

Materiálově-technologický návrh kompozitní formy pro daný díl

Bc. Miroslav Joštic

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav Joštic**

Osobní číslo: **T13618**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Materiálově-technologický návrh kompozitní formy pro daný díl**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši k danému tématu, kompozitní materiály, RTM technologie.
2. Konstrukční řešení RTM forem.
3. Modely a volba materiálu pro výrobu forem.
4. Přehled vhodných dílů pro výrobu RTM technologií.
5. Navrhněte konstrukční řešení RTM forem pro daný díl.
6. Navrhněte technologický postup výroby RTM formy, volba materiálu.
7. Volba technologických parametrů pro RTM technologii (teplota, tlak, čas).
8. Diskuze dosažených výsledků a závěr.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Doporučená literatura dle vedoucího diplomové práce.

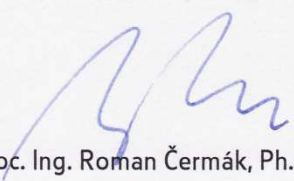
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 9. 10. 2014


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

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

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

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

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá materiálově-technologickým návrhem kompozitní formy pro daný díl pomocí RTM technologie. Teoretická část této diplomové práce pojednává o jednotlivých druzích RTM technologií. Jsou zde popsány druhy matric a vyztužujících vláken. Dále je zde popsáno konstrukční řešení RTM forem, materiály forem a modely. V praktické části je tato diplomová práce zaměřena na konkrétní konstrukční řešení formy pro daný díl, návrh technologického postupu výroby formy, volba materiálu a volba technologických parametrů pro RTM technologii. Závěr je soustředěn na diskuzi dosažených výsledků.

Klíčová slova: kompozit, matrice, výztuž, vlákno, RTM (vysokotlaké vstřikování), pryskyřice, model, forma.

ABSTRACT

This master thesis deals with material-technological design of composite molds for the part by using RTM technology. The theoretical part of this thesis discusses the various kinds of RTM technology. There are described the types of matrixes and reinforcing fibers. Furthermore, there is described design solutions RTM molds, mold materials and models. The practical part of this thesis focuses on specific design solutions for the mold part design technological process of form, material choice and the choice of technological parameters for RTM technology. Finally, it focuses on the discussion of results.

Keywords: composite, matrix, reinforcement, fiber, RTM (Resin Transfer Molding), resin, model, form.

Na prvním místě bych rád poděkoval své vedoucí doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za odborný dohled, cenné informace, rady, důležité připomínky a za příjemnou spolupráci při tvorbě této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Rusnákově z firmy FORM s.r.o. a Ing. Vaculčíkovi z firmy AERO Vodochody AEROSPACE a.s. za jejich rady a připomínky při řešení praktické části diplomové práce.

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

Prohlašuji, že jsem zpracovával diplomovou práci samostatně a zpracovanou literaturu jsem citoval dle platné normy ČSN ISO 690.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY A RTM TECHNOLOGIE	12
1.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1.1 Matrice	13
1.1.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R).....	15
1.1.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R).....	16
1.1.1.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R).....	16
1.1.1.4 Fenolické pryskyřice (PF-R).....	17
1.1.2 Vyztužující vlákna	17
1.1.2.1 Skleněná vlákna	18
1.1.2.2 Aramidová vlákna.....	20
1.1.2.3 Uhlíková vlákna.....	20
1.1.2.4 Přírodní vlákna.....	21
1.2 RTM TECHNOLOGIE (“RESIN TRANSFER MOLDING”).....	22
1.2.1 Základní výrobní kroky.....	23
1.2.2 Uplatňování teple a tlaku	24
1.2.3 Výhody RTM procesu.....	25
1.2.4 Limity RTM procesu.....	26
1.2.5 Varianty RTM procesu.....	26
1.2.5.1 LRTM (“RTM Light“).....	26
1.2.5.2 VARTM (“Vacuum Assisted RTM”).....	26
1.2.5.3 SCRIMP (“Seeman Composite Resin Infusion Molding Process”).....	27
1.2.5.4 SQRTM (“Same Qualified RTM”).....	28
1.2.5.5 HS-RTM (“High-Speed RTM”).....	28
1.2.5.6 Přímě injektované RTM	28
1.2.5.7 HP-RTM (“High Pressure RTM”).....	28
2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ RTM FOREM	29
2.1 VSTUPNÍ PORTY A ODVZDUŠŇOVACÍ OTVORY	30
2.2 OKRAJE RTM FORMY.....	31
2.3 DETAILNÍ ZOBRAZENÍ KONSTRUKCE RTM FORMY	31
2.4 UZAVŘENÍ RTM FORMY.....	32
3 MODELÝ A VOLBA MATERIÁLU PRO VÝROBU FOREM	33
3.1 MODELÝ.....	33
3.2 VOLBA MATERIÁLU PRO VÝROBU FOREM	34
3.3 POROVNANÍ TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU FOREM.....	36
3.4 VÝROBA CNC FRÉZOVÁNÍM	39
3.4.1 Stroje pro obrábění kompozitních materiálů.....	40
3.4.2 Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů.....	41
4 PŘEHLED VHODNÝCH DÍLŮ PRO VÝROBU RTM TECHNOLOGIÍ	43
4.1 DÍLY V LETECKÉM PRŮMYSLU:.....	43
4.1.1 Kompozitní vrtulový list	43
4.1.2 Nosníky podvozku malého dopravního letadla.....	44

4.2	DÍLY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU:	45
4.3	DALŠÍ TYPICKÉ DÍLY:	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	49
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	50
6	NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ RTM FORMY PRO DANÝ DÍL	51
6.1	NÁVRH DÍLU	51
6.2	NÁVRH MODELU	54
6.3	NÁVRH FORMY	55
6.4	KONSTRUKCE MANIPULAČNÍHO VOZÍKU	58
7	NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU VÝROBY RTM FORMY A VOLBA MATERIÁLU	61
8	VOLBA TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PRO RTM TECHNOLOGII (TEPLOTA, TLAK, ČAS).....	66
9	DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	68
	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK.....	76
	SEZNAM PŘÍLOH.....	77

ÚVOD

Cílem této diplomové práce je materiálově-technologický návrh kompozitní formy pro konkrétní díl, a také přiblížit čtenáři výrobu a vlastnosti kompozitu.

Daný díl bude vyráběn pomocí RTM technologie, kdy tato technologie nese řadu výhod, jako například nízké investiční náklady, dobré rozměrové vlastnosti. Ačkoliv RTM proces nese řadu výhod, má i svá slabší místa a to, že konstrukce nástroje je složitá. Tato technologie je vhodná pro střední a velké série. Sériovost je stanovena na 500ks výrobku.

Cílem je i stanovení technologických parametru pro RTM technologii, jako je čas, tlak a teplota. Konstrukční návrh bude vypracován v programu CATIA a přílohou této diplomové práce bude i výkresová dokumentace.

V nynější době se v praxi stále více s kompozitními výrobky setkáváme a to především díky jejich nízké hmotnosti, kdy nahrazujeme ocelové díly kompozitem. Kompozit je výhodnější z hlediska srovnání pevnosti a jeho hustoty. Kompozity se nejvíce používají v automobilovém průmyslu a stavebnictví, dále se však používají v leteckém průmyslu, lodním průmyslu, k výrobě sportovních potřeb, ve vojenské a vesmírné technice.

Kompozit je materiál s velkou budoucností, tento materiál nahradí mnoho dalších materiálů používaných v praxi, i když v nynější době je velice nákladný na recyklaci.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY A RTM TECHNOLOGIE

1.1 Kompozitní materiály

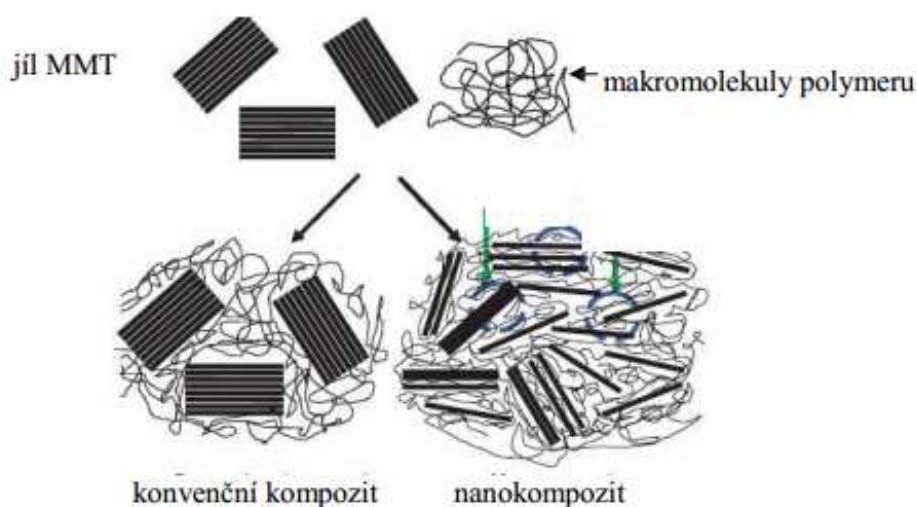
Slovo „kompozitní“ znamená „vytvořený či skládající se ze dvou nebo více odlišných částí“. Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek neboli fází je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu mají zřetelně odlišné vlastnosti od vlastností jeho složek, označujeme takový materiál za kompozit. [1]

Tvrší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. [2]

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. V průmyslu mají největší význam mikrokompozitní materiály, u kterých největší příčné rozměry výztuže (vláken nebo částic) jsou v rozmezí 10^0 až 10^2 μm . Oproti kovům a jejím slitinám mají mikrokompozitní menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě, tj. dosahují velké měrné pevnosti a měrného modulu pružnosti. [2]

Makrokompozity obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm a jsou používány především ve stavebnictví. [2]

Nanokompozity jsou kompozitní materiály, které mají rozměr výztuže (délka částice nebo průměru vlákna) v jednotkách nm. [2]



Obr. 1. Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem s výztuží na bázi destičkovitých částí jílu – montmorillonitu (MMT.) [2]

1.1.1 Matrice

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken, tj.:

- přenos namáhání na vlákna,
- převedení namáhání z vlákna na vlákno,
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku,
- ochrana vlákna před vlivy okolí. [3]

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a případně i chemické vazby mezi vláknem a maticí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. [3]

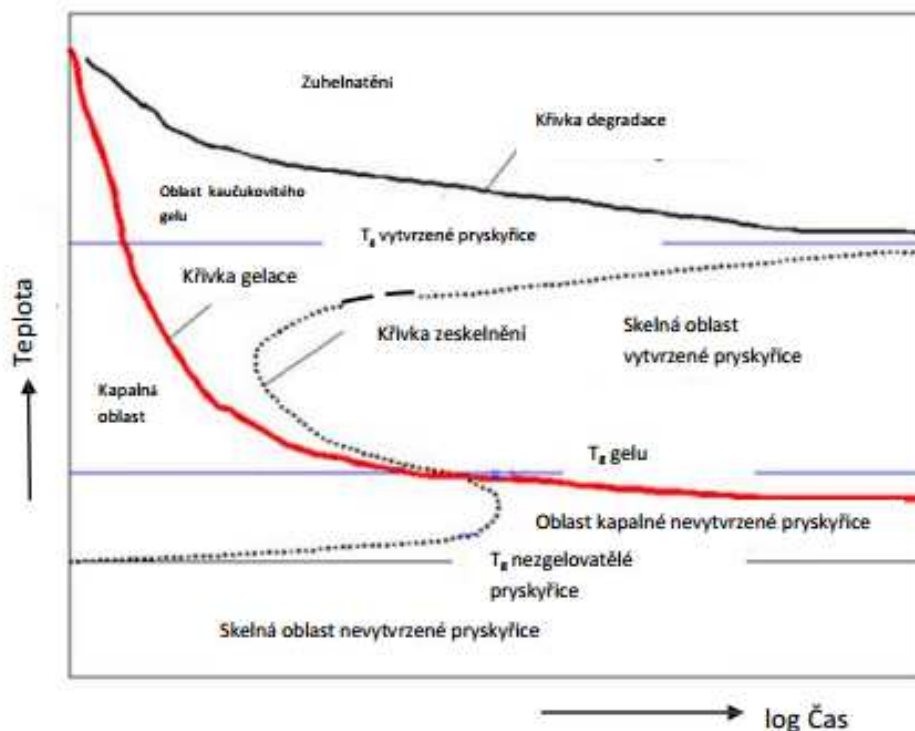
U polymerních kompozitů se matrice dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. Nejpoužívanější matrice jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP) a z termoplastů polypropyleny (PP) a polyamidy (PA). [2][3]

Tab. 1. Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách. [3]

Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za studena	10 až 40°C	stovky mPa.s
Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzování za tepla	140°C	1000mPa.s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice (EP-R) vytvrzovaná za tepla	např. 130°C	stovky mPa.s
Polypropylen (PP)	200 až 270°C	10 ³ Pa.s
Polyeteréterketon (PEEK)	350 až 400°C	10 ³ až 10 ⁴ Pa.s

Zpracovatelské teploty termoplastů jsou mnohem vyšší a jsou omezeny teplotou rozkladu, jejich viskozita při zpracování je ve srovnání s termosety sto až tisícinásobná. Termosetické pryskyřice se vytvrzují přidávkem katalyzátoru a urychlovače, případně dodáním energie (teplo, záření) – tak získá kompozit své konečné vlastnosti. Tyto trojrozměrně zesíťované materiály dosahují sice vysokých hodnot pevnosti a tuhosti (E-modulu), ale jsou často křehké a jejich tažnost se pohybuje v řádu procent. Zlepšení houževnatosti lze docílit přidávkem modifikačních přísad. [3]

Kinetiku vytvrzovací reakce pryskyřice při různých teplotách lze v případě čisté pryskyřice (bez rozpouštědla) znázornit v diagramu TTT (“Time-Temperature-Transformation”).[2]



Obr. 2. Diagram TTT (“Time-Temperature-Transformation”). [2]

Výhodou termoplastů oproti termosetům je právě jejich houževnatost. Jen minimum termoplastových kompozitů dosáhne obdobných hodnot E-modulu tepelné odolnosti a odolnosti proti chemickým vlivům jako termosety. Výhodou termoplastů je, že v průběhu jejich zpracování probíhá pouze roztavení a ztuhnutí matrice a nikoli chemický proces, který by ovlivnil jakost nebo narušování životního prostředí. Termoplast prosycuje vlákna v roztavené fázi, což je vzhledem k řádově vyšší viskozitě problematictější proces než u termosetických pryskyřic. Proto jsou zapotřebí zařízení, která urychlují prosycování působením vnějších sil. Toto prosycování neprobíhá na rozdíl od reaktivních pryskyřic

zpracováním v kapalném stavu, přímo u výrobce, nýbrž v samotném výrobním postupu – obdobně jako u prepregu. [3]

Termoplastické lisovací hmoty vyztužené krátkými vlákny o délce kolem 0,2mm, vhodné pro sériovou výrobu vstřikováním, jsou dnes běžné používány a jejich podíl na trhu je daleko vyšší než podíl termosetů. Polypropylen, polyamid, polyester polykarbonát a mnoho dalších termoplastů, vyztužených 50 a více procenty skelněných nebo uhlíkových vláken, patří mezi materiály pro velmi namáhané aplikace. Menší ale stále rostoucí skupinou, tvoří termoplasty vyztužené rohoží nebo tkaninou, které se zpracovávají na velkoplošné dílce lisováním. Plasty vyztužené skleněnými vlákny dosahují v závislosti na použitých složkách – hodnot mechanických vlastností ve velmi širokém rozsahu. [3]

1.1.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Patří k nejpoužívanějším pryskyřicím. Tyto reaktivní pryskyřice jsou bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které je možno vytvrzovat za normální nebo zvýšené teploty, aniž by vznikaly těkavé vedlejší produkty. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9%. [2][3]

Existuje mnoho typů polyesterových pryskyřic s nejrůznějšími vlastnostmi, které se liší druhem základní molekuly. Důležitou úlohu ve stavbě makromolekuly hraje délka polyesterového řetězce, obsah dvojných vazeb a další detaily stavby molekuly, například flexibilní prvky. Nenasycená polyesterová pryskyřice je tím reaktivnější, čím vyšší je obsah polymerizovatelných dvojných vazeb ve výchozích surovinách. [3]

Lisovací hmoty z nenasyčených polyesterových pryskyřic je nutno zcela vytvrdit a zamezit tak možným změnám při jejich aplikaci (dodatečné smrštění, nasákavost, snížená chemická odolnost). Vytvrzování většiny těchto hmot je při pokojové teplotě silně zpomaleno působením vzdušného kyslíku, nezakryté plochy zůstávají lepivé. Viskozita pryskyřice je z největší části závislá na obsahu styrenu, které se pohybuje v rozsahu 30 až 50%. [3]

Výběrem výchozích materiálu a pomocí různých přísad lze u nenasyčených polyesterových pryskyřic měnit zpracovatelnost i vlastnosti vyrobených lisovacích hmot ve velkém rozsahu. Přísady se často používají jako objemové plnivo i jako zlevňující materiál. Mezi důležitá plniva patří křída, kaolin a hydroxid hlinitý. Přísady snižují smrštění a součinitel tepelného délkové roztažnosti. Kromě přísad je možno měnit vlastnosti nenasyčených polyesterových pryskyřic změnou chemické struktury a přidávkem aditiv. [3]

1.1.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Vinylesterové pryskyřice se liší od nenasycených polyesterových pryskyřic tím, že zesíťování probíhá pomocí koncových metakrylátových skupin, kde jsou esterové vazby. U vinylesterových pryskyřic na bázi bisfenolu A je příčinou vysoké houževnatosti, velmi vysoké odolnosti proti alkalickému prostředí, ale také vzhledem ke dvojným vazbám i nižší tvarové stálosti za tepla. Vinylesterové pryskyřice, vycházejí ze základních složek fenolických pryskyřic, jsou podstatně reaktivnější a vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají nižší viskozitu a vyšší stupeň zesíťování. Jsou proto odolné vyšším teplotám, ale také reaktivně křehké, čímž se podobají materiálům z nenasycených polyesterových pryskyřic na bázi propoxylovaného bisfenolu A. Nedosahují sice jejich odolností proti alkáliím, ale jsou odolné proti aromatickým uhlovodíkům. [3]

Vinylesterové pryskyřice, známe též pod názvem fenakrylátové pryskyřice (PHA-R), se zpracovávají stejně jako nenasycené polyesterové pryskyřice. Jsou většinou rozpuštěny ve styrenu. Vinylesteruretonové pryskyřice (VEU-R), nazývané též hybridní vinylesteruretanové pryskyřice, spojují dobré mechanické vlastnosti s vynikající odolností proti vysokým teplotám a vysokou chemickou odolností, která je při dlouhodobé expozici lepší než u běžných vinylesterových pryskyřic. [3]

Vinylesterové pryskyřice mají oproti nenasyceným polyesterovým pryskyřicím dvě přednosti: jsou výrazně houževnatější a mají vyšší chemickou odolnost. Předností vinylesterových systémů v porovnání s epoxidovými pryskyřicemi je jejich nižší viskozita a říditelná vytvrzovací reakce, která umožňuje snadnější zpracování. Vzhledem k uvedeným vlastnostem se vinylesterové pryskyřice používají zejména v oblastech s vysokým korozním namáháním. Houževnatost vinylesterových pryskyřic je předpokladem použití ve formě výlisku. [3]

1.1.1.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice jsou za normální teploty kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat přídatné pomocné látky, např. rozpouštědla. V molekule obsahují nejméně jednu, většinou dvě epoxidové skupiny, nutné jako funkční skupiny pro stavbu makromolekuly. Tvrdivo se přidává v kapalné nebo pevné formě a obsahuje v molekule aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami pryskyřice. [3]

Epoxidové pryskyřice patří mezi velmi hodnotné termosety s velice dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Vlastnosti vytvrzených pryskyřic jsou ve velkém rozsahu ovlivněny širokou paletou tvrdidel, která jsou většinou přizpůsobena pro speciální aplikace. Vhodnou volbou pryskyřic, tvrdidel a přísad lze dosáhnout mnoha rozdílných vlastností (zpracování, tepelné mechanické vlastnosti, dlouhodobé chování). Vzhledem ke své vysoké kvalitě jsou epoxidové pryskyřice používány často jako matrice pro drahé výztuže, např. uhlíkové. Objemové smrštění epoxidové pryskyřice je poměrně nízké, 2 až 5%. Vzniká převážně v kapalně fázi, takže je vyrovnáno dodatečně přitékající pryskyřicí. Stejně jako ostatní reaktivní pryskyřice vytvrzují se epoxidové pryskyřice bez odštěpování vedlejších reakčních produktů. Neobsahují také žádné charakteristicky páchnoucí monomery jako akrylátové nebo polyesterové pryskyřice. [3]

1.1.1.4 Fenolické pryskyřice (PF-R)

Fenolické pryskyřice jsou reaktivní pryskyřice, které se vyrábějí kondenzací fenolů a 30 až 50% vodných roztoků aldehydů (zejména formaldehydu). Fenolické pryskyřice vykazují při vytvrzování chemicky a tepelně komplexní průběh, který se vyznačuje endotermickými a exotermickými pochody. Fenolické pryskyřice jsou křehké, a musí být proto pro většinu konstrukčních aplikací modifikovány. K tomu se používají deriváty fenolu, jako alkylované fenoly nebo bisfenol A. Velká část fenolických pryskyřic a dalších termosetů na bázi formaldehydu se zpracovává spolu s plnivem a výztužemi jako lisovací hmoty a vstřikováním. Podíl fenolických pryskyřic ve výrobě klasických vyztužených kompozitu je poměrně nízký. Při vytvrzování tvoří těkavé látky a jsou příliš křehké pro velkorozměrové díly. Mezi jejich vynikající vlastnosti patří vedle vysoké chemické a tepelné odolnosti i nízká hořlavost bez přídavku aditiv, velmi nízká hustota kouřových plynů a malá toxicita kouře. Fenolické pryskyřice, a to zejména ty, které obsahují novolaky, na světle hnědou a mohou se při vytvrzování zbarvit. Vyrábějí se proto v tmavých krycích barevných odstínech. [3]

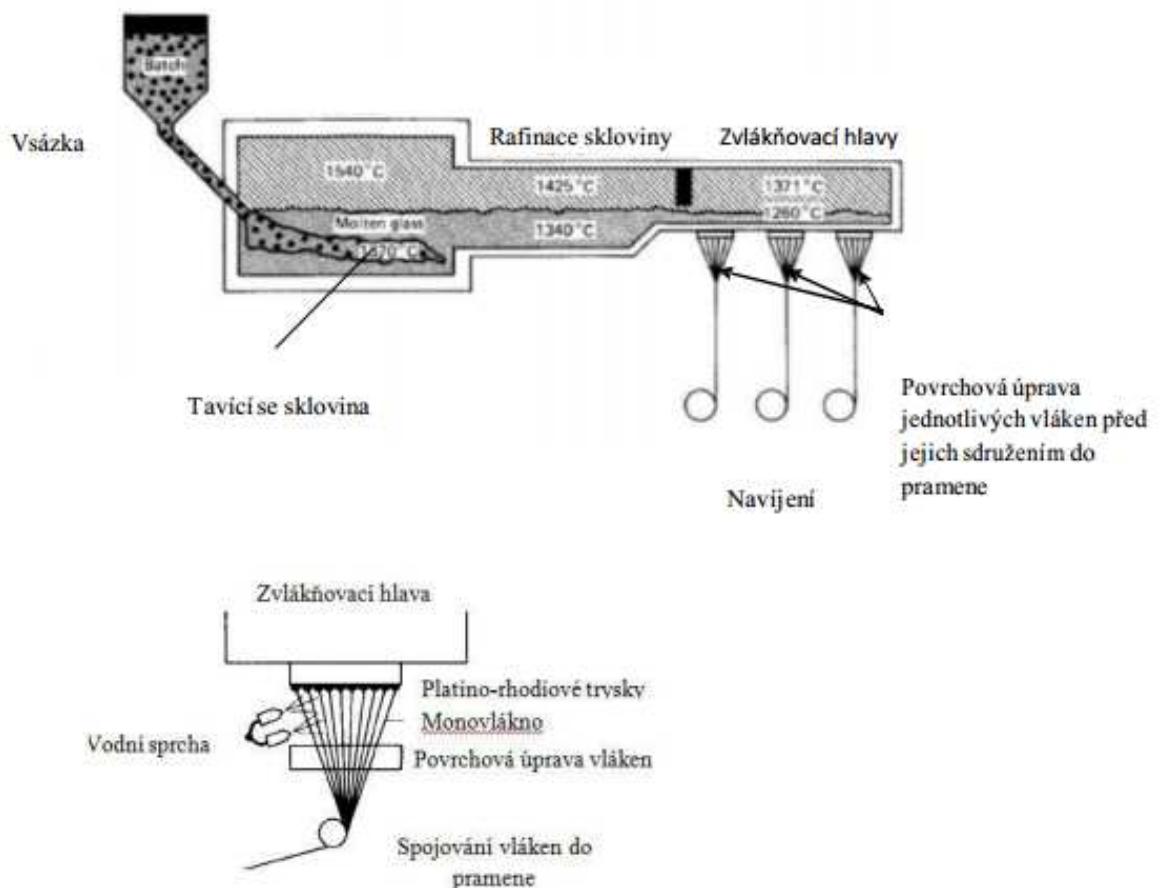
1.1.2 Vyztužující vlákna

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají zřídka. Zajímavou skupinou materiálů se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Ze zpracovatelského důvodu se většinou aplikují upravené produkty:

