner on smart composite overwrapped pressure vessels for space. Online. Dostupné z: <https://www.dawnaerospace.com/latest-news/smartcopvs>. [cit. 2025-02-19].
- [25] *Removable Tooling*. Online. Dostupné z: <https://acmtucson.com/removable-tooling/>. [cit. 2025-02-19].
- [26] PIERCAN. *Compression Bladders*. Online. Dostupné z: <https://piercan-en.piercan.fr/piercan-tech/elastomer-products/tech-parts-range/compression-bladders>. [cit. 2025-02-19].
- [27] SMI COMPOSITES. *What You Need to Know About the Bladder Molding Process*. Online. Dostupné z: <https://www.smicomposites.com/what-you-need-to-know-about-the-bladder-molding-process/>. [cit. 2025-02-19].

- [28] Additive Manufacturing Makes Sense. Online. Dostupné z: <https://proto3000.com/additive-manufacturing-opportunities-in-the-automotive-industry/>. [cit. 2025-02-19].
- [29] FDM Soluble Cores Simplify Production of Composite Parts. Online. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/articles/fdm-soluble-cores-simplify-production-composite-parts/>. [cit. 2025-02-19].
- [30] FIBREGLAST. Casting and Molding: Urethanes vs. Composites. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.fibreglast.com/blogs/learning-center/casting-and-molding-urethanes-vs-composites>. [cit. 2025-02-19].
- [31] DAY, Lewin. Techniques For Making Complex Carbon Fibre Tube Parts. Online. July 18 2020. Dostupné z: <https://hackaday.com/2020/07/18/techniques-for-making-complex-carbon-fibre-tube-parts/>. [cit. 2025-02-19].
- [32] HASAN, Zeaid. Tooling for Composite Aerospace Structures. Online. Butterworth-Heinemann, 2020. ISBN 978-0-12-819957-2. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2019-0-00982-X>. [cit. 2025-02-19].
- [33] Metallic tooling and layup molds. Online. Dostupné z: <http://leawichita.com/ProductsEquipment/MetallicTooling/>. [cit. 2025-02-19].
- [34] PELIN, George; SONMEZ, Maria a PELIN, Cristina-Elisabeta. The Use of Additive Manufacturing Techniques in the Development of Polymeric Molds: A Review. Online. Polymers. 2024, roč. 2024, č. 16, s. 42. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym16081055>. [cit. 2025-02-19].
- [35] 3D Printing for Composite Tooling. Online. Dostupné z: <https://www.objective3d.com.au/solutions/additive-manufacturing/tooling/composite-tooling/>. [cit. 2025-02-19].
- [36] PAESSLER, Erik. 3D printed molds and tooling. Online. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/segments/large-format-additive-manufacturing-for-autoclave-molds-and-tooling/>. [cit. 2025-02-19].
- [37] Composite tooling as an enabler for next generation adoption of composite materials. Online. 17 November 2021. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/composite-tooling-as-an-enabler-for-next-generation-adoption-of-composite-materials>. [cit. 2025-02-19].

- [38] KHAN, Ruhul A.; KHAN, Mubarak A.; ZAMAN, Haydar U.; PERVIN, Shamim; KHAN, Nuruzzaman et al. Comparative Studies of Mechanical and Interfacial Properties Between Jute and E-glass Fiber-reinforced Polypropylene Composites. Online. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2010, roč. 29, č. 7, s. 1078-1088. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684409103148>. [cit. 2025-02-19].
- [39] Innovative Hybrid Invar-Composite Molds Reduce Weight and Lead Time. Online. 23 January 2018. Dostupné z: <https://ascentaerospace.com/innovative-hybrid-invar-composite-molds-reduce-weight-and-lead-time/>. [cit. 2025-02-19].
- [40] BIANCHI, Iacopo; GENTILI, Serena; GRECO, Luciano; MANCIA, Tommaso; SIMONCINI, Michela et al. 3D printed molds for manufacturing of CFRP components. Online. Roč. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.140>. [cit. 2025-04-29].
- [41] BIANCHI, Iacopo; ANDREOZZI, Marina; MANCIA, Tommaso a SIMONCINI, Michela. Investigation on the mechanical and environmental behaviour of 3D-printed molds for manufacturing of CFRP components. Online. Roč. 2024. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14778-z>. [cit. 2025-04-29].
- [42] SKOVAJSA, Michal; SEDLACEK, Frantisek a MRAZEK, Martin. Design of Multi-Part Mould for Production of a Medium-Large Carbon Fibre Component. Online. Manufacturing Technology. 2020, roč. 20, č. 3, s. 378-384. ISSN 12132489. Dostupné z: <https://doi.org/10.21062/mft.2020.055>. [cit. 2025-04-29].
- [43] KUROWSKI, Paul M. Finite Element Analysis for Design Engineers. Third edition. Warrendale, PAU: SAE International, [2023]. ISBN 978-1-4686-0536-5. Dostupné také z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/natl-ebooks/detail.action?docID=30336170>.
- [44] FATHIZADEH, Zahed; ABOONAJMI, Mohammad a HASSAN-BEYGI, Seyed Reza. Apple Firmness Prediction During Shelf Life Using the Finite Element Method and Acoustic Vibration Response. Online. Erwerbs-Obstbau. 2023, roč. 65, č. 6, s. 2197-2206. ISSN 0014-0309. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10341-023-00952-2>. [cit. 2025-04-29].

