

# **Studie teplotních polí technologie vakuového tvarování**

Petr Miklas

---

Bakalářská práce  
2008

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr MIKLAS**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Studie teplotních polí technologie vakuového tvarování**

Zásady pro vypracování:

**1. Vypracujte literární studii na dané téma**

**a) technologie vakuového tvarování**

**b) materiály**

**c) stroje a zařízení**

**2. Stanovte a zdůvodněte výběr pro základních technologických zařízení pro studium teplotních polí**

**3. Definujte energetickou náročnost technologie vakuového tvarování**

**4. Proveďte technologické experimenty**

**5. Závěr**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1.E.BIŠŤAN : Vákuové tvarovanie termoplastov -- podkladový materiál firmy R&M Kotojedý u Kroměříže

2.Nauka o polymerech. Díl 1. -- 1. vyd. -- Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975, 1982 -- 121s

3.Nauka o polymerech. Díl 2. -- 1. vyd. -- Brno: VUT, 1980 -- 235s

4.Technologická studie vakuového tvarování -- podkladový materiál firmy FORM s.r.o. Sřelrná, autor: Ing. Pavel Ries, 1994

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**19. února 2008**

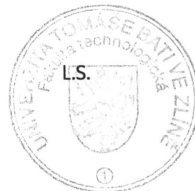
Termín odevzdání bakalářské práce:

**6. června 2008**

Ve Zlíně dne 31. ledna 2008



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je vyhledat nejvhodnější technologické požadavky výroby na rozložení teplotních polí při ohřevu termoplastické desky tak, aby při vakuovém tvarování docházelo k vytvoření vylisku s co nejrovnoměrnějším rozložením tloušťky stěny. Technologie výroby spočívá v ohřevu termoplastické desky či fólie na tvarovací teplotu, která je dána druhem materiálu, a následným tvarováním pomocí vakua.

Vakuové tvarování patří mezi energeticky úsporné výroby prostorových výrobků s nižšími požadavky na jejich fyzikální vlastnosti, ale s vysokými požadavky na funkčnost a estetické vlastnosti. Fyzikální vlastnosti lze ovlivnit správnou volbou materiálu a technologickými podmínkami.

Klíčová slova: vakuum, tvarování, teplotní pole,

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor work is to find the most suitable technologic production requirement to lay-out of temperature field on the heat thermoplastic plate so that the molding produced by vacuum forming has the most steady lay-out of surface thickness. Production technology consists in heating the thermoplastic plate or sheet to its forming temperature, which depends on the type of the thermoplastic material, and consecutive forming by vacuum.

Vacuum forming belongs to energetic economy production of cubical products with lower requirements for their physical properties but with high requirements for their functionality and design properties. Physical properties can be affected by right choice of thermoplastic material or technologic conditions.

Keywords: vacuum, forming, temperature field

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Zdeňku Dvořákovi, CSc., vedoucímu mé bakalářské práce, za metodické vedení, za cenné rady a připomínky, které mi pomohly v řešení dané problematiky. Zároveň děkuji Bc. Jakobovi Černému, Ing. Vladimírovi Šumberovi, Ing. Jiřímu Šálkovi a dalším pracovníkům UTB ve Zlíně.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně 23.5.2008

.....

Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VAKUOVÉ TVAROVÁNÍ</b> .....	<b>11</b>
1.1 PVC TVRDÝ, MĚKČENÝ A KOPOLYMERY PVC.....	12
1.1.1 Tvrdý PVC .....	12
1.1.2 Měkčený PVC .....	12
1.1.3 Kopolymery PVC .....	13
1.1.4 Houževnaté PVC.....	13
1.2 POLYSTYREN A JEHO KOPOLYMERY.....	13
1.3 POLYETHYLEN.....	14
1.4 POLYPROPYLEN.....	14
1.5 POLYMETYLMETAKRYLÁT.....	15
1.6 DERIVÁTY CELULÓZY .....	15
1.6.1 Celuloid .....	15
1.6.2 Acetát celulózy.....	15
1.6.3 Acetobutyrát celulózy.....	16
1.7 POLYKARBONÁT.....	16
<b>2 ZPŮSOBY VAKUOVÉHO TVAROVÁNÍ</b> .....	<b>17</b>
2.1 NEGATIVNÍ TVAROVÁNÍ.....	17
2.2 POZITIVNÍ TVAROVÁNÍ .....	19
2.3 POZITIVNÍ TVAROVÁNÍ S PNEUMATICKÝM PŘEDTVAROVÁNÍM.....	20
2.4 NEGATIVNÍ TVAROVÁNÍ S MECHANICKÝM PŘEDTVAROVÁNÍM .....	22
2.5 NEGATIVNÍ TVAROVÁNÍ S MECHANICKÝM A PNEUMATICKÝM PŘEDTVAROVÁNÍM .....	24
2.6 KOMBINOVANÉ POZITIVNĚ-NEGATIVNÍ TVAROVÁNÍ .....	25
2.7 KOMBINOVANÉ VAKUOVÉ A PŘETLAKOVÉ TVAROVÁNÍ.....	26
2.8 KONTINUÁLNÍ TVAROVÁNÍ.....	28
2.8.1 Diskontinuální proces.....	28
2.8.2 Kontinuální proces .....	28
2.8.3 Plně kontinuální rotační způsob .....	29
<b>3 STROJE A NÁSTROJE PRO VAKUOVÉ TVAROVÁNÍ</b> .....	<b>30</b>
3.1 OHŘÍVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	30
3.1.1 Regulovatelný ohřev podle pásem .....	31
3.1.2 Dvojstranný ohřev .....	32
3.2 PRACOVNÍ PLOCHA A UPÍNACÍ RÁM .....	32
3.2.1 Pracovní plocha.....	32
3.2.2 Upínací rám .....	33

3.3	VAKUOVÝ SYSTÉM .....	33
3.4	PNEUMATICKÝ A HYDRAULICKÝ SYSTÉM .....	34
3.5	FORMY PRO VAKUOVÉ TVAROVÁNÍ .....	35
3.5.1	Sádrové formy .....	36
3.5.2	Dřevěné formy.....	36
3.5.3	Cementové formy.....	37
3.5.4	Formy z epoxidových živic .....	38
3.5.5	Formy vyrobené z vrstvených materiálů .....	38
3.5.6	Kovové formy.....	39
<b>4</b>	<b>TECHNOLOGIE VAKUOVÉHO TVAROVÁNÍ .....</b>	<b>40</b>
4.1	PŘÍPRAVA FÓLÍÍ A DESEK .....	40
4.2	UPEVNĚNÍ FORMY A KONTROLA VAKUOVÉHO STROJE.....	40
4.3	TEPLOTA FORMY A JEJÍ VÝZNAM.....	41
4.4	OHŘEV NA TVAROVACÍ TEPLITU .....	42
4.5	TEPLOTA VZDUCHU A JEHO DÁVKOVÁNÍ PŘI PNEUMATICKÉM PŘEDTVAROVÁNÍ .....	43
4.6	PŘEDTVÁRNÍK .....	44
4.7	RYCHLOST TVAROVÁNÍ .....	44
4.8	OCHLAZOVÁNÍ A VYJÍMÁNÍ VÝLISKŮ Z FORMY .....	45
4.9	ODDĚLOVÁNÍ VYTVAROVANÝCH VÝLISKŮ .....	45
4.9.1	Stříhání na stolních nůžkách .....	45
4.9.2	Ořez na okružní nebo pásové pile .....	45
4.9.3	Frézování na horní fréze.....	46
4.9.4	Vyseknutí pomocí patrice a matrice .....	46
4.9.5	Ořezávání pomocí CNC frézky .....	46
<b>5</b>	<b>VÝPOČTOVÉ VZTAHY V TECHNOLOGII VAKUOVÉHO TVAROVÁNÍ .....</b>	<b>47</b>
5.1	VÝPOČET TLOUŠŤKY STĚNY TVAROVANÝCH VÝROBKŮ .....	47
5.2	TEPELNÝ TOK DESKOU.....	50
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>POPIS VAKUOVÉHO STROJE FORMECH 300X .....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU .....</b>	<b>58</b>
8.1	NÁVRH POUŽITÝCH MODELŮ .....	58
8.2	NÁVRH METODIKY POROVNÁVÁNÍ TVAROVANÝCH DESEK.....	60
8.3	PODMÍNKY PRO TVAROVÁNÍ.....	62
<b>9</b>	<b>VYHODNOCENÍ TECHNOLOGICKÝCH EXPERIMENTŮ.....</b>	<b>63</b>
9.1	VYHODNOCENÍ ZMĚNY TLOUŠŤKY DESKY .....	63
9.1.1	Model A .....	63