- příze – vyrábí se spřádáním z vláken,
- nitě (sekaná příze) – jsou spředeny z přízí,
- roving (pramenec) – zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením z nekonečného pramence,
- spředený roving – vyrábí se z vláken nestočených kolem podílné osy,
- rohože ze sekaných pramenců – vyrábějí se z dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených,
- rohože z kontinuálních vláken – skládají se z nekonečných vláken, které jsou uloženy nepravidelně bez jakékoliv orientace ve smyčkách, v několika vrstvách jsou vzájemně spojeny pojivem,
- povrchové (závojové) rohože – netkané plošné výrobky, které se pokládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice,
- krátká vlákna – mletá na jednotlivá elementární vlákna o různé délce,
- tkaniny – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravouhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech.
- jednosměrné pásy – textilní pásy z rovnoběžně uložených vrstev, nevláknitých netkaných vláken, které jsou spojeny příčně tenkou vrstvou lepící rohože nebo útkovými vlákny,
- úplety – textilní plošné výrobky, které se vyrábějí z vláken pletením, umožňují volbu nejrůznějších geometrických tvarů,
- trojrozměrné tkaniny – vyrobeny z vláknových systémů technologií pletením,
- pleteniny – jiný typ vyztužení představující úplety a pleteniny. [3]

1.1.2.1 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna je společný název pro tenká vlákna ($\text{Ø}3,5$ až $24\mu\text{m}$) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní účely. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou prostupností pro záření, proto se označují jako E-vlákna a jejich sklovina jako E-sklovina. Je to nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který postupně jako standartní typ obsadil téměř 90% trhu. Dodací formou textilního skla je příze, sekaná příze, pramenec, rohož, sekaný pramenec a krátké vlákno. Skleněná vlákna se vyrábějí tažením z trysek. Při široké nabídce ze skleněných vláken jsou konečné vlastnosti kompozitu ve značné míře závislé na druhu, obsahu a orientaci skleněných vláken. [3]



Obr. 3. Schéma výroby skleněných vláken tažením z trysek. [2]

Vlastnosti skleněných vláken – shrnutí:

- skleněné vlákno je izotropní, což znamená, že jeho materiálové vlastnosti v podélném i příčném směru jsou totožné,
- modul pružnosti v tahu (E-modul) skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli, pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken a je většinou podstatně vyšší než u oceli (v kompaktní formě). Vzhledem k porovnatelně nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken zvláště vysoká,
- mez průtažnosti skleněného vlákna má hodnotu kolem 3%. Deformace přitom téměř elastická, tj. skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna,
- tepelné vlastnosti skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti jiných materiálů. Ani dlouhodobé trvalé tepelné namáhání při 250°C nesnižuje hodnoty

mechanických vlastností. Tepelní vodivost je naproti tomu vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovu,

- skleněná vlákna jsou nehořlavá, a tudíž ohnivzdorná,
- bod měknutí E-skloviny je vyšší než 625°C,
- součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [3]

1.1.2.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna, předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít až 70% jejich skutečné pevnosti, při zvláště tažné matici dokonce ještě více. Aramidová vlákna jsou na trhu ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží. [3]

Vlastnosti aramidových vláken – shrnutí:

- je to nejlehčí vyztužující vlákno a má vysokou měrnou pevnost v tahu,
- mez pevnosti v tlaku ve směru vláken je výrazně nižší, než mez pevnosti v tahu,
- aramidové kompozity jsou vhodné pro lehké konstrukce s převažujícím tahovým namáháním, nikoliv však pro konstrukce namáhané ohybem nebo tlakem,
- aramidová vlákna jsou hydrofilní, tzn. absorbují vlhkost. Vlhkost ovlivňuje pevnost spoje mezi vláknem a maticí. Absorbovaná vlhkost neovlivňuje pouze pevnost spoje vlákna a matrice, ale i pevnost vlastního vlákna,
- u aramidových vláken dochází při expozici zářením s vysokou energií (např. UV záření) k výraznému poklesu pevnosti.
- aramidová vlákna – jako každé organické vlákno – nejsou příliš odolná proti vysokým teplotám. Ve formě kompozitu odolávají teplotě až 300°C,
- vytvrzené konstrukční prvky z aramidových vláken se obtížně obrábějí. [3]

1.1.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou teprve karbonizovány. Přitom se odštěpí všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující grafitizací, zlepšují se mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800°C je tvorba grafitové

struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu. Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály:

- celulóza,
- polyakrylonitril (PAN),
- smola. [3]

Průmyslová výroba uhlíkových vláken využívá hlavně dva výrobní postupy, technicky významnější je postup využívající polyakrylonitril, v druhém případě se vychází ze surovin bohatých na uhlík. [3]

Vlastnosti uhlíkových vláken – shrnutí:

- uhlíkové vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn. se zvyšujícím se zatížením, stoupá hodnota E-modulu,
- vysoká pevnost i hodnoty E-modulu až do teploty 500°C,
- nízká hustota,
- mimořádně vysoká korozní odolnost,
- dobrá elektrická a tepelná vodivost,
- snášlivost s tělesnými tkáněmi, lze je použít jako implantáty (klouby),
- uhlíková vlákna jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. Proto se při zpracování povrchově upravují apretací, směsí na bázi epoxidové pryskyřice,
- při delším skladování dochází k vytvrzení apretační vrstvy a vlákna ztrácejí ohebnost,
- dobrý průchod pro záření, neodráží radarový paprsek,
- uhlíková vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání,
- i když jsou uhlíková vlákna hořlavá, je rychlost hoření kompozitu obsahující 90% uhlíkových vláken velmi pomalá. [3]

1.1.2.4 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Pozoruhodné jsou i pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou

tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce. Jako přednost je nutno uvést:

- nízkou hustotu,
- malou abrazivitu při mechanickém zpracování,
- výhodnou likvidaci spalováním. [3]

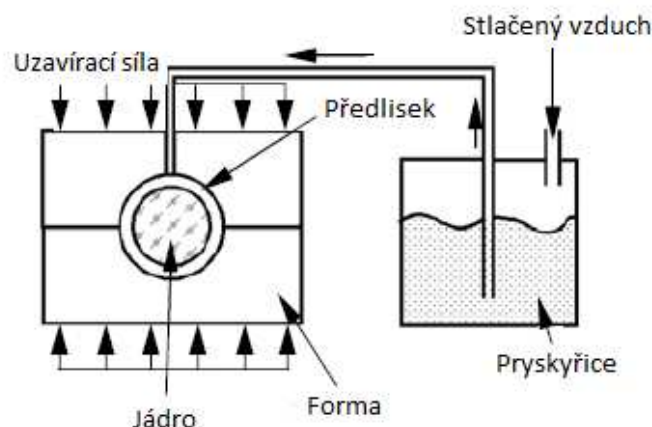
Problémy působí:

- závislost vlastností vláken na podmínkách růstu,
- citlivost na působení vlhkosti,
- omezená možnost volby matrice vzhledem k nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování (odolnost do 200°C),
- nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s matricí,
- omezená délka vláken,
- možnost změn vyvolaných biologickým napadením. [3]

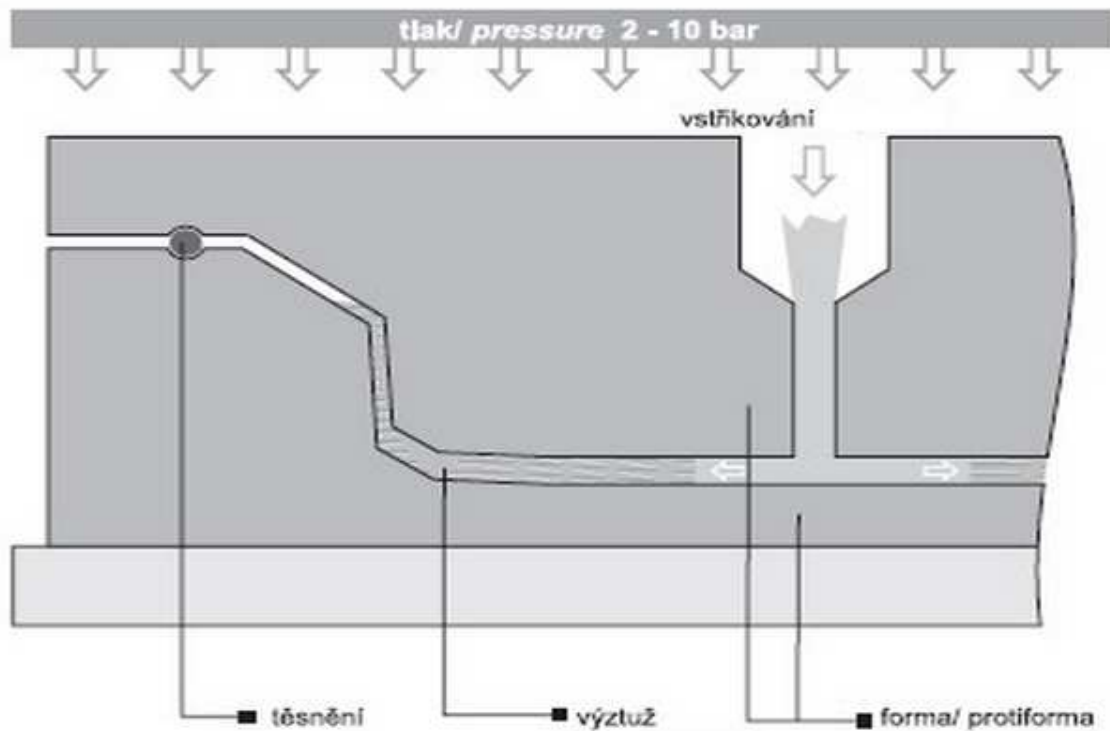
Mezi nejrozšířenější druhy přírodních vláken patří len (světová spotřeba 650 000 tun/rok) a juta (2 700 000 tun/rok). [3]

1.2 RTM technologie (“Resin Transfer Molding”)

RTM (“Resin Transfer Molding”) technologie probíhá v uzavřené formě, ve které jsou umístěna suchá vlákna předlisků. Pryskyřice se vstříkuje přes vstupní otvory, dokud se forma nenaplní. Pryskyřice se poté vytvrdí a hotový díl se vyjme z formy. [4]



Obr. 4. Schéma RTM procesu. [4]

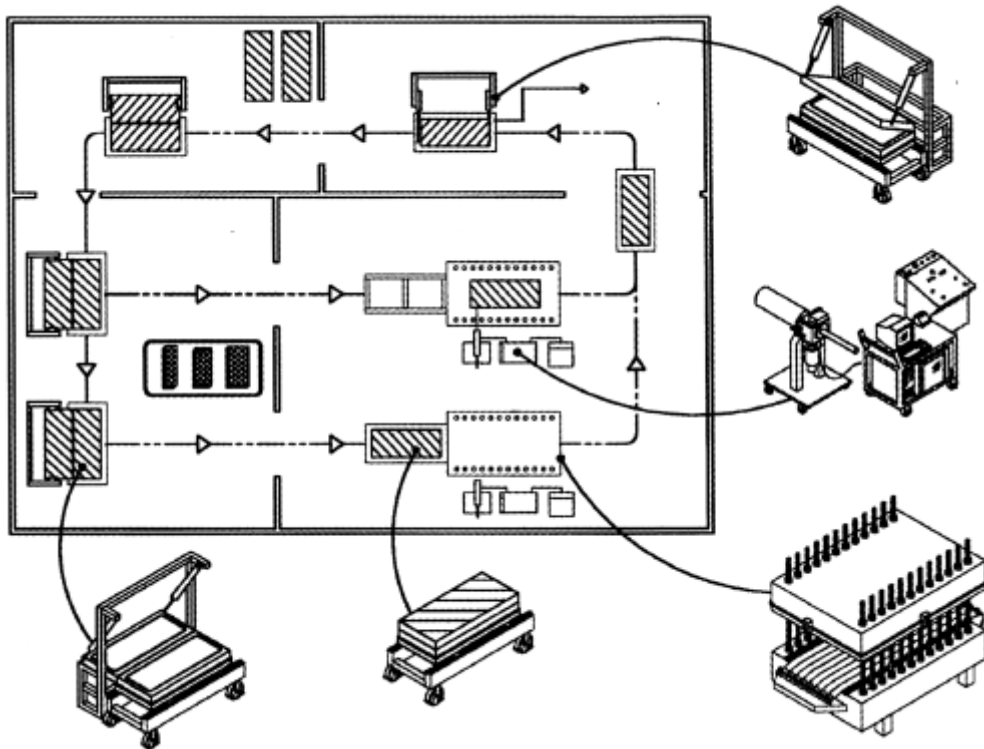


Obr. 5. Schéma RTM procesu. [6]

1.2.1 Základní výrobní kroky

Shrnutí základních kroků při procesu RTM technologii:

1. Pryskyřice a katalyzátor se nachází v nádrži a dávkovacím zařízení.
2. Uvolňovací prostředek je aplikován do formy pro snadné odstranění dílu z formy, někdy se používá Gelcoat a je aplikován pro dobrou povrchovou úpravu dílu.
3. Preform je umístěn do formy a forma se zavře.
4. Forma se zahřeje na danou teplotu.
5. Směs pryskyřice se vstřikuje vstupními porty při dané teplotě a tlaku. Vakuum uvnitř formy napomáhá toku pryskyřice a odstranění vzduchových bublin.
6. Pryskyřice je vstřikována do formy, až se zcela vyplní dutina formy. Vakuum se vypne a výstupní otvor se uzavře.
7. Po vytvrzení (6 až 20min. v závislosti na pryskyřici) se kompozitní díl vyjme z formy. [4]

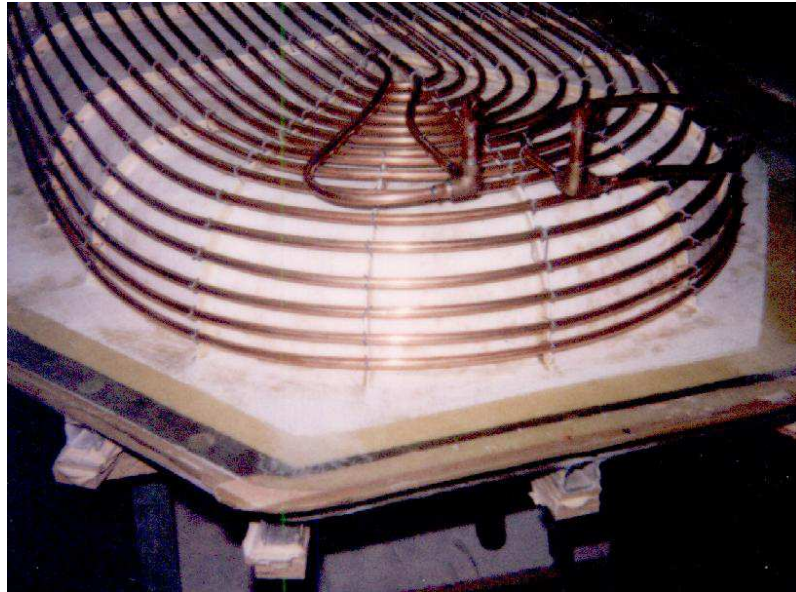


Obr. 6. Průběh procesu RTM. [4]

1.2.2 Uplatňování teple a tlaku

Tlak vzniká během procesu RTM ve formě pomocí vstřikovacího tlaku. Tento vstřikovací tlak pomáhá pryskyřici proudit dovnitř formy přes porézní media a umožňuje pryskyřici, aby vyplnila dutinu formy. Zařízení RTM má pumpu, která vstřikuje pryskyřici v určitém tlaku. Typický vstřikovací tlak je nízký v rozmezí od 69 do 690kPa. Vstřikovacím tlakem určujeme průtok pryskyřice, a tím dobu plnění formy. Poté co je forma zcela plná, tlak ve formě se udržuje přibližně 2 až 10Mpa. Tlak vstřikování pryskyřice je závislý na viskozitě pryskyřice, velikosti formy, propustnosti porézních medií, času potřebného na výplň formy a kinetiku vytvrzení pryskyřice. [4]

Volba teploty během procesu RTM je závislá na druhu pryskyřice. Dodavatel pryskyřic doporučuje konkrétní podmínky zpracování, včetně teploty předehřevu, teplotu formy a vytvrzovací teplotu. [4]



Obr. 7. Topná spirála pro vytápění RTM forem. [5]

1.2.3 Výhody RTM procesu

Mezi hlavní výhody RTM procesu oproti jiným technologiím patří:

1. Počáteční investiční náklady jsou nízké oproti lisování a vstřikování. Prototyp dílů je snadno vyroben.
2. Výlisky jsou vyrobeny v rozměrových tolerancích.
3. RTM technologií snižují náklady při středně velké sérii, tohoto se využívá v automobilovém průmyslu.
4. RTM technologií vyrábíme součásti s povrchovou úpravou na obou stranách, mohou mít i podobné nebo rozdílné povrchové úpravy.
5. RTM umožňuje výrobu součástí s výztuží a přesným uspořádáním vláken.
6. Vyšší objem vláken a to až 65%.
7. Do výlisků mohou být začleněny montážní prvky.
8. Široká škála výztužných materiálů.
9. Během procesu RTM jsou nízké emise těkavých látek, důsledkem uzavřené formy.
10. RTM technologie díky přesným tvarům vyráběné součásti snižuje náklady na materiál a na obrábění.
11. Proces RTM lze automatizovat, což má za následek vyšší produkci a snižuje cenu výrobku. [4]

1.2.4 Limity RTM procesu

Ačkoliv RTM proces má mnoho výhod ve srovnání s jinými výrobními procesy, ale má také následující omezení:

1. Výroba složitých dílců vyžaduje velké množství pokusů a omylů experimentováním, nebo je nutné při modelování simulovat tečení.
2. Náklady na nástroje a zařízení jsou vyšší, než u ručního kladení.
3. Konstrukce nástroje je složitá. [4]

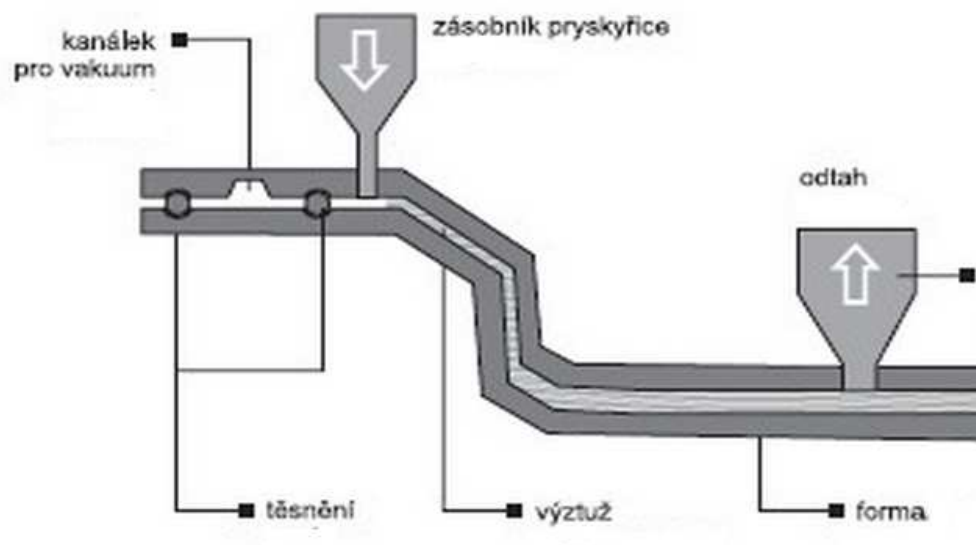
1.2.5 Varianty RTM procesu

1.2.5.1 LRTM (“RTM Light“)

Kromě RTM existuje také RTM Light (LRTM), které nevyžaduje při vstřikování vysoké tlaky, pryskyřice, tlak se pohybuje mezi 0,1 až 0,3 MPa. (to dovolí méně tuhé a lehčí formy). Pryskyřice je nasávána podtlakem. Je vhodné pro menší série výrobků (pro větší série je zapotřebí větší počet forem). [2]

1.2.5.2 VARTM (“Vacuum Assisted RTM“)

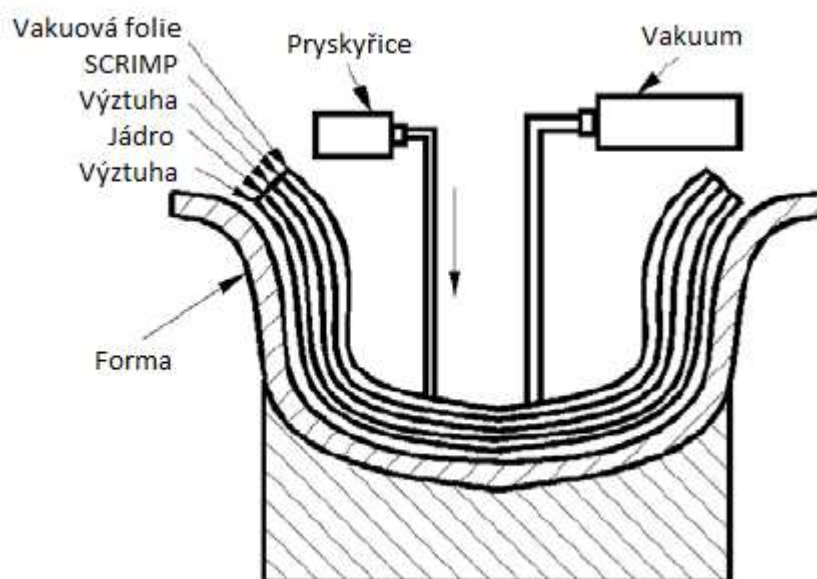
Pryskyřice s malou viskozitou (většinou s reaktivním ředidlem) teče do dvoudílné formy, ve které je přetvarovaná výztuž (“preform”). Tok pryskyřice je vyvolán jak vstříknutím, tak podtlakem. Běžnější je použití jednodílné formy. Druhá strana formy je tvořena fólií, filmem nebo vakem. Název VARTM bývá často používán i pro infuzní technologie, kdy k toku pryskyřice dochází jenom díky podtlaku. Tyto technologie jsou dále uvedeny jako SCRIMP, VIP, CAPRI, VAP, FASTRAC. Existuje také HVARTM (“Heat Vacuum Assisted Resin Transfer Molding”). Používá se pro nové C-PLY lamináty NCF (“Noncrimp Carbon fiber Fabric”), kde přináší tahovou pevnost třikrát větší než konvenční technologie. Proces nevyžaduje autokláv. [2]



Obr. 8. Vakuum injekční technologie. [6]

