



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH VÝROBNÍ TECHNOLOGIE VAKUOVÉ LISOVACÍ
FORMY**

PRODUCTION TECHNOLOGY FOR A VACUUM MOLD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Ponka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Ondřej Ponka**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Návrh výrobní technologie vakuové lisovací formy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teoretický rozbor problematiky funkce a provedení vakuové formy. Návrh nové výrobní technologie zvolené součásti. Součástí práce bude jak návrh nového provedení formy tak její výroba a následné srovnání se předcházejícím stavem z technického a ekonomického hlediska.

Cíle diplomové práce:

- Analýza zvolené problematiky
- Návrh nového řešení
- Návrh vhodné technologie výroby
- Srovnání se stávajícím stavem výroby, či porovnání variant
- Zhodnocení dosažených výsledků a doporučení

Seznam doporučené literatury:

ZEMČÍK, Oskar. Technologická příprava výroby. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2003. 193 s. ISBN 80-2147-2336-6.

CHLADIL, Josef. Teorie obrábění. 3. přeprac. vyd. Brno: VUT, 1989. 193 s. ISBN 65-137-2224-0.

ŠTULPA, Miroslav. CNC obráběcí stroje. Praha: BEN, 2006. 128 s. ISBN 80-7300-207-8.

BIŠŤAN, Ernest. Vákuové tvarovanie termoplastov. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Edícia chemickej literatúry (Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o problematice návrhu a výroby formy pro vakuové lisování. Konkrétně jakým způsobem ovlivňují stávající a nové materiály forem návrh a následně i jejich výrobní technologii. Práce obsahuje stručný popis principu problematiky vakuového lisování. Technologické a konstrukční zásady při navrhování forem. Dále pak samotnou realizaci variant řešení a simulaci jejich výroby. Řešené varianty jsou následně zhodnoceny z technického i ekonomického hlediska.

Klíčová slova

Tvarovací forma, vakuové lisování, epoxidové pryskyřice, hliník, frézování, tvarové frézování, vrtání.

ABSTRACT

The master thesis deals with the design and production of the mold for vacuum forming. Specifically, how the existing and new mold materials affect their design and, consequently, their production technology. The thesis contains a brief description of the principle of vacuum molding. Technological and design principles of designing molds. Furthermore, the realization of the solution variants and the simulation of their production. The solved variants are subsequently evaluated from a technical and economic point of view.

Key words

Forming mold, vacuum forming, epoxy resin, aluminum, milling, profile milling, drilling.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PONKA, O. *Návrh výrobní technologie vakuové lisovací formy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh výrobní technologie vakuové lisovací formy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Ondřej Ponka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D., za poskytnutí cenných rad a připomínek, které mi poskytl během vypracovávání této diplomové práce. Rád bych tímto také poděkoval své rodině, přátelům a blízkým za podporu během vypracování této diplomové práce a zároveň za podporu v celé délce studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 ANALÝZA ZVOLENÉ PROBLEMATIKY	10
1.1 Princip vakuového tvarování	10
1.2 Konstrukční zásady tvarovacích forem	12
1.2.1 Orientace forem	13
1.2.2 Odsávací kanálky forem	14
1.2.3 Ohřev a chlazení forem	15
1.2.4 Smrštění výlisku	16
1.3 Materiálové zásady tvarovacích forem	16
1.3.1 Hliník a jeho vlastnosti	17
1.3.2 Hliníkové epoxidové pryskyřice	19
1.3.3 Nové hliníkové epoxidové pryskyřice	20
1.3.3 Obrobitelnost hliníkových epoxidových pryskyřic	20
1.4 Výrobní zásady tvarovacích forem	22
1.4.1 Obrábění tvarových ploch	22
1.4.2 Vhodné řezné nástroje	25
2 NÁVRH ŘEŠENÍ FORMY	28
2.1 Použitý software	28
2.2 Parametry výlisku	29
2.3 Volba materiálu formy	29
2.3.1 Varianta A – EPO 752/2080	30
2.3.2 Varianta B – METAPOR BF100Al	30
2.4 Volba typu orientace formy	31
2.5 Návrh odsávacích kanálků formy	32
2.6 Řešení technologicko-konstrukčních zásad	34
2.7 Realizované řešení variant	35

3	NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY FORMY	36
3.1	Použitý software	36
3.2	Parametry obráběcího centra	37
3.3	Volba řezných nástrojů	38
3.4	Operace horní strany formy	41
3.4.1	Hrubovací operace	42
3.4.2	Dokončovací operace	45
3.4.3	Vrtací operace.....	48
3.4.4	Optimalizace dokončovacích operací	49
3.5	Operace spodní strany formy	51
3.5.1	Hrubovací operace	51
3.5.2	Dokončovací operace	54
3.5.3	Vrtací operace.....	55
4	POROVNÁNÍ VARIANT	56
4.1	Technické zhodnocení.....	56
4.2	Ekonomické zhodnocení	58
4.3	Celkové náklady jednotlivých variant	59
5	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ	60
	ZÁVĚR	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	65
	SEZNAM PŘÍLOH.....	67

ÚVOD

Vakuové lisování je relativně rychlý a jednoduchý způsob výroby výlisků různých velikostí a tvarové složitosti. V případě kontinuálního tvarování je tato technologie vhodná i pro sériovou výrobu. Dnes se s touto metodou tvarování termoplastů často setkáme např. u prototypové výroby.

Čím je forma složitější, tím je zpravidla i její výroba náročnější, ať už z technického či ekonomického hlediska. Jedním z řešení je vyvíjení nových a stále více sofistikovaných materiálů. Dnes tak máme široký výběr materiálů s rozdílnými vlastnostmi, a to od těch jednodušších, jako jsou dřeva, sádry, vrstvené kompozity nebo hliníkové slitiny, až po ty komplexnější jako jsou nejrůznější typy epoxidových pryskyřic a polyuretanových umělých dřev. Zvláště epoxidové pryskyřice prošly v posledních letech velkou proměnou.

Zcela klíčovou vlastností během procesu vakuového tvarování (lisování) je odsávání vzduchu skrz formu. To je řešeno u konvenčních forem pomocí odsávacích kanálků. U tvarově složitých forem je však výroba těchto kanálků, vzhledem k jejich počtu, poměrně složitá. Nemluvě o reálné možnosti vzniku prolisů výlisku v oblasti otvorů těchto kanálků, při nevhodně zvolené optimalizaci tvarovacího procesu. Výroba se tak stává složitější a nákladnější a zároveň zde není záruka požadované kvality výlisku samotného.

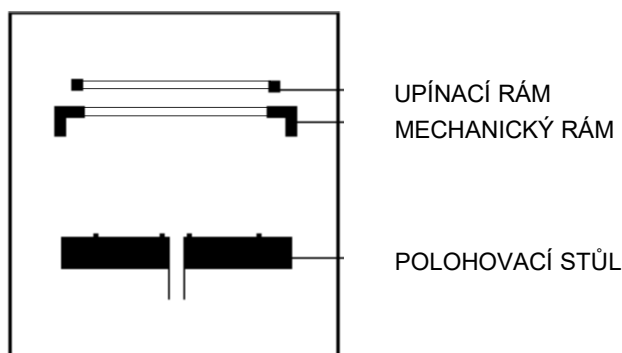
METAPOR je litá epoxidová pryskyřice, která byla vyvinuta jako jedno z řešení výše zmíněného problému s odsáváním vzduchu skrze formu. Oproti ostatním epoxidovým pryskyřicím má tu vlastnost, že je zcela porézní a není tedy zapotřebí žádných odsávacích kanálků, tak jako v případě konvenčních epoxidových pryskyřic. Vzduch je odsáván rovnoměrně celou tvarovou plochou, což vede k rychlejšímu, rovnoměrnějšímu a kvalitnějšímu vytvarování výlisku, bez hrozby prolisů. Nevýhodou je však vysoká cena této porézní pryskyřice.

Je tedy otázkou, kdy a v jakém případě je materiál typu METAPOR vhodné využít a kdy ne. Výrobní technologie samotné se stále více modernizují, zvláště v případě víceosých obráběcích center využívající pokročilé CAM systémy. Pak mohou mít v určitých případech i stávající konvenční materiály, díky těmto technologiím, stále své využití.

1 ANALÝZA ZVOLENÉ PROBLEMATIKY

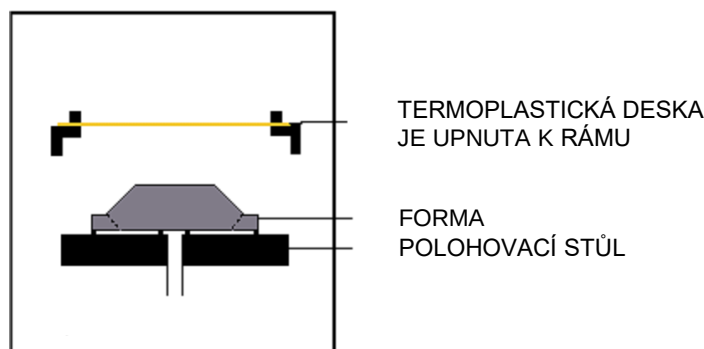
1.1 Princip vakuového tvarování

Proces vakuového tvarování (lisování) je principiálně jednoduchý. Vlivem různé velikosti série a tvarové složitosti výlisku, se můžeme setkat i se značně složitými procesy vakuového tvarování. Jako je například kontinuální tvarování. Nám bude stačit popis základního procesu tvarování, který se obvykle skládá ze 6 hlavních kroků.



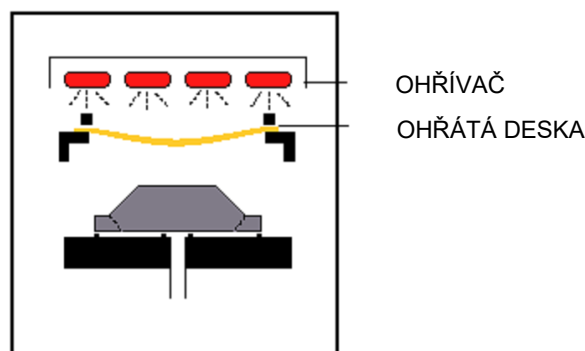
Obr. 1.1 Příprava na tvarovací proces [1].

Prvním krokem je příprava desky a stroje na proces tvarování obr. 1.1. U hydrofobických materiálů se můžeme setkat s vlhkostí, která má dopad na kvalitu tvarovaného termoplastu. Pokud tyto plasty nejsou řádně vysušeny, hrozí nerovnoměrné ohřátí tvarované desky, které kontaktem s formou vytváří bublinky. Tento jev je často zaměňován s přehřátím tvarované desky [2].



Obr. 1.2 Upnutí tvarované desky [1].

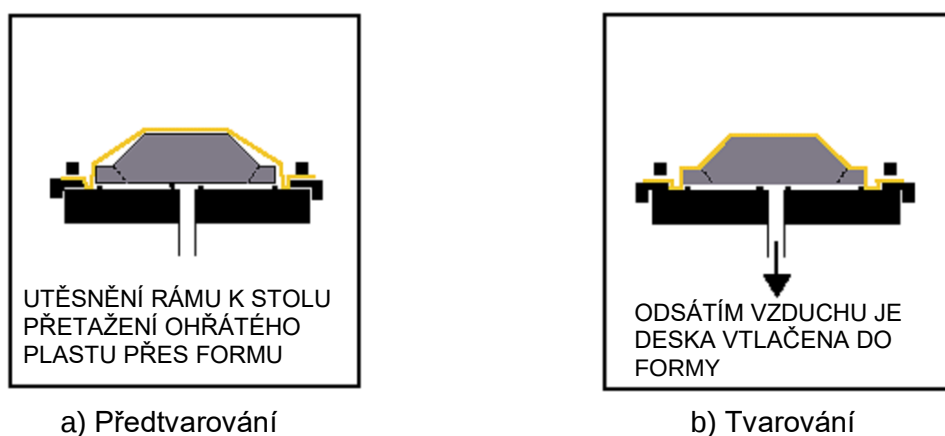
Druhým krokem obr. 1.2 je zajištění desky v rámu. Ta musí být k rámu vzduchotěsně upevněna tak, aby následné vakuum mohlo vytvarovat požadovaný tvar. K utěsnění slouží gumové těsnění, které je po celém obvodu rámu. Způsob uložení je závislý od konkrétního typu stroje, tvaru formy a tím jakým způsobem bude výlisek tvarován [2].



Obr. 1.3 Ohřev [1].

V třetím kroku následuje ohřev, který je jedním z nejdůležitějších kroků samotného tvarování obr. 1.3. Jak už bylo zmíněno, vlhkost může způsobit nerovnoměrné ohřátí polotovaru. To stejné může způsobit i rychlost ohřátí polotovaru. Pokud je ohřátí příliš rychlé, hrozí že střed desky (polotovaru) se více nahřeje než jeho okrajové části. Ztenčení stěn výlisku při hlubším tvarování je pak výrazné. Naopak v okamžiku příliš dlouhého ohřátí hrozí přehřátí desky, které může vyústit ve zvýšenou křehkost tvarovaného výlisku [2].

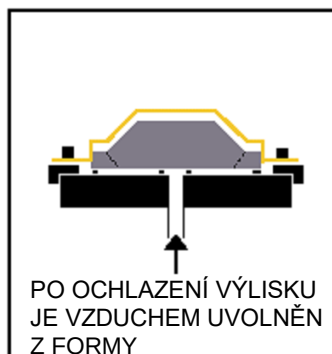
S prasknutím se můžeme setkat i v případě vnitřního prnutí výlisku, kde vlivem výchozí desky s větší tloušťkou hrozí, že jedna strana bude ohřáta více než druhá. Řešením může být oboustranný ohříváč [2].



Obr. 1.4 Tvarovací proces [1].

Předtvarování obr. 1.4 a) není vždy nezbytným krokem v procesu tvarování. Jsou dva základní druhy předtvarování, a to mechanické a pneumatické. Setkáme se s nimi především u hlubokotažných výlisků nebo u detailních tvarových ploch. Kdyby se u těchto výlisků předtvarování neudělalo, hrozilo by jejich nedotvarování. Má také pozitivní vliv na tloušťku stěn, kde dochází k rovnoměrnějšímu ztenčení [2].

Po předtvarování následuje samotné tvarování obr. 1.4 b). Jelikož je deska s rámem vzduchotěsně upevněna ke stolu, vzniká mezi vnitřní stěnou desky a stolem vzduchová „komora“, ze které je přes formu (skrz vzduchové kanálky) odsát vzduch. To má za následek vytvarování ohřáté desky podle tvaru formy [2].



Obr. 1.5 Ochlazení a vyjmutí výlisku [1].

Výlisek nesmíme vyjmout dříve, než se dostatečně zchladí. Pokud by se tak stalo, může dojít k samovolné změně tvaru. Doba, po kterou má být výlisek ve formě je specifická od druhu plastu. Doba ochlazování je závislá na tepelné vodivosti formy. Neboli na schopnosti předat teplo z tvarované desky do formy [2].

Náročnost vyjmutí formy obr. 1.5 je závislé především od tvarové složitosti výlisku. Obvykle je zapotřebí pouze stlačený vzduch, který je veden skrze odsávací kanálky v opačném směru [2].

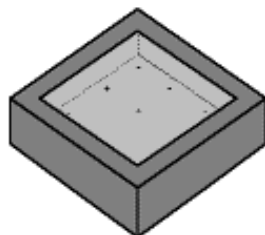
Posledním krokem procesu tvarování může být oddělení výlisku od polotovaru, respektive přířezu. K tomu může docházet buď přímo v okamžiku, kdy je výlisek vytvarován, ale stále ještě upnut v rámu. Pak je zapotřebí, aby tomu byl rám i forma přizpůsobena. Dále je možné výlisek od polotovaru oddělit samostatně jako následný dokončovací proces [2].

1.2 Konstrukční zásady tvarovacích forem

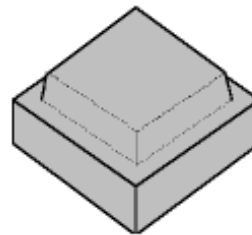
Jedním z cílů práce je návrh řešení tvarovací formy. Budeme se tedy dále z celé oblasti vakuového tvarování věnovat pouze problematice forem. Formy jako takové mohou být tvarově velmi jednoduché, ale i značně sofistikované jako jsou např. vstřikovací formy. Formy samotné jsou pak důležitou součástí tvarovacího procesu. Jednou z výhod vakuového tvarování je, že použité tvarovací tlaky jsou relativně malé do cca 100 kPa. Formy nemusejí být tak masivní, to je umožňuje vyrábět relativně ekonomicky ať už pro prototypovou nebo sériovou výrobu. Vzhledem k široké škále používaných materiálů forem, je důležité zvolit ten správný s ohledem na jeho vlastnosti, stejně tak jako navrhované vhodné řešení formy [3].

1.2.1 Orientace forem

Jednou ze zásad při návrhu formy je, rozhodnout o jaký typ (orientaci) formy se bude jednat. Jsou dva základní typy, a to pozitivní a negativní [3].



a) Negativní forma



b) Pozitivní forma

Obr. 1.6 Základní typy tvarovacích forem [1].

Volba správného typu formy je zcela klíčová pro proces tvarování, požadovanou kvalitu výlisku, návrh řešení a výrobu formy samotné. Každá z forem ať už negativního či pozitivního charakteru obr. 1.6 má své výhody i nevýhody.