- [45] QUIJANO, Christopher. When Is It Just a Pretty Picture? Tips For a Better Structural Analysis. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/tips-better-structural-analysis/>. [cit. 2025-04-29].
- [46] MADIÉ, Dominique. The Fundamentals of Mesh Generation in Finite Element Analysis. Online. 2023. ISBN 978-1-9990475-3-5. Dostupné z: <https://www.fea-academy.com/pdf/FEA%20Academy%20-%20The%20Fundamentals%20of%20Mesh%20Generation%20in%20Finite%20Element%20Analysis.pdf>. [cit. 2025-04-29].
- [46] XIAO, Z., L.T. HARPER, A.R. KENNEDY a N.A. WARRIOR. A water-soluble core material for manufacturing hollow composite sections. *Composite Structures*. 2017, 182, 380-390. ISSN 0263-8223. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.058](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.058)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení kompozitů, a) částicové, b) s krátkými vlákny, c) s dlouhými vlákny, d) laminátové [3].....	17
Obrázek 2 Globální trh konstrukčních kompozitů v roce 2019 [5]	19
Obrázek 3 E-sklo v polypropyleny [38]	20
Obrázek 4 Uhlíkové vlákno pod mikroskopem [6]	21
Obrázek 5 Roving z uhlíkových vláken [10]	24
Obrázek 6 Tkaninový prepreg [11].....	25
Obrázek 7 Metoda rozpouštědlového máčení [12]	26
Obrázek 8 Autokláv [16]	30
Obrázek 9 Průběh vytvrzování [18].....	32
Obrázek 10 Hybridní forma z invaru a kompozitu [39]	34
Obrázek 11 Tlaková nádoba vyrobená technologií navíjení vláken [24]	39
Obrázek 12 Nafukovací rukáv [26]	40
Obrázek 13 Rozpustné jádro vyrobené technologií 3D tisku [28].....	41
Obrázek 14 Rozebíratelná forma [31]	44
Obrázek 15 Hliníková forma [33].....	46
Obrázek 16 Forma vyrobená technologií 3D tisku [35]	48
Obrázek 17 3D tisk formy pro klapku [41].....	49
Obrázek 18 Kompozitní forma z uhlíkového prepregu [37].....	52
Obrázek 19 Kompozitní forma pro monokok [42]	52
Obrázek 20 Model koule před a po síťování [44].....	53
Obrázek 21 Typy elementů [45]	56
Obrázek 22 Opravený defekt na epoxidové formě	59
Obrázek 23 Opravený defekt na hraně epoxidové formy	59
Obrázek 24 Kompozitní šablona.....	60
Obrázek 25 Nastavení 2D sítě	61
Obrázek 26 Nastavení matrice	62
Obrázek 27 Nastavení prepregu.....	62
Obrázek 28 Nastavení vrstev	63
Obrázek 29 Výběr ploch v <i>Define Draping Input</i>	64
Obrázek 30 Výběr stříhů v <i>Define Draping Input</i>	64
Obrázek 31 Dokončená simulace nástřihu.....	65
Obrázek 32 Zobrazení nástřihu pro jeden tvarový prvek	65
Obrázek 33 Nástřihový plán pro první vrstvu formy.....	66