1.2.5.3 SCRIMP (“Seeman Composite Resin Infusion Molding Process”)

Při SCRIMP (“Seeman Composite Resin Infusion Molding Process”) rozvod polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice zajišťují hadice a tzv. distribuční médium, které se z povrchu vytvrzeného výrobku sejme (je odděleno od výrobku odtrhovou vrstvou). Krycí fólie zamezuje odpařování reaktivního rozpouštědla (obvykle styren u UP a VE pryskyřice). Mezi nosné vrstvy je možno vložit jádro (pěnové, voštinové) nebo distanční tkaninu. [2]



Obr. 9. Schéma SCRIMP procesu. [4]

1.2.5.4 SQRTM (“Same Qualified RTM”)

Tato technologie kombinuje prepregy a suchou předtvarovanou výztuž (“Pi-Preform”), které jsou zastříknuty pryskyřicí. Výroba nevyžaduje autokláv, jde o tzv. OOA technologii (“Out-of- autoclave”). Ohřev na vytvrzovací teplotu pryskyřice je rychlejší než v autoklávu vzhledem k velké tepelné vodivosti nástroje, což zrychluje a zlevňuje výrobu. Je používána při výrobě střech vrtulníků Sikorsky. [2]

1.2.5.5 HS-RTM (“High-Speed RTM”)

Zařízení vyrábí například Pinet e Enidecau, Inc. (Michigan). Tato technologie je využívána při velkosériové výrobě součástí automobilového průmyslu. [2]

1.2.5.6 Přímo injektované RTM

Zařízení od Phoenix Equipment Co. (Memphis, Ten a Largo, Fla.), obsahuje vnitřní míchací pistoli Phoenix 80 0 a čerpadlo s připojením pro přímou injektáž do formy. Systém může být konfigurován pro polyesterové nebo epoxid pryskyřice. Je schopný dodávat 28 l za minutu. Zařízení je zaměřeno na velké, vysoko objemové aplikace, jako jsou listy větrných elektráren a trupy lodí. [2]

1.2.5.7 HP-RTM (“High Pressure RTM”)

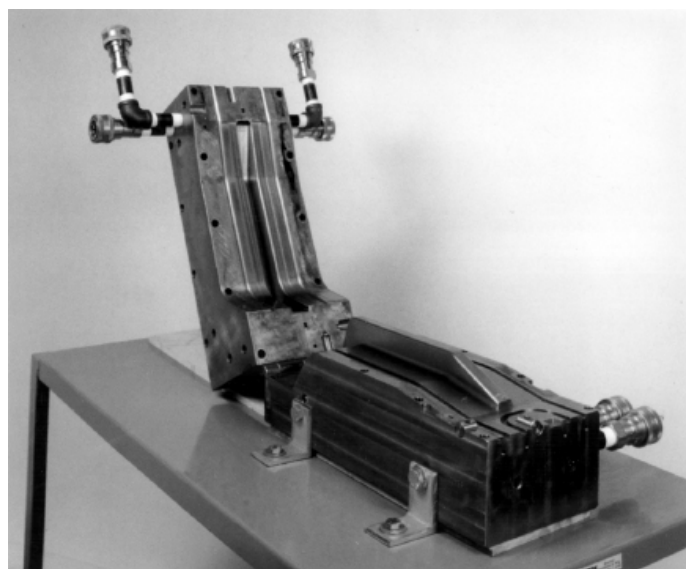
Huntsman Advanced Materials vyrábí poslední verzi epoxidové pryskyřice Araldite (Araldite LY 3585/Aradur 3475), vyrobené speciálně pro použití v procesu KrausMafei (Mnichov, Německo). Pryskyřice umožňuje pětiminutový výrobní cyklus a nabízí 30% časovou úsporu, oproti první generaci vysokotlakých pryskyřic. [2]

2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ RTM FOREM

RTM forma se obecně skládá ze dvou polovin, které obsahují jeden nebo více vstupních portů pro injektáž pryskyřice a jeden nebo více otvorů pro odvodu vzduchu a výstup pryskyřice. Při konstrukci formy je rozhodující tuhost. Tloušťky stěn formy musí být dostatečné, aby vydrželi tlak vyvíjený při zpracování. Při konstrukci formy je potřeba brát v úvahu teplotní roztažnosti a manipulaci s formou. Teplené vlastnosti formy a kompozitních materiálů mají vliv na rozměrové tolerance kompozitních dílců. Forma musí být navržena tak, aby byla během procesu řádně sevřena a uzavřena. [4]



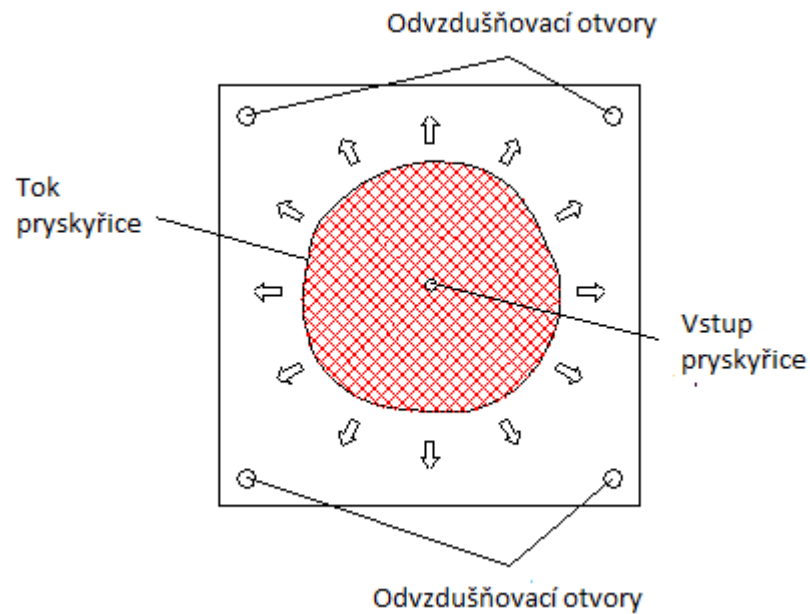
Obr. 10. RTM forma. [5]



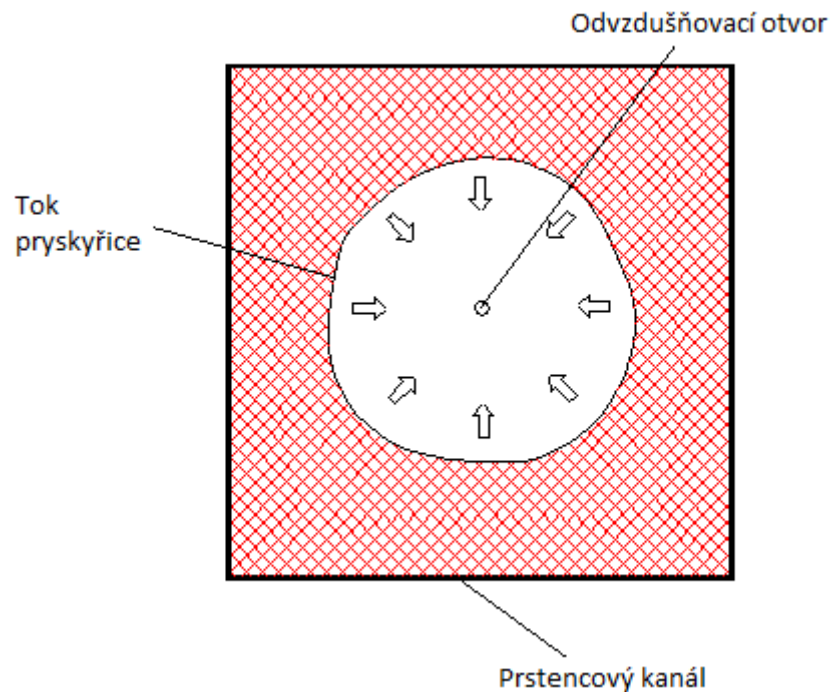
Obr. 11. RTM forma se všemi konstrukčními prvky. [4]

2.1 Vstupní porty a odvodušňovací otvory

Rozmístění vstupních otvorů pro injektáž pryskyřice a odvodušňovacích otvorů je vidět na následujících obrázcích.



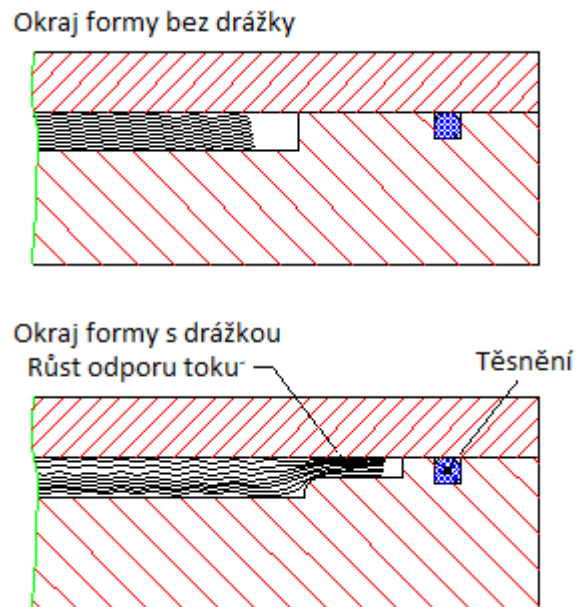
Obr. 12. Rozmístění vstupních a odvodušňovacích otvorů. [5]



Obr. 13. Prstencový tok pryskyřice. [5]

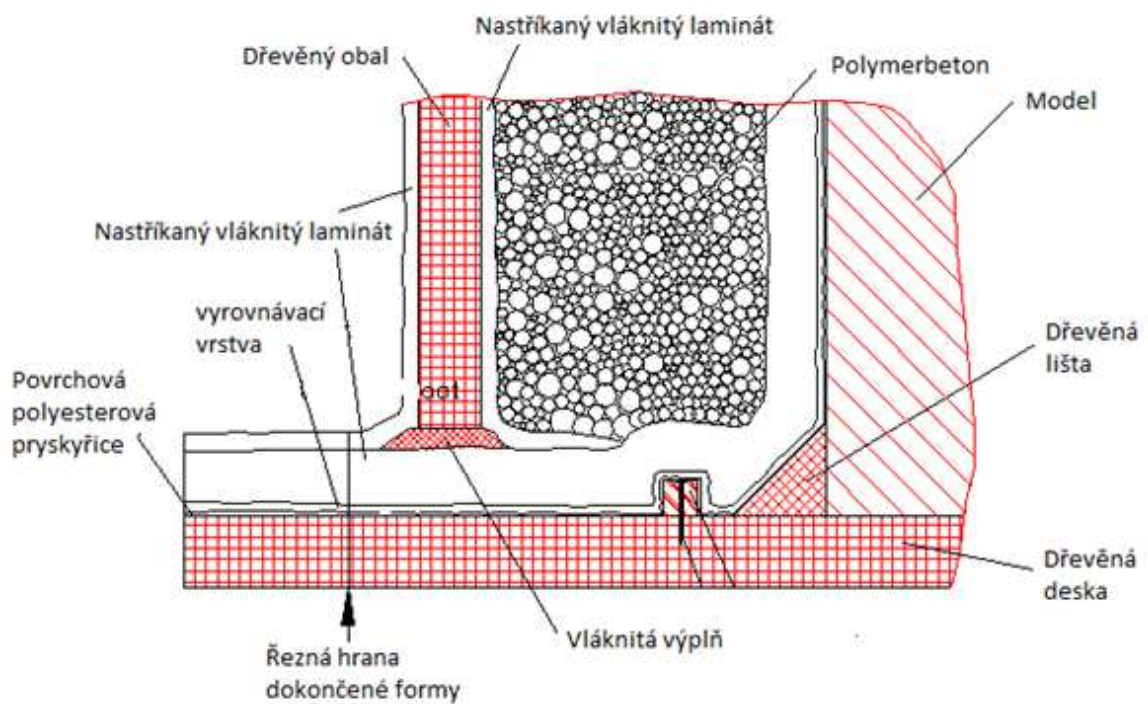
2.2 Okraje RTM formy

Pro lepší zatečení pryskyřice do okrajové části dílu je součástí konstrukce formy drážka pro přetečení pryskyřice. Tento přetok se následně odstraňuje obráběním.



Obr. 14. Okraje formy. [5]

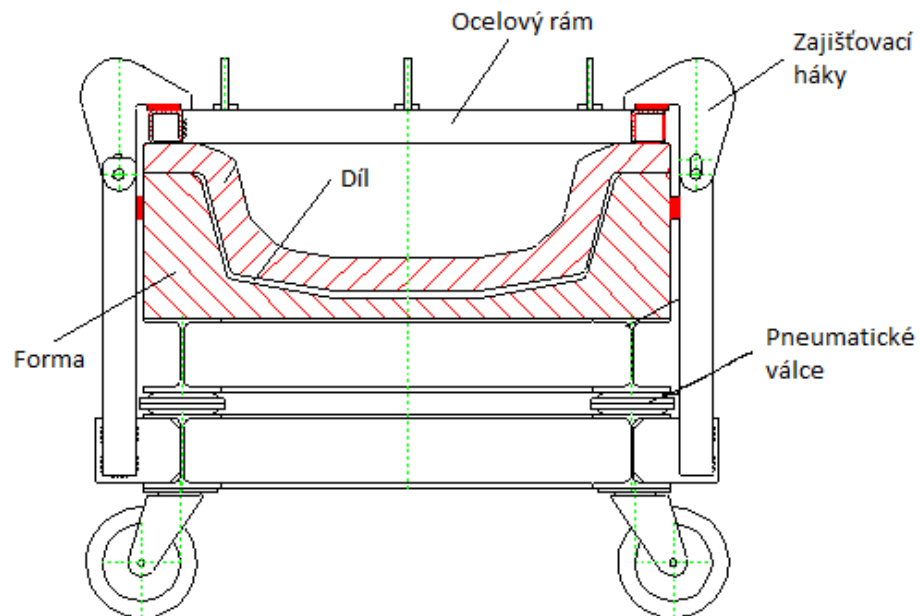
2.3 Detailní zobrazení konstrukce RTM formy



Obr. 15. Detail konstrukce RTM formy. [5]

2.4 Uzavření RTM formy

Princip uzavírání formy pomocí zajišťovacích háků je vidět na následujícím obrázku. Po zaklopení háků se forma zvedá pomocí pneumatických válců a zajistí dostatečné uzavření formy. [5]



Obr. 16. Uzavřená forma. [5]



Obr. 17. Uzavírání formy. [5]

3 MODELÝ A VOLBA MATERIÁLU PRO VÝROBU FOREM

3.1 Modely

Před výrobou modelu si je nutné uvědomit, jak velký model bude, jaké budou požadavky na přesnost a povrch. Je také nutno si uvědomit kolikrát budeme chtít model pro výrobu formy použít a zda jej například bude dobré zachovat pro výrobu další formy. [6]

Při ručním kladení, stříkání a injekčních metodách je prvním krokem návrh a příprava modelu. Jako materiál slouží:

- dřevo, překližka, MDF deska (obdoba dřevotřísky),
- pěnový polystyrén,
- laminát,
- sádra,
- balsa,
- polyuretanová deska,
- epoxidový blok. [6]

Tab. 2. Materiály modelů (maket) a jejich vlastnosti. [7]

Typ materiálu makety	Ytong	MDF	Ocel s podpůrnou konstrukcí	Dřevo (masiv)	PUR pěna (modelové bloky)	PUR (modelovací pasty)	Nástrojové bloky (Epoxid)	Uhlíková pěna
Hustota (kg/m ³)	350 - 600	700-870	7800	530-680	580-700	780-1300	730-1200	320
Cena materiál (Kč/m ³)	4 200	10 500	200 000	12 000 - 40 000	90 000	-	300 000	334 000*
Pozitiva	Dostupnost, hmotnost, cena, teplotní odolnost	Dostupnost, hmotnost, cena	Dostupnost, cena, teplotní odolnost	Dostupnost, hmotnost, cena, teplotní odolnost	Standardní technologie, hmotnost, homogenita povrchu, stabilita rozměrová	Standardní technologie, homogenita povrchu, stabilita rozměrová	Homogenita povrchu, teplotní odolnost, rozměrová stabilita	Teplotní odolnost a rozměrová stabilita, tuhost, hmotnost
Negativa	Křehké, jakost povrchu	Teplotní odolnost, vliv vlhkosti na rozměrovou stabilitu	Jen jednoduché tvary.	Vliv vlhkosti na rozměrovou stabilitu	Vyšší cena	Vyšší cena, komplikované nanášení (vyžaduje speciální vybavení)	Vysoká cena	Dostupnost a vysoká cena

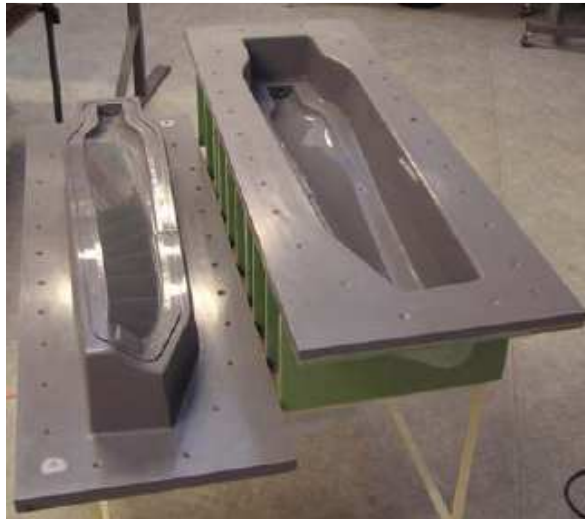


Obr. 18. Výroba modelu. [6]

Po dokonalém zpracování tvaru je nutno model tepelně stabilizovat na teplotu, které bude model při výrobě formy vystaven, povrchově upravit např. polyuretanovými laky nebo polyesterovým topcoatem, speciálními tmely vytvořit dělicí a ořezové roviny, v případě vícedílných forem dělicí roviny opatřit čepy nebo průchodkami pro přesné usazení forem a v případě potřeby osadit ořezové plochy kováním chránícím vůči opotřebení a důkladně naseparovat. [6]

3.2 Volba materiálu pro výrobu forem

Volba materiálu pro vlastní formu je dána hlavně sériovostí a také typem technologie. Pro prototypy, které se téměř vždy vyrobí ručním kladením, se užívá speciální sádra, dřevo, pěny, tmely. Výrobní formy pro ruční a injektážní technologie se zhotovují většinou z laminátu případně v kombinaci s pěny nebo balzou a dalšími sendvičovými materiály. Pro injektážní technologie z polymerbetonu nebo kovové. Kovové jsou formy pro lisovací technologie, navíjení, tažení a odstředivé lití. Pro výrobu nenáročných a levnějších laminátových forem jsou nejčastěji používanými materiály skleněné rohože a polyesterové pryskyřice. [6]



Obr. 19. Kompozitní forma [6]

Prvním, velmi důležitým krokem, je aplikace formového gelcoatu na naseparovaný model. Na kvalitě povrchu modelu, výběru a pečlivé aplikaci formového gelcoatu závisí kvalita povrchu formy a její životnost. [6]

Aby se snížilo vnitřní pnutí a smrštění a tedy i změna rozměrů formy je třeba při stavbě konstrukční části formy postupovat po dílčích krocích, nejprve na vytvrzený formový gelcoat klást jednu, nejvýš dvě vrstvy kvalitní rohože o gramáži 225-450 g/m² a prosytit pečlivě pryskyřicí s co nejnižším smrštěním včetně odstranění vzduchových bublin. Někteří výrobci forem dávají přednost před konstrukčními vrstvami aplikovat jako první na gelcoat jemnou povrchovou rohož nebo flís o nízké gramáži. Teprve druhý den po vytvrzení prvních vrstev lze klást další konstrukční vrstvy, nejlépe opět s prodlevami na vytvrzení vrstev předchozích. Výroba formy je tak relativně časově náročnou operací. Pro výrobu přesných nebo více namáhaných forem se v poslední době nejčastěji používají speciálně formulované, termoplasty modifikované a vysoce plněné polyesterové pryskyřice, kdy je možno v jednom kroku dosáhnout tloušťky až 14 mm a dosáhnout prakticky nulového smrštění. Výroba formy se tak zkrátí na 2 dny včetně zpevnění formy např. žebrováním na rubové straně a připevnění manipulačního rámu. Lze rovněž použít kvalitnější epoxidové pryskyřice s pomalu vytvrzujícími tužidly, které výrazně snižují riziko smrštění a mechanické poškození často používané formy. [6]

Před uvedením nových forem do provozu je nutno je opatřit spolehlivým separátorem, buď na bázi tvrdých karnaubských vosků nebo kapalnými semipermanentními bezsilikonovými separátory. Kvalitních separátorů je velký výběr, důležité je přesně dodržovat návod výrobce pro aplikaci na nové formy. [6]

3.3 Porovnání technologií pro výrobu forem

Prvním kritériem jsou materiálové náklady. V tabulkách jsou uvedeny náklady na materiály strukturní i technologické. Uvedené náklady odpovídají množství materiálu potřebnému na výrobu formy o ploše 1 metru čtverečního danou technologií. [7]

Tab. 3. Náklady na materiál potřebný na výrobu 1 m² formy (výztuž ve formě skelných vláken). [7]

Výrobní technologie	Prepregy I. generace	Prepregy II. generace	Vakuová infuze	Kontaktní laminace
Výztuž (Kč/m ²)	7 600	-	750	750
Pojivo (Kč/m ²)			5 000	5 200
gelcoat (Kč/m ²)	2 300	-	650	650
Technologické materiály (Kč/m ²)	150	-	200	450
Suma (Kč/m²)	10 050		6 600	7 050

Tab. 4. Náklady na materiál potřebný pro výrobu 1 m² formy (výztuž ve formě uhlíkových vláken). [7]

Výrobní technologie	Prepregy I. generace	Prepregy II. generace	Vakuová infuze	Kontaktní laminace
Výztuž (Kč/m ²)	16 000	14 500	9700	9700
Pojivo (Kč/m ²) formy			4 900	5 000
gelcoat (Kč/m ²)	2 300	-	650	650
Technologické materiály (Kč/m ²)	150	200	200	450
Suma (Kč/m²)	18 450	14 700	15 450	15 800

Dalším posuzovaným kritériem je pracnost jednotlivých technologií viz. následující tabulka. Hodnoty pracnosti jsou uvedeny na základě výroby stejné formy pro panel obložení interiéru metra a zkušeností získaných při výrobě dílů i forem prepregovou technologií. [7]

Tab. 5. Pracnosti operací procesu výroby formy pro výrobu dílu obložení interiéru vozu metra. [7]

Výrobní technologie	Prepregy I. generace	Prepregy II. generace	Vakuová infuze	Kontaktní laminace
Příprava nástřihů (min.)	45	45	60	60
Gelcoat (min)	30	-	30	30
Skladba (min.)	120	120	200	1 400
Položení technologických mat. (min)	15	15	30	45
Infuze (min.)	-	-	30	-
Vytvrzování (min.)	120	120	-	-
Odstranění technologických mat. (min.)	10	10	20	30
Obrábění tvaru (min.)	-	300	-	-
Suma (min.)	340	610	370	1 535

V následujících tabulkách je uvedeno porovnání nákladů na výrobu jednoho kusu formy pro výrobu dílu obložení interiéru vozu metra. Jsou zahrnuty rovněž náklady na výrobu master modelu, amortizace zařízení, energie a kooperace. Porovnání je provedeno v procentech nikoli přímo v korunách a lze srovnávat pouze hodnoty v řádcích nikoli ve sloupcích. Částka odpovídající 100% v řádku maket není stejná jako částka odpovídající 100% v řádku formy. V ceně makety jsou zahrnuty náklady na samotný materiál, přípravu polotovaru (lepení), tvorbu programu, obrábění, lakování (MDF), finalizace povrchu (leštění). V Řádku dokončení jsou uvedeny náklady na dokončení formy, opravy, leštění, separace. U formy vyrobené z prepregů II. Generace je v dokončení zahrnuto i obrábění do finálního tvaru. [7]

Tab. 6. Porovnání nákladů na výrobu makety a formy určené pro vytvrzování dílu obložení interiéru metra (výztuž ve formě skelných vláken). [7]

Výrobní technologie	Prepregy I. generace	Prepregy II. generace	Vakuová infuze	Kontaktní laminace
Materiál makety	PUR - bloky	-	MDF	MDF
Maketa (%)	100	-	50	50
Forma (%)	59	-	45	100
Dokončení (%)	10	-	10	100
Náklady celkem	střední	-	nízké	střední

Tab. 7. Teoretické porovnání nákladů na výrobu makety a formy určené pro vytvrzování dílu obložení interiéru metra (výztuž ve formě uhlíkových vláken). [7]

Výrobní technologie	Prepregy I. generace	Prepregy II. generace	Vakuová infuze	Kontaktní laminace
Materiál makety	PUR - bloky	Ytong	MDF	MDF
Maketa (-)	200	60	100	100
Forma (-)	61	64	53	100
Dokončení (-)	1	100	1	10
Náklady celkem	střední	vysoké	nízké	střední

V poslední tabulce jsou uvedeny výhody a nevýhody technologií pro výrobu forem. [7]

Tab. 8. Porovnání výhod a výhod jednotlivých technologií výroby forem. [7]

Výrobní technologie	Prepregy I. generace	Prepregy II. generace	Vakuová infuze	Kontaktní laminace
Pozitiva	Vysoká kvalita materiálu - Minimalizace porosity a eliminace vad vyskytujících se u VARTM či kontaktní laminace. Teplotní odolnost. Jen velmi omezené vystavení pracovníků těkavým látkám, omezený kontakt s pojivem	Obrobitelná forma - je tak možné dosáhnout velmi přesných tvarových tolerancí navíc se jednoduše opravuje + výhody prepregové technologie I. generace.	Velmi efektivní technologie zvláště pro rozměrné formy. Nízké náklady na vybavení, energii a maketu. Kontaktní pracovníků jen se suchou výztuží.	Velmi jednoduchá technologie, není nutné speciální vybavení, nízké náklady na energii a maketu
Negativa	Nákladný materiál, nutné nákladné vybavení. Velká spotřeba energie. Velmi omezená opravitelnost formy	Nákladný materiál, nutné nákladné vybavení. Velká spotřeba energie.	Proces sycení je poměrně náročný. Zvláště u tvarově složitých dílů je velmi nepravděpodobné vyrobení prvního kusu bez vady (neprosycené oblasti). Velmi omezená opravitelnost formy	Vystavení pracovníků kontaktu s pojivem (kontakt s pokožkou, těkavé látky). Nákladný materiál pokud má být forma použita na vytváření dílů při zvýšené teplotě. Nutné opravy vad po sejmutí formy z makety (malé vnitřní radiusy). Velmi omezená opravitelnost formy

Obecně nelze říci, která z výše uvedených technologií výroby vytvrzovacích přípravků je lepší a která horší. Jen v konkrétním případě je možné rozhodnout, která z technologií bude nejvhodnější pro danou aplikaci. Pro volbu výrobní technologie je nutné zohlednit co nejvíce faktorů, jako jsou zejména provozní podmínky formy (teplota, tlak, životnost), požadavky na díl, vybavenost firmy, zkušenost pracovníků a v neposlední řadě také objem finančních prostředků, které je možné na výrobu formy vynaložit. [7]

3.4 Výroba CNC frézováním

Pro zhotovení kusových zakázek na výrobu velmi složitých dílů je možné vyrobit jednorázovou formu ještě jinými speciálními postupy (frézovaná forma). Elektronicky zkonstruovaný model je možné transformovat do programu na obrábění pomocí CNC strojů. Alternativní výrobu velkých forem frézováním formovací směsí je možné realizovat velkou pětiosou frézku, protože elektronicky zkonstruovaný model je k dispozici.