Negativní forma

Negativní formy se využívají pro tvarově jednoduché mělké výlisky. Jejich největší nevýhoda spočívá v progresivním ztenčení stěn výlisku v závislosti na jejich hloubce. Čím hlubší je výlisek, tím více se bude vlivem přímého podtlaku materiál postupně nabalovat na stěny formy a nerovnoměrně se ochlazovat. Volné části tvarované desky mají zároveň tendenci se elasticky protahovat směrem ke dnu výlisku. K největšímu ztenčení pak dochází v místě vnitřních rohů, ohybů a dna. To je jedním z důvodů, proč má být doba tvarování co nejkratší [3].

Pro hrubou orientaci vhodnosti negativního typu formy, můžeme použít teoretický vztah [2]:

$$\frac{V}{D} = 0,4 [-] \quad (1.1)$$

kde: V [mm] - hloubka výlisku

D [mm] - průměr (šířka) výlisku

Tento poměr ukazuje, jakou maximální teoretickou hloubku výlisku můžeme dosáhnout pomocí negativního tvarování bez toho, abychom ztratily mechanické vlastnosti výlisku. Hloubka výlisku by neměla překročit 40 % svého průměru (šířky). Nejedná se však o zaručené pravidlo platící ve všech případech. V některých případech vlivem účelu použití nebo tvaru výlisku, se tento poměr může posunout, a to až na 75 %. Dalším rozhodujícím faktorem volby negativní formy může být vyšší přesnost výlisku na straně formy. Nicméně tato strana je také více náchylná na tvarové nedokonalosti vlivem možného znečištění formy [2].

Pozitivní forma

Pozitivní forma je naopak uzpůsobena pro hlubší výlisky. Ztenčení tu není tak progresivní jako v případě negativních forem. Výlisky mohou být členitější se silnějším dnem. U pozitivních forem je poměr hloubky a průměru [2]:

$$\frac{V}{D} = 1 [-] \quad (1.2)$$

V konkrétních případech tento poměr může dosáhnout i 150 % průměru výlisku. U pozitivních forem lepší kvality povrchu dosahuje horní strana tvarovací desky. Neboť není ve styku s formou. Nevýhodou těchto forem může být horší uvolňování výlisku od formy, neboť mají tendenci se smršťovat směrem do formy [2]. V praxi se však nesetkáme pouze s negativním nebo pozitivním členěním. Tvarově složitější výlisky už nemohou být vytvářeny čistě tou či onou metodou, ale jejich kombinací. U takových to tvarově složitých forem však hrozí výrazné nerovnoměrné ztenčování stěn. Využívají se tak pouze ve spojení s tzv. předtvarování, které takto složitým formám umožní zachovat si rovnoměrné ztenčení stěn [3].

1.2.2 Odsávací kanálky forem

Pro vytvarování ohřáté desky podle formy je nezbytné, aby vzduch nacházející se mezi deskou a formou byl odsát. Pro správné vytvarování je tedy zcela nezbytné vhodné rozmístění, počet a velikost kanálků. Vhodné rozmístění kanálků si můžeme ukázat na obr. 1.7 [3].



a) Správné rozmístění kanálků

b) Příklad rozmístění kanálků formy

Obr. 1.7 Rozmístění vzduchových kanálků tvarovací formy [1].

Kanálky se umísťují do rohů, okrajů, tvarových přechodů či rádiusů. Obecně tedy v místech posledního dotyku tvarovací desky s formou. Pro příklad si představme, že bychom odsávací kanálek v místě 3 nevyvrtaly. V místech 1 a 2 by došlo k správnému vytvarování, neboť podtlak je v těchto místech dostatečně silný. V místě 3 by však vzniknul vzduchový polštář, který by znemožňoval dotvarování (čárkovaná čára) [3].

Podobný problém by nastal i v případě, že bychom zvolily nedostatečný počet kanálků. Z procesu tvarování víme, že je vhodná co nejkratší doba tvarování. Vlivem malého počtu odsávacích kanálků hrozí pomalé odsávání vzduchu, které zapříčiňuje nedotvarování výlisku. Forma zároveň okamžitě ochlazuje tvarovaný díl. Je tedy vhodné volit spíše větší počet kanálků. Velkou měrou o tom však rozhoduje tvar samotné formy [3].

O správném vytvarování rozhoduje v neposlední řadě také velikost odsávacích kanálků. Z teoretického hlediska je obecně definována jako [3]:

$$D_k = \frac{t}{2} [mm] \quad (1.3)$$

kde: D_k [mm] - průměr kanálků
 t [mm] - tloušťka desky (polotovaru)

Hodnota D_k je považována za horní hranici, kterou může průměr kanálku mít. V praxi se však ukázalo, že průměr kanálku je spíše závislý na materiálu tvarované desky než na tomto vzorci. Například při tloušťce desky 4 mm je průměr kanálku u PVC desky maximálně 1 mm. U PP desky pouze 0,5 mm. Obecné doporučení na zaručenou kvalitu tvarování je mít průměry kanálků v intervalu 0,5 až 1 mm s přihlédnutím na předešlé dvě závislosti. Pokud by průměr byl větší, může v závislosti na materiálu desky hrozit vytvoření prolisů v oblasti odsávacích kanálků [3].

1.2.3 Ohřev a chlazení forem

Během kontaktu tvarované desky s formou dochází k výměně tepla směrem k formě. To má za následek ochlazení desky a zhoršení její další tvarovatelnosti. Je tedy nutné formu ohřát pod tvarovací teplotu tak, aby se teplotní šok pro desku snížil. Teplota formy je závislá především na materiálu, ze kterého je vyrobena. Tab. 1.1 ukazuje vhodnou teplotu tvarování včetně teploty formy pro jednotlivé materiály [3].

Tab. 1.1 Teploty tvarování forem pro vybrané termoplasty [2].

Termoplasty	Teplota tvarování [°C]	Teplota formy [°C]
PVC	100-130	45-50
PS	110-135	60-75
ABS	130-150	50-70
PMMA	120-150	60-80
PP	150-170	50-80
PC	175-180	90-110

V závislosti na tepelné vodivosti materiálu formy, se při kontinuální výrobě může teplota formy začít zvětšovat. Je tedy nutné ji ochlazovat. V praxi však toto ochlazování probíhá občas nekontrolovaně, kdy tak může docházet ve formě k velkým teplotním výkyvům. Jednou je forma studená a jindy naopak příliš horká. Oba stavy vedou k problematickému tvarování. Proto je nutné zvláště ve větších sériích využívat regulační zařízení, které zajišťuje stálou teplotu [3].

1.2.4 Smrštění výlisku

Během ochlazování má výlisek tendenci se smršťovat. Rozsah velikosti smrštění je dán typem použitého termoplastu. Krystalické polymery mají obvykle větší tendenci k smrštění než amorfní. Jedním z důvodů jsou vyšší tvarovací teploty, díky kterým se ve výlisku akumuluje větší množství tepla. S tímto jevem je tedy nutné počítat během návrhu formy. Zejména pokud je požadavek na zvýšené tolerance tvarovaného dílu. Velikost smrštění některých termoplastů je zobrazena v tab. 1.2 [3].

Tab. 1.2 Velikosti smrštění nejpoužívanějších termoplastů [3].

Termoplasty	Smrštění min.-max. [%]	Smrštění průměrné [%]
PVC	0,2-0,6	0,4
PS	0,2-0,8	0,5
ABS	0,3-0,8	0,55
PMMA	0,2-0,6	0,4
PP	1-3	2
PC	0,7-0,8	0,75

Vhodné je také zajistit výlisku jednoduché a rychlé vyjmutí z formy a přizpůsobit tomu formu během jejího návrhu, pokud to tvar výlisku dovoluje. Vyjmutí může pomoci také řada sprejů na bázi oleje a silikonu, které se nanesou na formu před samotným tvarováním. Druhou možností je využití vzduchových odsávacích kanálků a uvolnit formu stlačeným vzduchem v opačném směru. Tento způsob se využívá především u tvarově složitějších forem. Je nutné zvolit takové podmínky, aby nedošlo vlivem stlačeného vzduchu k poškození výlisku [2].

1.3 Materiálové zásady tvarovacích forem

Formy jsou během procesu tvarování poměrně málo namáhané, proto není potřeba je vyrábět z vysokopevnostních materiálů. V současné době je k dispozici velké množství materiálů s různorodými vlastnostmi. Při volbě je tak vhodné zohlednit celou řadu zásad, které ji mohou výrazně ovlivnit. Jednou z nich je množství výlisků tab. 1.3, které budou vyráběny na dané formě [3].

Tab. 1.3 Doporučená velikost série pro konkrétní druh materiálu formy [3].

Druh materiálu	Velikost série
Sádra	<50
Dřevo	<50
Lamináty	<100000
Epoxidové pryskyřice	<100000
Hliníkové slitiny	>100000

V našem případě se jsou to epoxidové pryskyřice, které jsou vhodné pro střední až vyšší série, možnou tvarovou složitostí formy a zaručenou obrobiteľností. Pro zlepšení tepelné vodivosti formy jsou to konkrétně lité epoxidové pryskyřice s kovovými příměsi ve formě hliníkového prášku [3].

1.3.1 Hliník a jeho vlastnosti

Vzhledem k tomu, že hliník tvoří příměs v epoxidu ve většinovém množství, je vhodné si nejprve uvést základní fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti hliníku obr. 1.8.



Obr. 1.8 Hliníkový prášek využívaný jako příměs do epoxidových pryskyřic [4].

Fyzikální vlastnosti

Z fyzikálního hlediska je hliník stříbřitě šedý kov, který má kubickou plošně centrovanou mřížku (face center cubic). Ta propůjčuje hliníku a jeho slitinám dobré tvárné vlastnosti. Skluzové roviny jsou $\{111\}_\alpha$, skluzové směry $\langle 110 \rangle_\alpha$. Základní vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tab. 1.4 [5].

Tab. 1.4 Základní vlastnosti hliníku [5].

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Protonové číslo	-	13
Hmotnostní číslo	-	26,98
Oxidační číslo	-	III
Elektronegativita	-	1,47
Elektronová konfigurace	—	$[Ne]3s^23p^1$
Standardní elektrodový potenciál	$[V]$	-1,662
Měrná hmotnost	$[kg/m^3]$	$2,69 \cdot 10^3$
Teplota tavení	$[^{\circ}C]$	660
Tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	247
Tvrdost	$[HB]$	20-30
Modul pružnosti v tahu	$[GPa]$	70
Modul pružnosti ve smyku	$[GPa]$	26

Chemické vlastnosti

Elektronová konfigurace hliníku z tab. 1.4 ukazuje, že má ve valenční vrstvě 3 elektrony. K získání stabilní elektronové konfigurace vzácného plynu, potřebuje své valenční elektrony sdílet v chemických vazbách. Záporný standardní elektrodový potenciál hliníku zároveň ukazuje, že je kovem neušlechtilým, s tendencí tvořit ionty Al^{3+} . To znamená, že ve sloučeninách se hliník vyskytuje výhradně v oxidačním stavu A^{III} . Odtud elektrodová reakce [5]:



V přírodě má hliník tendenci se nejvíce vázat na kyslík (O_2) [5]:



S nímž tvoří stabilní oxidy, nejčastěji oxid hlinitý. Ten je polymorfní a vyskytuje se ve více krystalických modifikacích jakou je např. korund. Ten je velice tvrdý, chemicky o tepelně inertní. Má výborné elektricko-izolační vlastnosti. Využívá se také pro výrobu keramiky. Dále se můžeme setkat s celou řadou hydratovaných oxidů jako jsou gibbsit, boehmit, diaspor a další. Všechny tyto sloučeniny jsou součástí již zmíněných hlinitých minerálů (bauxitů) [5].

V případě již čistého hliníku se na jeho povrchu vzhledem k již zmíněné afinitě ke kyslíku vytváří pasivní oxidační vrstva. Ta propůjčuje hliníku výbornou odolnost vůči korozi. S vyšší čistotou hliníku (>99,0 %), zpravidla roste i jeho korozní odolnost.

Přidáním legujících prvků do slitin hliníku tato odolnost obvykle klesá (měď). Stejně tomu je za vyšších pracovních teplot. Hliník má dobrou odolnost vůči korozi také ve sladké i slané vodě. V půdě je závislá především na pH [5].

Mechanické vlastnosti

U čistého hliníku jsou jeho mechanické vlastnosti špatné. Pevnost v tahu se pohybuje pod 100 MPa, tvrdost mezi 20-30 HB. Tvárné vlastnosti vlivem plošně centrované mřížky jsou dobré, tažnost přes 20 %. Jako konstrukční materiál je však čistý hliník nepoužitelný [6].

V případě slitin hliníku jsou mechanické vlastnosti závislé především na typu dané slitiny, disperzitě strukturních složek, na přítomnosti a tvaru intermediálních fází a samozřejmě na tepelném zpracování. Jemnozrnná struktura jednoznačně zlepšuje všechny mechanické vlastnosti včetně technologických. Mez pevnosti slévárenských vytvrditelných slitin (Al-Si-Mg) se může pohybovat kolem 330 MPa. Tepelným zpracováním se výrazně zvětšuje jak tvrdost (až 100 HB), tak také mez kluzu. Vysokopevnostní tvářitelné slitiny (Al-Zn-Cu) mohou dosahovat pevnosti v tahu až 780 MPa. Slitiny hliníku jsou obecně citlivé na zvýšenou pracovní teplotu, kde následně rychle ztrácí většinu svých vlastností. Ta může nastat už při 200 °C. Odolnost v takto obtížných provozních podmínkách může zlepšit měď (Cu), nikl (Ni) případně kobalt (Co). Mechanické vlastnosti se někdy komplexně hodnotí pomocí tzv. indexu kvality [6].

1.3.2 Hliníkové epoxidové pryskyřice

Obvykle se tyto epoxidové pryskyřice dodávají jako vícesložkové směsi. Obsahující pryskyřici, tvrdidlo a příměs. V našem případě je příměsí hliníkový prášek (podíl na objemu směsi 70-90 %). Dostatečné promíchání jednotlivých složek materiálu je jedním z důležitých kroků z pohledu obrobitelnosti formy. S cílem dosáhnout co možná nejvíce homogenní struktury. Je tak doporučeno striktně dodržovat postup předepsaný výrobcem daného materiálu. Výchozím polotovarem je pak buď odlitá deska různé tloušťky, případně samotná forma [1].

Formy vyrobené z těchto pryskyřic jsou obvykle trvanlivé a umožňují vytvořit kvalitní povrch tvarovaného dílu. Některé syntetické pryskyřice jsou však citlivé na zvýšení povrchového tepla, které u vakuového tvarování bohužel nastává. Vhodným řešením jsou již zmíněné příměsi. Zvyšují jednak tepelnou stabilitu, tak i tvrdost formy, která se pozitivně projevuje na její životnosti. Nevýhodou je zvýšená křehkost. Je tedy nutné věnovat zvýšenou pozornost při uložení formy na stůl tvarovacího stroje [1].

1.3.3 Nové hliníkové epoxidové pryskyřice

V současné době se můžeme setkat i se s zcela novými druhy pryskyřic, které jsou přímo navrženy pro specifické použití, v našem případě pro vakuové tvarování. Jedním z těchto materiálů je například METAPOR obr. 1.9.

Na rozdíl od ostatních epoxidových pryskyřic, tento má mikro-porézní strukturu. Ta mu propůjčuje vzdušnou propustnost. Byl navržen přímo pro zefektivnění procesu vakuového tvarování v oblasti odsávacích vzduchových kanálků. Vlivem své přirozené vzduchové propustnosti tak není ve tvarovacích formách zapotřebí žádných těchto kanálků. To umožňuje rychlejší odvod vzduchu a vytvoření kvalitnějšího povrchu výlisku bez vytvoření prolisů. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a velmi vysoká křehkost [7].



Obr. 1.9 Mikro-porézní epoxidová pryskyřice s hliníkovou příměsí METAPOR [8].

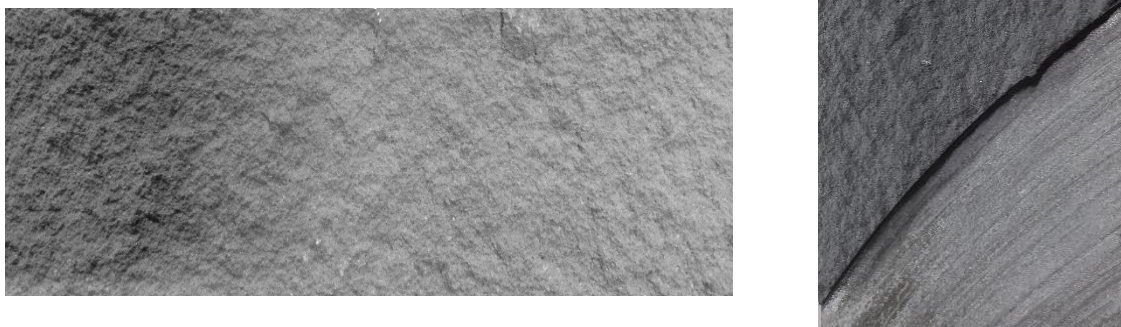
1.3.3 Obrobitelnost hliníkových epoxidových pryskyřic

Epoxidy a polyuretany obecně mohou mít relativně vysoké abrazivní účinky. Nízká tepelná vodivost těchto materiálů zapříčiňuje špatný odvod tepla z místa řezu. Většinu tepla tak zachycuje buď nástroj nebo chladicí kapalina. Ta je v případě kompozitních materiálů používána jen výjimečně, neboť výrazným způsobem může ovlivňovat vlastnosti daného materiálu. Zvláště u materiálu jako je METAPOR se nepoužívá řezná kapalina, ale stlačený vzduch. V případě jeho mikroporézní struktury, by došlo řeznou kapalinou k ucpání pórů a tím k znehodnocení materiálu samotného. Nástroj je však v případě absence řezné kapaliny vystaven tepelnému zatížení, které může mít za následek zvýšení abrazivních účinků a tím snížení trvanlivosti nástroje. Zvýšená teplota v místě řezu ovlivňuje také obráběný materiál samotný. Bez větších problémů se však mohou využívat nástroje z HSS, slinutých karbidů, řezné keramiky nebo diamantu [1].