9.1.1.1	Plný ohřev .....	63
9.1.1.2	Ohřev se stíněním .....	64
9.1.1.3	Grafické porovnání tlouštěk výlisků modelu A .....	65
9.1.2	Model B .....	66
9.1.2.1	Plný ohřev .....	66
9.1.2.2	Ohřev se stíněním .....	67
9.1.2.3	Grafické porovnání tlouštěk výlisků modelu B .....	68
9.1.3	Model C .....	69
9.1.3.1	Plný ohřev .....	69
9.1.3.2	Ohřev se stíněním .....	70
9.1.3.3	Grafické porovnání tlouštěk výlisků modelu C .....	71
9.1.4	Model D .....	72
9.1.4.1	Plný ohřev .....	72
9.1.4.2	Ohřev se stíněním .....	73
9.1.4.3	Grafické porovnání tlouštěk výlisků .....	74
9.1.5	Ideální a optimální tloušťka výlisku .....	74
9.2	VYHODNOCENÍ ZMĚNY RASTRU .....	75
9.2.1	Model A .....	76
9.2.1.1	Plný ohřev .....	76
9.2.1.2	Ohřev se stíněním .....	77
9.2.2	Model B .....	77
9.2.2.1	Plný ohřev .....	77
9.2.2.2	Ohřev se stíněním .....	77
9.2.3	Model C .....	78
9.2.3.1	Plný ohřev .....	78
9.2.3.2	Ohřev se stíněním .....	78
9.2.4	Model D .....	78
9.2.4.1	Plný ohřev .....	78
9.2.4.2	Ohřev se stíněním .....	79
<b>10</b>	<b>SIMULACE TEPLOTNÍCH POLÍ V PROGRAMU FEMLAB 3.1 .....</b>	<b>80</b>
10.1	PLNĚ OHŘÍVANÁ DESKA .....	80
10.2	ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ DO OBDÉLNÍKŮ .....	81
10.3	ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ DO PRSTENCŮ .....	83
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>85</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>89</b>



## ÚVOD

Vakuové tvarování termoplastů patří mezi energeticky úsporné výroby prostorových výrobků s nižšími požadavky na jejich fyzikální vlastnosti, ale s vysokými požadavky na funkčnost a estetické vlastnosti. Fyzikální vlastnosti lze ovlivnit správnou volbou materiálu a technologickými podmínkami.

Termoplasty jsou materiály, mezi které řadíme např. PS, PP, PE, PVC, PMMA apod. Jejich největší výhodou je ta vlastnost, že se zvyšující teplotou měknou a stávají se tvarovatelnými. Naopak postupným ochlazováním získávají původní pevnost a tvrdost.

K tvarování je potřeba výrobní zařízení – vakuový stroj. Ten je složen z upínacího rámu, ohřívacího zařízení, vakuového systému a dalších pomocných zařízení.

Abychom získali tvar požadované součásti, musíme mít tvarovací formu. V dnešní době existuje několik různých způsobů tvarování, i mnoho druhů forem.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VAKUOVÉ TVAROVÁNÍ

Vakuovým tvarováním lze v dnešní době tvarovat téměř všechny termoplastické materiály, které jsou ve formě polotovarů, tzn. ve formě desek nebo fólií. Tloušťka používaných desek či fólií je v rozsahu 0,1 až 16 mm.

Termoplast je látka, která se zvyšující se teplotou měkne, čímž ji můžeme tvarovat a ochlazením získávají svoji původní pevnost. [1]

Materiály používané pro vakuové tvarování:

- PVC tvrdý, měkčený a kopolymery PVC,
- polystyren a jeho kopolymery,
- polyethylen,
- polypropylen,
- polymethylmetakrylát,
- deriváty celulózy a
- polykarbonát.

Každý z uvedených materiálů má své specifické vlastnosti, a proto je potřeba při vakuovém tvarování dodržovat specifické podmínky pro každý materiál zvlášť. Podmínky kladené na kvalitu a vlastnosti fólií (desek) jsou následující:

- Povrch fólií (desek) musí být hladký, lesklý, případně matný, bez trhlin, bublin či stopách po cizím tělese, které by mohli vyvolat roztrhnutí materiálu při vakuovém tvarování.
- Změknutí tvarované fólie (desky) musí být rovnoměrné a dokonalé, aby síla, která je vyvozena vakuem, mohla vytvarovat i silnější desky.
- Tloušťka fólií (desek) musí být po celé jejich ploše stejná.
- Povrchové plochy fólií (desek) musí být dostatečně odolné proti přehřátí vrchních vrstev.
- Interval tvarovací teploty má být dostatečně široký, aby se výlisky mohli dobře vytvarovat na ručním i na automatickém vakuovém stroji.

- Fólie (desky) v ohřátém stavu se musí dát ztenčovat do určitého procenta. Stupeň ztenčení je dán způsobem vakuového tvarování a materiálem fólie (desky).
- Rozdělení tloušťky stěn výlisku, ovlivněné typem fólie (desky, tvarovací teplotou, geometrickým tvarem výlisku a způsobem vakuového tvarování se musí pohybovat v určitých mezích. [1]

## 1.1 PVC tvrdý, měkčený a kopolymery PVC

Polyvinylchlorid (PVC) je jedním z nejstarších a nejrozšířenějších termoplastů. Má výborné vlastnosti, je zdravotně nezávadný, má vynikající chemickou odolnost, je možno jej zpracovávat různými způsoby. Mechanické vlastnosti tvrdého i měkčeného PVC závisí především na vlastnostech samotného PVC a jeho přísad. [1]

### 1.1.1 Tvrdý PVC

Fólie z tvrdého PVC se vyrábí válcováním a vytlačáním. Válcováním získáme kvalitnější a hladší povrch fólie, kdežto vytlačováním můžeme vytvářet na fólii nejrůznější dezény. Pro vakuové tvarování se používají častěji válcované fólie pro jejich homogenitu a jednodušší tvarování.

Desky z tvrdého PVC se vyrábí lisováním fólií a vytlačáním. Pro vakuové tvarování je vhodnější použití lisovaných desek, a to z důvodu hladkosti a lesklosti povrchu a jejich celkové kvality.

PVC desky a fólie se mohou vyrábět v různých tloušťkách, barvách a rozměrech.

Rozsah tvarovacích teplot je vysoký, a to od 85°C až po 140°C, nejvhodněji ale pro 100 až 130°C. Kvůli vysoké pevnosti PVC při tvarovací teplotě není možno dosáhnout u tlustších desek ostřejších či hranatějších tvarů. Výlisky z tvrdého PVC jsou tepelně odolné do 60°C. [1]

### 1.1.2 Měkčený PVC

Fólie z měkčeného PVC se používají k výrobě plastické kůže (koženky) s velmi hlubokým vzorkováním. Pomocí negativního tvarování měkčených fólií můžeme dosáhnout velmi detailní kresby reliéfu podle formy. Tyto fólie se mohou taky používat k povrchové úpravě tvarovaných výrobků ze dřeva, kovu apod. a to použitím způsobu, kdy se fólie na výrobek

vakuově natvaruje a posléze přilepí. Desky z měkčeného PVC se pro vakuové tvarování používají jen zřídka. [1]

### 1.1.3 Kopolymery PVC

Nejčastějším kopolymerem PVC je vinylchlorid-vinylacetát (VC-VAC), který je pro vakuové tvarování dokonce vhodnější než samotné PVC. Mezi výhody tohoto materiálu patří vyšší tažnost, dobrá barvitelnost, transparentnost, materiál může být vysoce lesklý. Díky vyšší tažnosti může být použit pro bohatě tvarované výlisky, případně pro hlubší tvary.

Nevýhodou kopolymeru VC-VAC je nižší teplotní odolnost.

Mezi další používané kopolymery se řadí fólie(desky) vyrobeny z různých kopolymerů vinylchloridu a akrylátů. [1]

### 1.1.4 Houževnaté PVC

Výlisky vyrobeny z tvrdého PVC jsou poměrně křehké při nižších teplotách, proto se používá houževnatý PVC. Jedná se o PVC modifikovaný polyolefiny nebo kaučuky. Má vyšší teplotní odolnost, až do 80°C a vyšší mrazuvzdornost, až do -30°C. Nevýhodou je obtížnější vakuové tvarování. [1]

## 1.2 Polystyren a jeho kopolymery

Polystyren (PS) je čirá, plastická hmota, která má velmi dobré elektroizolační vlastnosti, je lehce barvitelná, je velmi odolná proti vlhkosti a propouští více než 90% světla. Hustota polystyrenu je asi 1,05g.cm<sup>-3</sup>. Je hořlavý a vyznačuje se nízkou odolností vůči organickým rozpouštědlům. Je relativně křehký, což omezuje jeho použití pro namáhané výrobky. Je však výborně tvarovatelný. Výrobky z polystyrenu jsou tvrdé, ale křehké, odolné až do 80°C.

Fólie a desky z polystyrenu se vyrábí vytlačováním, a to v různých rozměrech. Fólie jsou vhodné pro plně automatický a kontinuální provoz vakuového tvarování. Vyrábí se též orientované fólie, a to tak, že vzniklá vytlačená fólie se vytahuje v příčném a podélném směru, čímž si získá vysokou pevnost.

Směsí polystyrenu s přírodním či syntetickým kaučukem získáme houževnatý polystyren, který má vyšší pevnost v ohybu než běžný polystyren, proto výrobky z něj vyrobené nejsou

tak křehké. Nevýhodou je však nižší odolnost proti stárnutí. ve velké míře se používá pro vakuové tvarování.