Obrázek 34 Nástřihy pro výrobu páky	70
Obrázek 35 Kompozitní forma	71
Obrázek 36 Plnič pórů a separátor	71
Obrázek 37 Položená první vrstva ve formě	72
Obrázek 38 Odtrhová fólie a vakuovací fólie	72
Obrázek 40 Nastříhané části odsávací rohože	73
Obrázek 41 Odtrhová fólie před debulkingem	73
Obrázek 42 Zabalené poloviny formy v odsávací rohoži	74
Obrázek 43 Debulking	75
Obrázek 44 Odtrhová fólie po debulkingu	75
Obrázek 45 Překrytí druhé a třetí vrstvy prepregu	76
Obrázek 46 Vložený rukáv ve formě	76
Obrázek 47 Zavakuovaná fólie s rukávem	77
Obrázek 48 Autokláv OP Panini S.r.l	77
Obrázek 49 Forma připojená k autoklávu	78
Obrázek 50 Nastavení cyklu	78
Obrázek 51 Vytvrzovací cyklus v autoklávu	79
Obrázek 52 Sestava s formou po vyjmutí z autoklávu	79
Obrázek 53 Odformování	80
Obrázek 54 Páka po vyjmutí z formy	80
Obrázek 55 Defekt na výrobku	81

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Požadavky na formy [19].....	35
Tabulka 2 Rozdělení forem podle tvaru a počtu částí [21].....	38
Tabulka 3 Požadavky na materiály forem [21].....	45
Tabulka 4 Technologický postup výroby formy.....	67
Tabulka 5 Ceny materiálů.....	68
Tabulka 6 Odhadované náklady na suroviny.....	68
Tabulka 7 Časy jednotlivých operací.....	69
Tabulka 8 Celkové náklady výroby.....	69
Tabulka 9 Technologický postup výroby páky.....	82

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: MATERIÁLOVÝ LIST TKANINY

Příloha P II: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST TKANINY



Balanced Carbon Fabric

WOVEN FABRIC DATA SHEET

G. Angeloni reference

GG 285 T

CHARACTERISTICS	
Mass per unit area	gr/sqm.
Weave	
Standard Width	mm.
Laminate thickness	mm.
Other informations	

Nominal	Tolerance	Normative
285	± 5%	ISO 4605
2x2 Twill		ISO 2113
1000/1200	± 2,5%	
0,28	± 2,5%	(**)
Loomstate		

Nominal Construction	
Fibre description	
Thread Count	ends/cm.
Weight distribution	gr/sqm.
	%

WARP		WEFT	
HR carbon fiber 3K - 200 tex		HR carbon fiber 3K - 200 tex	
7,0	ISO 4602	7,0	ISO 4602
3k carbon fibre :	142 50%	3k carbon fibre :	142 50%

(**) Theoretical thickness for an epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note : Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct.
No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality.
All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

G. Angeloni srl

via Abate Tommaso , 72/A5 - 30020 Quarto d'Altino (VE) - ITALY

Tel. +39 0422 823801 - 780580 Fax +39 0422 782782

E-Mail : info@g-angeloni.com

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE



Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 www.impregnatex.it

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepegging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetical requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

BENEFITS AND FEATURES

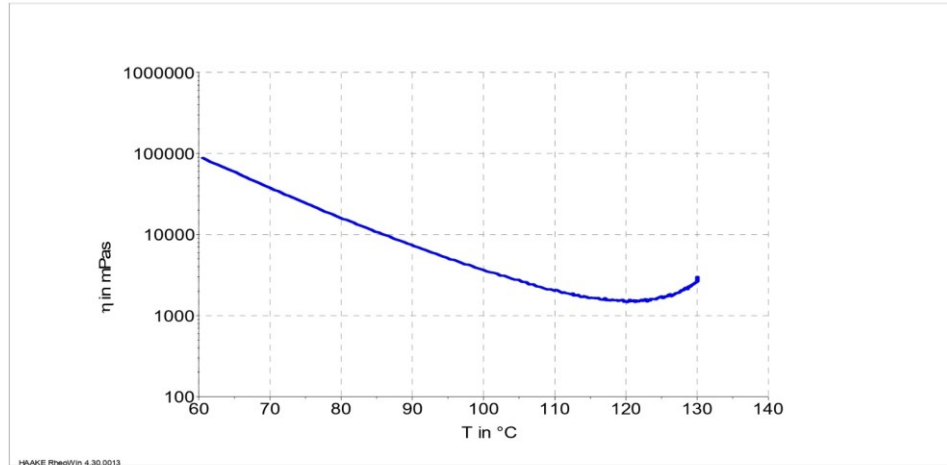
- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm ³	1,15 ÷ 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	6'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 ÷ 26
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off.
Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/ min.