V závislosti na typu frézování může být volena rychlost posuvu při obrábění těchto pryskyřic vyšší oproti běžným hliníkovým slitinám, a to až o 400 %. U nástrojů velmi malých průměrů o 200 %, aniž by se zhoršila kvalita obrobené plochy, případně životnost nástroje [9].

Boční posuv může být také podstatně vyšší než v případě hliníkových slitin. Tam, kde by velikost bočního posuvu kulových fréz u slitin hliníku odpovídala hrubovacím nebo polodokončovacími operacím, lze v případě těchto pryskyřic bezproblémově dokončovat. Obrobený povrch je tak zcela bez trhlin či zvrásnění vlivem příliš velkého bočního posuvu [9].

V případě otáček jsou tyto pryskyřice značně omezeny. Obecně by otáčky neměli překročit 7750 min^{-1} . Při překročení těchto otáček hrozí poškození obráběného povrchu spékajícím se práškem pryskyřice na povrchu nástroje. V horším případě může dojít až k prasknutí desky viz obr. 1.10. Řešením může být relativně velké pole rozsahů posuvové rychlosti (kdy nedochází k zhoršení kvality obráběného materiálu), která nám může nahradit limitované otáčky [9].



Obr. 1.10 Lom obráběné desky METAPOR vlivem příliš velké řezné rychlosti.

Už bylo zmíněno, že velkým problémem pro pryskyřice jako je METAPOR je řezná kapalina. To samé platí také pro vlhkost. Během frézování vzniká jako odpad velmi jemný prášek, který v případě kontaktu s kapalinou má tendenci se usazovat na nástroji. Kde se podobně jako při příliš velkých otáčkách začne spékat, což může vyústit v poškození obráběného materiálu. To samé může hrozit i u nástrojů, které byly v předcházejícím obrábění v kontaktu s řeznou kapalinou [9].

Je tedy nutné, aby nástroje byly před použitím očištěny a vysušeny, stejně jako výchozí polotovary. Vlhkosti se v případě materiálu dá zbavit vysušením ve vakuové peci při $40\text{--}50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [9].

Jak už bylo zmíněno pro obrábění takovýchto epoxidových pryskyřic není zapotřebí žádných speciálních nástrojů. Plně dostačují nástroje z HSS, slinutých karbidů (povlakové) či s destičkami převážně kruhového tvaru vhodných pro frézování hliníkových slitin [9].

1.4 Výrobní zásady tvarovacích forem

Obrábění patří v současnosti k nejběžnějším způsobům výroby forem pro vakuové tvarování. Konkrétně se jedná o frézování tvarových ploch. V případě epoxidových pryskyřic se jako výchozí polotovary využívá buď hrubé lité formy, které se následně obrobí na požadovaný tvar a přesnost. Nebo se využívá tzv. litých bloků. Tedy polotovary obvykle ve tvaru kvádry, tak jako je tomu u tvářených profilů [3].

Při samotné výrobě je také nutné dodržet celou řadu zásad. Konstrukční i materiálové zásady forem, které byly rozebrány v předešlých částech, mají přímý dopad na ty výrobní. Přesnost forem je vázána na tvarovou složitost výlisku, způsob tvarování, či velikost smrštění materiálu výlisku. Vzhledem k tomu, že PP materiály mají relativně velké smrštění, přesnost není jejich klíčovou vlastností. Drsnost tvarových ploch u těchto forem je též závislá na materiálu a řezných podmínkách [3].

Výrobu forem pro vakuové tvarování lze ve většině případů považovat jako výrobu prototypovou. Proto může v závislosti na požadavcích být finančně i časově náročná. Technická vybavenost do značné míry rozhoduje o tom, zdali je pro nás forma vyrobitelná či nikoliv. U tvarově složitých forem je dnes nezbytné disponovat víceosými obráběcími centry, specializovanými CAM systémy a kvalifikovanou obsluhou [3].

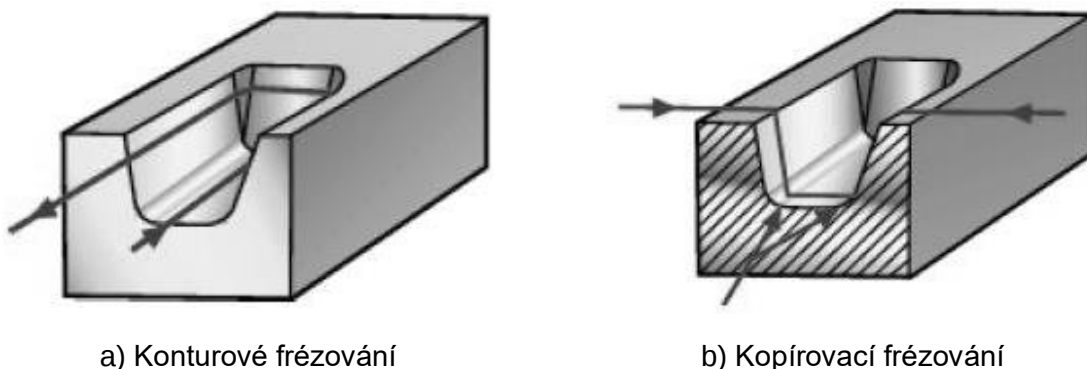
1.4.1 Obrábění tvarových ploch

Vlivem stále se rozvíjející se oblasti frézování odpadá stále více dokončovacích operací. Velkým posunem byl v tomto směru příchod víceosých obráběcích center. Ty nám dnes s pomocí CAM systémů umožňují nahradit klasické kopírovací techniky frézování tvarových ploch technikami konturovacími [10].

Konturovací strategie

Konturovací frézování oproti kopírovacímu přináší řadu výhod např. vyšší řezné rychlosti a posuvy, které tak snižují dobu obrábění. Jsou závislé především na efektivním průměru frézy a počtu zubů, kterými fréza obrábí. Vzhledem k tomu, že u konturovacích strategií frézování dochází k menšímu počtu náhlých změn ať už z pohledu zatížení, či směrů pohybu, fréza je tak déle v záběru a řezy jsou tak plynulejší. Minimalizují se tím vibrace a prodlužuje životnost nástroje. Plynulejší záběr

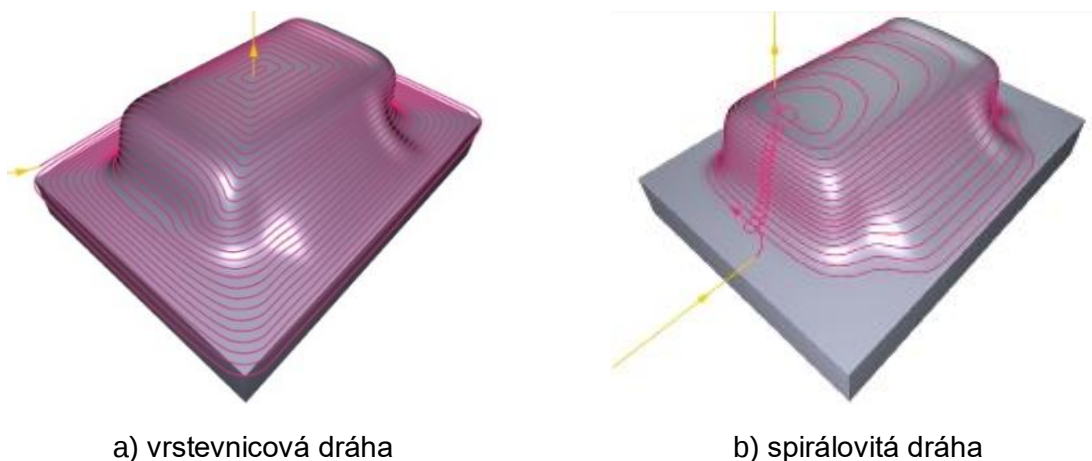
zlepšuje také kvalitu obrobeného povrchu a její tvarovou přesnost. Nedochází tak k podřezání, případně odfrézování vnitřních rádiusů a rohů. Rozdíl mezi konturovou a kopírovací strategií je zobrazen na obr. 1.11 [11].



Obr. 1.11 Rozdíl dráhy konturové a kopírovací strategie [12].

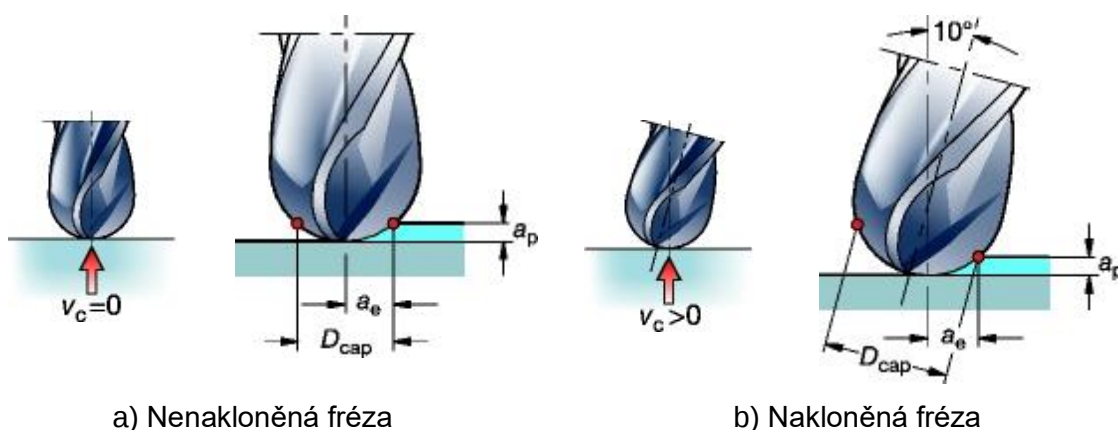
Hrubovací a polohrubovací procesy frézování u konturového frézování probíhá obvykle po vrstevnicích obr. 1.11. Cílem je odebrat, pokud možno co největší objem materiálu co nejrychleji tak, abychom se co nejvíce přiblížili procesu dokončování. To vyžaduje zvýšenou odolnost pro hrubovací nástroje. Vhodné je tedy využít, pokud to tvar formy dovoluje, frézovací hlavy s VBD destičkami nejlépe kruhového tvaru. Lze však využít i monolitní karbidové tvarové frézy, případně frézy z HSS. Preferováno je též sousledné frézování [11].

Dokončovací proces konturového frézování naopak probíhá obvykle po spirále (šroubovici) obr. 1.12 b). V případě epoxidových pryskyřic je často snahou dokončovací proces mít natolik kvalitní, aby nebylo zapotřebí dalších operací. Proto je velmi důležité mít dráhu nástroje, pokud možno co nejplynulejší. V případě změny směrů, docházelo ke konstantní šířce záběru a vytvoření jak tvarově, tak i rozměrově přesné plochy [11].



Obr. 1.12 Druhy konturovacích drah [12].

Takovéto dokončovací procesy však mohou být značně složité a může být tak zapotřebí víceosých obráběcích center, zvláště u hlubších forem. Během klasického tříosého obrábění je osa nástroje (Z) pevná. K realizaci drah, ať už vrstevnicových nebo spirálových dochází jen prostřednictvím tří lineárních pohybů. To však může v případě kulových nástrojů vést k nepříznivým záběrovým podmínkám, kde je v ose nástroje nulová řezná rychlost a dochází tak k nechtěnému tváření obr. 1.13 a). Řešením je využití čtvrté, popřípadě i páté osy. Nástroj naklonit (obvykle 10-15°) vůči původní Z ose, čímž se zvětšuje efektivní průměr nástroje a tím i řezná rychlost. Ta má za následek jak zlepšení kvality obrobeneho povrchu, tak i zvýšení živostnosti nástroje obr. 1.13 b) [12].



a) Nenakloněná fréza

b) Nakloněná fréza

Obr. 1.13 Nenakloněná fréza vs. Nakloněná fréza [12].

Hledaný efektivní průměr v případě nenakloněné frézy je popsán rovnicí [13]:

$$D_{cap_0} = 2 * \sqrt{a_p * (D_1 - a_p)} \text{ [mm]} \quad (1.6)$$

kde: a_p [mm] - hloubka řezu

D_1 [mm] - nominální průměr frézy

D_{cap_0} [mm] - efektivní průměr frézy

V případě nakloněné frézy je efektivní průměr vyjádřen jako [13]:

$$D_{cap_β} = D_1 * \sin \left[\beta + \arccos \left(\frac{D_1 - 2 * a_p}{D_1} \right) \right] \text{ [mm]} \quad (1.7)$$

kde: β [°] - úhel naklopení frézy ve směru posuvu

Efektivní řezná rychlost je tedy [14]:

$$v_{c_e} = \frac{\pi * n * D_{cap}}{1000} \text{ [m/min]} \quad (1.8)$$

kde: v_{c_e} [m/mm] - skutečná řezná rychlost

n [min-1] - otáčky frézy

V případě kulových fréz je občas možné nakloněním zvýšit rychlost posuvu (v_f). Zvětšením efektivního průměru frézy může v případě vícebřité frézy dojít k zvětšení počtu zubů v záběru. Vzhledem k větší řezné rychlosti se tak zkrátí doba záběru břitů. Čas přestupu tepla z obrobku na nástroj se zkrátí a teplota v místě řezu se sníží. V případě dokončování, či superdokončování je však velikost posuvu na zub (f_z) limitována požadavkem na kvalitu obrobenej plochy. Velikost f_z se pak rovná a_e (bočnímu úběru zubu) [12].

1.4.2 Vhodné řezné nástroje

Frézovací systémy Slotworx

Pro jednotlivé způsoby obrábění obsahuje systém Slotworx vhodnou kombinaci nástroje a výměnných břitových destiček. Tato univerzálnost je velmi vhodnou vlastností v případě frézování tvarových ploch. Celkem máme čtyři základní typy Slotworx systému fréz a to S, M, M-HF a L obr. 1.14 [15].

Nejmenší nástroje Slotworx S jsou charakteristické mimořádně lehkým řezem a vysokým výkonem. Multifunkční nástroje řady Slotworx M jsou k dispozici s maximálním počtem VBD pro nejrůznější aplikace. Systémy s označením M-HF jsou vhodné pro vysokorychlostní obrábění. Nástroje Slotworx L jsou určeny pro řezné hloubky až 14 mm. Moderní spirálová geometrie řezných hran destiček s kladným úhlem čela vede k velmi lehkému řezu a extrémně kvalitnímu povrchu, a to jak u kolmých, tak i čelních ploch [15].



Obr. 1.14 Břitové destičky systému Slotworx od firmy Pokorn [16].

Díky své univerzálnosti jsou vhodné pro řadu operací (obr. 1.15). Zvládají jak plnohodnotné hrubování i dokončování, přestože byly vyvinuty primárně pro výkonné dokončování. Geometrie VBD je pozitivní, lze s nimi obrábět jak oceli, tak hliník, grafit i plasty [17].

Optimalizovaný přívod řezné kapaliny přímo do místa řezu zaručuje vyšší životnost VBD a vyšší stabilitu řezného procesu vlivem dobrého odvodu třísek z místa řezu. K vyšší životnosti přispívá také celá řada povlaků PVGO, PVTi, PVST. Vyšší nároky na přesnost jsou zajišťovány broušenými a leštěnými VBD. Vysoká přesnost provedení nástroje zajišťuje jeho klidný a tichý chod [17].



Obr. 1.15 Rozsah operací [16]: 1 - čelné frézování, 2 - kruhový ramping, 3 - úhlový ramping, 4 - obvodové frézování, 5 - drážkování.

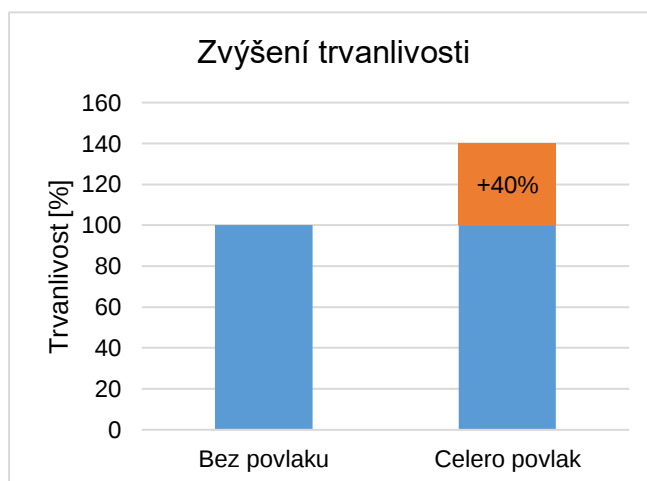
Monolitní karbidové frézy s CELERO povlakem

Hrubovací a dokončovací frézy obr. 1.16 od společnosti Fraisa s určením pro obrábění hliníkových slitin, mědi a kompozitních materiálů, jsou díky své geometrii (variabilnímu úhlu stoupání a dělení zubů) uzpůsobeny k tlumení vibrací během frézování ať už z axiálního nebo radiálního směru. To umožňuje, aby byl řez jemnější bez větší hlukové zátěže a obrobený povrch byl tak kvalitnější i přes vyšší objem odebíraného materiálu [18].