Trojrozměrný soubor dat CAD, včetně dat vhodných nástrojů. Výroba forem číslicově řízeným frézováním je rychlá a hospodárná zejména u kusové a prototypové produkce. [8]

3.4.1 Stroje pro obrábění kompozitních materiálů

Pětiosé obráběcí centrum Power je určeno pro prostorové obrábění kontur a ploch dílů z plastů, kompozitu, dřeva či slitin hliníku. Obecně je toto obráběcí centrum, které se vyrábí v provedení s pěti řízenými osami (popř. i se třemi řízenými osami), určeno pro prostorové obrábění kontur a ploch. Možnosti použití určuje i druh obráběného materiálu, kterým jsou plasty, polystyren, epoxidové a polyuretanové pryskyřice včetně pryskyřic sycených kovovým plnivem, masivní dřevo, překližky, dřevovláknité desky, lamináty, kompozitní materiál, Al slitiny atd. V praxi je nejrozšířenější využití v následujících činnostech:

- výroba modelů - frézování tvarově složitých modelů
- ořez plastových výlisků z vakuových lisů - zde jde zejména o samotný tvarový ořez frézováním, vyřezávání a vyvrtávání otvorů
- ořez laminátů a kompozitních materiálů - operace obdobné jako u plastových výlisků. [8]



Obr. 20. Pětiosé obráběcí centrum Power. [8]

Při obrábění vyztužených kompozitu se tvoří drobné částičky třísky (zejména z vyztužujících vláken), které se ve formě prachu šíří z místa řezu do okolí. To vyžaduje aplikovat výkonná odsávací zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí. [8]

Hodnoty měrných řezných sil jsou mnohem nižší než při obrábění kovů - tím se snižují řezné síly a potřebný příkon obráběcího stroje. [8]

3.4.2 Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů

Kompozitní materiály s matricí na bázi pryskyřice nebo polymeru patří do skupiny materiálů se specifickými vlastnostmi, jejichž použití spolu s požadavky na nástroje neustále vzrůstá. Obrábění kompozitních materiálů je obtížné a volba vhodných řezných nástrojů vyžaduje zpravidla selektivní postup a velkou pečlivost. [8]

Vyztužující vlákna působí na nástroj silným abrazivním účinkem a jsou hlavní příčinou velmi intenzivního opotřebení nástroje. Proto je nutné pro dosažení vyšší trvanlivosti volit nástrojové materiály s vysokou odolností vůči otěru (např. povlakované SK, diamant). [8]



Obr. 21. Výběr fréz s CVD povlaky různých průměrů pro obrábění kompozitu. [8]

Velmi nízká tepelná vodivost obráběného materiálu způsobuje, že vzniklé teplo přechází do obráběného materiálu a třísky pouze v zanedbatelném rozsahu, a musí být tedy v maximální míře odvedeno nástrojem. Kompozity mají nízkou tepelnou odolnost, při vyšších teplotách (100 - 300 °C) nejsou stálé. Proto je třeba volit takové řezné podmínky, aby nebyla překročena tzv. kritická teplota, kdy dochází k degradaci pryskyřičné matrice a na obrobeném povrchu se začnou objevovat spálené oblasti. Proces tvoření třísky v daleko větší míře ovlivňuje integritu obrobené plochy, při nevhodných řezných podmínkách může dojít k popraskání obrobené plochy nebo z povrchu obrobku vystupují chuchvalce vláken a pryskyřice. V důsledku mechanického a tepelného namáhání může v oblasti řezu docházet ke vzniku trhlin a k delaminaci obráběného materiálu. Vzhledem

k nasákavosti kompozitu nelze při jejich obrábění většinou aplikovat obvyklé řezné kapaliny. [8]

Nejlepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují nástroje z polykrystalického diamantu. Především vysoká tvrdost, která umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu účinku vláken, a vynikající tepelná vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu, jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeného povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší (až stonásobně) než u nástrojů ze slinutých karbidů. Ostrý břit, který vydrží po dlouhou dobu obrábění, poskytuje chladnější řez a snižuje tvorbu delaminace, protože při nadměrném opotřebení břitu se vlákna spíše odlamují, místo aby byla běžně řezána. Vhodnou aplikací nástrojů z PCD při obrábění kompozitních materiálů dochází ke zvýšení řezných podmínek (zejména řezné rychlosti) a následně produktivity o 50 až 100 %. [8]

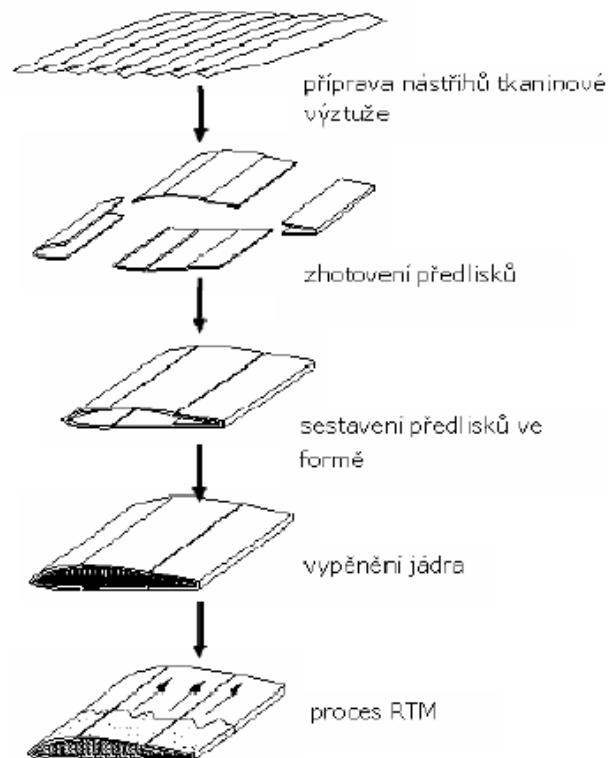
4 PŘEHLED VHODNÝCH DÍLŮ PRO VÝROBU RTM TECHNOLOGIÍ

Proces RTM je vhodný pro výrobu malých a velkých konstrukcí v malém a středně velkém objemovém množství. RTM je používáno v automobilovém průmyslu, v leteckém průmyslu, v lodním průmyslu, ve sportovních potřebách a v aplikaci spotřebních výrobků. Typické výrobky jsou helmy, dveře, hokejky, rámy jízdních kol, čepele větrných mlýnů, sportovní karoserie automobilů, a části letadel (nosníky, přepážky, žebra, výztuhy, kapotáže a distanční bloky). [4]

4.1 Díly v leteckém průmyslu:

V leteckém průmyslu je možné najít řadu konkrétních případů náhrady klasických materiálu kompozity. [9]

4.1.1 Kompozitní vrtulový list



Obr. 22. Schéma výroby vrtulového listu metodou RTM. [7]

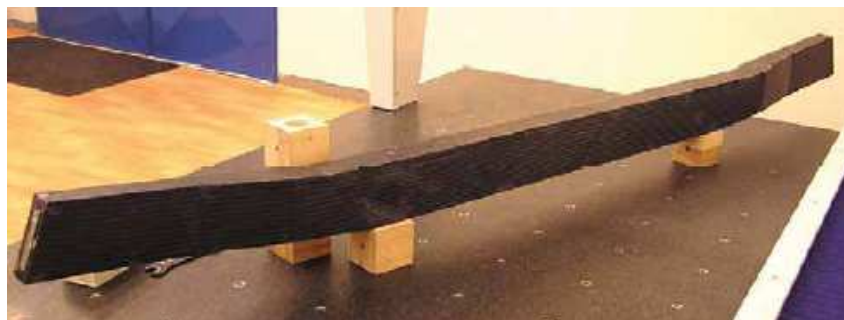


Obr. 23. Kompozitní vrtulový list. [7]

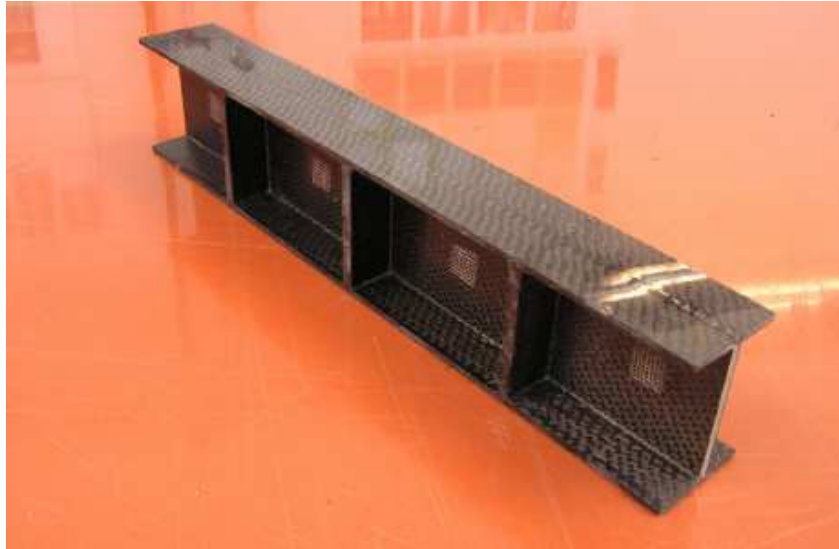


Obr. 24. Řez listem – viditelné je překrytí vrstev náběžné a odtokové hrany. [7]

4.1.2 Nosníky podvozku malého dopravního letadla



Obr. 25. Vytvrzený nosník bez kování. [7]



Obr. 26. Střední segment nosníku malého dopravního letadla. [7]

4.2 Díly v automobilovém průmyslu:

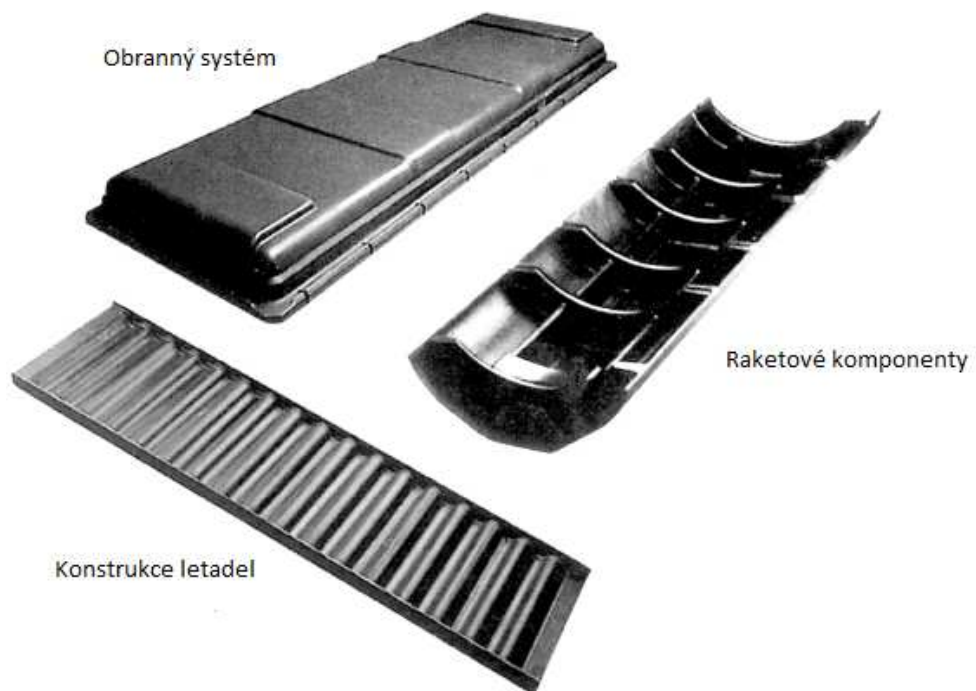


Obr. 27. Díly automobilu SMART Crossblade. [5]



Obr. 28. Neoríznuté díly automobilů. [5]

4.3 Další typické díly:



Obr. 29. Části vyráběné RTM technologií. [4]



Obr. 30. Typické díly pro malé a střední série vyráběné RTM technologií. [4]



Obr. 31. Jednodílný skořepinový rám kola. [4]



Obr. 32. Plášť vnitřních dveří. [5]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je návrh kompozitní formy pro daný díl. Tento díl byl zadán společností FORM s.r.o., pro kterou se daná forma navrhuje.

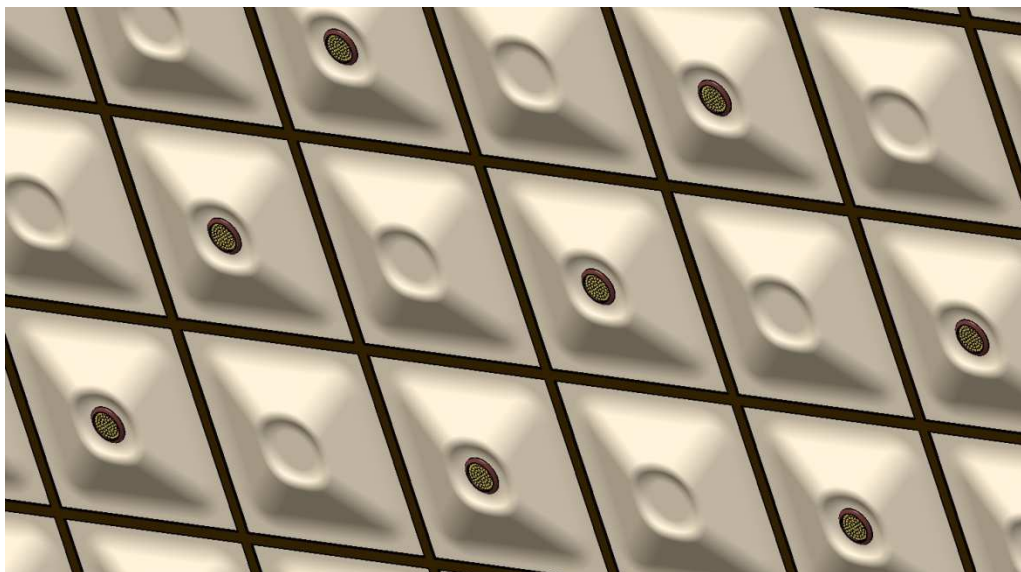
Společnost FORM s.r.o. se zabývá již 20 let výrobou kompozitních výrobků a také se specializuje na výrobky z termoplastů. Mezi jejich hlavní odběratele patří výrobci kolejových vozidel, autobusů a automobilů. Zákazníky mají také v oblasti stavebnictví, zemědělství, komunální a zdravotnické techniky po celé Evropské unii.

Pro dosažení zadaného cíle volíme následující kroky:

- výběr technologie pro daný díl s ohledem na počet kusů,
- návrh modelu, výběr materiálu a způsob obrábění,
- konstrukční řešení dvoudílné RTM formy včetně opěrné konstrukce,
- manipulace s formou pomocí vozíku,
- návrh technologického postupu výroby RTM formy a volba materiálu,
- volba technologických parametrů pro RTM technologii,
- diskuze dosažených výsledků a závěr.

6 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ RTM FORMY PRO DANÝ DÍL

Daný díl pro praktickou část diplomové práce je dán z požadavku zákazníka. Jedná se o kompozitní kazetový stropní systém pro speciální laboratoře. Kazetový systém obsahuje otvory pro svítidla, požární hlásiče a mřížky klimatizace. Pro názornou ukázkou je tento systém znázorněn na následujícím obrázku.



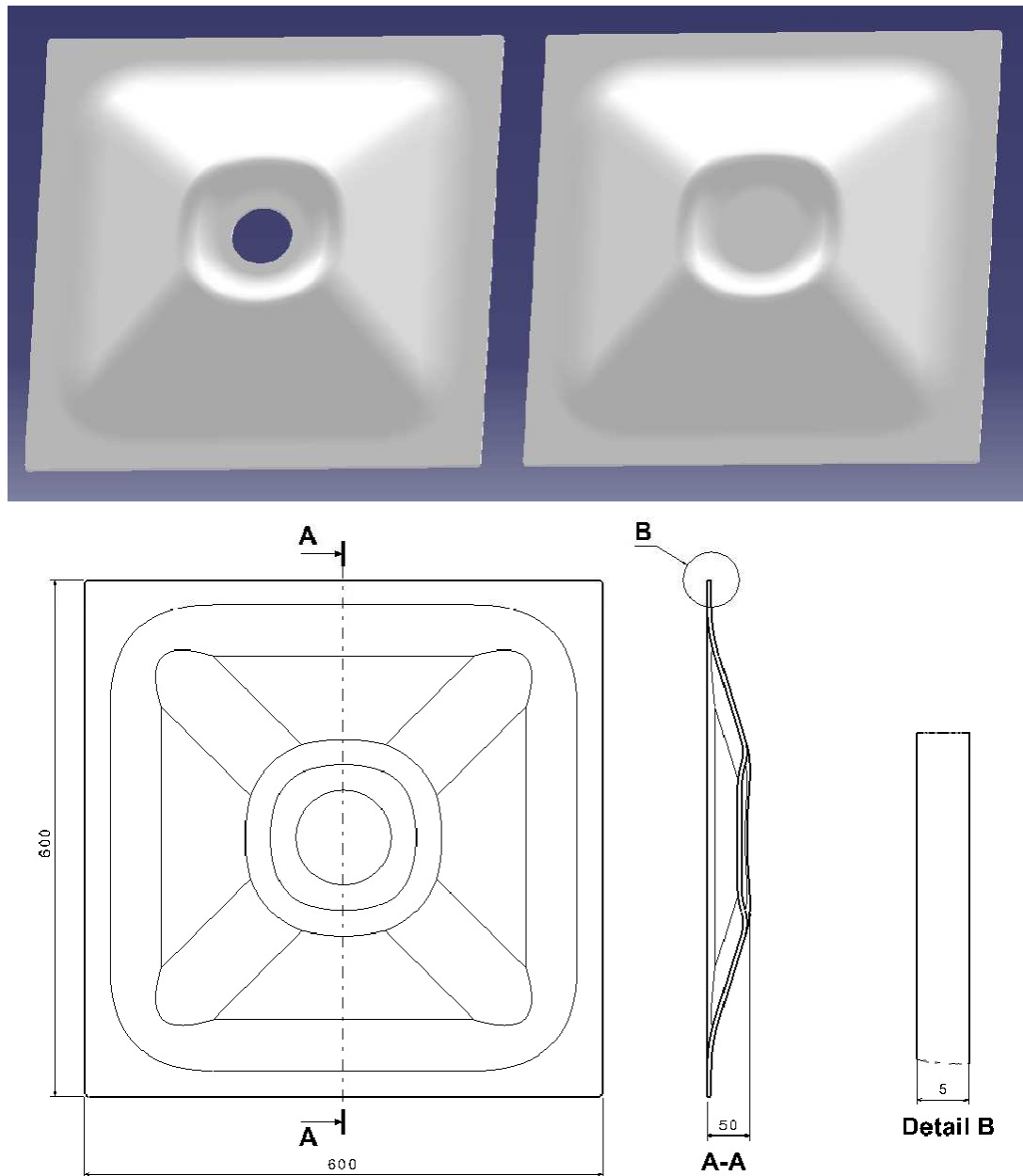
Obr. 33. Kompozitní kazetový stropní systém.

Daným dílem pro navrhování je tedy kompozitní stropní kazeta. Konstrukční návrh bude vypracován v programu CATIA V5 a přílohou bude i výkresová dokumentace modelu, vyztužujících rámu formy a manipulačního vozíku.

Pro výrobu stropních kazet je zvolena RTM technologie z důvodu počtu vyráběných kusů. Sériovost výroby je stanovena na 500 kusů výrobku, tuto technologii je vhodné používat již od 200 kusů.

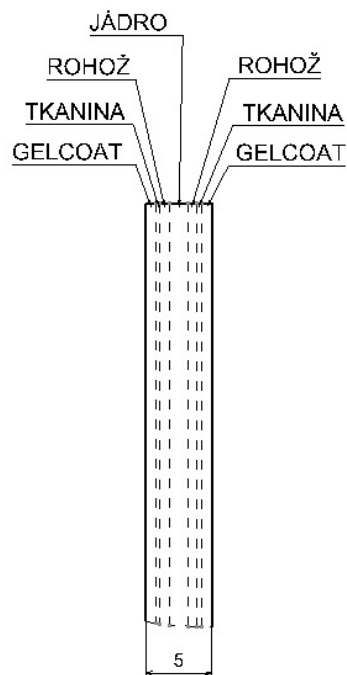
6.1 Návrh dílu

Rozměry stropní kazety jsou stanoveny na 600 x 600mm a tloušťka stěny kazety je 5mm. Barva výrobku bude bílá a požadovány jsou obě pohledové strany. Středové otvory na 100 kusech výrobku budou vytvořeny frézováním při ořezávání okrajů na CNC obráběcím stroji. Ořezané hrany se ručně začistí a dokončí pomocí jemného tmelu. Navržený díl je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 34. Kompozitní stropní kazeta.