Pro zlepšení vlastností samotného polystyrenu se vyrábí kopolymery a směsné polymery, např. styren s akryláty, styren s akrylonitrilem, dále akrylonitril-butadien-styren (ABS). [1]

### 1.3 Polyethylen

Polyethylen (PE) je jednou z nejvíc používaných plastických hmot. Mezi jeho vlastnosti se řadí pevnost, ohebnost, pružnost, vysoká houževnatost při nízkých teplotách, výborné elektroizolační vlastnosti, dobrá chemická a tepelná odolnost. Hustota je asi  $0,95\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Fólie a desky z polyethylenu se vyrábí vytlačováním. Jsou pevné a houževnaté, velmi vhodné pro vakuové tvarování, mají však delší dobu ohřívání. Proto je nejvýhodnější použít dvoustranný ohřev.

Tvarovací teplota je v rozmezí  $120$  až  $140^\circ\text{C}$ , výlisky jsou odolné až do  $90^\circ\text{C}$ . Výlisky jsou pevné a pružné, nemají však takovou tvrdost jako výlisky z PVC či PS. [1]

### 1.4 Polypropylen

Polypropylen (PP) je jedním z nejmladších termoplastických materiálů, vlastnostmi a vzhledem velmi podobný polyethylenu. Vlastnosti jako vyšší tepelná odolnost, vyšší tvrdost a chemická odolnost i při vysokých teplotách, výborné elektroizolační vlastnosti, vysoký bod tavení, rozměrová stabilita umožňují uplatnění tam, kde se dříve používal PVC. Jedná se o nejlehčí termoplastickou hmotu, jeho hustota je  $0,90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , je zdravotně nezávadný.

Fólie a desky z polypropylenu se vyrábí vytlačováním. Jejich povrch je lesklý a hladký. Jedná se o materiál s vyšší tvrdostí, proto mají výlisky vyšší pevnost a vyšší odolnost proti poškrábání. Polypropylenové fólie jsou proti ethylenovým fóliím křehčí a lámavější.

Polypropylenové desky jsou velmi vhodné pro vakuové tvarování, přičemž mají lepší vlastnosti než fólie(desky) z polyethylenu. Je potřeba delší doba ohřevu, proto se využívá silnější ohřev. Pro silnější desky se používá dvoustranný ohřev. Tvarovací teplota je  $160$  až  $175^\circ\text{C}$ , hotová výlisky jsou tepelně odolné až do  $125^\circ\text{C}$  a mrazuvzdorné asi do  $-20^\circ\text{C}$ . [1]

## 1.5 Polymethylmetakrylát

Polymethylmetakrylát (PMMA) nebo-li plexisklo je materiál s výbornými optickými vlastnostmi, odolností proti pověrným vlivům, proti pohonným hmotám avšak poměrně drahý.

Desky z PMMA se vyrábí vytlačováním nebo blokovou polymerizací. Vytlačované desky mají tu výhodu, že ořezaný odpad se může opět zpracovat na desky. Pro vakuové tvarování je vhodný též měkčený PMMA, který má vyšší pevnost v ohybu, ale má nižší teplotní odolnost.

Hustota PMMA je  $1,19\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , je hořlavý, ale zapálit jej lze pouze na hraně. Tvarovací teplota je v rozmezí 120 až 150°C, při ohřevu se deska zmenší asi o 2%, a to jak v délce tak i na šířku. Při vyšších teplotách až 170°C vzniká možnost destrukce materiálu.

Stejně jako u PVC má PMMA při ohřevu na tvarovací teplotu ještě vysokou pevnost, čímž nám znemožňuje dosáhnout hranatých a ostrých obrysů u tlustších desek. Z důvodů vzniku pnutí se doporučuje samovolné ochlazení výlisku. Výlisky jsou odolné až do 85°C podle druhu použitého PMMA.

Pro vakuové tvarování se používá kopolymer metylmetakrylátu se styrenem. Tento materiál má lepší tahové vlastnosti, proto je vhodnější pro vakuové tvarování než samotný PMMA. Je levnější a vhodný pro složitější tvary výlisků. [1]

## 1.6 Deriváty celulózy

### 1.6.1 Celuloid

Jedná se o houževnatou pevnou hmotu, libovolně barvitelnou, a vhodnou pro vakuové tvarování. Kvůli velké hořlavosti a snadné zápalnosti se tento materiál moc nepoužívá. [1]

### 1.6.2 Acetát celulózy

Materiál s podobnými vlastnostmi jako má celuloid, není hořlavý, ale má horší mechanické vlastnosti. Pro vakuové tvarování se používá tvrdá nebo změkčená diacetátová fólie. Fólie mají velmi kvalitní povrch a dobrou průsvitnost. Na vlastnosti fólie má rozhodující vliv obsah změkčovadel. Jejich vyšší obsah zvyšuje houževnatost, ale snižuje tepelnou odolnost a odolnost proti stárnutí.

Tvarovací teplota je v rozmezí 140 až 150°C, doba ohřevu je totožná jako u fólií z tvrdého PVC. Odolnost proti teplotám je až do 80°C a mrazuvzdornost až do -20°C. [1]

### 1.6.3 Acetobutyrát celulózy

Má podobné vlastnosti jako acetát celulózy, výlisky jsou teplotně odolné až do 70°C. Pro vakuové tvarování se používají fólie a desky o různých tloušťkách, které se vyrábí vytlačováním. Pro vakuové tvarování jsou vhodnější než desky z PVC. [1]

## 1.7 Polykarbonát

V dnešní době se používají pro vakuové tvarování i fólie z polykarbonátu (PC). Mezi výhody tohoto materiálu patří vysoká tepelná odolnost, odolnost proti proražení, nevýhodou je to, že fólie mohou přijímat vlhkost, a nízká odolnost proti rozpouštědlům. Hlavní uplatnění má PC v elektrotechnickém průmyslu a ve výrobě izolačních výlisků.

Nejvhodnější tvarovací teplota je asi 180°C, výlisky jsou po tvarování odolné až do 130°C. Polykarbonátová fólie má krátkou dobu ohřevu, ale úzký interval tvarovací teploty, proto nikdy nedosáhneme 100% ostrost hran na výlisku. [1]



## 2 ZPŮSOBY VAKUOVÉHO TVAROVÁNÍ

Současně s vývojem a se zlepšováním vlastností termoplastických desek a fólií se zdokonalovala i technologie vakuového tvarování. V krátkém čase se poměrně jednoduchá metoda vakuového tvarování rozšířila a zdokonalila natolik, že dnes existuje již několik různých druhů vakuového tvarování, a to:

- negativní tvarování,
- pozitivní tvarování,
- pozitivní tvarování s pneumatickým předtvarováním,
- negativní tvarování s mechanickým předtvarováním,
- negativní tvarování s pneumatickým a mechanickým předtvarováním,
- kombinované pozitivně-negativní tvarování,
- kombinované vakuové a přetlakové tvarování,
- kontinuální tvarování.

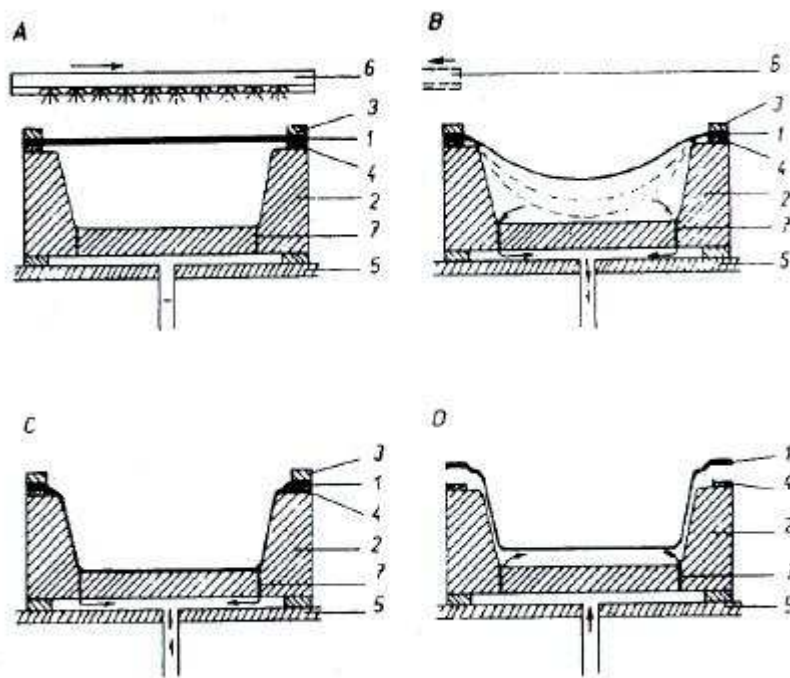
Principy, výhody a nevýhody jednotlivých tvarování jsou popsány níže. [1]

### 2.1 Negativní tvarování

Negativní tvarování je nejjednodušší a vůbec nejstarší metodou vakuového tvarování.