Tyto monolitní karbidové stopkové frézy jsou vyrobeny ze slinutého karbidu HM MG10 (tvrdost 1600HV). Jsou ideální kombinací houževnatosti a tvrdosti, a zárukou zvýšené produktivity. Trvanlivost těchto nástrojů je výrazně prodloužena v případě, že jsou povlakované. U abrazivních hliníkových materiálů vykazují zlepšenou odolnost nástrojů vůči opotřebení až o 40 % obr. 1.17 [18].



Obr. 1.16 Monolitní karbidové frézy od firmy Fraisa [19].



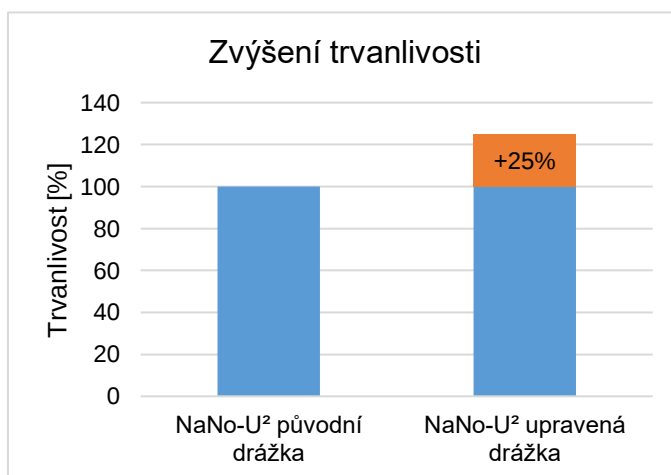
Obr. 1.17 Rozdíl v trvanlivosti nástroje s CELERO povlakem a bez [18].

Spirálové vrtáky Supradrill U

Vrtáky Supradrill U obr. 1.18 jsou vyrobeny stejně jako monolitní frézy ze slinutého karbidu HM MG10. Pro zvýšení trvanlivosti nástroje je použit Nano- U^2 povlak, který je považován za jeden z nejvýkonnějších ochranných povlaků pro obrábění ocelí. Díky unikátní geometrii nástroje dochází ke kontrolovatelnému odchodu třísky a nedochází tak k jednorázovému zvýšení opotřebení. Vlastní geometrie spolu s povlakem Nano- U^2 umožňuje zvýšit trvanlivost nástroje až o 25 % obr. 1.19. Speciálně vyvinuté spirálovité drážkování také výrazně snižuje velikost axiální síly (posuvová síla během procesu vrtání). Zaoblení břitu (CER/F) zvyšuje spolehlivost řezného procesu [20].



Obr. 1.18 Spirálový vrták Supradrill U od firmy Fraisa [20].



Obr. 1.19 Trvanlivost vrtáku Supradrill U s Nano- U^2 povlakem [20].

Mikrovrtáky Microdrill NX

Vrtáky Microdrill NX jsou vhodné pro produktivní vrtání otvorů o velmi malých průměrech s odstupem po 0,05 mm. Vhodné pro vrtání do materiálů jako je ocel, kalená ocel do 42 HRC, litina, hliník a nerezová ocel. Výkon těchto mikrovrtáků je dán kombinací ultra jemnozrnného karbidu, geometrií a speciálním otěruvzdorným povlakem Duro-SD [21].

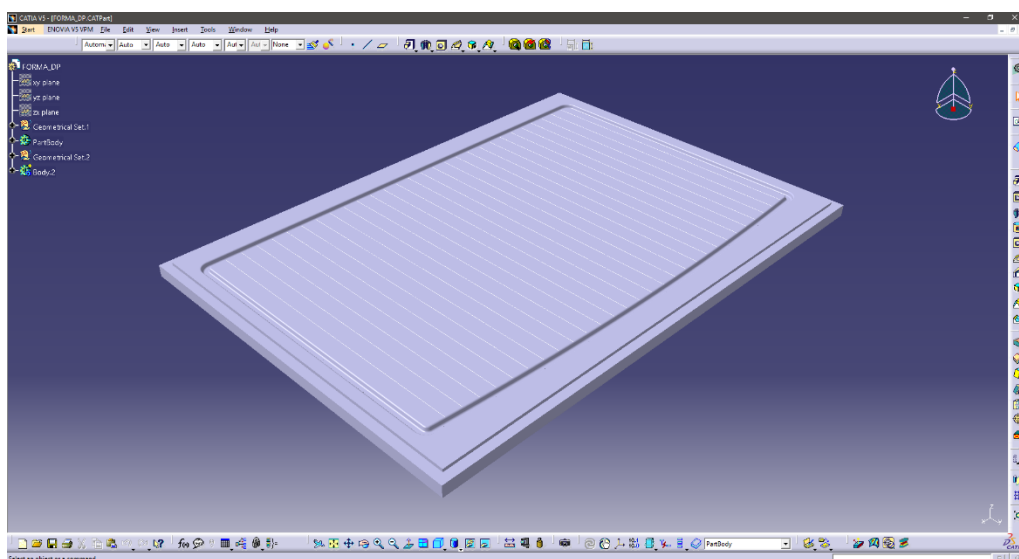
2 NÁVRH ŘEŠENÍ FORMY

Pro návrh řešení formy budeme vycházet z poznatků zmíněných v rešeršní části práce, konkrétně konstrukčními a materiálovými zásadami forem. Návrh porovnatelných variant řešení bude kompletně realizován v CAD programu CATIA V5, nejen pro její vlastnosti vhodné k navrhování plastových dílů a jejich forem, ale také díky kompatibilitě s CAM programem NX CAM, ve kterém bude simulován návrh výroby variant jednotlivých řešení.

2.1 Použitý software

CATIA (obr. 2.1) neboli Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application je PLM program od francouzské společnosti Dassault Systèmes. Zahrnuje hned několik CAX řešení, jako je CAD, CAE a CAM. Díky svým rozvinutým funkcím je vhodná pro navrhování objemových i plošných těles. Dále pro systémové inženýrství, fluidní a elektrické systémy. Je také aplikovatelná na širokou škálu průmyslových odvětví jako je letectví, automobilový průmysl, high-tech spotřebiče, lodní průmysl či stavebnictví. Má dominantní postavení mezi programy, jakou jsou Pro / Engineer, NX případně SolidWorks [22].

CATIA umožňuje vytváření komplexních 3D těles, plechových, kompozitních, lisovaných, kovaných nebo obráběných dílů až po vytváření složitých mechanických sestav s možností definování dynamických a kinematických vlastností. Obsahuje také celou řadu simulačních analýz [22].



Obr. 2.1 Pracovní prostředí v programu CATIA V5.

2.2 Parametry výlisku

Celá řada základních technologických a výrobních zásah tvarovacích forem je závislá na tvaru výlisku obr. 2.2. Dále na materiálu, ze kterého je výlisek vyroben, a to především pro určení vhodného materiálu pro formu. Zvláště s přihlédnutím na tepelnou odolnost. Je tedy nezbytné si definovat všechny potřebné základní parametry výlisku tab. 2.1.

Předtím než bude tvarovaný díl zaformován do formy, je nutné zohlednit smrštění materiálu výlisku. Dle tab. 2.1 jeho toto smrštění 1,4 %. Je tedy nutné o stejnou velikost extrahovanou tvarovou plochu zvětšit.

Tab. 2.1 Základní parametry výlisku.

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Šířka	[mm]	1007
Hloubka	[mm]	666
Výška	[mm]	9,4
Tloušťka	[mm]	1,4
Materiál	[–]	PPC + PE
Měrná hmotnost	[kg/m ³]	920
Smrštění	[%]	1,4



Obr. 2.2 Extrahovaná plocha výlisku zvětšená o smrštění.

2.3 Volba materiálu formy

Materiál formy, jak bylo zmíněno je důležitějším technologickým parametrem při jejím návrhu. Je tedy nezbytné si co nejlépe definovat materiál pro jednotlivé varianty řešení. Pro variantu A je zvolen materiál EPO 752/2080. V případě varianty B je to METAPOR BF100AI.

2.3.1 Varianta A – EPO 752/2080

Materiál pro variantu A je litá epoxidová pryskyřice **EPO 752/2080**. Skládá se celkem ze tří částí: pryskyřice (EPO 752), tvrdidla (EPOLAM 2080) a příměsí. Tou je v tomto případě hliníkový prášek. Ten ve větší míře ovlivňuje vlastnosti epoxidové pryskyřice. Materiál má tak relativně dobrou tepelnou odolnost (195 °C), dlouhou živostnost a tvrdost až 90 D. To umožňuje vyrábět formy relativně vysoké tvarové složitosti. Tato pryskyřice je zvláště vhodná pro vakuové tvarování. Obrobitelnost pryskyřice je výborná. Základní vlastnosti epoxidové pryskyřice jsou uvedeny v tab. 2.2 [23].

Tab. 2.2 Základní vlastnosti EPO 752/2080 [23].

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Měrná hmotnost	[kg/m ³]	1740
Tvrdost	[Shore D15]	90
Pevnost v tahu	[MPa]	49
Pevnost v ohybu	[MPa]	88
Modul pevnosti v ohybu	[MPa]	5600
Rázová houževnatost (CHARPY)	[kJ/m ²]	9
Teplotní odolnost	[°C]	195
Koeficient lineární expanze	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	50
Smrštění	[mm/m]	1,3

2.3.2 Varianta B – METAPOR BF100AI

Pro variantu B je zvolena taktéž litá epoxidová pryskyřice, a to **METAPOR BF100AI**. Stejně jako u předešlé pryskyřice i zde je jako příměs použit hliníkový prášek. Hlavním rozdílem však je jeho mikro-porézní struktura, která tvoří cca 15 % celkového objemu a umožňuje vzdušnou propustnost skrz celý povrchu materiálu. Tato unikátní vlastnost umožňuje využívat tento materiál pro výrobu tvarově složitých prototypových forem pro vakuové tvarování, a to s dosažením vynikající kvality tvarovaného povrchu. Póry na povrchu pryskyřice se za vhodných podmínek neuzavřou ani během obrábění, lze ji tak bez problému obrábět, kde obrobená plocha dosahuje též výborné kvality. Mezi výhody patří [24]:

- vynikající detaily a tvarová přesnost forem,
- rychlá vzduchová propustnost,
- výborná kvalita povrchu výlisků,
- redukovaný čas obrábění oproti hliníkovým slitinám,
- eliminace vzduchových bublin během procesu tvarování.

METAPOR může být použit pro tvarování téměř všech dnes dostupných termoplastů jako je PS, PP, PE, ABS, PVC, PET apod. Je však velice citlivý na vlhkost, proto je nutné ho skladovat v suchém prostředí, případně ho před použitím vysušit. Stejně tak v případě nástrojů, je potřebné zkontrolovat, zdali jsou čisté a suché. METAPOR se také v žádném případě nesmí během obrábění chladit řeznou kapalinou, ale pouze stlačeným vzduchem [24].

Dále je doporučeno vyhýbat se jakýmkoliv dokončovacími operacím jako je broušení, kdy nedbalým postupem hrozí ucpání pórů a znehodnocení materiálu. Základní vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 2.3 [24].

Tab. 2.3 Základní vlastnosti METAPOR BF100AI [24].

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Měrná hmotnost	[kg/m ³]	1800
Tvrdost	[Shore D15]	81
Pevnost v ohybu	[MPa]	56
Modul pevnosti v ohybu	[MPa]	9000
Rázová houževnatost (CHARPY)	[kJ/m ²]	14
Koeficient tepelné roztažnosti	[mm/mm /°C]	30,4 * 10 ⁻⁶
Teplotní stabilita	[°C]	108-210
Průměr pórů	[μm]	15
Vzduchová propustnost	[%]	100

2.4 Volba typu orientace formy

Zaformování bude v případě obou variant stejné, neboť se jedná o stejný výlisek. Rozdíl je pouze v materiálu formy, který v tomto případě tvarovací proces neovlivňuje takovým způsobem, že by bylo zapotřebí u jedné z variant volit jinou orientaci formy. Vyjdeme-li z rovnice (1.1) tak:

$$\frac{9,4}{666} = 0,014 \ll 0,4 [-]$$

Vidíme, že podíl hloubky výlisku vůči jeho průměru (v našem případě se pro zjednodušení jedná o obdélníkový tvar s minimem o hodnotě 666 mm) je výrazně menší než limitní hodnota pro čistě negativní formu. Je tedy volen čistě negativní charakter formy, bez použití pneumatického nebo mechanického předtvarování. Zaformování je zobrazeno na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Negativní zaformování výlisku pro obě varianty stejné.

Během návrhu zaformování je nutné vyřešit také násobnost formy, která je závislá především na velikosti série. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně velký díl (1007 x 666 mm) a zároveň je jedná o návrh prototypových výlisků v sériovosti max. desítek až stovek kusů, násobnost formy v tomto případě nemá význam řešit.

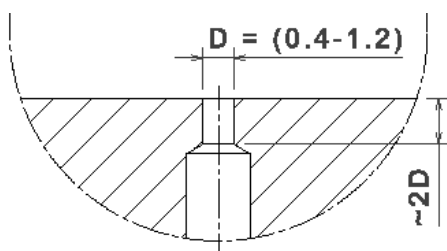
2.5 Návrh odsávacích kanálků formy

Varianta A

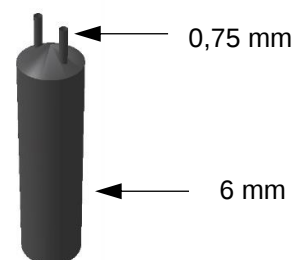
Správné zvolení průměru, rozložení a množství odsávacích kanálků je zcela klíčové pro dosažení kvalitního výlisku. Vyjdeme-li z rovnice (1.3) pak:

$$D_k = \frac{1,4}{2} = 0,7 \text{ mm}$$

Teoretická hodnota průměru odsávacího kanálku je 0,7 mm. Z technologického hlediska a s přihlédnutím na materiál výlisku je průměr kanálku volen 0,75 mm. Vzhledem k tloušťce formy (30 mm) je však celkem obtížné vrtat takto tenký otvor skrz celou tloušťku. Je tedy vhodnější zvolit profilovou díru. Literatura nabízí několik variant, jedna z nich je zobrazena na obr. 2.4 a).



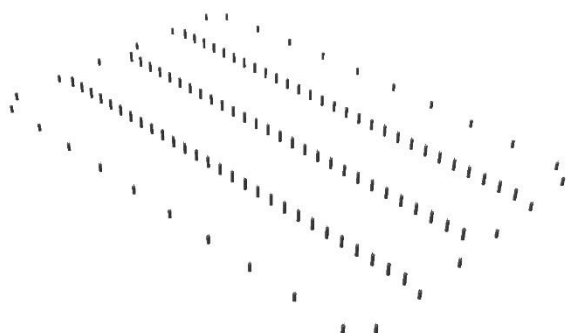
a) Odsávací otvory dle literatury [26].



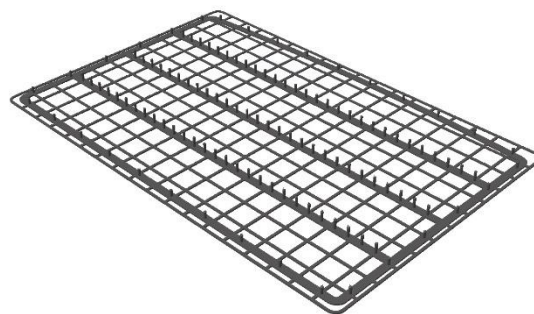
b) Navrhované řešení.

Obr. 2.4 Řešení odsávacího kanálku.

Navrhované řešení je zobrazeno na obr. 2.4 b). Otvor průměru 0,75 mm bude vrtán spolu s otvory průměru 6 mm, a to ve dvou hloubkách 15 a 22 mm. Rozmístění a množství je zobrazeno na obr. 2.5 a).



a) Rozmístění odsávacích otvorů uvnitř formy.



b) Otvory odsávacích otvorů napojeny na rast na spodní straně formy.

Obr. 2.5 Odsávací systém formy varianta A.

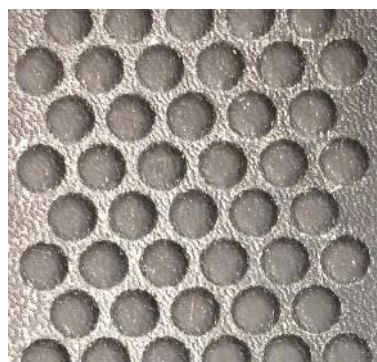
Součástí odsávacího systému je i zajištění dostatečného vedení vzduchu mezi stolem tvarovacího zařízení a spodní stranou formy. Je tedy zapotřebí navrhnout rastr, který se bude napojovat na vzduchové kanálky na spodní straně formy a zároveň usnadňovat odvod vzduchu na rastrovém stole tvarovacího zařízení obr. 2.5 b).