Při výrobě dílu bude použita polyesterová pryskyřice HAVELpol 2 - bílá RAL 9010. Je předem urychlená polyesterová pryskyřice. Je vhodná pro výrobu výrobků, u kterých je požadavek na probarvení. Pro vytvrzení přidáváme Butanox M50 v poměru 100:3 hmotnostně. [10]



Obr. 35. Řez výrobkem.

Povrchovou vrstvu výrobku bude tvořit bílý polyesterový gelcoat HAVELGEL 1 – bílý, namíchaný na požadovaný odstín RAL 9010. Pro aplikaci stříkáním je nutné gelcoat naředit styrenem. Styren je jednou ze základních surovin používaných při výrobě polyesterových pryskyřic a gelcoatů. Samostatně se používá jako ředidlo pro polyesterové a vinylesterové materiály. Ve větší míře může ovlivnit kvalitu a parametry vytvrzené pryskyřice. Gelcoat HAVELGEL 1 je vhodný pro lamináty z polyesterových pryskyřic, které nebudou dlouhodobě vystaveny vodě a slunečnímu záření. Tloušťka nastříkané vrstvy gelcoatu na horní i spodní straně výrobku bude 0,8mm. [10]

Jako skelnou tkaninu použijeme AEROGLOSS 125g/m² – plátno. Je to hustěji tkaná skelná tkanina vhodná pro výrobu tvarově méně náročných dílů. Tloušťka vrstvy skelných tkanin bude 0,1mm. Dále použijeme rohož ze skelných vláken 320g/m² a tloušťka vrstvy bude 0,6mm. [10]

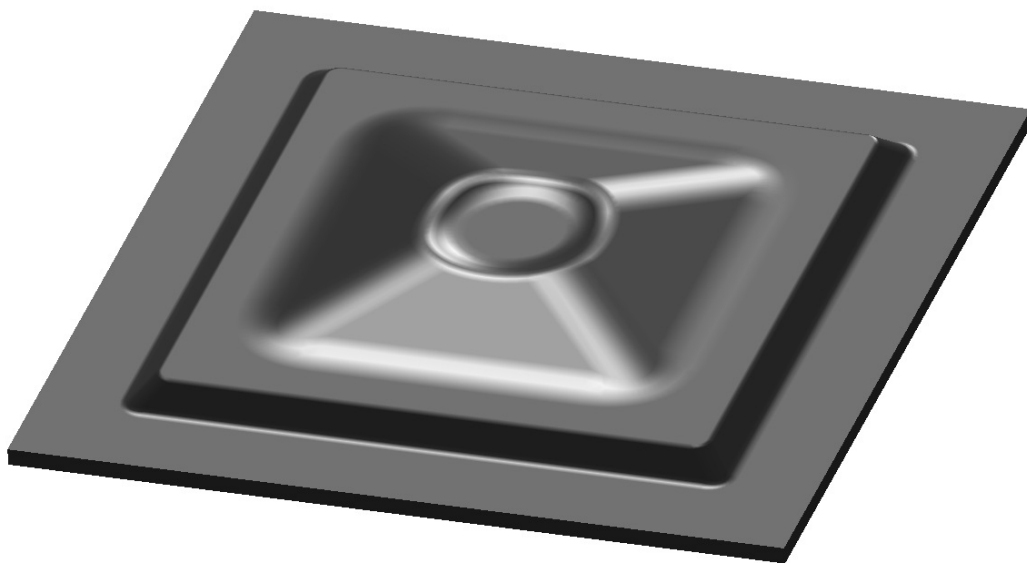
Jádro výrobku bude tvořit SORIC SF 2mm 130g/m². Je to sendvičový materiál vhodný zejména pro infuzi. Materiál má strukturu tvořenou šestiúhelníky a jsou vyztužené tak, aby při tlaku nedocházelo k deformaci výrobku. [10]

6.2 Návrh modelu

Model je nejdůležitějším článkem při výrobě kompozitní formy. Návrh modelu je vytvořen v programu CATIA V5. Při návrhu modelu je potřeba zohlednit všechny technologické přídatky, jako jsou přídatky na smrštění a přídatky pro výrobu formy.

Navržen je jednostranný model. Materiálem modelu je MDF deska. Její předností je hlavně dostupnost, hmotnost a cena. Samozřejmě má i své nevýhody, jako je teplotní odolnost a vliv vlhkosti na rozměrovou stabilitu, proto je vhodné formu vyrábět co nejdříve po dokončení modelu.

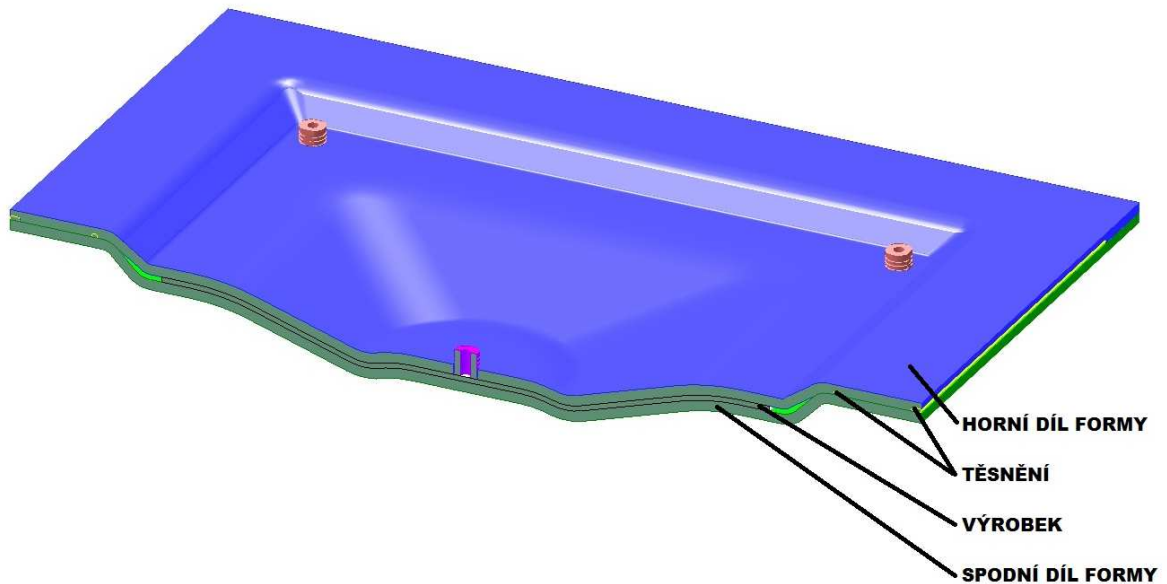
Po navržení modelu se následně vytvoří obráběcí program s výstupem pro CNC obráběcí stroj, na kterém se obrobí požadovaná MDF deska do požadovaného tvaru. Další operací je jemné dokončení tvarových ploch modelu pomocí brusných papírů o zrnitosti od P150 až P1000. Ručně přebroušený model je připraven pro nástřik PUR plniče, který vyplní jemné póry a vyrovná drobné nerovnosti, dále se plnič opět přebrousí jemnými brusnými papíry o zrnitosti od P500 až P1500 a následně zaleští. Díky tomuto je povrch ještě více vyhlazen a připraven pro nástřik laku, který se přešetí a vytvoří ideální povrch pro výrobu formy. Plnič a lak je nanášen ze všech stran modelu z důvodu pronikání vlhkosti. Dále je nutné následující nanesení separátoru TR 900. Separátor slouží ke snadnému odformování. Takto je model kompletní pro výrobu formy. [10]



Obr. 36. Model výrobku.

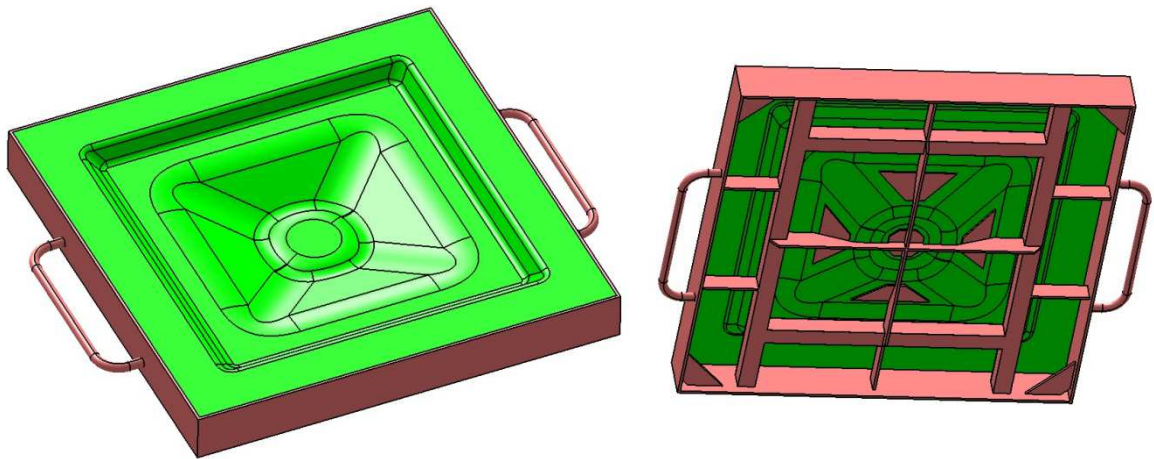
6.3 Návrh formy

Při konstrukčním návrhu formy se vychází z rozměrů modelu. Tvar spodní části kompozitní formy kopíruje povrch modelu. Tvar horní části je osazen, tak aby vytvořil potřebnou dutinu formy. Horní i spodní část formy je utěsněná pomocí těsnění. Návrh kompozitní části formy je popsán v technologickém postupu výroby formy.

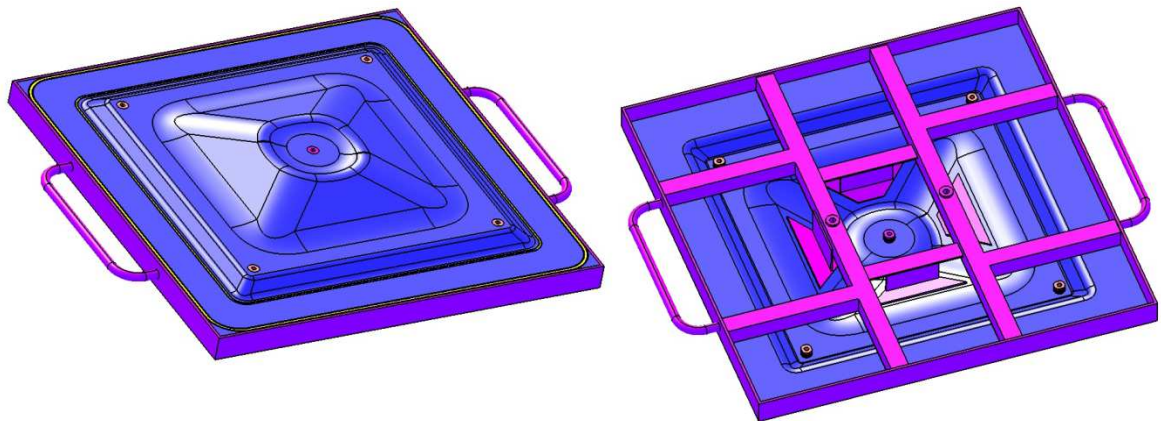


Obr. 37. Řez dutinou formy.

Nejdůležitějším faktorem při návrhu formy je její tuhost a pevnost. Tuhost zajišťujeme pomocí vyztužujících rámců horní a spodní části formy. Vyztužující rámy jsou ocelové z jeklů a plechů. Rámy jsou svařovány. K rámcům se při kompletaci formy přivaří i upínky, naváděcí kolíky, pomocná oka a madla pro snadnou manipulaci s formou. Rám spodní části formy je řešen tak, aby byl následně přišroubován na manipulační vozík. Pro horní formu je rám konstruován tak, aby bylo snadné připojení injektážního systému. Rám formy se vyrábí dle výrobní dokumentace a při kompletaci formy se přizpůsobí dle skutečně vyrobené kompozitní formy a následně je přilepený k této formě.



Obr. 38. Spodní vyztužený díl formy.



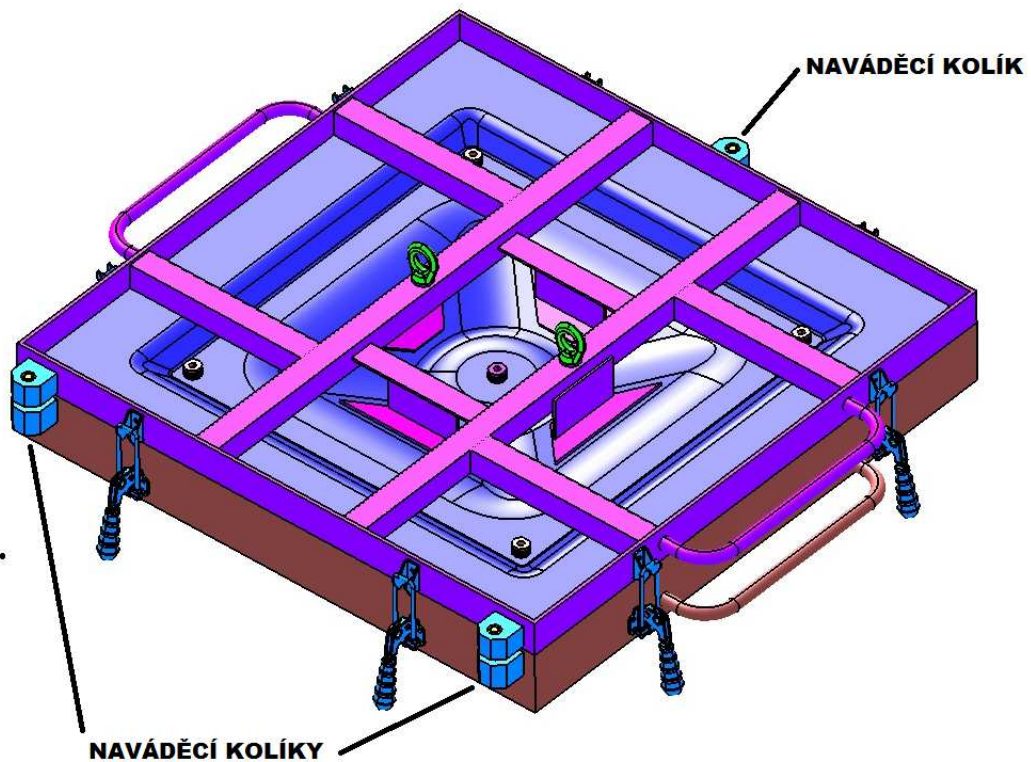
Obr. 39. Horní vyztužený díl formy.

Uzavření formy je zajištěno mechanicky pomocí upínek, které jsou součástí formy. Upínky jsou přivařeny na vyztužující rám formy. Uzavření formy je velice důležité při injektáži pryskyřice. Při nedokonalém uzavření, může vlivem tlaku vyvolaným při vstřikování docházet k pootevření formy. Pro uzavření formy bylo celkem použito 8 kusů upínek a to na každou stranu 2 kusy. Jedná se o hákové upínky typu 403 od firmy Zamet, upínky umožňují rychlé uzavření. Výhodou je malá potřeba prostoru pro montáž a velká upínací síla. Lze seřídit délku uzavíracích třmenů.



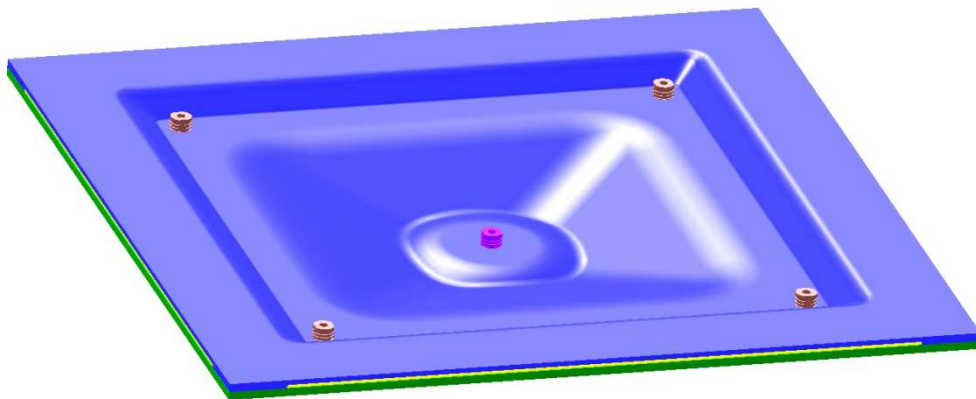
Obr. 40. Háková upínka Zamet typ 403.

Dolní a horní díl formy je nutné přesně usadit při uzavírání, to provedeme pomocí naváděcích kolíků, které budou součástí formy. Pokud bychom neměli přesné vedení, mohlo by při uzavírání docházet k shrnutí skelných tkanin a rohoží, což je nepřijatelné. Pro přesné usazení při návrhu formy bylo použito tedy 3 kusů naváděcích kolíků. Tyto kolíky včetně vedení jsou přidělané k rámu formy. Polohy kolíků jasně určují polohu pro uzavření, aby nemohlo dojít ke špatnému uzavření vlivem otočení horní části formy.



Obr. 41. Umístění naváděcích kolíků.

Dalším důležitým faktorem je umístění vtokového a odvzdušňovacího systému, aby došlo k dokonalému prosycení výrobku při vstřikování pryskyřice. Vtoková vložka je umístěna do středu výrobku. Odvzdušňovací vložky pro výstup pryskyřice jsou umístěny do rohu dílů. Tvary vložek jsou navrženy tak, aby zajistily bezpečné připojování a odpojování injektážního systému.



Obr. 42. Umístění vtoku a odvzdušnění.

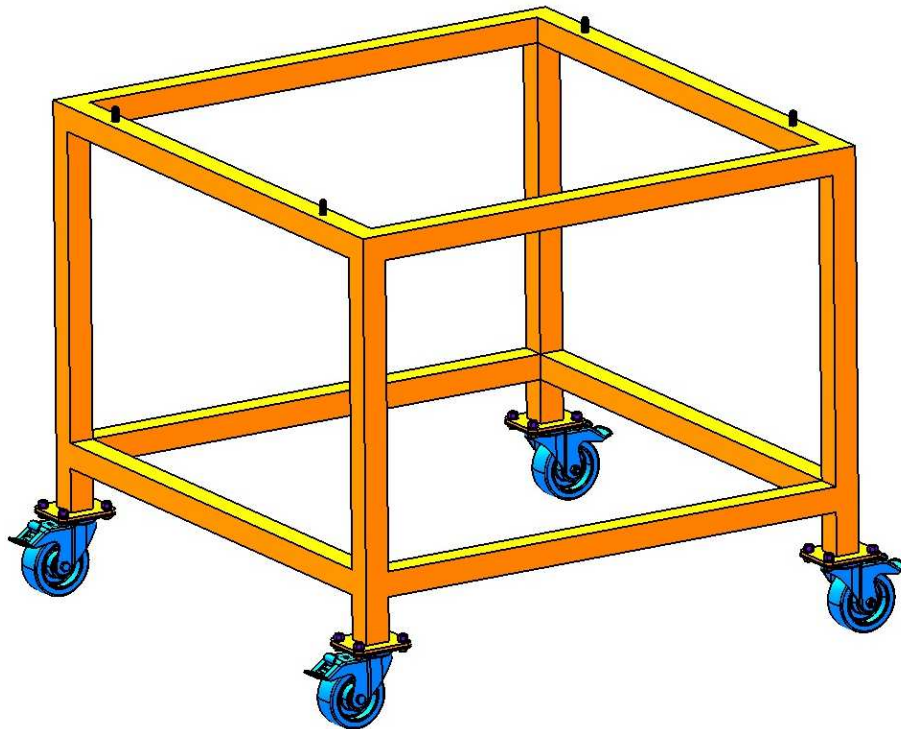
Temperace formy se standardně provádí při sérii nad 10 tis. výrobků. Při dané velikosti série je temperace formy neekonomická, proto u dané formy nad temperací neuvažujeme.

U složitých dílů se používají vyhazovače, aby nedocházelo při odformování výrobku k poškození formy nebo vyráběného kusu. Nevýhodou je, že stopa zůstává po vyhazovačích na výrobku a musí se začistit. U navrhovaného výrobku neuvažujeme nad použitím vyhazovačů, jednak to prodražuje formu a tvar součásti není složitý pro odformování bez použití vyhazovačů, dále se chceme vyhnout stopám po vyhazovačích. Odformování u navržené formy se provádí fouknutím stlačeného vzduchu mezi formu a výrobek.

6.4 Konstrukce manipulačního vozíku

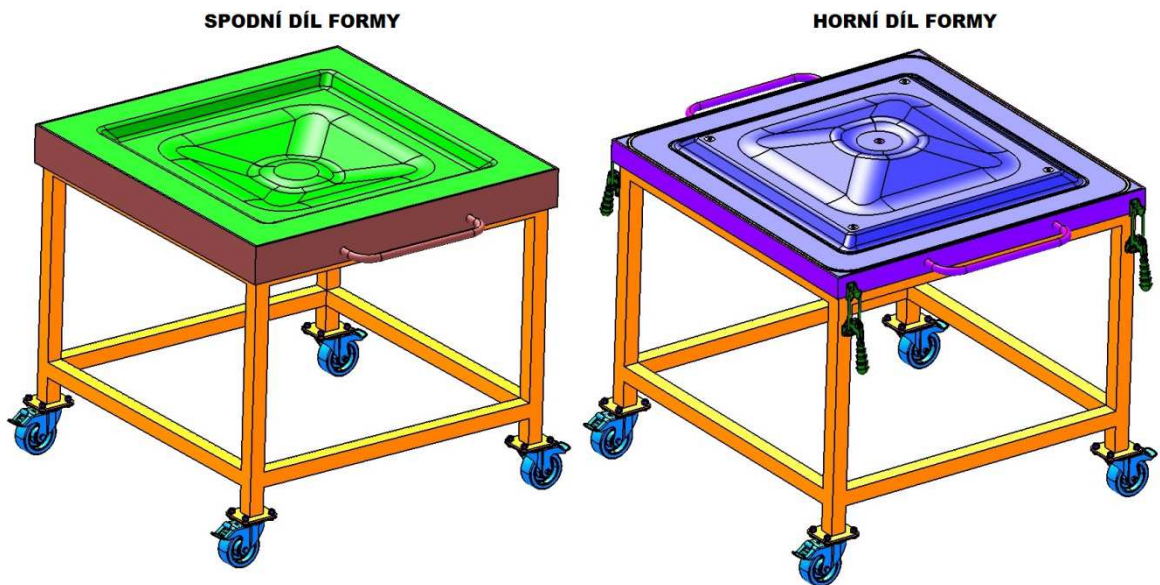
Konstrukce manipulačního vozíku vychází z rozměrů, které jsou dané vyztužujícím rámem formy. Při navrhování vozíku vycházíme z požadavku výroby na snadnou manipulaci. Z požadavku výroby také vychází výška dělící roviny formy, a to 850mm od podlahy. Konstrukce vozíku tvoří ocelový rám z jechlů o rozměrech TR 4HR 40x3 a plechů tloušťky 5mm, který zajišťuje dostatečnou tuhost a stabilitu formy.

Pro snadnou manipulaci je vozík opatřen pojezdovými kolečky. Tyto kolečka volíme v závislosti na povrchu, po kterém se budou pohybovat, a proto byly zvoleny kola větších rozměrů. Z důvodu zajištění polohy stojanu je nutné použít pojezdové kola s brzdou. Pojezdová kola použijeme od firmy Blickle. Jedná se o pojezdovou kladku typu L-ALST 100K-FI, je to točná kladka z ocelového plechu, těžké provedení, se základovou deskou a s brzdou. Kolo je s polyuretanovým běhounem s ocelovými svařovanými disky. Tyto kladky mají průměr kola 100mm a nosnost 200kg, která je dostačující pro danou formu.