Princip:

Termoplastická desku nebo fólii 1, kterou budeme tvarovat položíme na negativní formu 2 a přitlačíme upínacím rámem 3 na těsnění 4. Formu 2 položíme na pracovní stůl vakuového stroje 5. Nad desku přisuneme ohřívací zařízení 6 a po ohřátí desky na tvarovací teplotu se odsune ohřívací zařízení zpět do výchozí polohy. Vzduch nacházející se mezi deskou a formou odsajeme ihned po ohřátí přes odsávací kanálky 7, čímž se deska vlivem atmosférického tlaku vytvaruje a přisaje na povrch formy. Po vytvarování následuje proces chlazení a vyjmutí vylisku z formy. [1]



Obr. 1A-1D. Postup negativního tvarování

Výhody:

- a. jednoduchá technika tvarování a jednoduché zařízení vakuového stroje,
- b. ostrost obrysů a hran na vnější straně výlisku.

Nevýhody:

- a. tloušťka stěn se snižuje s rostoucí hloubkou výlisku, rohy a spodní hrany jsou tenčí z důvodu přílišného vytažení desky,
- b. způsob není vhodný pro hlubší výlisky, hloubka nemá přesahovat 40% šířky nebo průměru výlisku.

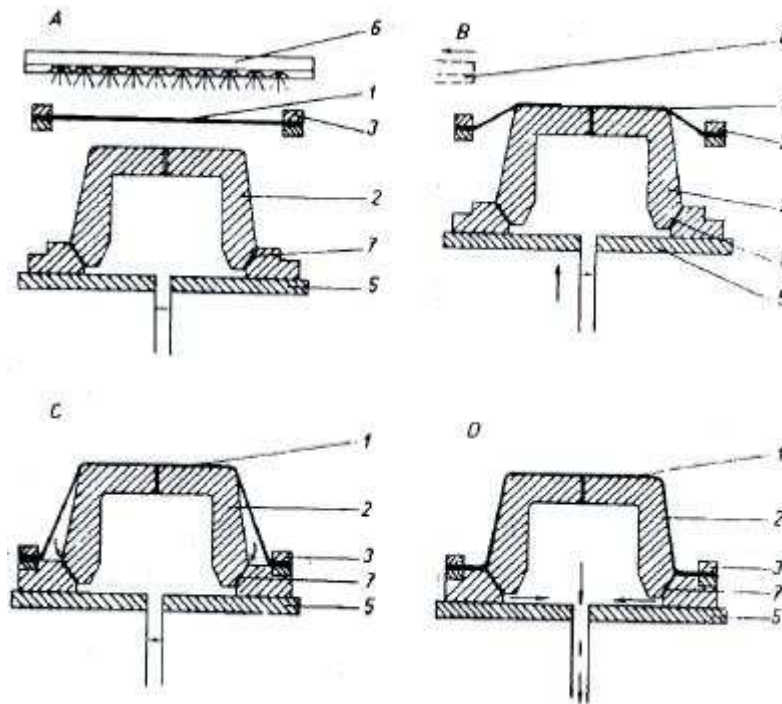
Negativním způsobem se vyrábí plynké výlisky s konickými bočními stěnami, kde se ztenčování stěn může jen málo projevit. Je vhodný pro tvarování nejrůznějších druhů obalů, krytů, kufrů podobně. [1]

## 2.2 Pozitivní tvarování

Pozitivní tvarování je často používaným způsobem vakuového tvarování, zejména pro svoji jednoduchost a praktičnost. Spolu s negativním tvarováním tvoří základní způsoby vakuového tvarování.

Princip:

Termoplastická deska *1* upevněná v upínacím rámu *3* se ohřeje na tvarovací teplotu. Po ohřátí desky se odsune ohřívací zařízení *6* a pozitivní, neboli vypuklá forma se vtlačí do ohřáté desky, a to buď pneumaticky nebo hydraulicky. Nárazem na upínací rám *3* se vzduchotěsně uzavře. Hned po tomto napnutí ohřáté desky se přes odsávací kanálky *7* odsaje vzduch, přičemž se deska působením vakua přesně dotvaruje podle formy. Poté následuje ochlazení a vyjmutí vylisku z formy. [1]



Obr. 2A- 2D. Postup pozitivního tvarování

Způsoby dotlačení ohřáté desky jsou dva:

- a. ohřátá deska se pohybuje směrem nahoru a dolů, čímž se vtlačí do formy,
- b. forma se pohybuje nahoru a dolů, čímž se vtlačí do ohřáté desky.

Výhody:

- a. můžeme získat hlubší výlisky než při negativním tvarování a materiál bude rovnoměrněji rozložený, proto budou stěny výlisku téměř stejně tlusté,

Nevýhody:

- a. není možné vyrobit výlisky se stejnou tloušťkou ani výlisky o větší hloubce,
- b. vzniká nebezpečí vytváření tzv. záhybů v rozích, zejména při tvarování kostkových tvarů,
- c. při malém zešikmění stěn se výrobek velmi těžko stahuje z formy.

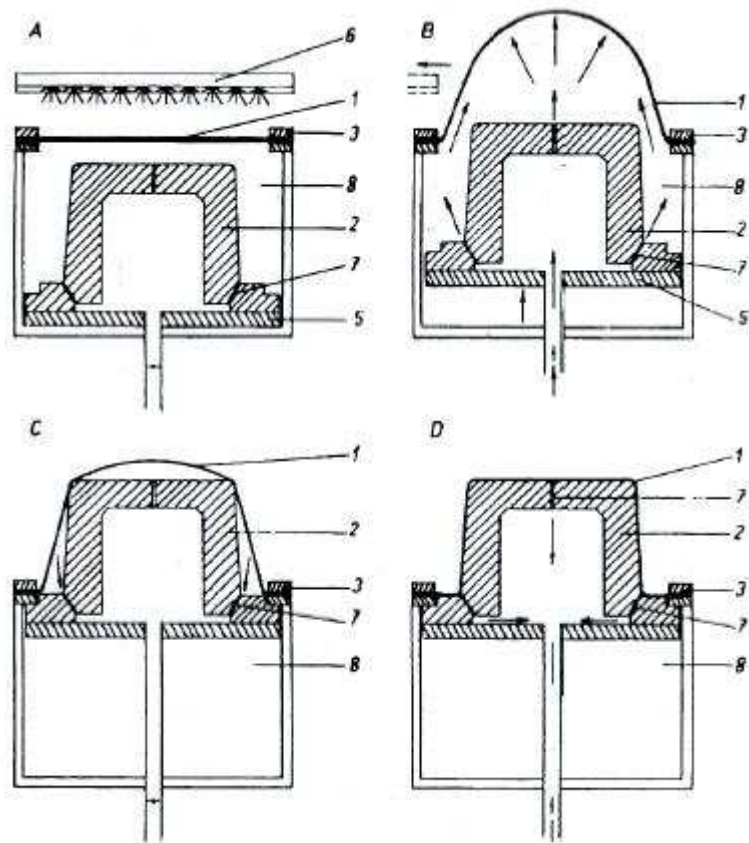
Pozitivním tvarováním se vyrábí výlisky střední hloubky se zešikmenými stěnami, které musí mít pevnou spodní plochu. Dále výlisky, při kterých se požaduje odolnost spodních hran proti nárazům, ale taky výlisky, které jsou velmi členěné. [1]

### 2.3 Pozitivní tvarování s pneumatickým předtvarováním

Jedná se o rozšíření pozitivního tvarování, a to tak, že tvarovaná fólie či deska je před samotným tvarováním předběžně napnuta pomocí tlaku vzduchu.

Princip:

Pozitivní forma 2 je umístěná pod termoplastickou deskou 1 v tvarovací skříni 8. S deskou 1 upnutou v upínacím rámu 3 se prostor skříni vzduchotěsně uzavře. Po ohřátí desky 1 na tvarovací teplotu a odsunutí ohřívacího zařízení 6 se do tvarovací skříni 8 přivede stlačený vzduch. Přesně dávkovaný vzduch roztáhne desku 1 směrem nahoru. Pozitivní forma se ihned nazdvihne nahoru a vytvoří doplňující předtvarování desky na vnějších okrajových plochách. Poté se hned vytvoří vakuum, díky kterému dosedne tvarovaná deska na formu a tím se vytvoří tvar požadovaného výrobku. Další postup je stejný jako při pozitivním tvarování. [1]



Obr. 3A-3D. Postup pozitivního tvarování s pneumatickým předtvarováním

Výhody:

- a. tímto způsobem je možné vytvářet hluboké výlisky, jejichž hloubka může být až dvojnásobkem šířky (průměru) výlisku, přičemž tloušťky stěn jsou rovnoměrné po celé ploše
- b. při tomto způsobu můžeme dosáhnout různé tloušťky u výlisku, a to tak, že pomocí nerovnoměrného ohřevu desky je možné regulovat pneumatické předtvarování.

Nevýhody:

- a. dražší výrobní zařízení,
- b. je potřeba odborná obsluha, případně odborné nastavení celého tvarovacího cyklu.