Varianta B

Vzhledem k vzduchové poréznosti materiálu METAPOR není zapotřebí řešit otázku velikosti, množství, případně rozmístění odsávacích kanálků, tak jako v případě varianty A. Bez odsávacích kanálků nehrozí žádné prolisy na výlisku. Rozdíl v kvalitě povrchu výlisku vytvořeném na formě s odsávacími otvory a na porézní formě je zobrazen na obr. 2.6.



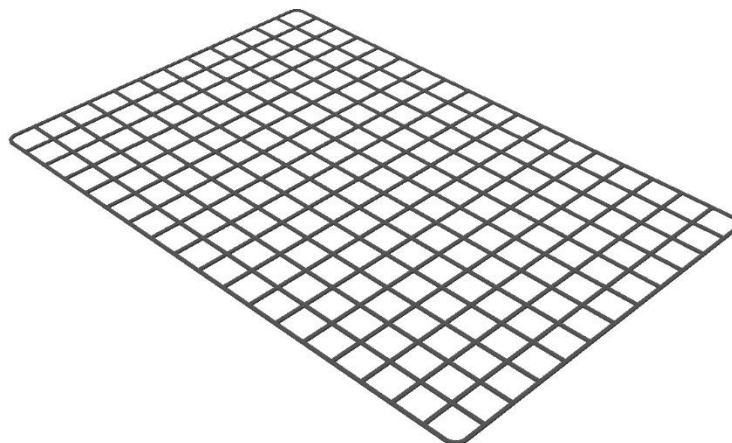
a) Výlisek tvarovaný bez porézní formy.



b) Výlisek tvarovaný formou z materiálu METAPOR.

Obr. 2.6 Rozdíl mezi porézní a neporézní formou.

Ačkoliv bude forma porézní po celé své ploše, i zde je nutné vytvořit na spodní straně formy rastr, pro plynulejší vedení vzduchu mezi formou a stolem tvarovacího zařízení. Návrh rastru pro variantu B je zobrazen na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Rast na spodní straně formy variantu B.

2.6 Řešení technologicko-konstrukčních zásad

Ohřev a chlazení formy

Teplotní odolnost formy je důležitým aspektem při návrhu, která platí pro obě navrhované varianty. V případě materiálu EPO 572/2080 je dle tab.6 maximální dovolená teplota 195 °C. U materiálu METAPOR BF100Al dle tab. 2.3 se pohybuje v rozmezí 108-210 °C, v závislosti na poměru jednotlivých složek pryskyřice a procesu vytvrzení. Teplota, kterou by forma během tvarování PP (PPC + PE) neměla překročit je 80–90 °C. U obou materiálů je tak teplotní rezerva dostatečná.

V případě kontinuální výroby opakovaným dotykem ohřáté desky (polotovaru) a tvarovací formy dochází k přehřátí formy nad dovolenou mez. Proto se u takovýchto forem navrhuje také systém chlazení.

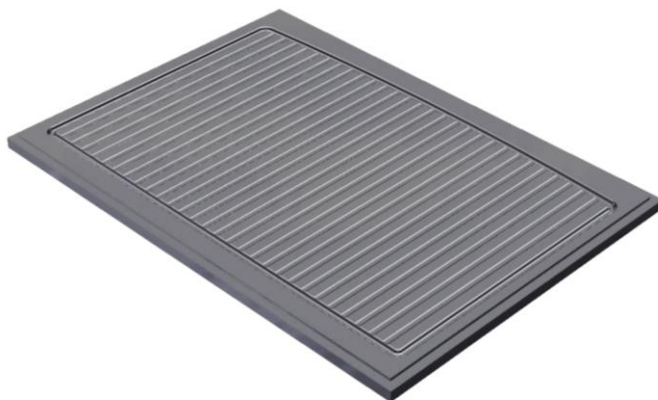
V našem případě však chladicí systém formy není nutný. Vzhledem k tomu, že se jedná o prototypovou výrobu o sériovosti desítek až stovek kusů. Dalším důvodem je chlazení epoxidových pryskyřic řeznou kapalinou, které je nevhodné.

Vyjmutí vylisku z formy

Řešení systému mechanických vyhazovačů je nutné řešit v případě hlubších tvarově složitějších vylisků. V našem případě bude dostačovat pneumatický vyhazovač. Vzduch bude veden zpětným chodem z tvarovacího zařízení přes odsávací systém formy.

2.7 Realizované řešení variant

Horní strana formy je stejná v obou navrhovaných řešení.



Obr. 2.8 Horní strana formy.

Spodní strana varianty A.



Obr. 2.9 Spodní strana formy varianta A.

Spodní strana varianty B.



Obr. 2.10 Spodní strana formy varianta B.

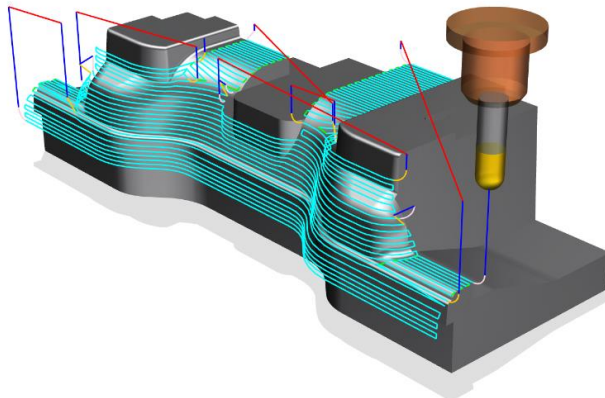
3 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY FORMY

Výroba formy bude simulována CAM systémem NX CAM od společnosti Siemens, pro víceosé obráběcí centrum CNC Spider. Rozdílné vlastnosti materiálů formy, zapříčiňující odlišné řešení její konstrukce, které bylo řešené v kapitole 2. To má přímý dopad na jednotlivé operace simulace výroby.

V případě varianty A je nutné zohlednit odsávací systém formy. Proto simulace jednotlivých obráběcích operací horní i dolní strany formy nebudou zcela totožné, ačkoliv jsou formy tvarově stejné.

3.1 Použitý software

NX CAM obr. 3.1, je součástí komplexního CAD/CAM systému NX od společnosti Siemens. Nabízí širokou škálu funkcí od jednoduchého NC programování až po vysokorychlostní obrábění tvarově složitých součástí na víceosých obráběcích centrech. Poskytuje kompletní softwarové řešení výroby od programování, simulaci postprocesingu až obrábění. Jako je např. frézování (včetně víceosého), vrtání, soustružení, drátové řezání, vysokorychlostní obrábění, obrábění turbín apod. [26].



Obr. 3.1 Simulační proces obrábění programu NX CAM [27].

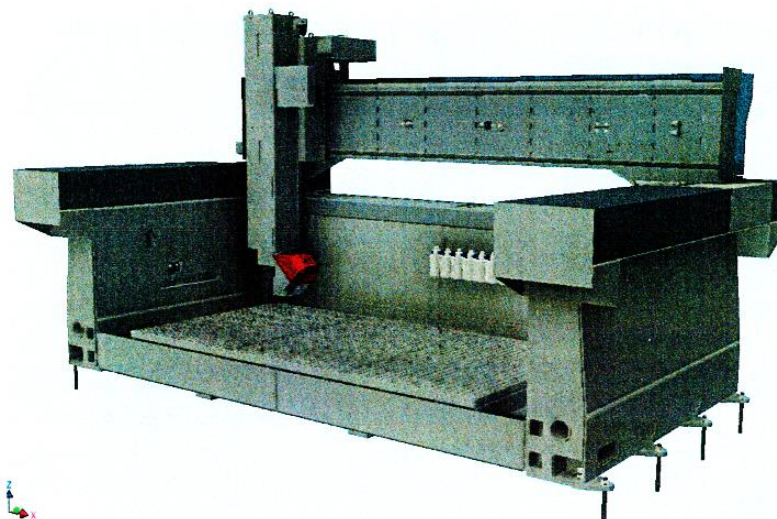
Zvláště silnou pozici má NX CAM v oblasti simulací procesu obrábění. Integrované simulace a jejich následná verifikace umožňuje programátorům kontrolovat dráhy nástrojů v rámci přípravy NC programů. G-kódem řízená simulace zobrazí pohyby obráběcího stroje, které je řízené výstupním NC kódem z interního postprocesoru systému NX. Obsahuje také pohyblivé 3D modely stroje s obrobkem, přípravky, včetně řezných nástrojů, které se pohybují tak jak se budou pohybovat v obráběcím stroji pro zpracování G-kódu. Pokud je potřeba simulovat velmi přesné pohyby, zrychlení, výměny nástrojů či doby obráběcích operací je k dispozici rozšíření v podobě VNCK (Virtual NC Controller Kernel) [26].

3.2 Parametry obráběcího centra

Simulace všech obráběcích operací formy v programu NX CAM bude určena pro frézovací centrum CNC Spider (obr. 3.2) od firmy Houfek, a.s. V současné době je stroj zakoupen, a ještě v tomto roce zařazen do výrobního portfolia firmy. Z tohoto důvodu budou jednotlivé obráběcí operace pouze simulovány. CNC Spider je 5-osé obráběcí centrum určené pro dřevěné, kompozitní a hliníkové materiály s automatickou výměnou nástrojů. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Základní parametry obráběcího centra CNC Spider.

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Plocha pracovního stolu [mm]	3152 x 1550	Max. otáčky [min^{-1}]	20000
Vakuový stůl s otvory o rozteči [mm]	150 x 150	Kuželová stopka	HSK F63
Otvory pro mechanické upnutí M12 o rozteči [mm]	200 x 200	Počet pozic v zásobníku [ks]	14
Max. výška obrobku [mm]	400	Max. délka nástroje [mm]	150
Rychloposuv osa X [m/min]	0-60	Max. průměr nástroje [mm]	100
Rychloposuv osa Y [m/min]	0-40	Max. hmotnost nástroje [kg]	5
Rychloposuv osa Z [m/min]	0-25	Rozměry stoje š x v x d [mm]	3015 x 3594 x 4960
Výkon elektro vřetena [kW]	13	Řídicí systém	SINUMERIK 840D-SL



Obr. 3.2 5-osé frézovací centrum CNC Spider.

3.3 Volba řezných nástrojů

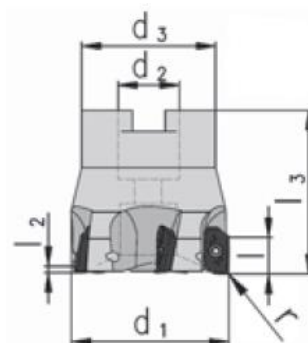
Pro začátek je důležité si definovat základní parametry jednotlivých nástrojů, které budeme využívat. Patří mezi ně čelní frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami, monolitní karbidové stopkové frézy a vrtáky. Především od výrobců jako jsou Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG a Fraisa Holding AG.

Nástroj č.1:

Rohová, drážkovací nástrčná fréza Pokolm obr. 3.3 s obdélníkovou břitovou destičkou (VBD) Slotworx velikosti M obr. 3.4. Základní parametry nástroje a VBD jsou uvedeny v tab. 3.2 a 3.3.

Tab. 3.2 Parametry nástroje č.1 [16].

Katalogové číslo	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
6 52 367	52	6	1,4
Výška VBD l [mm]	Užitná délka l_3 [mm]	Hloubka utápění l_2 [mm]	VBD destička
10	53	2,5	Slotworx M



Obr. 3.3 Nástroj č.1: rohová, drážkovací fréza Pokolm [16].

Tab. 3.3 Parametry obdélníkové VBD [16].

Katalogové číslo	Typ	Rohový rádius r [mm]	Výška l [mm]
04 67 820 R20	Obdélníková břitová destička	2	10
Tloušťka s [mm]	Označení dle DIN	Materiál	Povlak
3,58	XDHT 10T320 FR	K10	leštěno



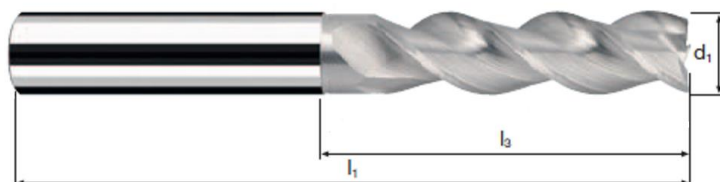
Obr. 3.4 Obdélková břitová destička Slotworx M [16].

Nástroj č.2:

Válcová monolitní fréza ze slinutého karbidu od společnosti Fraisa (obr. 3.5). Základní parametry nástroje jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Parametry nástroje č.2 [19].

Katalogové číslo	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
C15560.260	5	3	-
Délka nástroje l_1 [mm]	Užitná délka l_3 [mm]	Materiál	Povlak
63	24	HM MG10	CELERO



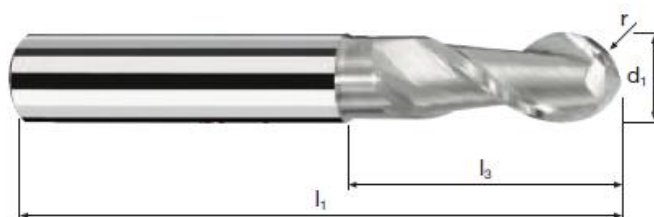
Obr. 3.5 Válcová monolitní fréza Fraisa [19].

Nástroj č.3:

Kulová monolitní fréza ze slinutého karbidu od společnosti Fraisa (obr. 3.6). Základní parametry nástroje jsou uvedeny v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Parametry nástroje č.3 [19].

Katalogové číslo	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
C5290.300	6	2	3
Délka nástroje l_1 [mm]	Užitná délka l_3 [mm]	Materiál	Povlak
57	20	HM MG10	CELERO



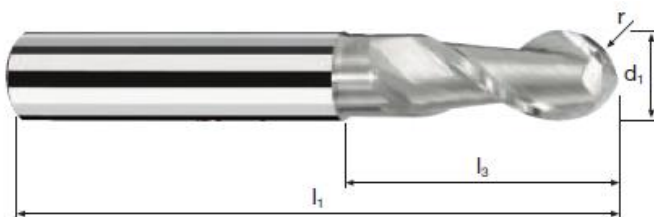
Obr. 3.6 Kulová monolitní fréza Fraisa [19].

Nástroj č.4:

Kulová monolitní fréza ze slinutého karbidu od společnosti Fraisa (obr. 3.7). Základní parametry nástroje jsou uvedeny v tab. 3.6.

Tab. 3.6 Parametry nástroje č.4 [19].

Katalogové číslo	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
C5290.450	10	2	5
Délka nástroje l_1 [mm]	Užitná délka l_3 [mm]	Materiál	Povlak
72	31	HM MG10	CELERO



Obr. 3.7 Kulová monolitní fréza Fraisa [19].

Nástroj č.5:

Spirálový vrták Supradrill U od společnosti Fraisa (obr. 3.8). Základní parametry nástroje jsou uvedeny v tab. 3.7.

Tab. 3.7 Parametry nástroje č.5 [20].

Katalogové číslo	Průměr vrtáku D_1 [mm]	Délka nástroje l_1 [mm]
B62014.0600	6	82
Užitná délka l_2 [mm]	Materiál	Povlak
44	HM MG10	Nano-U ²



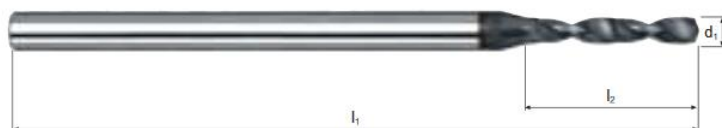
Obr. 3.8 Spirálový vrták Fraisa [20].

Nástroj č.6:

Spirálový vrták Microdrill NX od společnosti Fraisa (obr. 3.9). Základní parametry nástroje jsou uvedeny v tab. 3.8.

Tab. 3.8 Parametry nástroje č.6 [28].

Katalogové číslo	Průměr vrtáku D_1 [mm]	Délka nástroje l_1 [mm]
B57014.0075	0,75	42
Užitečná délka l_2 [mm]	Materiál	Povlak
4,9	HM MG10	DURO-SD



Obr. 3.9 Spirálový vrták Fraisa [28].

3.4 Operace horní strany formy

Frézovací operace horní strany formy obou variant obsahují několik hrubovacích, dokončovacích a vrtacích operací. Parametry vstupního polotovaru jsou uvedeny v tab. 3.9.

Tab. 3.9 Parametry vstupního polotovaru.

Parametr	Hodnota
Rozměry vstupního polotovaru š x h x d [mm]	1070x770x50
Varianta A	
Materiál	EPO 752/2080
Hmotnost vstupního polotovaru [kg]	72
Varianta B	
Materiál	METAPOR BF100Al
Hmotnost vstupního polotovaru [kg]	74

3.4.1 Hrubovací operace

Hrubovací operace horní strany formy, včetně zvolených řezných nástrojů a podmínek jsou zobrazeny v každé jednotlivé operaci.