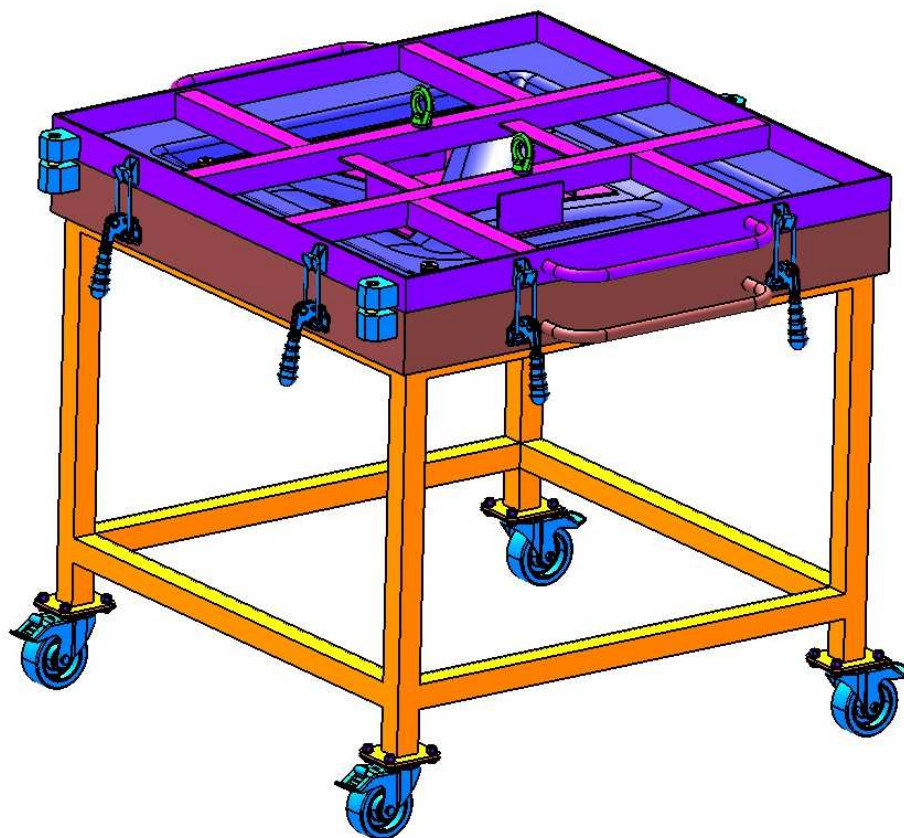


Obr. 43. Konstrukce manipulačního vozíku.

Pojezdová kola jsou přišroubována k rámu. Vozík je se spodní částí formy spojený pevně pomocí šroubů. Pro odkládání horní části formy a snadnou manipulaci s ní je vyroben stejný vozík, který je spojený s formou pomocí upínek Zamet typ 403. Vozík společně s formou je znázorněn na následujících obrázcích.



Obr. 44. Znáznornění otevření formy.



Obr. 45. Vozík společně s uzavřenou formou.

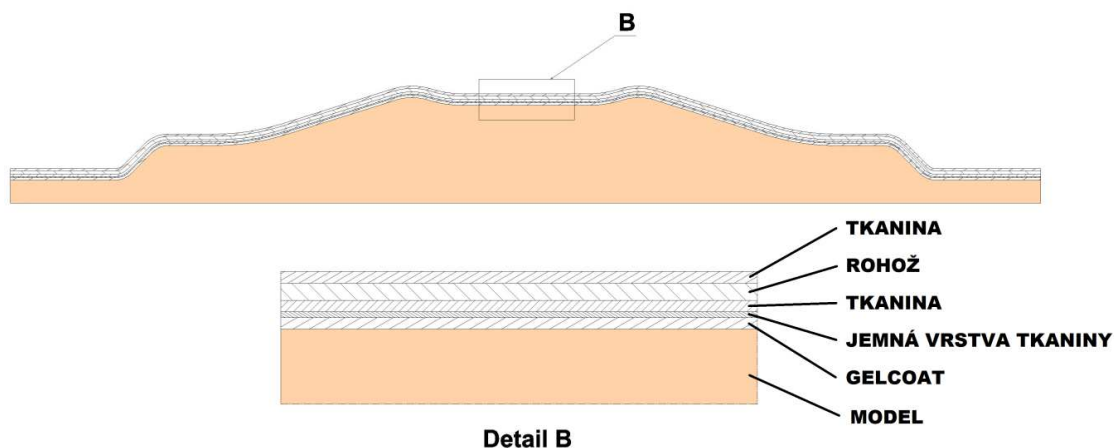
7 NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU VÝROBY RTM FORMY A VOLBA MATERIÁLU

Kompletně připravený model pro výrobu formy, na který je nanesen separátor TR 900, je podkladem pro výrobu formy.

Separátor TR 900 je nanesen pomocí hadříku bez otřepů. Dokud je povrch mokrý, jemně se separátor roztírá dalším čistým bavlněným hadříkem. Nanášení se provádí z jednoho konce na druhý po částech, s malým překryvem.

Na připravený model je nastříkán vinylesterový formový gelcoat na výrobu forem Norpol GM 60014 – zelený. Tento gelcoat má vysokou trvanlivost, je stálý za tepla a je méně náchylný k tvorbě trhlin a matování. Před touto operací je nutné odzkoušet nástřik gelcoatu na menším vzorku, abychom potvrdili kvalitu výsledku. Gelcoat o celkové tloušťce 2mm je stříkán ve třech vrstvách s technologickými přestávkami. Želatinační doba gelcoatu je 10-25 minut. První dvě vrstvy jsou o tloušťce 0,65mm a třetí vrstva je o tloušťce 0,7mm. Minimální teplota během vytvrzování je 18°C.

Gelcoat Norpol GM 60014 je vhodný pro formy laminované polyesterovou pryskyřicí. Povrch a detaily vytváříme přesným kopírováním modelu. Lze brousit a leštit. Případné opravy jsou lehce proveditelné. Je zelené barvy a použitý bude ve verzi S - vhodný pro nanášení stříkáním. Při stříkání se musí nanášet postupně, tak aby mohlo dojít k úplnému úniku nežádoucích vzduchových mikrobublinek. Při aplikaci stříkáním se doporučuje používat speciální stroj pro stříkání gelcoatů, který pro stříkání používá tlakovou pumpu. K gelcoatu je třeba použít tužidlo-katalyzátor. Katalyzátor je peroxid K1 v přídávku 1,3-2% hmotnostně. [10]



Obr. 46. Skladba spodní části formy.

Po třech hodinách od posledního nástřiku třetí vrstvy gelcoatu se mohou nanášet vrstvy skelných tkanin. Na gelcoat je jako první nanesena jemná vrstva skelných tkanin AEROGLOSS 140g/m² – plátno, z důvodu rozměrové stálosti formy, je to velmi kvalitní skelná tkanina, extrémně rychle se prosycuje epoxidovými, polyesterovými i vinylesterovými pryskyřicemi. Vykazuje vysokou pevnost. Po prosycení je velmi transparentní. Jako pojivo je použita polyesterová pryskyřice RM 2000, je to nenasyčená polyesterová pryskyřice určená speciálně pro výrobu forem. Vhodná i pro výrobu složitějších i tvarově náročných forem, doba zpracovatelnosti je 40 - 45 minut. Pro vytvrzení pryskyřice je použit peroxid CATA 2000, je to peroxid pro pryskyřice RM 2000 a poměr míchání je 100 : 1 - 1,5. Pryskyřice je nanášena pomocí válečků a štětců, tak aby došlo k dokonalému prosycení, vytlačení přebytečné pryskyřice a odstranění vzduchových bublin. Výška této vrstvy je 0,4mm. [10]



Obr. 47. Ukázka používaných nářadí pro RTM formy. [5]

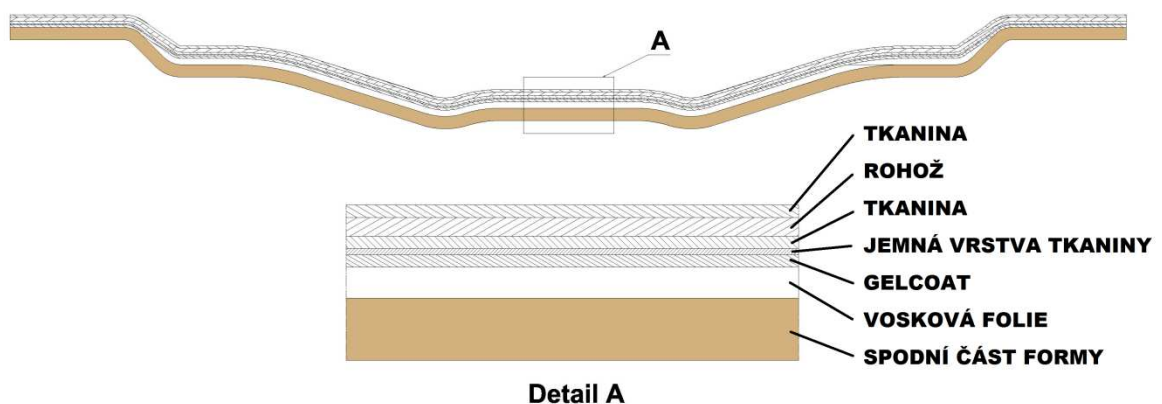
Dále je kladena skelná tkanina AEROGLOSS 390g/m² – plátno, je to velmi kvalitní skelná tkanina, extrémně rychle se prosycuje polyesterovými pryskyřicemi. Vykazuje vysokou pevnost a po prosycení je velmi transparentní. Mezi jednotlivými vrstvami je nutné dodržet technologickou přestávku na zatuhnutí a vytvrnutí. Technologická přestávka je stanovena na 16 hodin. Daná tkanina je kladena ve dvou vrstvách a je prosycovaná již dříve zmiňovanou pryskyřicí. Celková tloušťka daných vrstev činí 2mm.

Na vrstvu skelných tkanin se nanáší vrstvy skelné rohože AEROGLASS 450g/m² a je kladena ve třech vrstvách za dodržení technologických přestávek. Prosycování je taktéž danou pryskyřicí. Celková tloušťka vrstev skelné rohože je 3,6mm.

Poslední vrstva spodní části kompozitní formy je opět tvořena skelnou tkaninou AEROGLASS 390g/m² – plátno. Daná tkanina je kladena ve dvou vrstvách. Celková tloušťka daných vrstev činí 2mm.

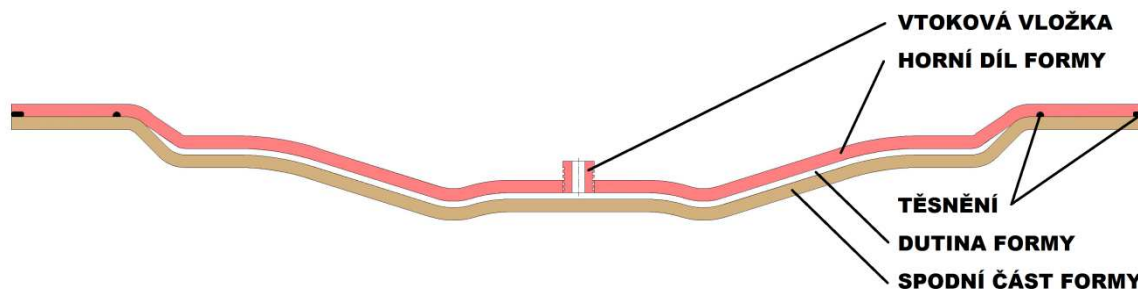
Celková výška laminované vrstvy je 10mm. Po vytvrzení formy je nutné ořezat přečnívající část laminátu a přidělat ocelový vyztužující rám pomocí lepidla Emfimastic PU 50, což je jednosložková pružná lepicí hmota pro lepení laminátových dílů a jejich spár. Pružně slepuje laminát, kov, některé plasty, dřevo a spousty dalších materiálů. Materiál, který je velmi často používaný a vyzkoušený. Dodává se v kartuši 310 ml v bílém, šedém nebo černém odstínu. Pro vytlačování je doporučeno použití aplikační pneumatické pistole V – 103. Nalepený svařený ocelový rám se následně přelaminuje jednou vrstvou skelné tkaniny AEROGLASS 280g/m² a tím je zajištěno spojení pro dostatečnou pevnost a tuhost formy. [10]

Po dokončení spodní části formy se model odejme z formy a vyčistí se dutina formy. Pro zhotovení horní části formy se dutina formy vyloží voskovou folií tloušťky 5mm a vyplní se spoje. Vosková folie je materiál, který se používá pro vymezení budoucího prostoru mezi oboustrannou formou, která se bude používat pro lisování laminátu. Tyto fólie se dobře tvarují i do složitějších tvarů a oproti vrstvám tvořených laminováním, zaručují konstantní tloušťku i v rozích formy. [10]



Obr. 48. Skladba horní části formy.

Při výrobě horní části formy se postupuje stejným způsobem, jako při dolní části formy, jen je potřeba do horní části formy ještě před aplikací gelcoatu zabudovat pásku pro vymezení prostoru na těsnění, vtokové a odvzdušňovací vložky dle konstrukčního návrhu formy. Těsnění je umístěno ve dvou pruzích, na kraji dutiny a na kraji formy.



Obr. 49. Řez formou.

Pro dokončení formy je nutné dutinu formy připravit pro výrobu výrobku. V první fázi je nutné odstranění zbytku vosku z dutiny formy. Další fází je jemné přebroušení tvarových ploch formy pomocí brusných papírů o zrnitosti od P500 až P1500 a následuje doleštění pomocí leštící pasty pro formy Oskar's M-100. Pro finální dokončení je nutná instalace těsnění do vnitřní i vnější části připravených drážek formy dle konstrukčního návrhu. Po konečné instalaci je do formy nanesen separátor TR 900.

Pro ověření správné funkce formy je potřeba provést mechanické zkoušky formy a technologické zkoušky. Pokud forma splní všechny testovací náležitosti, tak je kompletně připravena pro výrobu dílů.

Tab. 9. Shrnutí technologického postupu.

Č.O.	POPIS	MATERIÁL - rozměr/množství
1.	Výroba modelu na CNC stroji dle obráběcího programu.	MDF deska - 100x950x950mm
2.	Jemné dokončení tvarových ploch, nástřik PUR plniče, přebroušení, zaleštění, nástřik laku a přešetření (nástřik PUR plniče a laku ze všech stran), nanesení separátoru.	Brusný papír - P150 až P1500 PUR plnič TU 100/NO Tužidlo PUR – TH 793 Bezbarvý lak Separátor - TR 900

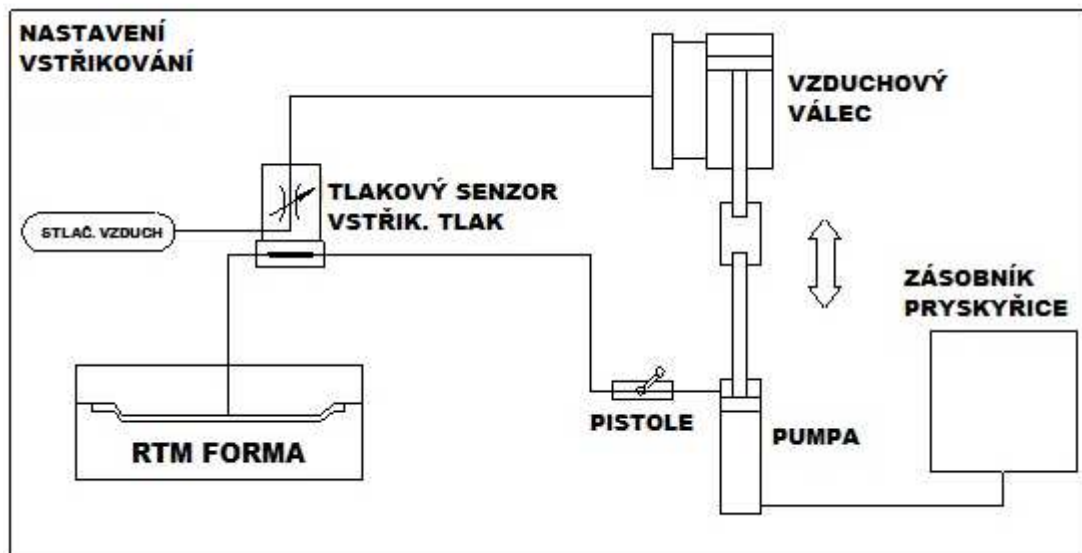
3.	Nástřik gelcoatu – 3 vrstvy o celkové tloušťce 2mm (0,65mm,0,65mm a 0,7mm), doba želatinace 10 až 25minut. Technologická přestávka před další operací je 3hodiny.	Gelcoat NORPOL GM60014 - 2,1kg Peroxid K1 - 35g
4.	Výroby spodní části formy: kladení skelných tkanin a rohoží: - AEROGLASS 140g/m ² – 1 vrstva - AEROGLASS 390g/m ² – 2 vrstvy - AEROGLASS 450g/m ² – 3 vrstvy - AEROGLASS 390g/m ² – 2 vrstvy Technologická přestávka mezi vrstvami je stanovena na 16 hodin.	AEROGLASS: 140g/m ² - 0,16kg 390g/m ² - 1,72kg 450g/m ² - 1,49kg Pryskyřice RM 2000 - 8,77kg Peroxid CATA 2000 - 120g
5.	Ořezání přečnávajících částí, svaření výztužného rámu dle výkresu s ohledem na skutečně vyrobenou formu, přilepení a přilaminování rámu k formě.	Lepidlo Emfimastic PU 50 – 310ml AEROGLASS 280g/m ² - 0,3kg Pryskyřice RM 2000 – 0,6kg Peroxid CATA 2000 - 8g
6.	Vyjmutí modelu z formy, vyčištění dutiny formy.	
7.	Výroby horní části formy: vyplnění dutiny formy voskovou folií a vyplnění spojů. Vymezení prostoru pro těsnění – vnitřní a vnější, zabudování vtokové vložky do středu a odvodušňovacích vložek do rohu formy. Při výrobě horní části formy opakujeme postup dle operace 4. a 5.	Vtoková vložka UN-501-016 – 1ks Odvzdušňovací vložka UN-501-015 – 3ks Vosková folie tloušťky 5mm – 0,9m ²
8.	Pro dokončení formy nutná instalace vedení a uzavíracích upínek dle výkresové dokumentace. Následuje odstranění zbytků vosku z dutiny formy, přebroušení tvarových ploch, leštění, instalace těsnění a nanesení separátoru.	Vedení – UN-542-012 – 3ks Upínka ZAMET 403 – 12ks Brusný papír P500-P1500 Leštící pasta - Oskar´s M-100 Těsnění vnitřní: JHM TECH 1680-25 Těsnění vnější: JHM TECH 1114-25 Separátor - TR 900
9.	Provede mechanických a technologických zkoušek.	

8 VOLBA TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PRO RTM TECHNOLOGII (TEPLOTA, TLAK, ČAS)

Pro výrobu kvalitních a dobře prosycených výrobků je nutné zvolit správné technologické podmínky. Technologické parametry jsou zvoleny pro daný díl a tyto podmínky se ověřují na zkušebních kusech. Před výrobou je potřeba provést tedy ověřovací sérii na 5 vzorcích. K ověřovací sérii je potřeba vést potřebnou dokumentaci, která zajišťuje popsání technologické podmínky a postupy výroby u každého zkušebního vzorku. Na základě schválení kontroly kvality je zahájena sériová výroba.

Konkrétní jednotlivé parametry pro výrobu dílů jsou zvoleny dle doporučení a dle praktických zkušeností.

Prvotním důležitým faktorem je vstřikovací tlak pryskyřice, který je vyvíjený pumpou. Vstřikovací tlak je tedy stanoven na 0,26MPa, po doplnění formy udržujeme tlak ve formě 3,1MPa. Tlak je zvolen na základě propustnosti, viskozity pryskyřice a velikosti formy. Důležité je zachovat podmínky správného uzavření při vstřikování, je tedy nutné, aby nedošlo při vstřikování k překročení uzavírací síly.



Obr. 50. Princip RTM vstřikování. [5]

Dalším faktorem je teplota, ta je dána v závislosti na druhu pryskyřice dodavatelem a ten udává konkrétní hodnoty zpracování. Vzhledem k tomu, že forma není temperovaná, tak pryskyřice tuhne za pokojové teploty a ta je stanovena na 20°C.

Časové hodnoty tuhnutí a vytvrzení jsou stejně jako teplota udávány dodavatelem. Pro naši aplikaci, kdy výrobek zatuhne za pokojové teploty, je konkrétní hodnota časové jednotky 26 minut při 20°C. Hodnota samotného vytvrzení výrobku je při 20°C 24 hodin.

9 DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Dosáhli jsme návrhu kompletní formy pro RTM technologii na konkrétní díl dle požadavku zákazníka. Postupovali jsme dle zvyklostí pro návrh a tvorbu kompozitní formy. Pokud bychom se zaměřili na konkrétní zvyklosti, zjistili bychom, že každá firma považuje své řešení za to nejlepší a liší se v detailech.

Jako příklad lze uvést vyztužující rám, na který je možné přivařit dle potřeby další potřebné upínky nebo přídavné madla. Samozřejmě by šlo použít i jiné řešení, jako je například kompozitní rám, na který by se upínky a vodící kolíky šroubovaly do kovových výztuh. Zvolili jsme tedy ocelový rám dle zvyklostí a výhod, kterými disponuje, nejenom tuhostí, ale především variabilitou doplnění různých pomocných prvků na základě požadavků, které vzniknou při výrobě.

Dosažením kvalitních výsledků je potřeba nejenom kvalitního návrhu formy, ale také kvalitní výroby formy a všech částí s tím spojených. Nesmíme zapomínat na velice důležité technologické parametry pro výrobu dílů vytvářející kvalitní výrobek, který splňuje všechny požadavky na použití a výrobu.

Při výrobě formy jsou zohledněny skladové zásoby firmy, které jsou využity u konkrétního návrhu formy. Jedná se především o materiál pro výrobu kompozitních částí formy a pro výrobu ocelových vyztužujících rámu, ale také o drobnosti, které jsou objednávány ve větším množství, jako jsou upínky a pojezdová kola.

Důležitým faktorem je hmotnost formy, při návrhu této formy jsme dosáhli celkové hmotnosti 135kg a to včetně všech potřebných součástí. Pokud to rozdělíme na tři samostatné části, tak hmotnost manipulačního vozíku včetně pojezdových kol a šroubů je 37,2kg. Dále celková hmotnost spodní části formy je 54,5kg. Tyto dva díly jsou pevně spojeny, proto počítáme s celkovou hmotností vozíku a spodní části formy a ta činí 91,7kg. Manipulace s touto spodní částí formy je pomocí pojezdových kol vozíku, proto samotná hmotnost není až tak důležitá. Nejdůležitější hmotností ze všech je samotná hmotnost horní části. S touto částí je manipulováno ručně, proto je důležitost této hmotnosti tak velká. Celková hmotnost pro ruční manipulaci s horní částí formy je 43,3kg. Pro zavírání a otevírání formy je zapotřebí dvou osob a to jak z důvodu samotné hmotnosti, tak z důvodu bezpečného uzavření a otevření formy.

Z ekonomického hlediska jsou náklady pro výrobu kompozitní formy rozděleny na více částí. První částí jsou náklady na výrobu modelu, ty jsou stanoveny na 41 tisíc Kč. Kompozitní částí formy stojí 76 tisíc Kč. Další jsou náklady na vložkování a povrchovou úpravu formy, ty stojí 15 tisíc Kč a poslední částí jsou náklady na výztužné rámy s komponenty a ty stojí 32 tisíc Kč. Celkové náklady na výrobu kompozitní formy jsou tedy 164 tisíc Kč. Náklady na výrobu kompozitní formy můžeme porovnat s náklady na kovovou formu. Náklady na kovovou formu by byly řádově dvakrát větší, cena kovové formy pro daný díl je 318 tisíc Kč.