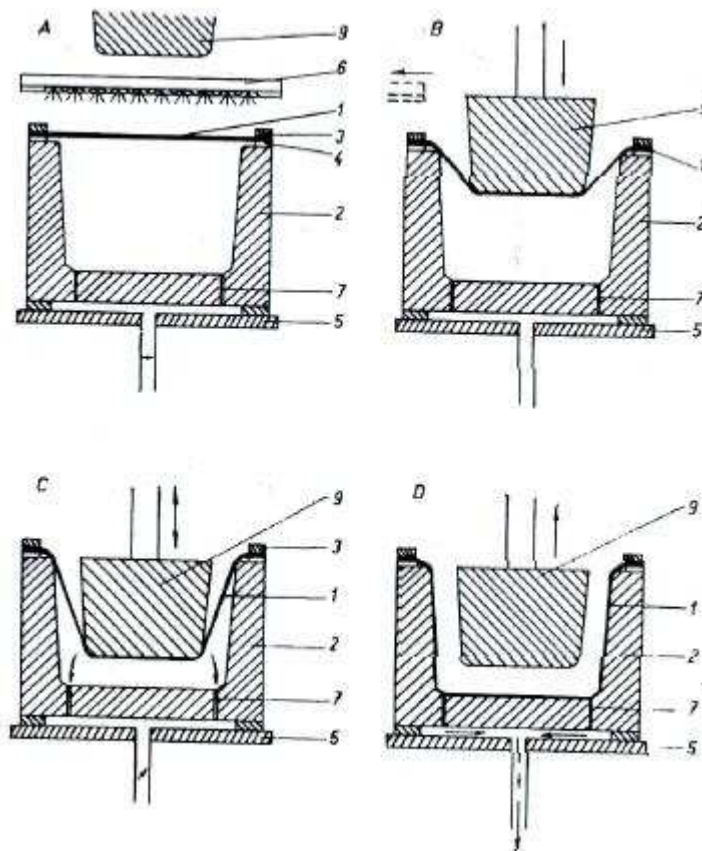
Pomocí pozitivního tvarování s pneumatickým předtvarováním je možné vyrobit hluboké výlisky, které mají téměř kolmé boční stěny a rovnoměrnou tloušťku stěn. [1]

## 2.4 Negativní tvarování s mechanickým předtvarováním

V případě, že chceme použít negativní tvarování, a hloubka je větší než 40% šířky nebo průměru výlisku, můžeme použít mechanické předtvarování. Předtvarovací zařízení je složeno z pístu a kovové desky na které je připevněný předtvárník. Hlavní úlohou předtvárníku je stlačit do negativní formy dostatečné množství termoplastického materiálu na vytváření hlouběji položených ploch tak, aby tloušťka stěny byla co nejrovnoměrnější.

### Princip

Termoplastická deska *1* vzduchotěsně upnutá v upínacím rámu *3* na negativní formě *2* se ohřeje na tvarovací teplotu. Po odsunutí tvarovacího zařízení *6* předtvárník *9* ihned postupuje dolů do a vtlačí se do ohřáté desky *1* čímž ji mechanicky roztáhne. Jakmile předtvárník dosáhne mezní polohy, okamžitě se vytvoří vakuum, čímž dojde k natvarování desky na formu. Předtvárník se vrátí zpět do své výchozí polohy, dojde k ochlazení výlisku a k jeho vyjmutí z formy. [1]



Obr. 4A-4D. Negativní tvarování s mechanickým předtvarováním

Předtvárník by měl mít tyto vlastnosti:

- a. musí mít hladký povrch aby mohl po něm ohřátý termoplastický materiál lehce klouzat,
- b. musí mít určité rozměry, asi 70% z průměru negativní formy,
- c. hloubka ponoru předtvárníku má být asi 70% hloubky tvarovaného výlisku,
- d. má být vyroben z tepelně izolačního materiálu, nebo musí být ohřátý na teplotu při které je deska tvarovaná,
- e. jeho dráha a rychlost musí být správně nastavená.

Mechanické předtvarování se doporučuje všude tam, kde je potřeba vytvarovat výlisky střední nebo velké hloubky bez ohledu na to, zda jde o výlisky malé či velké, a taky tam, [kde se z určitých důvodů požaduje negativní tvarování. Pomocí tohoto způsobu vyrábí výlisky s velkou plochou a hloubkou a tloušťkou stěn 6 až 10 mm.

Negativní tvarování je vhodné i pro hromadné tvarování použitím vícenásobné formy a vícenásobného předtvárníku. Jedná se o často používaný způsob vakuového tvarování.

Výhody:

- a. při správném postupu se získají výlisky s rovnoměrnou tloušťkou stěn, s velkou plochou s velmi tlustými ale i velmi tenkými stěnami.

Nevýhody:

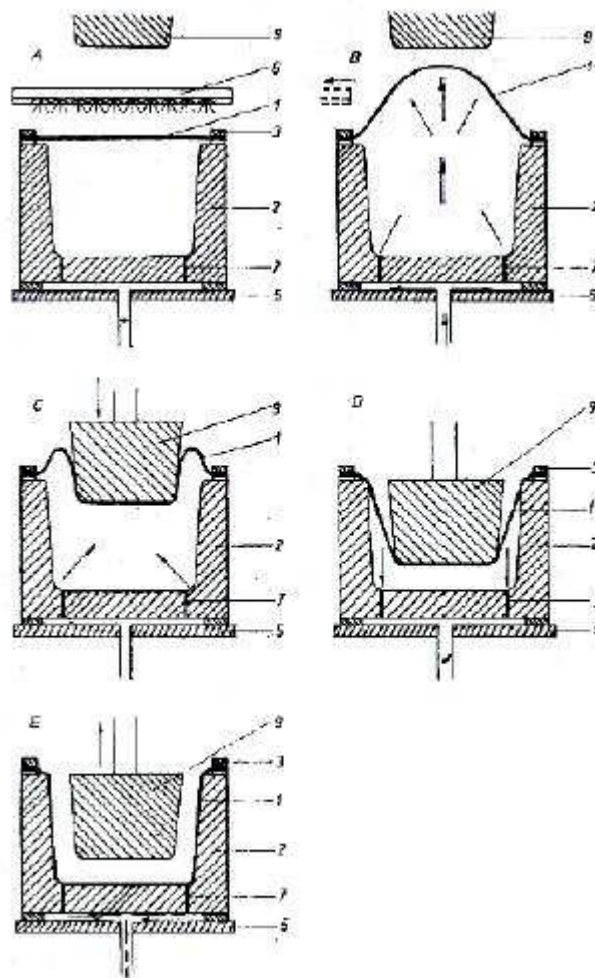
- a. dražší výrobní zařízení protože vakuový stroj musí mít předtvarovací zařízení,
- b. je potřeba kvalifikované obsluhy, nebo odborného nastavení celého varovacího procesu. [1]

## 2.5 Negativní tvarování s mechanickým a pneumatickým předtvarováním

Jestliže potřebujeme tvarovat výlisky větší hloubky než je dvojnásobek šířky (průměru), můžeme použít negativní tvarování s pneumatickým a mechanickým předtvarováním.

Princip:

Princip tvarování je podobný negativnímu tvarování s mechanickým předtvarováním. Po ohřátí desky na tvarovací teplotu se nejdříve přes odsávací kanálky 7 do negativní formy 2 přivede tlak vzduchu. Vzduch musí být přesně odměřený a musí být ohřátý na teplotu jakou má tvarovaná deska roztáhne ohřátou desku směrem nahoru. Po tomto roztáhnutí se ihned uvede do pohybu předtvárník 9 směrem dolů. Další postup je stejný jako u negativního tvarování s mechanickým předtvarováním. Celá operace musí být řízena automaticky. [1]



Obr. 5A-5E. Postup negativního tvarování s mechanickým a pneumatickým předtvarováním



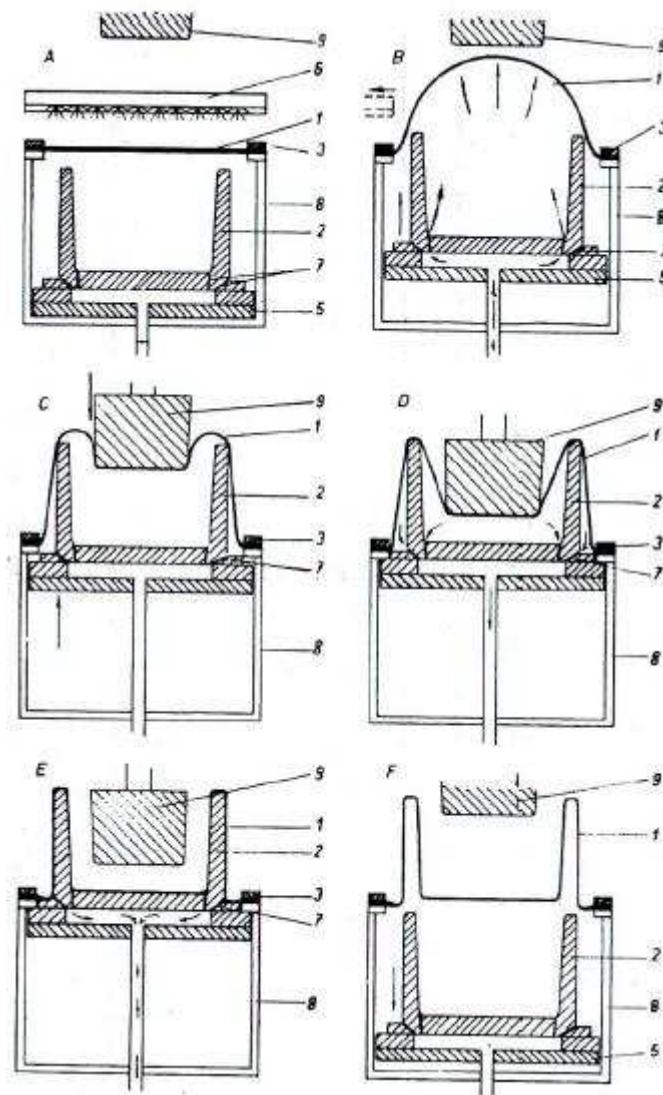
## 2.6 Kombinované pozitivně-negativní tvarování

Tento způsob tvarování je vhodný pro složitější výlisky, které mají jak vyhloubeniny tak i vypuklé části.