Hrubovací operace č.1

Použitý řezný nástroj:

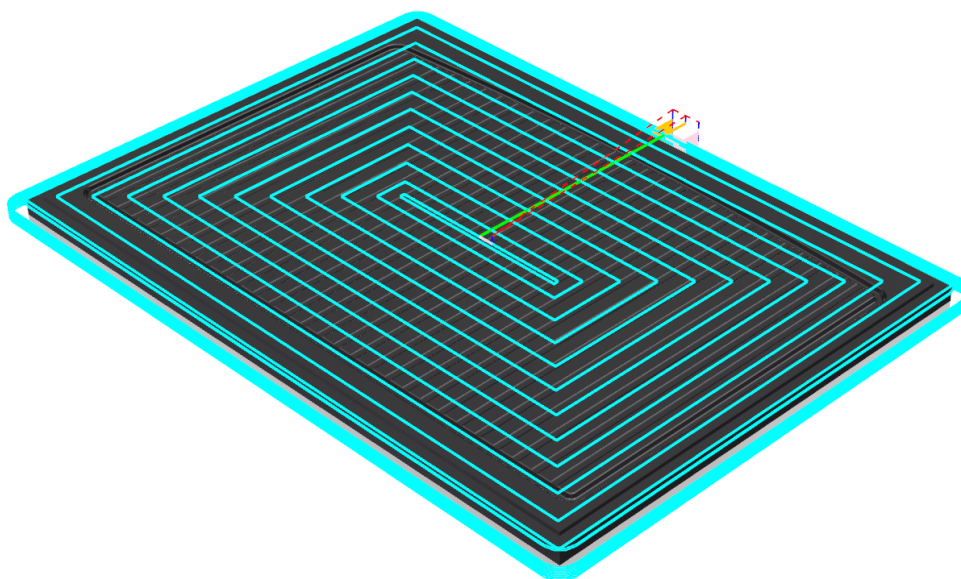
Tab. 3.10 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.1	52	6	2

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.11 Parametry hrubovací operace č.1.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
2755	450	2480	3
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,75 * D_1$	0,15	0,5	40



Obr. 3.10 Hrubovací operace č.1.

Hrubovací operace č.2

Použitý řezný nástroj:

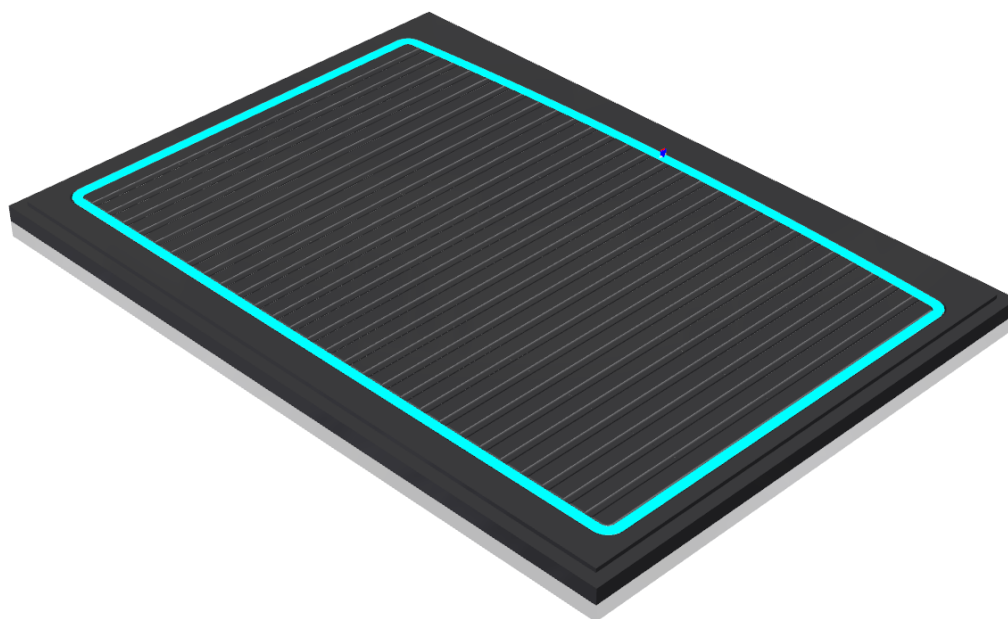
Tab. 3.12 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.2	5	3	-

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.13 Parametry hrubovací operace č.2.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
7750	122	2790	1
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,25 \cdot D_2$	0,12	0,2	70



Obr. 3.11 Hrubovací operace č.2.

Hrubovací operace č.3

Použitý řezný nástroj:

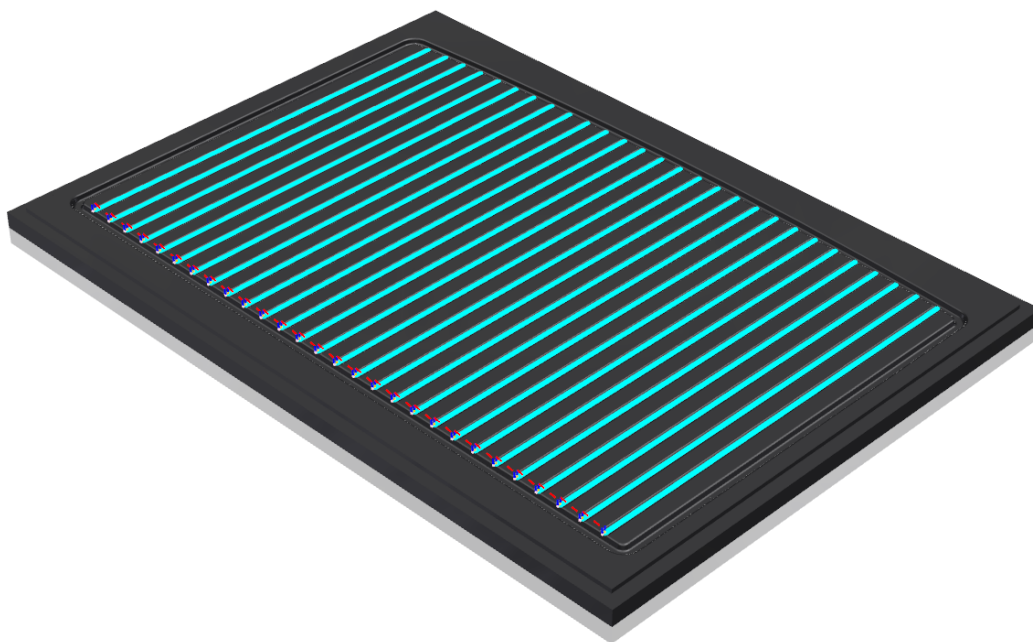
Tab. 3.14 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.2	5	3	-

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.15 Parametry hrubovací operace č.3.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
7750	122	2790	0,5
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,75 \cdot D_2$	0,12	0,2	35



Obr. 3.12 Hrubovací operace č.3.

3.4.2 Dokončovací operace

Dokončovací operace horní strany formy, včetně zvolených řezných nástrojů a podmínek jsou zobrazeny v každé jednotlivé operaci.

Dokončovací operace č.1

Použitý řezný nástroj:

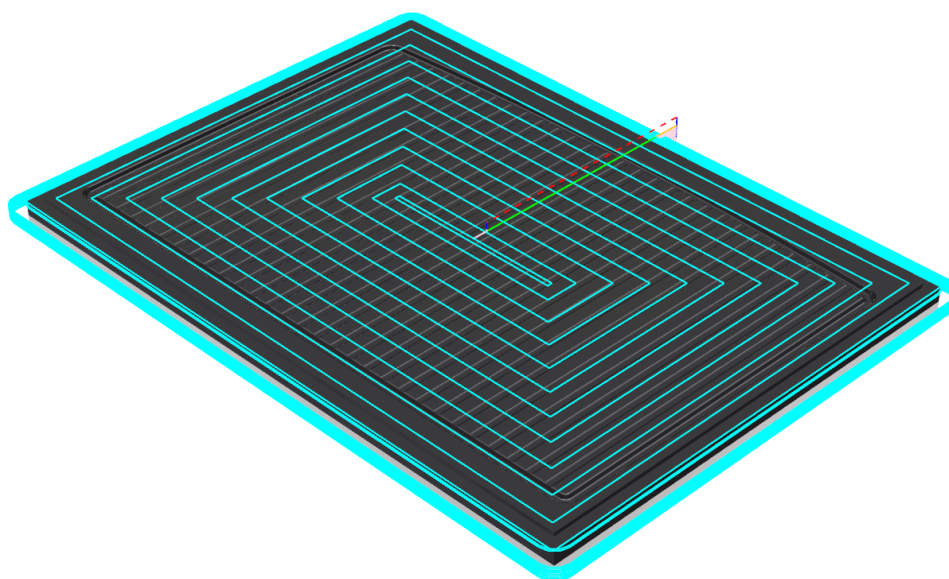
Tab. 3.16 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.1	52	6	2

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.17 Parametry dokončovací operace č.1.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
4897	800	2350	3
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,75 \cdot D_1$	0,08	0	30



Obr. 3.13 Dokončovací operace č.1.

Dokončovací operace č.2

Použitý řezný nástroj:

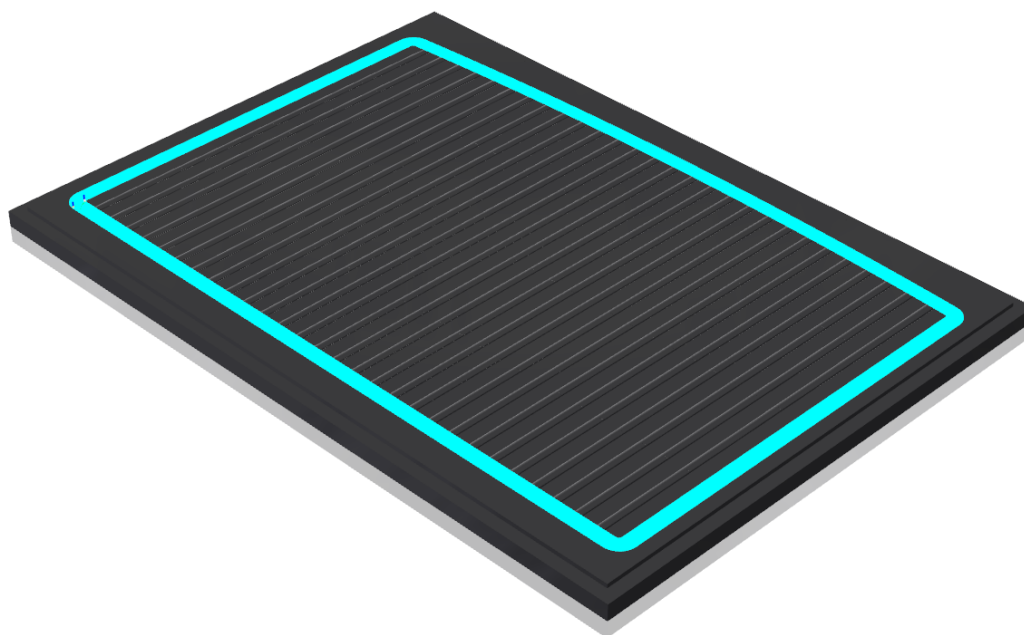
Tab. 3.18 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.3	6	2	3

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.19 Parametry dokončovací operace č.2.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
7750	146	1782	0,2
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
0,22	0,115	0	310



Obr. 3.14 Dokončovací operace č.2.

Dokončovací operace č.3

Použitý řezný nástroj:

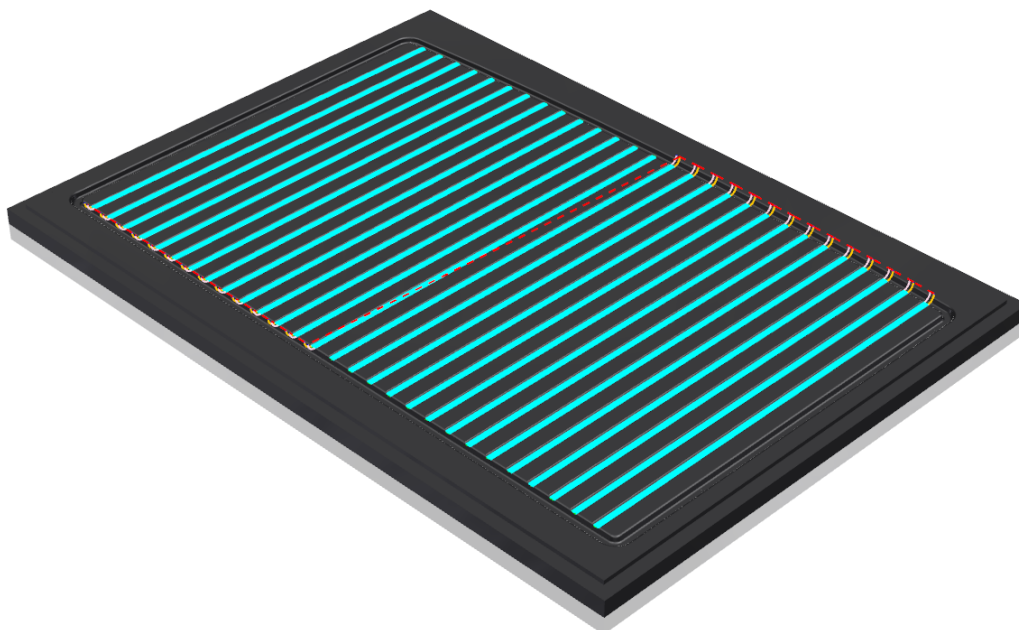
Tab. 3.20 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.4	10	2	5

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.21 Parametry dokončovací operace č.3.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
7750	243	2712	0,2
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
0,27	0,175	0	268



Obr. 3.15 Dokončovací operace č.2.

3.4.3 Vrtací operace

Vrtací operace horní strany formy, včetně zvolených řezných nástrojů a podmínek jsou zobrazeny v každé jednotlivé operaci.

Vrtací operace č.1

Použitý řezný nástroj:

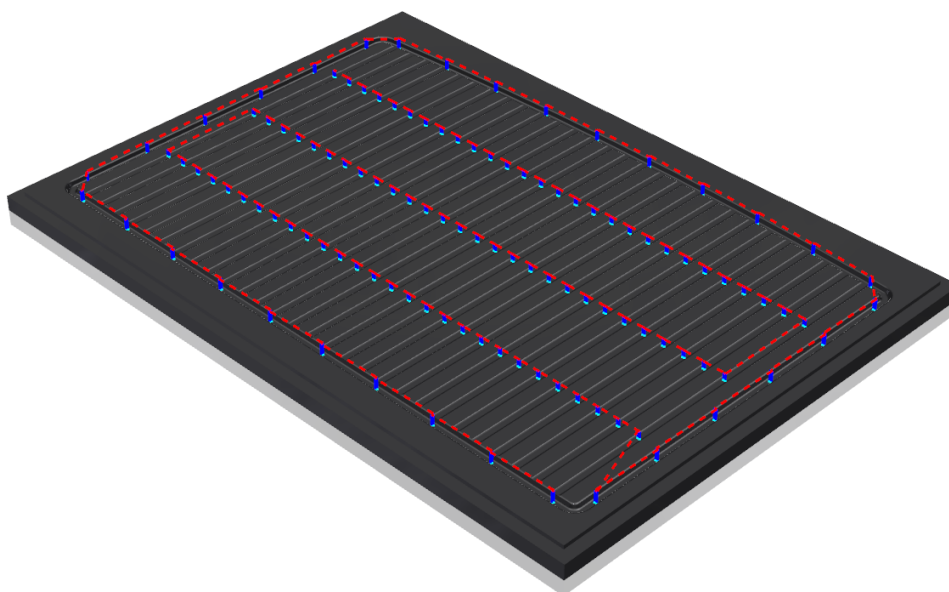
Tab. 3.22 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr vrtáku D_1 [mm]	Užitná délka l_2 [mm]	Rohový rádius r [mm]
č.6	0,75	4,9	-

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.23 Parametry vrtací operace č.1.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
7750	18	117	4
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv f [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
-	0,015	-	10

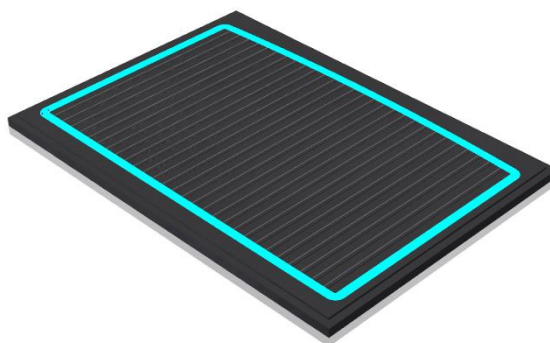


Obr. 3.16 Vrtací operace č.1.

3.4.4 Optimalizace dokončovacích operací

Vzhledem k tomu, že v dokončovacích operacích č.2 obr. 3.17 a č.3 obr. 3.18 dochází k frézování kulovou monolitní frézou s relativně malým axiálním posuvem, vyvstává otázka, zdali nevyužít naklonění frézy pro dosažení vyšší řezné rychlosti v místě řezu a tím lepší kvality obráběného povrchu a zároveň snížení opotřebení nástroje [12].

Optimalizace dokončovací operace č.2



Obr. 3.17 Dokončovací operace č.2.