Při samotné výrobě formy je kladen důraz na bezpečnost práce a ochranu zdraví. Tato bezpečnost je soustředěna do dvou základních odvětví, a to jednak na ochranu dýchacích cest, tak na ochranu kůže. Pro ochranu dýchací cest se používají dýchací respirátory a různé chemické masky nebo polomasky. Pro ochranu kůže se používají kombinézy protiprachové a chemicky odolné, dále speciální rukávy a latexové rukavice.

ZÁVĚR

Závěrem této diplomové práce je nutné zopakovat splněné cíle na základě zadání. Teoretická část je zaměřena na téma RTM technologie. Konkrétně jsou zde zmíněny kompozitní materiály, samotná RTM technologie, konstrukční řešení RTM forem, volby materiálu modelů a forem a přehled vhodných dílů pro RTM technologii.

Samotná praktická část je zaměřena na konkrétní návrh RTM formy pro daný díl. Sériovost výroby byla stanovena na 500 kusů. Výrobkem byla kompozitní stropní kazeta.

První částí praktického řešení je návrh konkrétního konstrukčního řešení. Konstrukční řešení začíná návrhem dílů, následuje návrh a postup výroby modelu. Tento model je navržen z MDF desek a vyrábí se na CNC stroji s následujícími dokončovacími ručními operacemi. Jako další a nejhlavnější částí je návrh kompozitní formy. Tato kompozitní forma je vyztužena z důvodu tuhosti pomocí ocelového rámu. Součástí konstrukčního řešení je i návrh umístění vtokového a odvzdušňovacího systému. Uzavírání formy je řešeno mechanicky pomocí upínek a poloha správně uzavřené formy je zajištěna vodičnými kolíky. Pro kompletní konstrukční řešení je nutný i návrh manipulačního vozíku. Tento vozík je navržen z ocelových jeleků a jeho součástí jsou pojezdová kola pro pohodlnou manipulaci.

Další část je zaměřena na technologický postup výroby formy a volbu materiálu formy. V této části je detailně popsán samotný postup výroby formy. Forma se skládá z horní a dolní kompozitní části. Těsnění, vtokové a odvzdušňovací vložky jsou umístěny do horní části této kompozitní formy. V postupu je popsána příprava modelu, nástřik gelcoatu, kladení jednotlivých vrstev skelných tkanin a rohoží. Technologický postup obsahuje časové a materiálové informace. Součástí postupu je i příprava formy pro samotnou výrobu.

Pro danou formu je nutné stanovit technologické parametry pro výrobu. Nejprve jsou zmíněny zkoušky technologických parametrů a kontrola kvality. V dalším kroku jsou zmíněny konkrétní hodnoty technologických parametrů. Volen je nejprve tlak pro vstřikování, následně je zvolen tlak po zaplnění formy pryskyřicí. Dále jsou zvoleny časové hodnoty tuhnutí a vytvrzení, ty jsou udávány dodavatelem dle materiálových listů. Teplotní parametry jsou stanoveny na pokojovou teplotu z důvodu, že forma neobsahuje temperaci.

Diskuze dosažených výsledků je zaměřena na zvyklosti firem a jejich odlišností v konstrukčním řešení forem. Je zde zmíněna důležitost kvality, bezpečnost práce a ochrana zdraví při výrobě. Dále je zde zmíněna hmotnost jednotlivých částí formy a ekonomické zhodnocení výroby formy.

Přílohou k diplomové práci je výkresová dokumentace modelu, vyztužujících ráků formy a manipulačního vozíku. Všechny stanovené cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AGARWAL B. D. a BROUTMAN L. J. *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1987, ISBN 04-217-87.
- [2] KOŘÍNEK Z. *Kompozity* [online]. [cit. 2014-09-29]. Dostupný z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>.
- [3] EHRENSTEIN G. W. *Polymerní kompozitní materiály.* V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] MAZUMDAR S. K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering.* Boca Raton: CRC Press, 2002, ISBN 08-493-0585-3.
- [5] WOLFANGEL R. *What is RTM, Mould construction* [online]. Germany: Wolfangel GmbH [cit. 2014-09-29]. Dostupný z: <http://www.wolfangel.com/>.
- [6] *Technologie výroby kompozitů, výroba modelu* [online]. Havel Composites CZ s.r.o., 2014 [cit. 2014-09-29]. Dostupný z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie.html>.
- [7] *Časopis Transfer: Elektronický sborník VZLÚ - výzkum a vývoj pro letecký průmysl.* [online]. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., 2007-2014 [cit. 2014-09-29]. Dostupný z: <http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/>.
- [8] *MM Průmyslové spektrum: Strojnířský měsíčník.* Praha: Vogel Publishing, 1997. ISSN 1212-2572. Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/>.
- [9] DAĐOUREK K. *Kompozitní materiály-druhy a jejich užití.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra materiálu, 2007.
- [10] *Materiálové listy produktů* [online]. Havel Composites CZ s.r.o., 2015 [cit. 2015-02-10]. Dostupný z: <http://www.havel-composites.com>.
- [11] LEINVEBER J., ŘASA J. a VÁVRA P. *Strojnické tabulky.* Třetí, doplněné vydání. Praha: Scietia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [12] LEINVEBER J. a VÁVRA P. *Strojnické tabulky.* Druhé doplněné vydání. Praha: ALBRA, 2005. ISBN 80-7361-011-6.
- [13] SKOČOVSKÝ P., PALČEK P., KONEČNÁ R. a VÁRKOLY L. *Konstrukční materiály.* Žilina: Žilinská univerzita, 2000.
- [14] LAŠ V. *Mechanika kompozitních materiálů.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, ISBN 80-704-3273-X.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CNC	Computer Numeric Control (číslicové řízení počítačem)
EP-R	Epoxidové pryskyřice
HP-RTM	High Pressure RTM
HS-RTM	High-Speed RTM
LRTM	RTM Light
MDF	Medium Density Fibreboard (polotvrdá dřevovláknitá deska)
PF-R	Fenolické pryskyřice
RTM	Resin Transfer Molding
SCRIMP	Seeman Composite Resin Infusion Molding Process
SQRTM	Same Qualified RTM
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice
VARTM	Vacuum Assisted RTM.
VE-R	Vinylesterové pryskyřice

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem s výztuží na bázi destičkovitých částí jílu – montmorillonitu (MMT.) [2].....	12
Obr. 2. Diagram TTT (“Time-Temperature-Transformation”). [2].....	14
Obr. 3. Schéma výroby skleněných vláken tažením z trysek. [2].....	19
Obr. 4. Schéma RTM procesu. [4].....	22
Obr. 5. Schéma RTM procesu. [6].....	23
Obr. 6. Průběh procesu RTM. [4]	24
Obr. 7. Topná spirála pro vytápění RTM forem. [5]	25
Obr. 8. Vakuum injekční technologie. [6]	27
Obr. 9. Schéma SCRIMP procesu. [4].....	27
Obr. 10. RTM forma. [5]	29
Obr. 11. RTM forma se všemi konstrukčními prvky. [4]	29
Obr. 12. Rozmístění vstupních a odvodušňovacích otvorů. [5].....	30
Obr. 13. Prstencový tok pryskyřice. [5].....	30
Obr. 14. Okraje formy. [5].....	31
Obr. 15. Detail konstrukce RTM formy. [5].....	31
Obr. 16. Uzavřená forma. [5].....	32
Obr. 17. Uzavírání formy. [5]	32
Obr. 18. Výroba modelu. [6].....	34
Obr. 19. Kompozitní forma [6].....	35
Obr. 20. Pětiosé obráběcí centrum Power. [8].....	40
Obr. 21. Výběr fréz s CVD povlaky různých průměrů pro obrábění kompozitu. [8].....	41
Obr. 22. Schéma výroby vrtulového listu metodou RTM. [7].....	43
Obr. 23. Kompozitní vrtulový list. [7]	44
Obr. 24. Řez listem – viditelné je překrytí vrstev náběžné a odtokové hrany. [7]	44
Obr. 25. Vytvrzený nosník bez kování. [7].....	44
Obr. 26. Střední segment nosníku malého dopravního letadla. [7]	45
Obr. 27. Díly automobilu SMART Crossblade. [5].....	45
Obr. 28. Neoříznuté díly automobilů. [5]	46
Obr. 29. Části vyráběné RTM technologií. [4]	46
Obr. 30. Typické díly pro malé a střední série vyráběné RTM technologií. [4].....	47
Obr. 31. Jednodílný skořepinový rám kola. [4]	47

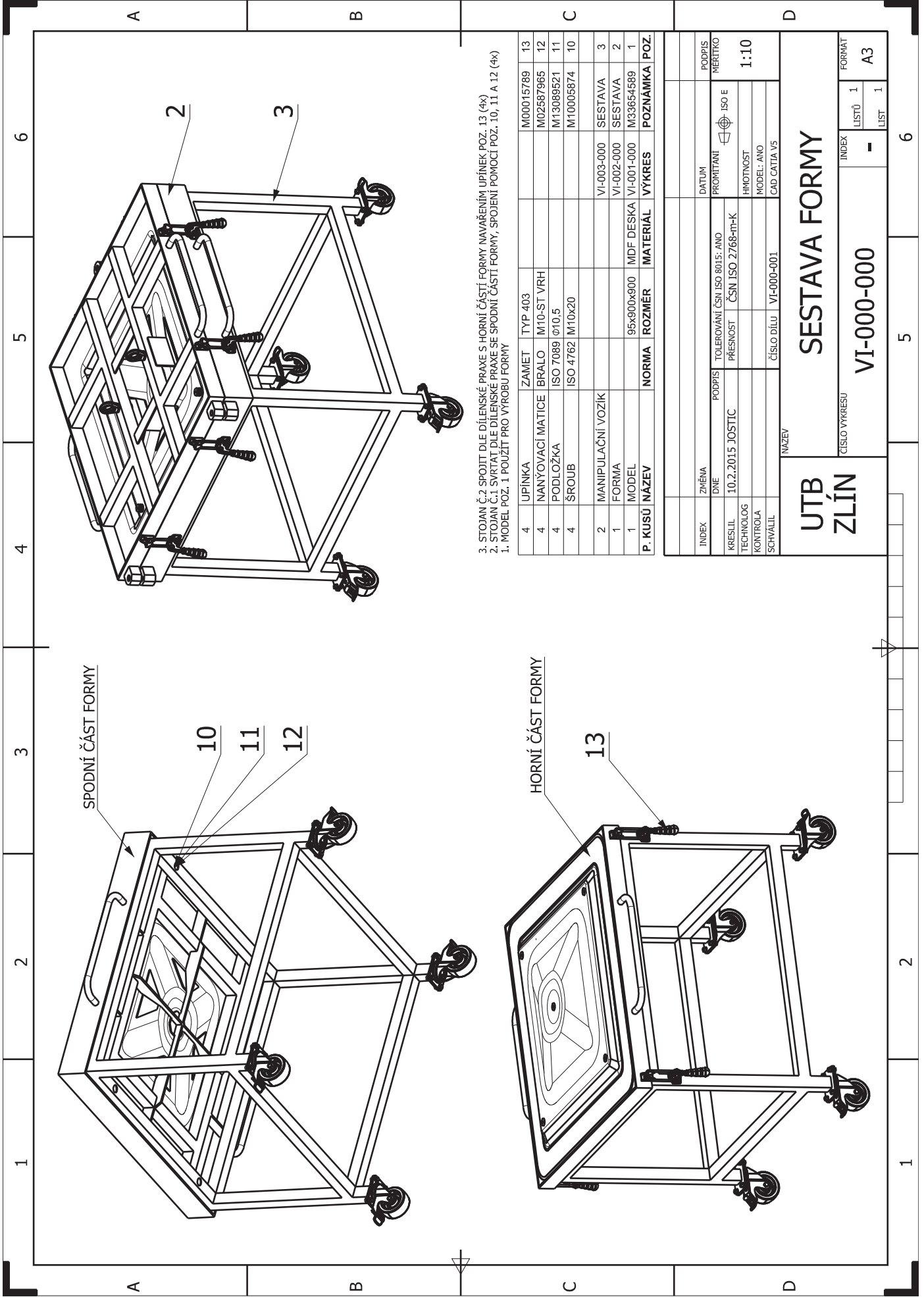
Obr. 32. Plášť vnitřních dveří. [5].....	48
Obr. 33. Kompozitní kazetový stropní systém.	51
Obr. 34. Kompozitní stropní kazeta.....	52
Obr. 35. Řez výrobkem.....	53
Obr. 36. Model výrobku.	54
Obr. 37. Řez dutinou formy.	55
Obr. 38. Spodní vyztužený díl formy.	56
Obr. 39. Horní vyztužený díl formy.	56
Obr. 40. Háková upínka Zamet typ 403.....	57
Obr. 41. Umístění naváděcích kolíků.	57
Obr. 42. Umístění vtoku a odvzdušnění.	58
Obr. 43. Konstrukce manipulačního vozíku.	59
Obr. 44. Znázornění otevření formy.	60
Obr. 45. Vozík společně s uzavřenou formou.	60
Obr. 46. Skladba spodní části formy.....	61
Obr. 47. Ukázka používaných náradí pro RTM formy. [5]	62
Obr. 48. Skladba horní části formy.....	63
Obr. 49. Řez formou.	64
Obr. 50. Princip RTM vstřikování. [5]	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách. [3].....	13
Tab. 2. Materiály modelů (maket) a jejich vlastnosti. [7].....	33
Tab. 3. Náklady na materiál potřebný na výrobu 1 m ² formy (výztuž ve formě skelných vláken). [7]	36
Tab. 4. Náklady na materiál potřebný pro výrobu 1 m ² formy (výztuž ve formě uhlíkových vláken). [7]	36
Tab. 5. Pracnosti operací procesu výroby formy pro výrobu dílu obložení interiéru vozu metra. [7]	37
Tab. 6. Porovnání nákladů na výrobu makety a formy určené pro vytvrzování dílu obložení interiéru metra (výztuž ve formě skelných vláken). [7]	38
Tab. 7. Teoretické porovnání nákladů na výrobu makety a formy určené pro vytvrzování dílu obložení interiéru metra (výztuž ve formě uhlíkových vláken). [7]	38
Tab. 8. Porovnání výhod a výhod jednotlivých technologií výroby forem. [7]	39
Tab. 9. Shrnutí technologického postupu.	64

SEZNAM PŘÍLOH

VI-000-000	SESTAVA FORMY
VI-001-000	MODEL
VI-002-000	FORMA
VI-002-001	SPODNÍ RÁM
VI-002-002	HORNÍ RÁM
VI-003-000	MANIPULAČNÍ VOZÍK
VI-003-001	RÁM

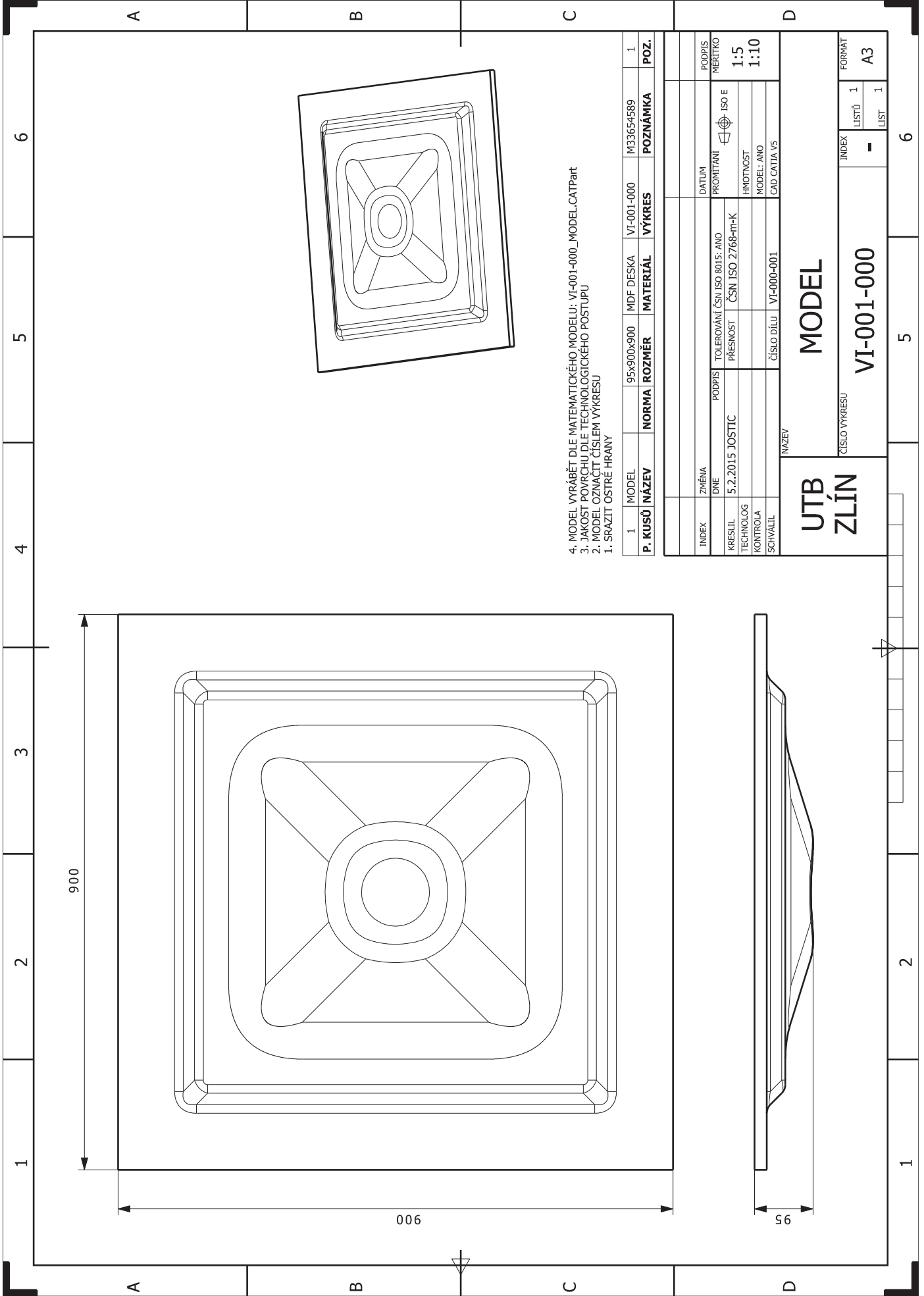


3. STOJAN Č. 2 SPOJIT DLE DÍLENSKÉ PRAXE S HORNÍ ČÁSTÍ FORMY NAVÁŘENÍM LUPÍNEK POZ. 13 (4x)
 2. STOJAN Č.1 SVRŽAT DLE DÍLENSKÉ PRAXE SE SPODNÍ ČÁSTÍ FORMY, SPOJENÍ POMOCÍ POZ. 10, 11 A 12 (4x)
 1. MODEL POZ. 1 POUŽIT PRO VÝROBU FORMY

P. KUSŮ	NÁZEV	NORMA	ROZMĚR	MATERIÁL	VÝKRES	POZNÁMKA	POZ.
4	LUPÍNKA	TYP 403					M00015789 13
4	NANÝVACÍ MATICE	BRALO M10-ST VRH					M02587965 12
4	PODLOŽKA	ISO 7089 Ø10,5					M13089521 11
4	SROUB	ISO 4762 M10x20					M10005874 10
2	MANIPULAČNÍ VOZÍK				VI-003-000	SESTAVA 3	
1	FORMA				VI-002-000	SESTAVA 2	
1	MODEL	95x900x900	MDF DESKA	VI-001-000	M33654589	SESTAVA 1	

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	PROJITANTI	ISO E	PODPIS
						MERITKO
KRESLIL	DNE	TOLEROVÁNÍ ČSN ISO 8015: ANO	PODPIS	ČSN ISO 2768-IT-K		1:10
TECHNOLÓG	10.2.2015	PŘESNOST	JOSTIC			
KONTROLA						
SCHVÁLIL		ČÍSLO DÍLU	VI-000-001			
		NÁZEV				

UTB ZLÍN		SESTAVA FORMY	
ČÍSLO VÝKRESU		INDEX	
VI-000-000		-	
LÍSTŮ 1		LÍST 1	
FORMÁT		FORMÁT	
A3		A3	



- 4. MODEL VYRÁBĚT DLE MATEMATICKÉHO MODELU: VI-001-000_MODEL.CATPart
- 3. JAKOST POVRCHU DLE TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU
- 2. MODEL OZNAČIT ČÍSLEM VÝKRESU
- 1. SRAZIT OSTRÉ HRANY

1	MODEL	95x900x900	MDF DESKA	VI-001-000	VÝKRES	M33654589	POZNÁMKA	1	POZ.
P. KUSŮ		NÁZEV	NORMA	ROZMĚR	MATERIÁL	VÝKRES	POZNÁMKA		

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	PROJITANT	ISO E	1:5	1:10
DNE	TOLEROVÁNÍ ČSN ISO 8015: ANO	PROJITANT	ISO E				
KRESLIL	5.2.2015 JOSTIC	PŘESNOST	ČSN ISO 2768-IT-K	HMOTNOST	MODEL: ANO		
TECHNOLOG		ČÍSLO DÍLU	VI-000-001	KONTROLA	CAD CATIA V5		
SCHVÁLIL							