Princip:

Do ohřáté desky se nejprve směrem dolů vtlačí předtvárník, poté se forma dosune směrem nahoru a vakuovým tahem se deska dotvaruje. V závislosti na tvaru výlisku může být postup i opačný, nebo se může předtvárník i forma pohybovat současně. Výlisky s dvojitými stěnami je možné tvarovat pozitivně-negativní metodou tvarování s pneumatickým a mechanickým předtvarováním.

Ohřátá a upnutá deska 1 se nejprve roztáhne směrem nahoru pomocí teplého vzduchu, který se zavede do tvarovací skříně 8, ve které je umístěna pozitivně-negativní forma 2. Poté se začne forma pohybovat směrem nahoru a jakmile dosáhne konce zdvihu, začne se směrem dolů pohybovat předtvárník 9. Po tomto předtvarování se pomocí vakua dotvaruje deska do tvaru výlisku. Předtvárník se vrátí do své původní polohy a po ochlazení se zruší vakuum a poté dojde k vyjmutí výlisku z formy pomocí stlačeného vzduchu. [1]



Obr. 6A-6F. Kombinované pozitivně- negativní tvarování

Z důvodu složitosti technologie je potřeba mít kvalifikovanou obsluhu, automatické řízení výroby a přesnost a dokonalé sladění všech úkonů. Největším problémem je velké napínání desky, proto je potřeba pro výlisek o tloušťce 1,5mm mít polotovar o tloušťce 6 až 7 mm.

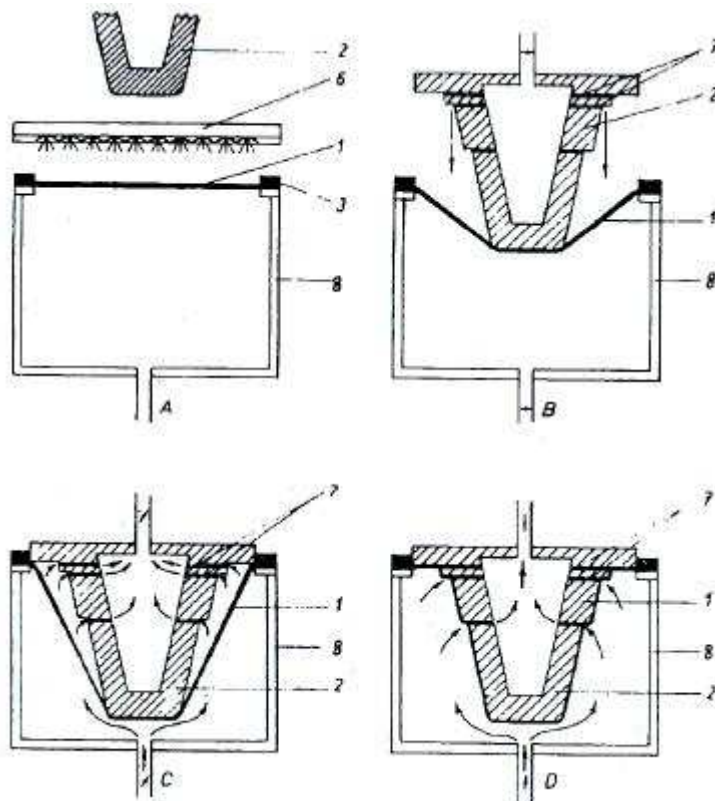
Výlisky s dvojitými stěnami jsou dosud vrcholem techniky vakuového tvarování.

## 2.7 Kombinované vakuové a přetlakové tvarování

Pro výrob malých, ale tlustostěnných výlisků nepostačuje síla vakua. Je potřeba zvolit metodu kombinace působení sil vakua a tlaku. V tomto případě má předtvárník tvar vyráběného předmětu a slouží jako forma. [1]

Princip:

Tvarovaná deska 1 se položí na prázdnou tvarovací skříň 8 a upínacím rámem 3 se k ní vzduchotěsně přitlačí. Po odsunutí ohřívaného zařízení 6 se forma 2 posune dolů do ohřáté desky a mechanicky se roztáhne. Jakmile forma dosáhne konce své dráhy ihned se začne odsávat vzduch přes odsávací kanálky 7. Současně s odsáváním vzduchu se přivádí stlačený vzduch do tvarovací skříň 8. Za působení těchto dvou sil (podtlaku a přetlaku) dojde k dotvarování a přilnutí výlisku k formě. Výrobní cyklus je zakončen ochlazením výlisku, zrušením tlaku a vakua a stáhnutím výlisku z formy. V případě potřeby je možné desku pneumaticky předtvarovat.



Obr. 7A-7D. Kombinované vakuové a přetlakové tvarování

Tlustostěnné výlisky se vyrábí pro jejich pevnost nebo pro jejich estetický vzhled. Tímto způsobem lze tvarovat předměty, které nemají velké plochy, ale tlusté stěny, a taky výlisky se složitějším tvarem. [1]

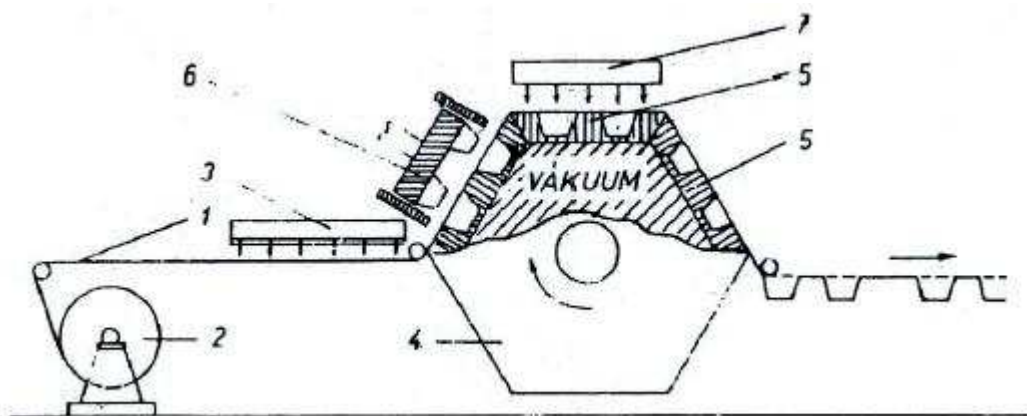
## 2.8 Kontinuální tvarování

### 2.8.1 Diskontinuální proces

Chceme-li tvarovat termoplastické desky, musí se nejprve nařezat na určité rozměry dané upínacím rámem a poté se teprve mohou tvarovat. Při tvarování fólií můžeme použít metodu, kdy se materiál přímo odvíjí z kotouče. Potřebný kus fólie se odvine z kotouče a upne se do upínacího rámu. Po proběhnutí tvarovacího cyklu se fólie posune a postup se opakuje. [1]

### 2.8.2 Kontinuální proces

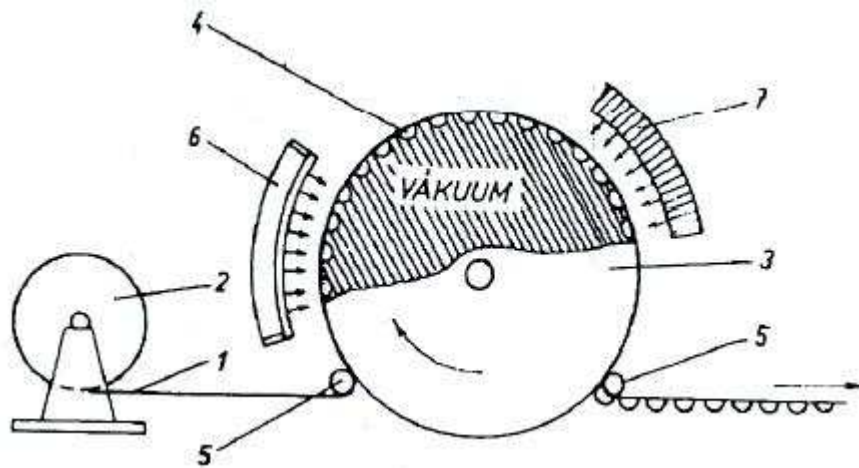
Fólie 1 se odvíjí z kotouče 2 a dopravuje se pod ohřivací zařízení 3, které je umístěno před bubnem 4. Na obvodě tohoto bubnu je umístěno 6 vícenásobných forem. Po ohřátí fólie se buben otočí o 1/6 svého obvodu, přičemž se ohřátá fólie upínacím systémem vzduchotěsně přitlačí a vícenásobnou formu 5. Po mechanickém předtvarování pomocí vícenásobného předtvárníku 6 se fólie dotvaruje vakuovým tahem a předtvárník se vrátí zpět do své výchozí polohy. Buben se opět otočí o 1/6 svého obvodu, čímž se další část ohřáté fólie posune ad další vícenásobnou formu. V okamžiku kdy se tvaruje fólie, již vytvarovaná fólie se chladí studeným vzduchem 7. Dalším otočením bubnu se zruší vakuum a vytvarovaná fólie se oddělí od vícenásobné formy a postupuje k ořezávacímu zařízení, kde se výlisky ořezou a zbytek fólie se navíjí na druhý kotouč. Kontinuální způsob tvarování je vhodný pro velké série. [1]