Nejprve je nutné zjistit efektivní průměr nenakloněné frézy dle rovnice (1.6), pro nástroj č.3 tab. 3.5:

$$D_{cap3_0} = 2 * \sqrt{a_{p_3} * (D_{1_3} - a_{p_3})} = 2 * \sqrt{0,2 * (6 - 0,2)} = 2,15 \text{ mm}$$

Při naklonění (tažení) nástroje o 10° je pak efektivní průměr dle (1.7):

$$\begin{aligned} D_{cap3_{10}} &= D_{1_3} * \sin \left[\beta + \arccos \left(\frac{D_{1_3} - 2 * a_{p_3}}{D_{c2}} \right) \right] = \\ &= 6 * \sin \left[10 + \arccos \left(\frac{6 - 2 * 0,2}{6} \right) \right] = 3,09 \text{ mm} \end{aligned}$$

Nyní je zapotřebí vypočítat efektivní řeznou rychlost, tedy skutečnou řeznou rychlost v místě řezu dle (1.8), v případě nakloněné a nenakloněné frézy. Nejprve tedy efektivní řeznou rychlost nenakloněné frézy č.3:

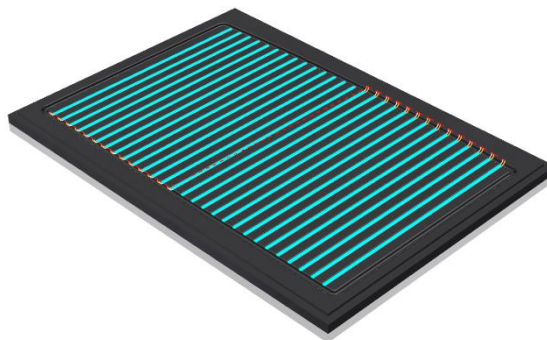
$$v_{c_{e3_0}} = \frac{\pi * n * D_{cap3_0}}{1000} = \frac{\pi * 7750 * 2,15}{1000} = 52,3 \text{ m/min}$$

Dále efektivní řeznou rychlost nakloněné frézy č.3 o 10° proti směru posuvu:

$$v_{c_{e3_{10}}} = \frac{\pi * n * D_{cap3_{10}}}{1000} = \frac{\pi * 7750 * 3,09}{1000} = 75,2 \text{ m/min}$$

Vypočtené efektivní řezné rychlosti lze nyní porovnat. Nakloněním frézy č.3 o 10° proti směru posuvu se efektivní řezná rychlost zvětšila o téměř 44 %.

Optimalizace dokončovací operace č.3



Obr. 3.18 Dokončovací operace č.3.

Efektivní průměr nenakloněné frézy dle rovnice (1.6), pro nástroj č.4 tab. 3.6:

$$D_{cap4_0} = 2 * \sqrt{a_{p_4} * (D_{1_4} - a_{p_4})} = 2 * \sqrt{0,2 * (10 - 0,2)} = 2,8 \text{ mm}$$

Při naklonění (tažení) nástroje o 10° je pak efektivní průměr dle (1.7):

$$\begin{aligned} D_{cap4_{10}} &= D_{1_4} * \sin \left[\beta + \arccos \left(\frac{D_{1_4} - 2 * a_{p_4}}{D_{1_4}} \right) \right] = \\ &= 6 * \sin \left[10 + \arccos \left(\frac{10 - 2 * 0,2}{10} \right) \right] = 4,42 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dále je zapotřebí vypočítat efektivní řeznou rychlost dle (1.8), v případě nakloněné a nenakloněné frézy. Nejprve tedy efektivní řeznou rychlost nenakloněné frézy č.4:

$$v_{c_{e4_0}} = \frac{\pi * n * D_{cap4_0}}{1000} = \frac{\pi * 7750 * 2,8}{1000} = 68,1 \text{ m/min}$$

Dále efektivní řeznou rychlost nakloněné frézy č.4 o 10° proti směru posuvu:

$$v_{c_{e4_{10}}} = \frac{\pi * n * D_{cap4_{10}}}{1000} = \frac{\pi * 7750 * 4,42}{1000} = 107,6 \text{ m/min}$$

Vypočtené efektivní řezné rychlosti lze nyní opět porovnat. Nakloněním frézy č.4 o 10° proti směru posuvu se efektivní řezná rychlost zvětšila o téměř 58 %. V obou případech je tedy patrné, že nakloněním se velice účinně zvýší řezná rychlost v místě řezu, což vede již k zmíněné lepší kvalitě obrobeného povrchu a tím k eliminaci dalších dokončovacích operací po samotném frézování.

3.5 Operace spodní strany formy

Frézovací operace spodní strany formy obou variant obsahují několik hrubovacích, dokončovacích a vrtacích operací. Parametry vstupního polotovaru jsou uvedeny v tab. 3.9.

3.5.1 Hrubovací operace

Hrubovací operace č.4

Použitý řezný nástroj:

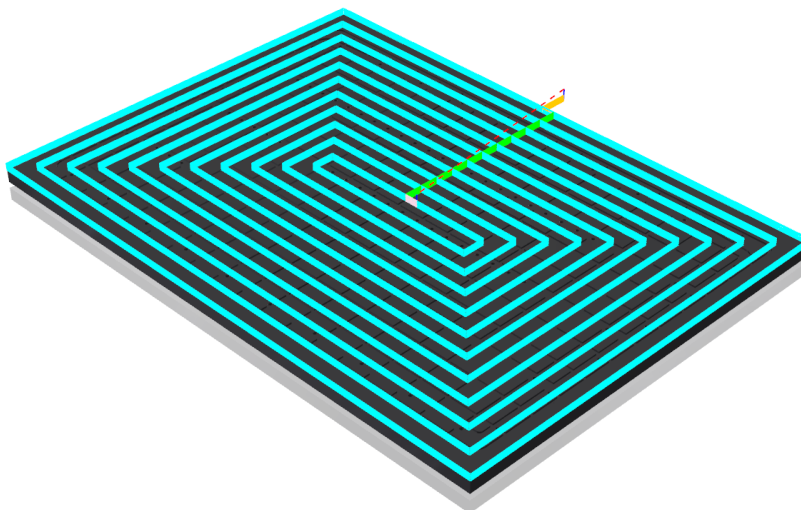
Tab. 3.24 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.1	52	6	-

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.25 Parametry hrubovací operace č.4.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
2755	450	2480	3
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,75 \cdot D_1$	0,15	0,5	50



Obr. 3.19 Hrubovací operace č.4.

Hrubovací operace – rastr A č.5

Použitý řezný nástroj:

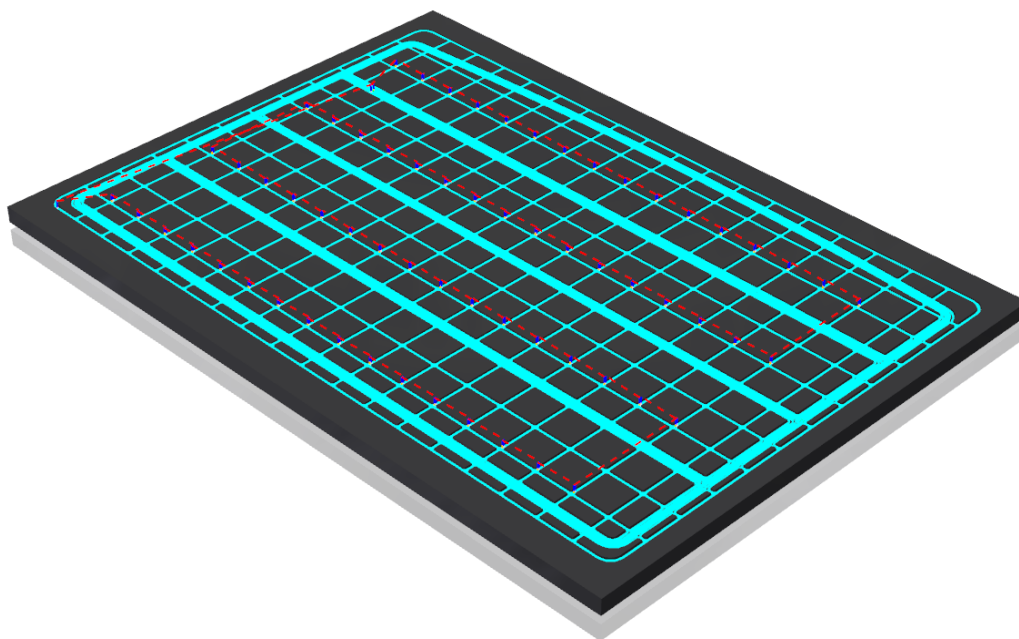
Tab. 3.26 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.2	5	3	-

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.27 Parametry hrubovací operace – rastr A č.5.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
7750	122	2790	1,5
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,75 \cdot D_2$	0,12	-	60



Obr. 3.20 Hrubovací operace – rastr A č.5.

Hrubovací operace – rastr B č.6

Použitý řezný nástroj:

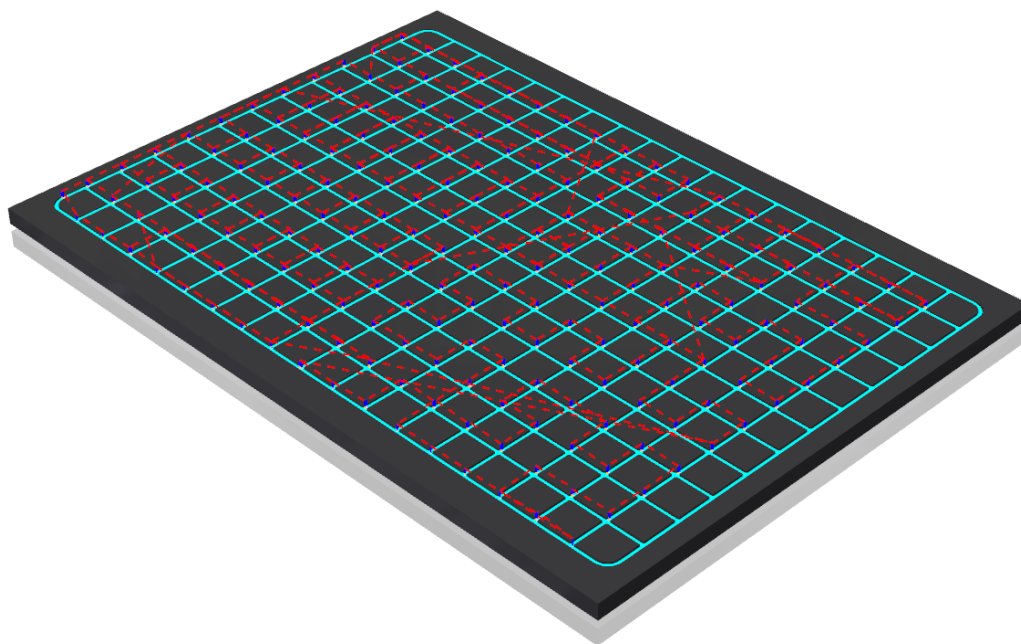
Tab. 3.28 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.2	5	3	-

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.29 Parametry hrubovací operace – rastr B č.6.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
7750	122	2790	1,5
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,75 \cdot D_2$	0,12	-	40



Obr. 3.21 Hrubovací operace – rastr B č.6.

3.5.2 Dokončovací operace

Dokončovací operace spodní strany formy, včetně zvolených řezných nástrojů a podmínek jsou zobrazeny v každé jednotlivé operaci.

Dokončovací operace č.4

Použitý řezný nástroj:

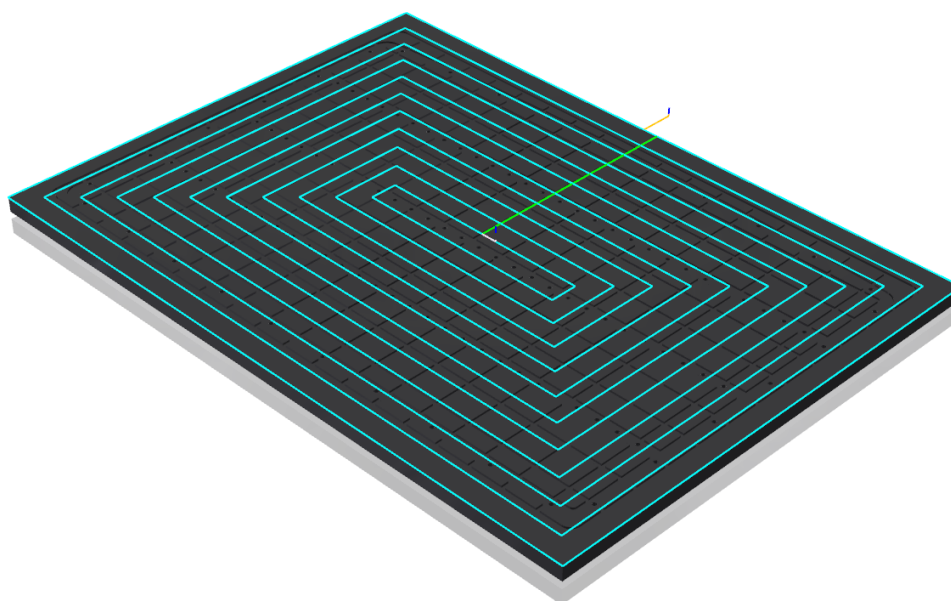
Tab. 3.30 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů z [ks]	Rohový rádius r [mm]
č.1	52	6	2

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.31 Parametry dokončovací operace č.4.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
4897	800	2350	3
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
$0,75 \cdot D_1$	0,08	0	10



Obr. 3.22 Dokončovací operace č.4.

3.5.3 Vrtací operace

Vrtací operace spodní strany formy, včetně zvolených řezných nástrojů a podmínek jsou zobrazeny v každé jednotlivé operaci.

Vrtací operace č.2

Použitý řezný nástroj:

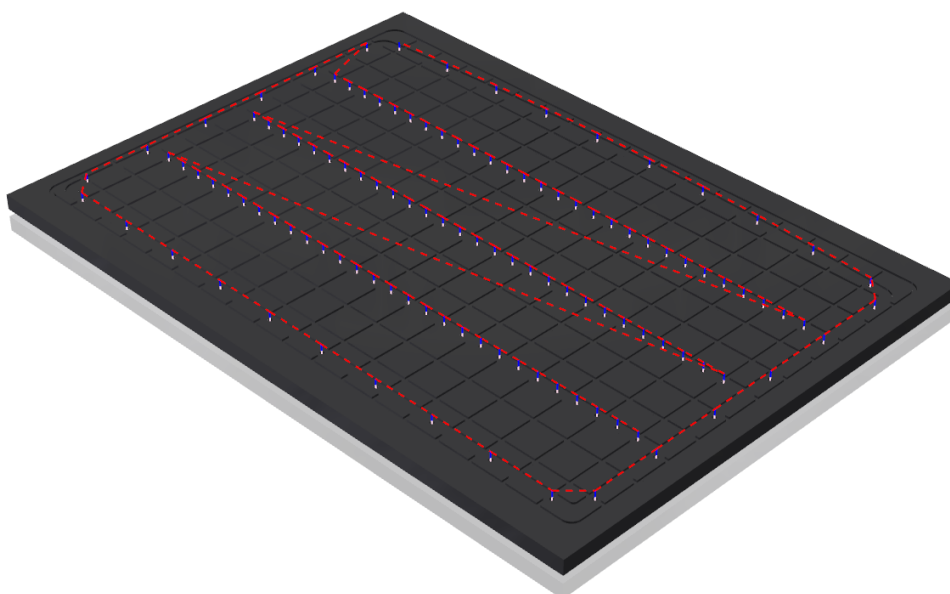
Tab. 3.32 Základní parametry nástroje použité pro výpočet řezných podmínek.

Nástroj	Průměr vrtáku D_1 [mm]	Užitná délka l_2 [mm]	Rohový rádius r [mm]
č.5	6	44	-

Použité řezné podmínky:

Tab. 3.33 Parametry vrtací operace č.2.

Otáčky n [min^{-1}]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]	Axiální posuv a_p [mm]
5305	100	292	18-22
Radiální posuv a_e [mm]	Posuv f [mm]	Přídavek p [mm]	Čas operace t [min]
-	0,055	-	8



Obr. 3.23 Vrtací operace č.2.

4 POROVNÁNÍ VARIANT

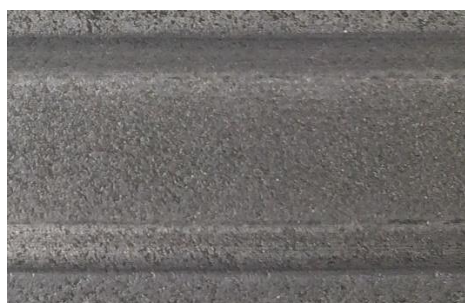
Poté co jsme si stanovili a simulovali jednotlivé výrobní operace obou variant řešení, je vhodné tyto varianty také vyhodnotit. Pro stanovení té nejoptimálnější varianty, je nutné vyhodnotit celkem tři rozhodující faktory. Cenu vstupního materiálu, nákladovost výroby a dosažitelnou kvalitu povrchu vylisku. Abychom toho mohli docílit, je zapotřebí provést techniko-ekonomické zhodnocení.