**CURING CYCLES SUGGESTED**

TEMPERATURES	TIME	Tg (TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

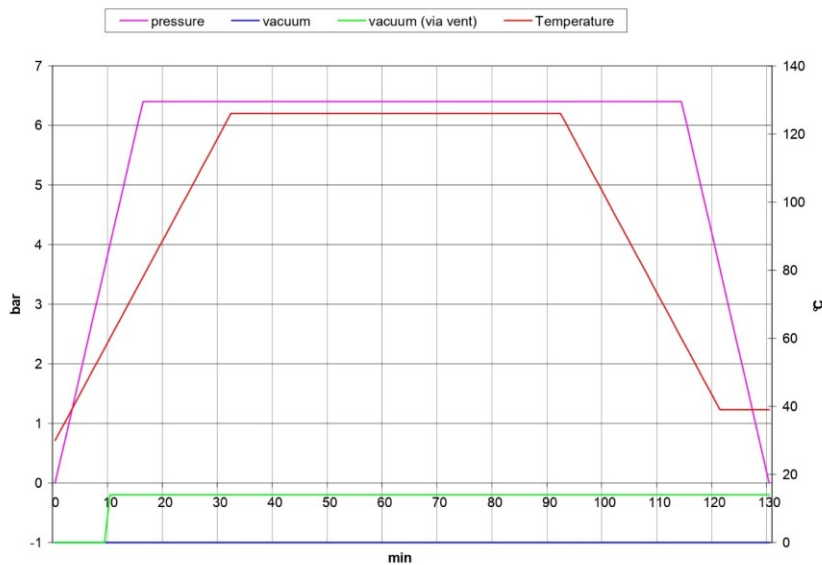
PROCESS DESCRIPTIONS

Autoclave:

125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply -0.9 ÷ -1.0 bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4÷7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to -0.2 bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 60°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave

AUTOCLAVE CYCLE



Hot Press:

125°C cycle:

1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C at 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

IMP503 Z is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregnatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical data below were performed on laminate cured by hot press technology at 125°C curing cycle (see above).

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTMD790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
GG630T	730	57	800	56	64
GG428T	800	52	-	64	59
GG204T-V (1)	800	54	-	64	59
GG205T	810	55	750	68	58
GG240T	800	54	760	65	56
GG380T	800	55	730	64	62
GG90P	655	52	-	70	65
GG204P	810	53	-	66	59
CX400	938	56	-	54	62 (provini ricavati in direzione +45°)
GG800T	822	60	-	52	64
GG285T4	805	51	-	61	65
VV290T	630	27	-	57	64.8
VV380	710	23	-	64	60

FABRIC	Flexural Strenght ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
VV580T	760	30	1160	60	56
VV700	750	25	-	56	64
KK300	440	21	-	44	56
GV330UD	1150	115	700	73	66
GV335UD	650	250	-	62	54

The values are to be understood as the average of the experimental values observed.

- (1) is also available as stabilized WF1, for exposed areas where high aesthetic of textile construction must be maintained during the process.

These mechanical data were obtained by hot press technology. With different curing cycle technology these data can be different.

PREPREG STORAGE LIFE

This prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. Storage life at different temperatures:

- 12 Months at -18 °C
- 5 weeks at +23 °C

After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag to prevent water condensation.

PRECAUTIONS FOR USE

To handle properly the prepreg product observe the established precautions.

Operators working with this prepreg should wear clean and impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent the prepreg contamination
Safety data sheet is available for this product.

NOTE

The above mentioned technical informations are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.
Impregnatex Compositi will reserve to made further modification to this paperwork