Obr. 8 Kontinuální tvarování

### 2.8.3 Plně kontinuální rotační způsob

Dalším pokrokem je vývoj plně kontinuálního rotačního způsobu vakuového tvarování. Princip spočívá v tom, že vedeme fólii 1 z kotouče 2 na vakuový válec 3. Po celém obvodu jsou umístěny vícenásobné formy 4. Jako zásobník vakua nám slouží vnitřek válce. Fólie je přes váleček 5 napínána na válec, kde dochází k ohřevu folie a následnému vakuovému natvarování podle formy. Po vytvarování dochází k chlazení studeným vzduchem a k oddělení výlisků z fólie.



Obr. 9 Princip plně kontinuálního rotačního způsobu tvarování

Výhody:

- a. Není potřeba upínací zařízení, protože se fólie přisává pomocí vakua.
- b. Fólie se může na válec přivádět přímo z vtačovacího lisu nebo kalandru, přičemž se využije teplota kterou fólie má.
- c. Pracovní proces je velmi rychlý.

Kontinuální vakuové tvarování slouží především k výrobě menších obalů ve velmi velkých sériích.

Přehled metod vakuového tvarování ukazuje nakolik se metoda postupně zdokonalovala a vyvíjela. Pro daný výrobek můžeme vybírat z několika technologií, a to na základě technologických a ekonomických požadavků. [1]

### 3 STROJE A NÁSTROJE PRO VAKUOVÉ TVAROVÁNÍ

Zároveň s rozvojem samotné technologie vakuového tvarování se vyvíjely nové a lepší stroje na vakuové tvarování. Z původně jednoduchého ručního stroje se postupně vyvíjely stroje poloautomatické, až se postupně vyvinuly stroje plně automatické. V dnešní době existuje již několik různých typů a velikostí vakuových strojů. Univerzální vakuový stroj však neexistuje.

Stroj na vakuové tvarování se skládá z několika hlavních částí:

- a. ohřívací zařízení,
- b. pracovní plocha a upínací rám,
- c. vakuový systém,
- d. hydraulický a pneumatický systém. [1]

#### 3.1 Ohřívací zařízení

Dosavadní zkušenosti dokazují, že ohřívací zařízení je velmi důležitou součástí vakuového stroje s proto je velmi důležité věnovat mu velkou pozornost. Od kvality ohřívacího zařízení se odvíjí kvalita a kapacita strojů a také kvalita výlisků.

Termoplastické desky se výhradně ohřívají pomocí sálavého tepla, jejímž zdrojem můžou být otevřené nebo zakryté elektrické odporové tělesa, infražárovky nebo keramické infrazářiče.

Infračervené záření se doposud osvědčilo jako nejlepší, nejspolehlivější a nejúčinnější způsob ohřívání. Nemá žádné viditelné světelné efekty, jeho teplota je od 700 do 1000°C. Vyzařované teplo působí bez ohledu na barvu a povrchovou úpravu ohřívajícího materiálu. Jako zdroj tepla se osvědčili keramické zářiče, protože jsou trvanlivější a lépe akumulují teplo. Větší počet těchto zářičů vytváří ohřívací panel, který je uložen v krytu a jako celek tvoří ohřívací zařízení. [1]

Od ohřívacího zařízení se požaduje:

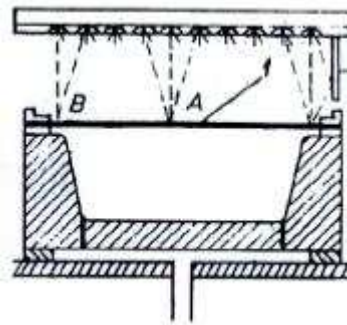
- a. rovnoměrný ohřev desky po celé ploše,
- b. možnost změny intenzity ohřevu v určitých pásmech,
- c. možnost přizpůsobení výkonu ohřevu pro různé materiály a tloušťky desek,

d. plošné rozměry zařízení mají být větší než rozměr ohřívané desky.

Výkon ohřívacího zařízení je různý, u většiny strojů je asi  $P = 15 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ .

V těch strojích, kde není možnost regulovat výkon ohřevu se výkon reguluje pomocí změny vzdálenosti ohřívacího panelu od termoplastické desky, v praxi má toto řešení však několik nedostatků.

Při ohřevu desky *l* na tvarovací teplotu dochází k tomu, že bod A získává více tepelné energie než bod B. Je to způsobeno odvodem tepla v okrajových částech do upínacího rámu.



Obr. 10 Ohřev termoplastické desky

Tento problém lze vyřešit přidáním zrcadel do okrajových částí ohřívacího zařízení. Jako zrcadla používáme čisté lesklé hliníkové plechy. Tímto se zvětší plocha ohřívacího zařízení a dojde ke zrovnomenění poměru mezi okrajovými a středními pásmy ohřívané desky.

Některé typy strojů mají na okrajích ohřívacího zařízení umístěny výkonnější zářiče, případně ve středních pásmech slabší zářiče. Ohřívací zařízení musí být v rámci stroje pohyblivá, a to ručně nebo mechanicky, a jejich pohyb je kolem svislé osy nebo rovnoběžně. [1]

### 3.1.1 Regulovatelný ohřev podle pásem

Ideálním způsobem řešení rozložení zářičů je šachovnicový systém. Jednotlivé zářiče je možno vypínat či zapínat, ale taky samostatně regulovat.

Výhody:

- možnost nastavit teplotu podle potřeby pro každé pásmo desky,
- hospodárný ohřev desek.

Nevýhody:

- vyšší náklady na stroj, především na ohřívací zařízení. [1]

### 3.1.2 Dvojstranný ohřev

Tento způsob používáme tehdy, chceme-li zvýšit kapacitu stroje snížením doby ohřívání, zejména tlustších termoplastických desek.

Způsoby řešení dvojstranného ohřevu:

1. Deska se neohřívá nad formou ale posune se v upínacím rámu mezi dvě naproti sobě postavené ohřívací zařízení. Po ohřátí na tvarovací teplotu se deska posune nad formu a tvaruje se.
2. Dvojstranný ohřev je polohovatelný, a přisune se nad a pod upnutou desku a po dosažení tvarovací teploty se ohřev odsune.

Výhody:

- snížení potřebné doby na ohřev materiálu o víc než 50%,
- výhodné pro ohřev tlustších desek,
- vzdálenost mezi ohřívacími zařízeními a deskou lze libovolně upravovat.

Nevýhody:

- u tlustších desek vzniká prohýbání desky (odstranění pomocí oporného vzduchu).

[1]

## 3.2 Pracovní plocha a upínací rám

### 3.2.1 Pracovní plocha

Pracovní plochou rozumíme prostor, kam se umísťuje forma. Tato plocha je stabilní, nebo svisle pohyblivá. Stroje s pohyblivou pracovní plochou jsou z hlediska různých způsobů vakuového tvarování výhodnější. Pohyb pracovní desky se řídí pneumaticky nebo hydraulicky. Rozměr pracovní plochy určuje velikost stroje.



### 3.2.2 Upínací rám

Upínací rám se ve většině případů skládá ze spodního a horního rámu. Na upínací rám jsou kladeny následující požadavky:

- a. jednoduchá, pevná konstrukce pro tenké fólie i tlusté desky,
- b. šířka rámu má být co nejnižší, aby procento odpadu bylo co nejnižší,
- c. musí mít dostatečný upínací tlak, aby upnutá deska byla dobře upevněná a nevy-smykla se během tvarování,
- d. mají být lehce vyměnitelné, případně rozměrově stavitelné.