4.1 Technické zhodnocení

Z pohledu obrobitelnosti jsou na tom obě varianty stejně, vzhledem k tomu, že se jedná o stejný typ materiálu. Obrobitelnost těchto materiálů je vynikající, opotřebení rezných nástrojů minimální. V případě optimalizovaných variant dochází vlivem naklonění frézy k zvýšení řezné rychlosti a tím prodloužení trvanlivosti nástroje.

U vrtacích operací dochází k vrtání děr varianty A strojově na CNC centru. Dříve k vrtání odsávacích kanálků forem docházelo ručním vrtáním, které však výrobu forem značně prodlužovalo. V tomto případě je vrtáno celkem 348 děr, které strojním vrtáním trvá celkem 18 minut v porovnání s původním ručním, které by v tomto případě trvalo kolem 112 minut.

Vzhledem k tomu, že se jedná o simulaci výroby, nemůžeme reálně vyhodnotit rozdíly v kvalitě obrobené formy jednotlivých variant. Můžeme však porovnat rozdíly (obr. 4.1) v kvalitě povrchu předchozích typů forem, které byly vyrobeny ze stejných materiálů jako jsou navrhované varianty.



a) Kvalita obrobeného povrchu neporézní formy.



b) Kvalita obrobeného povrchu porézní formy.

Obr. 4.1 Rozdíl mezi porézní a neporézní formou.

Tab. 4.1 Přehled jednotkových časů pro jednotlivé operace.

Operace horní strany formy		Varianta A [min]		Varianta B [min]	
Hrubování č.1		40		40	
Dokončování č.1		30		30	
Hrubování č.2		70		70	
Dokončování č.2	Dokončování č.2 - optimalizace	310	310	310	310
Hrubování č.3		35		35	
Dokončování č.3	Dokončování č.3 - optimalizace	270	270	270	270
Vrtání č.2		10		-	
Celkem		765		755	
Operace spodní strany formy		Varianta A [min]		Varianta B [min]	
Hrubování č.4		50		50	
Dokončování č.4		10		10	
Rastr Varianta A		60		-	
Rastr Varianta B		-		40	
Vrtání č.1		8		-	
Celkem		128		100	
Σ operací		893		855	

Jednotkový čas tab. 4.1 neoptimalizované dokončovací operace č.2 a 3 obou variant řešení je stejný jako jednotkový čas optimalizovaných variant č.2 a 3. Náklonem frézy proti směru posuvu dochází k zvýšení řezné rychlosti v místě řezu a tím i zlepšení řezných podmínek. U operace č.2 je to zvýšení o 44 %, v případě operace č.3 o 58 %. V případě obrábění horní strany formy je nutné zohlednit také operaci, při které jsou navrtávány díry pro odsávací kanálky.

Vyhodnocení jednotkových časů operací variant spodní strany formy je už poměrně složitější. První rozdíly jsou patrné při obrábění rastru. Vzhledem k tomu, že varianta A potřebuje odsávací kanálky je nutné tomu uzpůsobit také rastr. Jednotkový čas výroby rastru varianty A je o celou 1/3 delší než v případě výroby rastru varianty B. V případě varianty A je navíc opět nutné zohlednit vrtací operaci druhé části odsávacích kanálků. Porovnání celkových jednotkových časů operací horní a spodní strany, spolu s celkovým jednotkovými časy obou variant je uvedeno v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Rozdíly dílčích a celkových jednotkových časů jednotlivých variant řešení.

	Varianta A [min]	Varianta B [min]
Horní strana formy celkem	765 (+10)	755
Spodní strana formy celkem	128 (+28)	100
Celkem	893 (+38)	855

4.2 Ekonomické zhodnocení

V ekonomickém zhodnocení bude za úkol vyhodnotit jednotlivé varianty řešení v peněžním vyjádření. K tomu je zapotřebí nejprve stanovit hodinovou sazbu CNC stroje. Hodinová sazba CNC stroje bude činit 1800 Kč/hod. Tab. 4.3 vyjadřuje cenu jednotlivých variant řešení v peněžním vyjádření.

Tab. 4.3 Přehled jednotlivých operací v peněžním vyjádření.

Operace horní strany formy		Varianta A [Kč]		Varianta B [Kč]	
Hrubování č.1		1200		1200	
Dokončování č.1		900		900	
Hrubování č.2		2100		2100	
Dokončování č.2	Dokončování č.2 - optimalizace	9300	9300	9300	9300
Hrubování č.3		1050		1050	
Dokončování č.3	Dokončování č.3 - optimalizace	8040	8040	8040	8040
Vrtání č.2		297		-	
Celkem		22887		22590	
Operace spodní strany formy		Varianta A [Kč]		Varianta B [Kč]	
Hrubování č.4		1500		1500	
Dokončování č.4		300		300	
Rastr Varianta A		1800		-	
Rastr Varianta B		-		1200	
Vrtání č.1		238		-	
Celkem		3838		3000	

Vidíme, že ceny jednotlivých operací reflektují jednotkové časy. Porovnání celkových nákladů operací horní a spodní strany, spolu s celkovým výrobními náklady obou variant je uvedeno v tab. 4.4.

Tab. 4.4 Rozdíly dílčích a celkových výrobních nákladů jednotlivých variant řešení.

	Varianta A [Kč]	Varianta B [Kč]
Horní strana formy celkem	22887 (+297)	22590
Spodní strana formy celkem	3838 (+838)	3000
Celkem	26725 (+1135)	25590

4.3 Celkové náklady jednotlivých variant

Pro zjištění celkových nákladů je nutné si určit cenu vstupního materiálu. Ta je v pro obě varianty zobrazena v tab. 4.5.

Tab. 4.5 Cena vstupního polotovaru pro jednotlivé varianty řešení.

Polotovar 1070x770x50	Varianta A [Kč]	Varianta B [Kč]
EPO 782/2080	25048	-
METAPOR BF100AI	-	71250

Na první pohled je patrné, že rozdíl v ceně je obrovský. Vstupní polotovar varianty B je téměř tři krát dražší než v případě varianty A. Jak se cena vstupního materiálu projeví na celkové ceně variant řešení je ukázáno v tab. 4.6.

Tab. 4.6 Celkové náklady na výrobu jednotlivých variant řešení.

Polotovar 1070x770x50	Varianta A [Kč]	Varianta B [Kč]
Celkové náklady na operace	26725	25590
Náklady na vstupní polotovar	25048	71250
Σ všech nákladů	51773	96840

Z pohledů celkových nákladů je patrné, že varianta B je o 87 % nákladnější než varianta A, konkrétně o 45067 Kč.

5 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ

Při volbě orientace formy je vhodné zohlednit spolu s poměrovým číslem (V/D), také směr smrštění výlisku, případně stranu plochy s požadovanou tvarovou přesností (strana dotýkající se formy obvykle dosahuje lepší tvarové přesnosti). Vzduchová propustnost epoxidové pryskyřice METAPOR hraje v případě rozdílných vlastností materiálů formy zásadní roli. Forma z tohoto materiálu nepotřebuje žádné odsávací kanálky, což má dopad nejen na konstrukci formy jako takové, ale především na její výrobu.

Z pohledu obrobiteľnosti jsou na tom materiály obou variant podobně. I přes hliníkovou příměs mají relativně špatnou tepelnou vodivost, aby se tak zabránilo natavení pryskyřice s hliníkovým práškem na nástroj, otáčky by neměly nepřekročit 7750 min^{-1} . Při nevhodných řezných podmínkách dochází k snížení trvanlivosti nástroje a zhoršení kvality obrobeného povrchu. Jako chladicí médium je nutné používat pouze stlačený vzduch a zároveň se vyvarovat jakéhokoliv kontaktu s kapalinou. U kulových fréz je také vhodné naklopit frézu proti směru posuvu tak, aby v ose nástroje nebyla nulová řezná rychlost a nedocházelo tak k nechtěnému tváření.

Z pohledu jednotkových časů operací je na tom varianta B lépe. Dříve se však odsávací kanálky forem vrtaly ručně. Často tak samotná časová náročnost výroby rozhodla o konkrétní variantě bez ohledu na cenu vstupního materiálu. Vzhledem k pořízení nového CNC centra jsou vrtací operace v navrhovaných řešeních řešena strojově. To umožňuje zkrátit čas vrtacích operací až o 620 %. Je tedy patrné, že s využitím moderních technologií rozdíly v nákladech na výrobu jednotlivých forem klesají. O to více bude o konečné vhodnosti řešené varianty rozhodovat cena polotovaru formy.

Z pohledu nákladů na vstupní materiál je vzduchová propustnost materiálu varianty B vykoupena téměř trojnásobnou cenou. Vstupní polotovar varianty A z materiálu EPO 782/2080 stojí 25048 Kč. V porovnání s materiálem varianty B METAPOR BF100Al, který stojí 71250 Kč. Varianta B se tak z tohoto pohledu rázem stává výrazně nákladnější.

V případě tvarově méně složitých forem, jako je tento případ, kdy jsou náklady na samotnou výrobu téměř srovnatelné je vhodnější zvolit variantu A, tedy neporézní materiál. V případě tvarově složitých forem (nutnost velkého množství odsávacích kanálků, řádově tisíce až desítky tisíc), se vyšší cena porézního materiálu začne kompenzovat nižšími náklady na její výrobu. Pak je výhodnější volit variantu s porézním materiálem.

ZÁVĚR

V diplomové práci bylo dosaženo těchto výsledků:

- Z rozboru problematiky vakuového tvarování vyplývá, že důležitou oblastí tvarových forem jsou odsávací kanálky. Jejich počet, rozmístění a velikost mohou ve větší míře ovlivnit výsledek tvarovacího procesu. Kvalita výlisku je dále závislá také na optimalizaci tvarovacího procesu. Jedním z řešení jsou nové dostupné materiály forem se specifickými vlastnostmi.
- Vzhledem k tvarové složitosti formy a velikosti série (100 a více kusů) jsou zvoleny jako materiál formy dvě lité epoxidové pryskyřice. Kde varianta A je navržena s ohledem na vlastnosti konvenční epoxidové pryskyřice s hliníkovou příměsí EPO 782/2080. Návrh řešení v případě varianty B je naopak přizpůsoben vlastnostem nové epoxidové pryskyřice METAPOR BF100AI. Při čemž tato zvolená pryskyřice má porézní strukturu.
- V případě materiálu varianty B je vhodné se vyvarovat následným dokončovacími operacím jako je broušení (hrozí ucpání porézní struktury na povrchu). V případě simulací výroby dokončovacích operací č.2 a 3 je volen náklon kulové monolitní stopkové frézy a to 10° proti směru posuvu. Tím dochází k zvětšení efektivní rezné rychlosti v místě řezu a vytvoření kvalitnějšího obrobeného povrchu.
- Z pohledu celkových jednotkových strojních časů výrobních operací je doba výroby varianty A stanovena na 893 minut, v případě varianty B je to 855 minut. Vrtací operace varianty A, včetně úpravy rastru prodlužují její výrobu o 38 minut. Náklady na výrobu reflektují jednotkové časy. V případě varianty A je to 26725 Kč, u varianty B 25590 Kč. Z pohledu výroby je tak varianta A dražší o 1135 Kč. Náklady spojené s materiálem varianty A jsou 25048 Kč, kde celkové náklady jsou pak 51773 Kč. Náklady na materiál varianty B jsou 71250 Kč, kde celkové náklady jsou 96840 Kč.
- V konečném zhodnocení je jako optimální řešení zvolena varianta A, vzhledem k nižším celkovým nákladům a to o 45067 Kč. V případě tvarově složitějších forem (s větším počtem odsávacích kanálků) je doporučeno volit varianty s porézním materiálem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] A Vacuum Forming Guide. *The University of Arizona*. [online]. 2010 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://capla.arizona.edu/forms/shop/fromechvacuumguide.pdf>
- [2] BIŠŤAN, Ernest. *Vákuové tvarovanie termoplastov*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967. Edícia chemickej literatúry.
- [3] KULHÁNEK, Jan. *Formy pro tváření plastických hmot*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. Řada strojírenské literatury.
- [4] Easy Composites [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.easycomposites.co.uk/#!/resin-gel-silicone-adhesive/filler-powders-and-additives/metal-powders/aluminium-metal-filler-powder.html>
- [5] *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [6] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu II*. 3., nezm. vyd. Brno: VUT, 1979. Učební texty vysokých škol.
- [7] METAPOR Block Material. *Portec*. [online]. ©2018 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: http://www.portec.ch/metapor_block.htm
- [8] METAPOR BF100AL, METAPOR. *CMT Materials*. [online]. ©2018 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.cmtmaterials.eu/products/metapor-bf100al/>
- [9] Machining Metapor. *Pittsburgh Plastics Manufacturing*. [online]. 1985-2017 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.pittsburghplastics.com/assets/files/Machining%20Metapor.pdf>
- [10] Kaňka, Jan. Proč pro výrobu forem používat specializovaný CAD/CAM?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, č.1 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/proc-pro-vyrobu-forem-pouzivat-specializovany-cad-cam.html>
- [11] SKOPEČEK, Tomáš a Petr HOFMANN. Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č.5 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapusťek.html>
- [12] Posouzení aplikace a užitečné rady. *SANDVIK Coromant* [online]. ©2018 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/profile_milling/application_checklist/pages/default.aspx

- [13] Ball Nose Milling With and Without a Tilt Angle. *Ball Nose Milling Strategy Guide* [online]. 2017 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/ball-nose-milling-strategy-guide/>
- [14] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE 1, Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia, 2003.
- [15] Nástrojové systémy pro optimalizaci procesu frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, č.4 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastrojove-systemy-pro-optimalizaci-procesu-frezovani.html>
- [16] *Katalog a technická příručka frézování*. Německo: Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG, 2010.
- [17] PRÁŠIL, Tomáš. Nástroje pro vysokorychlostní a vysokoposuvové frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, č.12 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-vysokorychlostni-a-vysokoposuvove-frezovani.html>
- [18] *Multicut XA – produktivita a kvalita pro jemné obrábění hliníku*. Švýcarsko: FRAISA SA, 2017.
- [19] *High – performance milling tools*. Švýcarsko: FRAISA SA, 2018.
- [20] *Spirálové vrtáky Supradrill U*. Švýcarsko: FRAISA SA, 2015.
- [21] PRÁŠIL, Tomáš. Výkonné vrtání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č.4 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vykonne-vrtani.html>
- [22] Seznámení s CAD software CATIA V5. *CATIA fórum* [online]. 2018 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.catia-forum.cz/manual-catia/introduction/>
- [23] Epoxy Casting Resins. *Axson – technologies* [online]. 2010 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.axson-technologies.com/sites/default/files/epo752-2080-gb.pdf>
- [24] METAPOR – BF100Al – Data Sheet. *Tooling Tech Group* [online]. 2018 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.toolingtechgroup.com/images/metaphor-mold/1-metapor-BF100-Data-Sheet.pdf>
- [25] TOMIS, František, Jiří KAŇOVSKÝ a Josef HELŠTÝN. *Formy a přípravky*. Brno: VUT, 1979. Učební texty vysokých škol.

- [26] High Productivity Part Manufacturing. Siemens PLM [online]. ©2016 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z :
https://www.plm.automation.siemens.com/media/store/en_us/Siemens-PLM-NX-CAM-High-Productivity-Part-Manufacturing_tcm1023-4561_tcm29-1989.pdf
- [27] NX 9 represents 50 years of CAM software in the making. *Siemens PLM Community* [online]. 2013 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
<https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Siemens-PLM-Corporate-Blog/NX-9-represents-50-years-of-CAM-software-in-the-making/ba-p/335178>
- [28] *Carbide drills | Thread cutting tools 2017/18*. Švýcarsko: FRAISA SA, 2018.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ABS		Acrylonitrile butadiene styrene
a_e	[mm]	šířka řezu
a_p	[mm]	hloubka řezu
CAD		Computer Aided Design
CAE		Computer Aided Engineering
CAM		Computer Aided Manufacturing
CNC		Computer Numerical Control
D	[mm]	průměr (šířka) výlisku
D_1	[mm]	nominální průměr frézy
D_2	[mm]	hloubka utápění
D_3	[mm]	průměr krčku
D_{cap_0}	[mm]	efektivní průměr frézy nenakloněné
D_{cap_β}	[mm]	efektivní průměr frézy nakloněné
D_k	[mm]	průměr odsávacího kanálku
f_z	[mm]	posuv na zub
HSS		High speed steel (Rychlořezná ocel)
l	[mm]	výška břitové destičky
l_1	[mm]	délka nástroje
l_2	[mm]	užitečná délka vrtáku
l_3	[mm]	užitečná délka frézy
n	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky nástroje
NC		Numerical Control
p	[mm]	přídavek na obrábění
PC		polycarbonates
PE		polyethylene
PMMA		poly(methyl methacrylate)
PP		polypropylene
PPC		polypropylene copolymer
PS		polystyrene
PVC		polyvinyl chloride

r	[mm]	zaoblení rohu frézy
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
s	[mm]	tloušťka břitové destičky
t	[mm]	tloušťka desky (polotovaru)
V	[mm]	Hloubka výlisku
VBD		vyměnitelná břitová destička
v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	řezná rychlost
v_{c_e}	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	efektivní řezná rychlost
v_f	[$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	rychlost posuvu
VNCK		Virtual NC Controller Kernel
z		počet zubů frézy
β	[°]	úhel naklonění nástroje ve směru posuvu

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1	Výkres formy varianta A
PŘÍLOHA 2	Výkres formy varianta B