UTB ZLÍN

MODEL

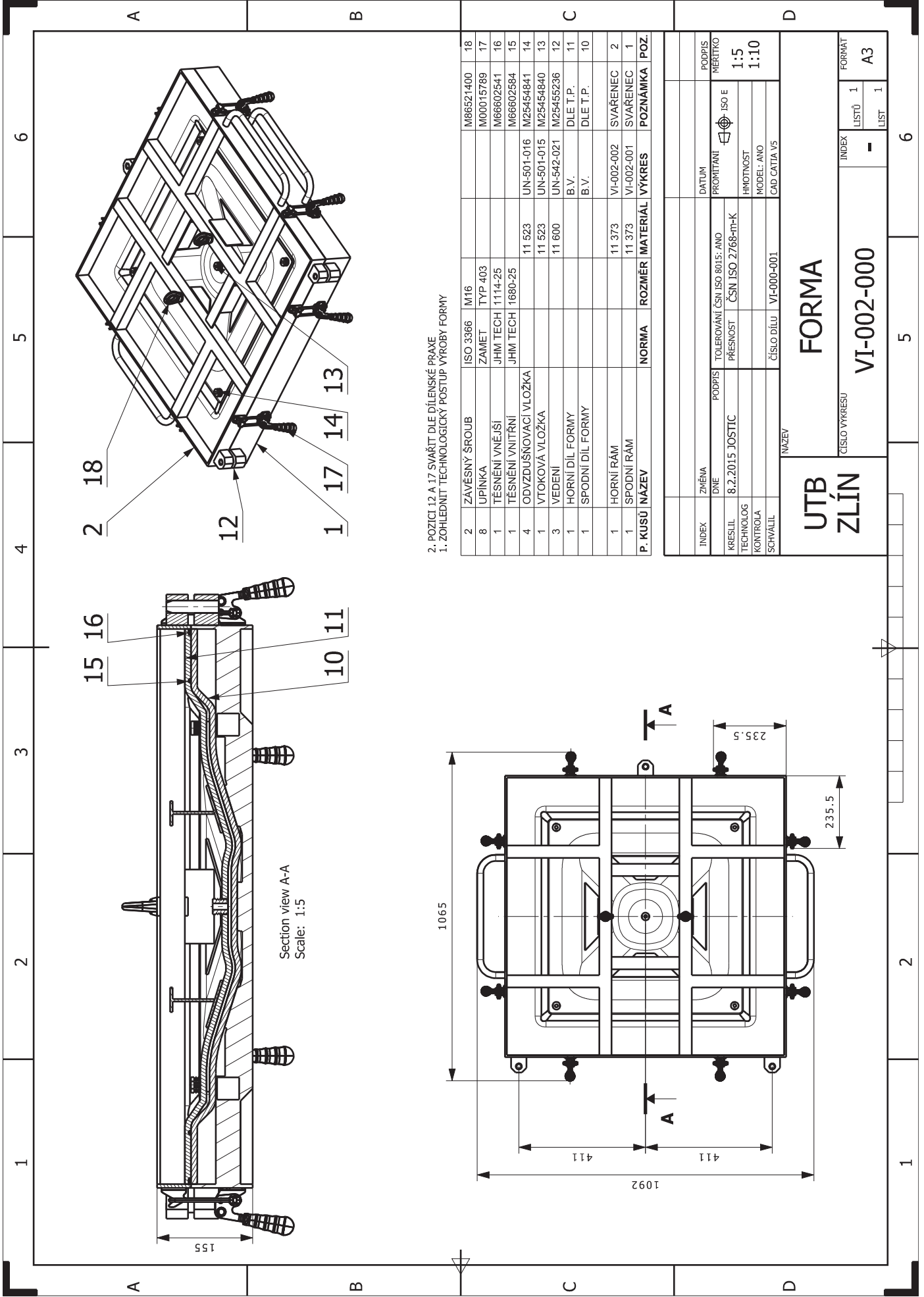
VI-001-000

INDEX -

LISTŮ 1

LIST 1

FORMÁT A3

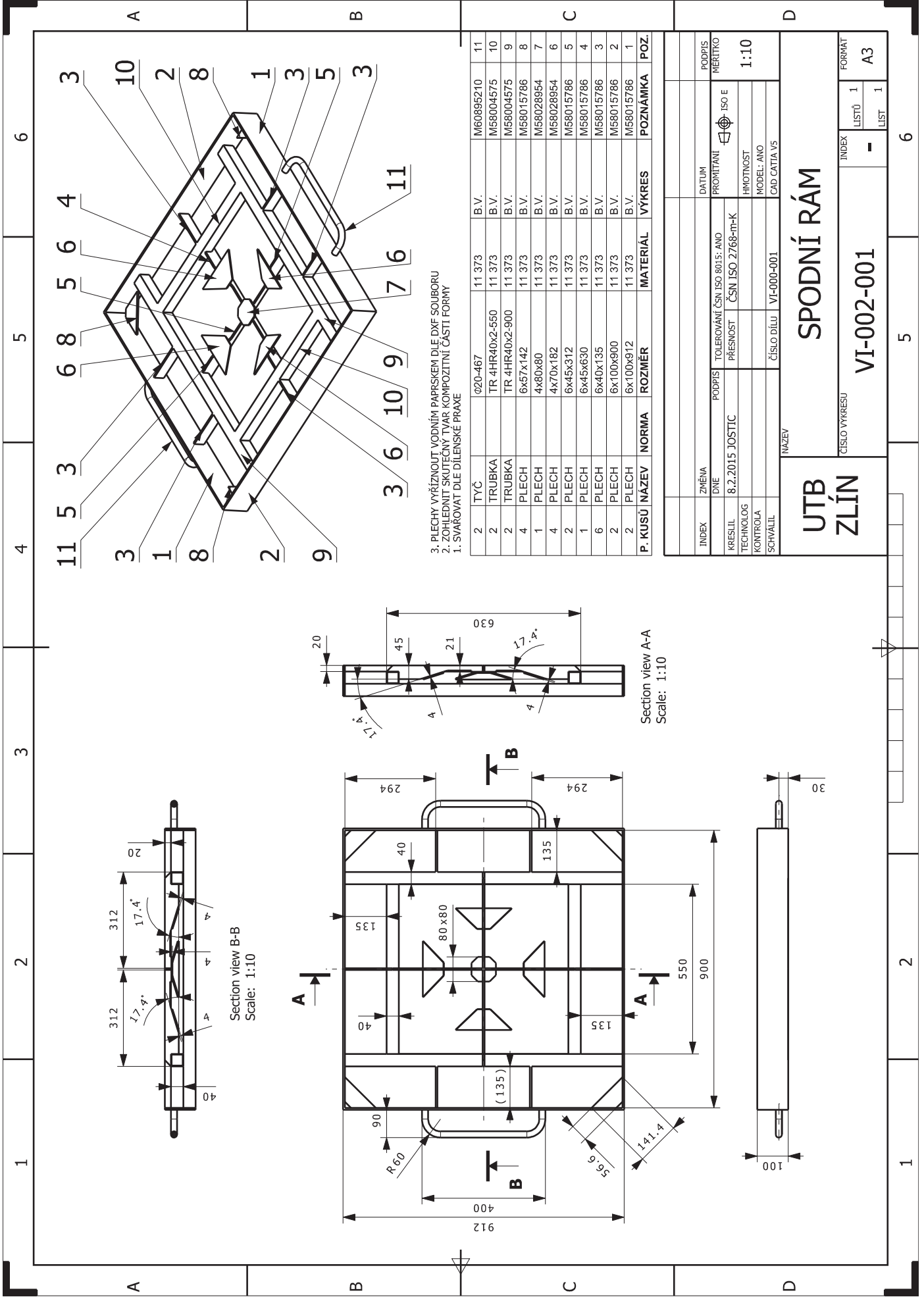


2. POZICI 12 A 17 SVÁŘIT DLE DÍLENSKÉ PRAXE
1. ZOHLEDNIT TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY FORMY

2	ZÁVĚSNÝ ŠROUB	ISO 3386	M16			M86521400	18
8	UPÍNKA	ZAMET	TYP 403			M00015789	17
1	TĚSNĚNÍ VNĚJŠÍ	JHM TECH	1114-25			M66602541	16
1	TĚSNĚNÍ VNITŘNÍ	JHM TECH	1680-25			M66602584	15
4	ODVZDUŠŇOVACÍ VLOŽKA			11 523	UN-501-016	M25454841	14
1	VTOKOVÁ VLOŽKA			11 523	UN-501-015	M25454840	13
3	VEDENÍ			11 600	UN-542-021	M25455236	12
1	HORNÍ DÍL FORMY				B.V.	DLE T.P.	11
1	SPODNÍ DÍL FORMY				B.V.	DLE T.P.	10
1	HORNÍ RÁM			11 373	VI-002-002	SVARENEC	2
1	SPODNÍ RÁM			11 373	VI-002-001	SVARENEC	1
P. KUSŮJ NÁZEV		NORMA	ROZMĚR	MATERIÁL	VÝKRES	POZNÁMKA	POZ.

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	PROJITANT	ISO E
	DNE	TOLEROVÁNÍ ČSN ISO 8015: ANO			1:5
KRESLIL	8.2.2015 JOSTIC	PŘESNOST ČSN ISO 2768-11-K			1:10
TECHNOLÓG					
KONTROLA					
SCHVÁLIL					
NÁZEV		ČÍSLO DÍLU	VI-000-001	CAD CATIA V5	

UTB ZLÍN		FORMA	
ČÍSLO VÝKRESU	VI-002-000	INDEX	-
		LISTŮ	1
		LIST	1
		FORMAT	
		A3	



3. PLECHY VYŘÍZNOUT VODNÍM PÁRSKEM DLE DXF SOUBORU
 2. ZOHLEDNIT SKUTEČNÝ TVAR KOMPOZITNÍ ČÁSTI FORMY
 1. SVAŘOVAT DLE DILENSKÉ PRAXE

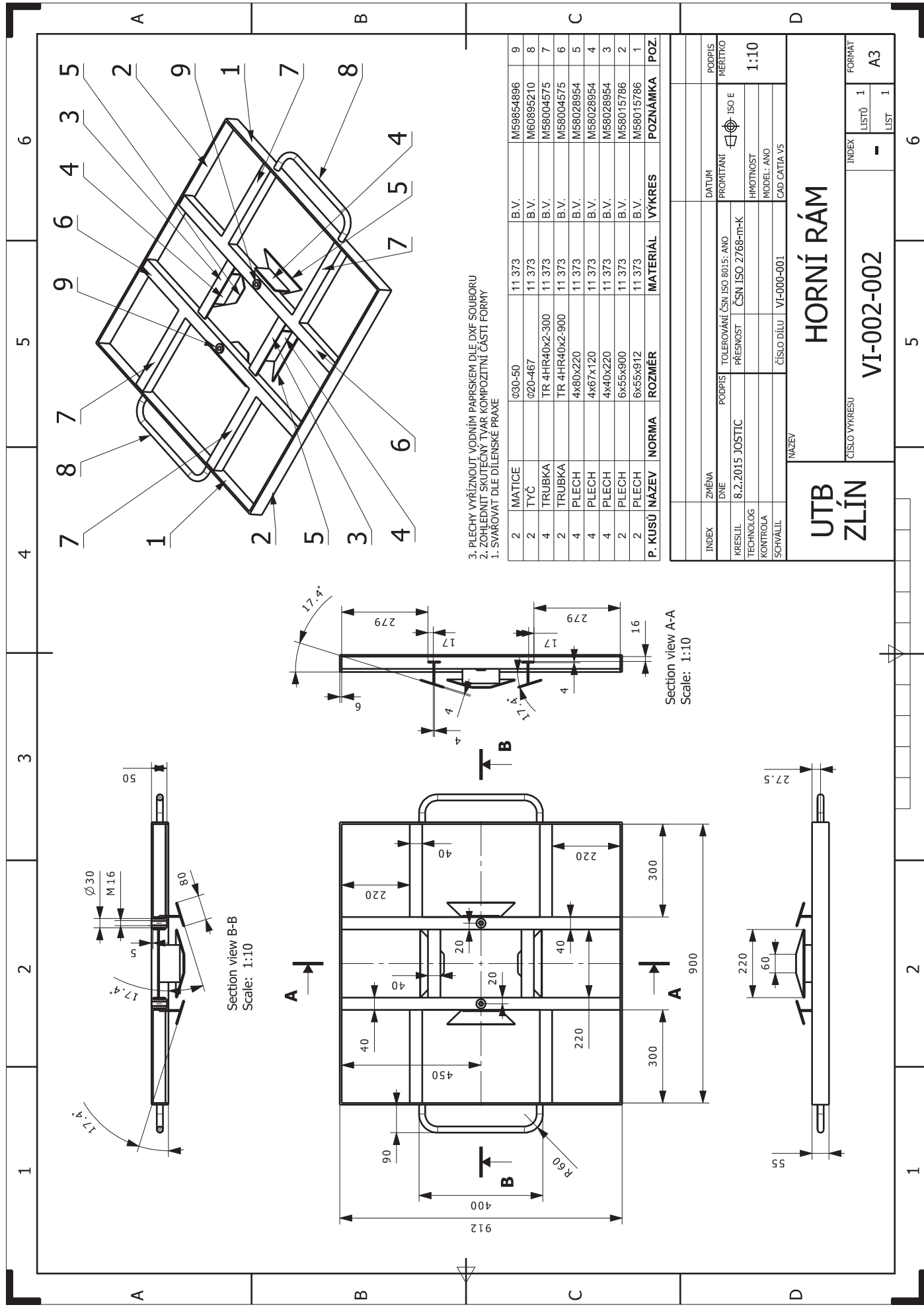
P.	KUSŮ	NAZEV	NORMA	ROZMĚR	MATERIÁL	VÝKRES	POZNÁMKA	POZ.
2	TYČ	Ø20-467		11 373	B.V.		M60895210	11
2	TRUBKA	TR 4HR40x2-550		11 373	B.V.		M58004575	10
2	TRUBKA	TR 4HR40x2-900		11 373	B.V.		M58004575	9
4	PLECH	6x57x142		11 373	B.V.		M58015786	8
1	PLECH	4x80x80		11 373	B.V.		M58028954	7
4	PLECH	4x70x182		11 373	B.V.		M58028954	6
2	PLECH	6x45x312		11 373	B.V.		M58015786	5
1	PLECH	6x45x630		11 373	B.V.		M58015786	4
6	PLECH	6x40x135		11 373	B.V.		M58015786	3
2	PLECH	6x100x900		11 373	B.V.		M58015786	2
2	PLECH	6x100x912		11 373	B.V.		M58015786	1

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	PODPIS
				MERITKO
KRESLIL	DNE	TOLEROVÁNÍ ČSN ISO 8015: ANO	PROJITANTI	ISO E
TECHNOLOG	8.2.2015 JOSTIC	PŘESNOST ČSN ISO 2768-Pr-K		HMOTNOST
SCHVÁLIL				MODEL: ANO
				CAD CATIA V5

UTB ZLÍN		SPODNÍ RÁM	
INDEX	LISTŮ	INDEX	LIST
VI-002-001	1	-	1
FORMÁT		FORMÁT	
A3		A3	

Section view B-B
Scale: 1:10

Section view A-A
Scale: 1:10



3. PLECHY VYŘÍZNOUT VODNÍM PÁPRSKEM DLE DXF SOUBORU
 2. ZOHLEDNIT SKUTEČNÝ TVAR KOMPOZITNÍ ČÁSTI FORMY
 1. SVAROVAT DLE DILÉNSKÉ PRAXE

P. KUSUJ	NÁZEV	NORMA	ROZMĚR	MATERIÁL	VÝKRES	POZNÁMKA	POZ.
2	MÁTICE		Ø30-50	11 373	B.V.	M59854896	9
2	TYČ		Ø20-467	11 373	B.V.	M60895210	8
4	TRUBKA		TR 4HR40x2-300	11 373	B.V.	M58004575	7
4	TRUBKA		TR 4HR40x2-900	11 373	B.V.	M58004575	6
4	PLECH		4x80x220	11 373	B.V.	M58028954	5
4	PLECH		4x67x120	11 373	B.V.	M58028954	4
4	PLECH		4x40x220	11 373	B.V.	M58028954	3
2	PLECH		6x55x900	11 373	B.V.	M58015786	2
2	PLECH		6x55x912	11 373	B.V.	M58015786	1

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PROJITANT	PODPIS	PODPIS MERITKO
KRESLIL	8.2.2015 JOSTIC	TOLEROVÁNÍ ČSN ISO 8015: ANO	ČSN ISO 2768-M-K	ISO E	1:10
TECHNOLÓG		PŘESNOST		HMOTNOST	MODEL: ANO
SCHVÁLIL		ČÍSLO DÍLU	VI-000-001	CAD CATIA V5	

UTB ZLÍN

HORNÍ RÁM

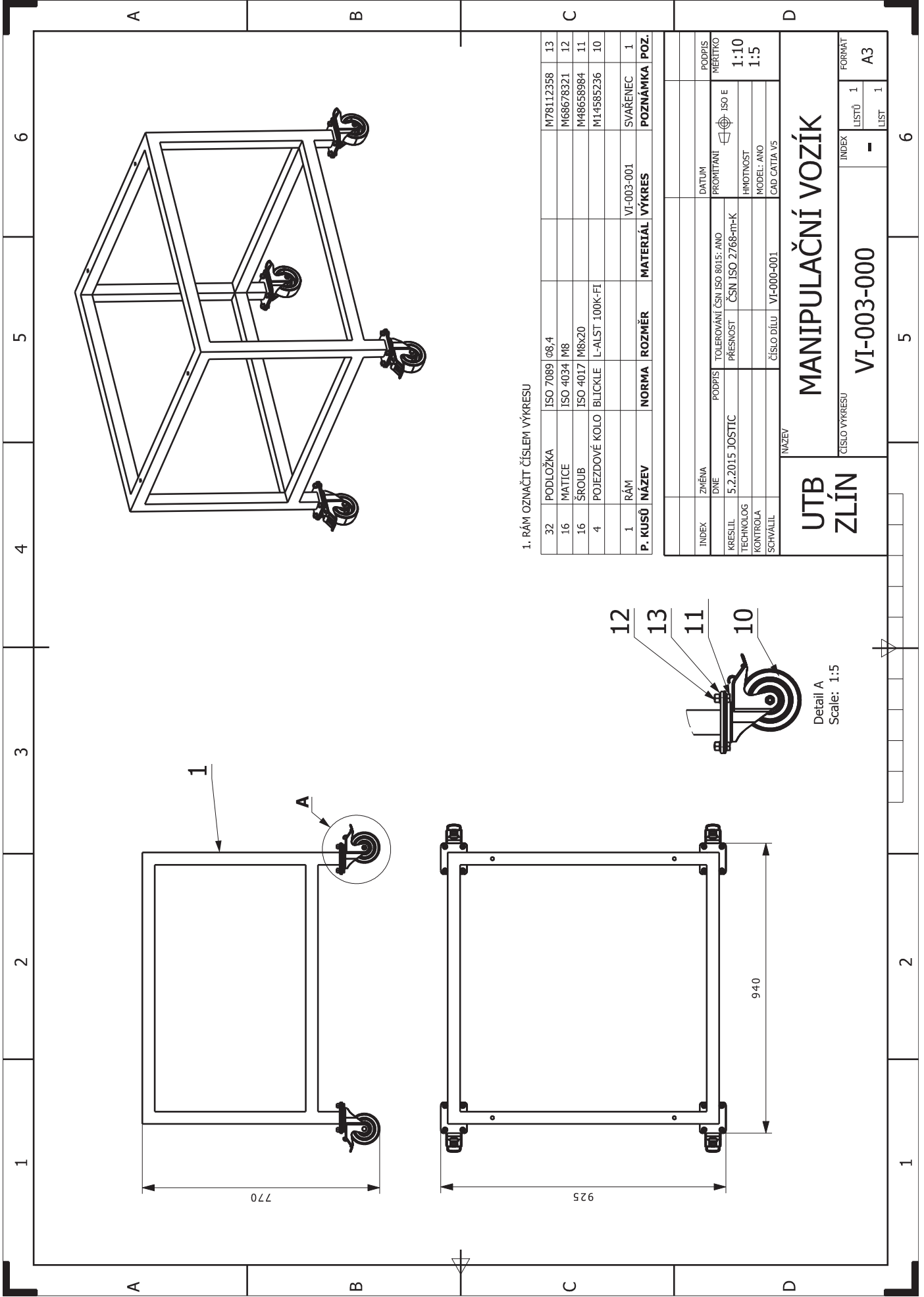
ČÍSLO VÝKRESU: VI-002-002

INDEX: -

LISTŮ: 1

LIST: 1

FORMÁT: A3

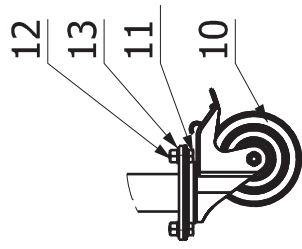


1. RÁM OZNAČIT ČÍSLEM VÝKRESU

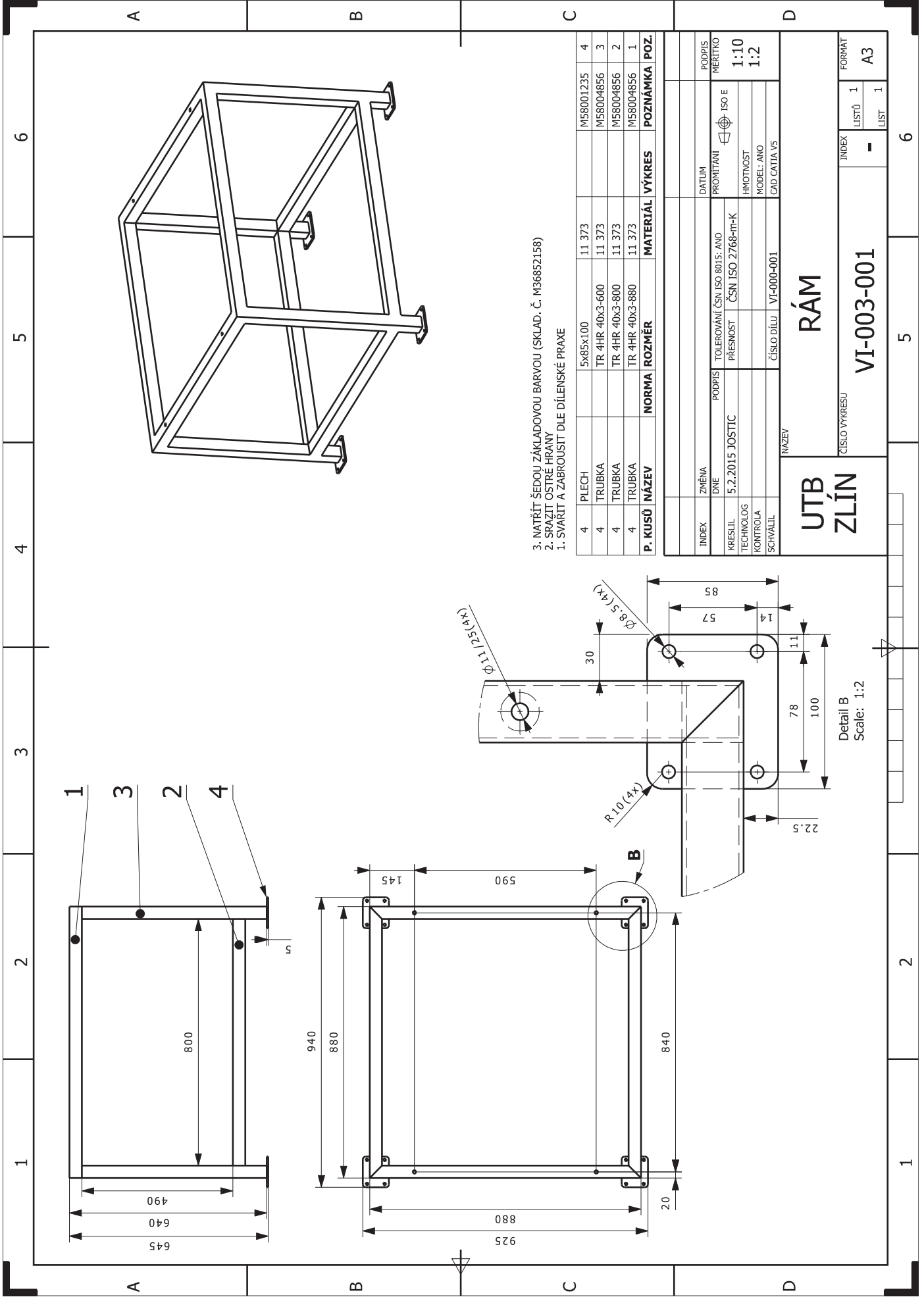
32	PODLOŽKA	ISO 7089	Ø8,4			M78112358	13
16	MATICE	ISO 4034	M8			M68678321	12
16	ŠROUB	ISO 4017	M8x20			M48658984	11
4	POJEZDOVÉ KOLO	BLICKLE	L-ALST 100K-FI			M14585236	10
1	RÁM				VI-003-001	SVARENEC	1
P. KUSŮ		NAZEV	NORMA	ROZMĚR	MATERIÁL	VÝKRES	POZNÁMKA
							POZ.

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	PROJITANTI	ISO E	PODPIS
						MERITKO
KRESLIL	DNE	PODPIS	TOLEROVÁNÍ ČSN ISO 8015: ANO			1:10
TECHNOLOG	5.2.2015	JOŠTIC	PŘESNOST ČSN ISO 2768-11-K			1:5
KONTROLA						
SCHVÁLIL			ČÍSLO DÍLU	VI-000-001		
			NAZEV			

UTB ZLÍN		MANIPULAČNÍ VOZÍK	
ČÍSLO VÝKRESU		INDEX	FORMÁT
VI-003-000		-	A3
		LISTŮ 1	LIST 1



Detail A
Scale: 1:5



3. NATŘÍT ŠEDOU ZÁKLADOVOU BARVOU (SKLAD. Č. M36852158)
 2. SRAŽIT OSTRÉ HRÁNY
 1. SVARIT A ZABROUSIT DLE DÍLENSKÉ PRAXE

P. KUSŮ	NÁZEV	NORMA	ROZMĚR	MATERIÁL	VÝKRES	POZNÁMKA	POZ.
4	PLECH		5x85x100	11 373		M58001235	4
4	TRUBKA		TR 4HR 40x3-600	11 373		M58004856	3
4	TRUBKA		TR 4HR 40x3-800	11 373		M58004856	2
4	TRUBKA		TR 4HR 40x3-880	11 373		M58004856	1

INDEX	ZMĚNA	PODPIS	TOLEROVÁNÍ ČSN ISO 8015: ANO	PROVĚŘENÍ	ISO E	PODPIS
						MĚŘITKO
						1:10
						1:2

INDEX	NAZEV	ČÍSLO DÍLU	VI-000-001
	UTB ZLÍN		
	RÁM		
	VI-003-001		

INDEX	LISTŮ	1	1

INDEX	LISTŮ	1	1

FORMÁT
A3