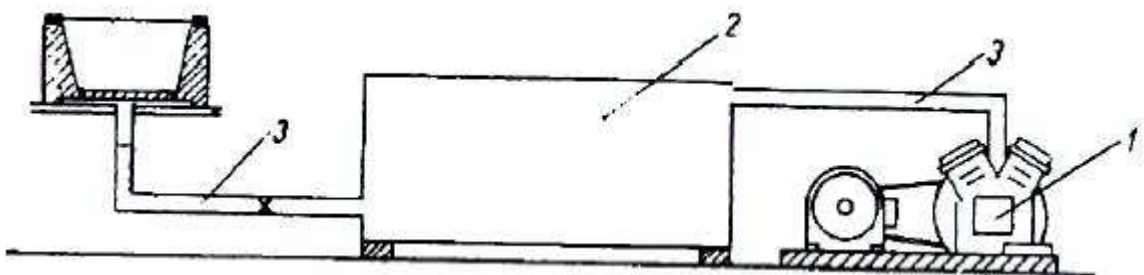
U malých nebo starších strojů je řešeno upínání ručně, u větších a moderních strojů zajišťu-je upínání hydraulický nebo pneumatický systém.

### 3.3 Vakuový systém

Při vakuovém tvarování je potřeba vzduch, který je pod ohřívanou deskou nebo fólií odsát, aby vznikl podtlak. Z rozdílů tlaků nad a pod ohřívanou deskou se vytvoří tvarovací síla zhruba  $9,5 \text{ N.cm}^{-2}$ . Jestliže atmosférický tlak je přibližně  $10 \text{ N.cm}^{-2}$  můžeme při absolutním vakuu počítat s tvarovací silou  $10 \text{ N.cm}^{-2}$ . V praxi používáme tzv. technické vakuum, které má hodnotu přibližně  $9,5 \text{ N.cm}^{-2}$ , protože k vytvoření absolutního vakua by bylo zapotřebí drahých výkonných vývěv.

Na kapacitě vakuového systému závisí vysávací výkon a spolehlivost stroje pro danou vý-rodu a pro daný objem výlisků.

Složení vakuového systému:



Obr. 11 Princip vakuového systému

1. vakuová pumpa,
2. vakuový zásobník,
3. vakuové potrubí s ventily.

Zdrojem vakua jsou pumpy různých typů a velikostí. Kapacitu vakuové pumpy je potřeba dimenzovat na požadovanou rychlost tvarování a objem vylisku. Aby výkon vakuové pumpy nemusel být zbytečně velký, zařazuje se mezi formu a pumpu vzduchotěsná nádrž- zásobník vakua. Stroje bez zásobníku vakua se používají pro tvarování malých vylisků z tenkých fólií. Kapacita těchto strojů je velmi omezená.

Po vytvarování vylisku trvá určitý čas, než vakuová pumpa opět vysaje vzduch ze zásobníku a dosáhne opět vakua.

Velikost stroje omezuje použití velkého zásobníku vakua, proto se někdy zásobníky umísťují samostatně. Všeobecně totiž platí, že zásobník má být kolikrát větší než je objem vysátého vzduchu, aby tvarovací tlak byl co největší.

Pro rychlé odsátí vzduchu z prostoru formy by ventily a potrubí mít co největší světlost. V některých případech je potřeba regulovat rychlost odsávaného vzduchu. [1]

### 3.4 Pneumatický a hydraulický systém

Většina strojů na vakuové tvarování má mít zařízení na stlačený vzduch. Tlak vzduchu postačuje 0,5 – 0,6 MPa. Některé stroje mají chod téměř plně pneumatický, kdy pohyby vykonávají pneumatické písty ovládané z centrálního ovládacího panelu.

Pneumatický systém může vykonávat tyto úkony:

1. Uzavírat upínací rámy, případně dávkovat fólii.
2. Posouvat a odsouvat ohřívací zařízení.
3. Pohybovat pracovní plochou nahoru a zpět.
4. Pohybovat zařízením na mechanické předtvarování.
5. Pneumaticky předtvarovat ohřáté desky.
6. Chladit vytvarovaný vylisek.
7. Pomáhat při vyjmutí vylisku z formy.

8. Uzavírat a otvírat ochranné kryty, mříže apod.

Pohyb pracovní lochy s formou i upínání rámů je u některých strojů řešeno hydraulicky. [1]

### 3.5 Formy pro vakuové tvarování

Forma je důležitou částí výrobního zařízení k vakuovému tvarování. Podle typu tvarování rozlišujeme formy:

- a. negativní,
- b. pozitivní.

Formy pro vakuové tvarování mají několik výhod.

1. Formy jsou pouze jednodílné, jako druhý díl slouží atmosférický tlak.
2. Formy jsou poměrně málo namáhané, proto mohou být vyrobeny z materiálů menší pevnosti.

Tyto výhody však neznamenají že bychom konstrukci forem neměli věnovat velkou pozornost, protože na kvalitě vylisku záleží kvalita formy. I ten nejdokonalejší vakuový stroj nevyrobí kvalitní vylisek, jestliže nepoužijeme kvalitní formu. Mnoho problémů, které nás doprovází při tvarování souvisí s kvalitou formy. O způsobu volby technologie tvarování rozhoduje finální tvar vylisku, který dává tvar formě. [1]

Materiálů na výrobu forem [1] se používá několik, např.:

- dřevo,
- sádra,
- cement,
- epoxidové živice,
- lamináty,
- slitiny lehkých kovů,
- nástrojová ocel.

Volba materiálu, ze kterého bude forma závisí na více faktorech:

- a. na množství vylisků, které budeme vyrábět,

- b. na finančních možnostech, které máme k výrobě formy,
- c. na čase, který máme k výrobě formy,
- d. na požadovaném povrchu formy,
- e. na geometrickém tvaru a složitosti formy,
- f. na požadavcích na rozměrovou stálost formy,
- g. na tepelné vodivosti materiálu a technice chlazení,
- h. na druhu termoplastického materiálu, který budeme ve formě tvarovat.

### 3.5.1 Sádrové formy

Sádrové formy jsou vhodné především pro menší série, případně pro výrobu vzorových výlisků. Životnost formy lze o něco prodloužit tím, že se její povrch opatří nátěrem melaminové nebo epoxidové živice.

Výhody sádrových forem:

- nízká pořizovací cena,
- možnost mít formu bez odsávacích kanálků díky pórovitosti sádry,
- rychlost výroby formy.

Nevýhody sádrových forem:

- sádra je křehký materiál, proto je potřeba na tento fakt dávat pozor,
- velké formy by měly být zpevněny armováním dráty, případně pletivem nebo tyčemi,
- je vhodnější pro větší zaoblení, ne pro ostré hrany.

Před použitím formy je potřeba, aby forma byla dokonale proschlá, doba schnutí až 7 dní podle velikosti formy a podle podílu vody v sádře. Vhodnou sádrrou pro výrobu forem je alabastrová nebo modelářská sádra. [1]

### 3.5.2 Dřevěné formy

Dřevěné formy jsou vhodné pro série přibližně 500 výlisků. Jedná se o materiál hojně používaný na výrobu forem. Životnost dřevěné formy závisí na několika faktorech, například

na tvaru výlisků a na druhu termoplastického materiálu. Při tvarování PVC nám může dřevěná forma vydržet až 3000 výlisků, kdežto při tvarování např. PP nebo PE, které mají velmi vysokou tvarovací teplotu, vydrží forma maximálně 50 výlisků.

Povrch formy musí být jemně obroušen, aby se do termoplastického materiálu neotiskovaly vlákna dřeva.

Pro výrobu forem ze dřeva se používá několik druhů dřeva:

1. javor,
2. bříza,
3. mahagon,
4. olše.

Výhody dřevěných forem:

- nízká pořizovací cena,
- nerozbitnost dřevěných forem při běžném zacházení,
- velmi dobrá opracovatelnost.

Nevýhody dřevěných forem:

- malá rozměrová stálost při vyšší vlhkosti,
- nízká odolnost proti vysokým teplotám,
- nutnost tmelit praskliny ve formě,
- použití jen starého a dobře vysušeného dřeva.

Pro zvýšení odolnosti povrchu formy jej můžeme stejně jako u sádrových forem opatřit nátěrem laku, nebo živic. Tím dojde nejen ke zpevnění povrchu, ale taky ke zvýšení teplotní odolnosti. [1]

### 3.5.3 Cementové formy

Cement je málo používaným materiálem, především pro svoji vyšší hmotnost. Proto se používá pouze u menších forem. Nevýhodou je nemožnost vyhlazení povrchu formy, proto se používá tam, kde nemusíme dbát na kvalitní povrch. Další nedostatky jsou obdobné jako

při použití sádry. Největší výhodou cementu je jeho velmi nízká pořizovací cena, nižší než u sádry. [1]

#### 3.5.4 Formy z epoxidových živic

Epoxidové živice se v posledních letech osvědčily jako výborný materiál pro výrobu forem pro vakuové tvarování. Tepelně stálé jsou asi do 80°C, je možné na těchto formách vytvářet více než 100 000 vylisků.

Výhody:

- jednoduchá výroba a jednoduchost oprav,
- rozměrová stálost,
- dobrá pevnost,
- odolnost proti stárnutí,
- poměrně nízké náklady na zhotovení.

Nevýhody:

- vysoká citlivost na vysoké teploty,
- nízká tepelná vodivost.

Pro zvýšení tepelné vodivosti je vhodné přidávat do živice plniva, například železný nebo hliníkový prach. V tomto případě musíme dbát na dokonalé promísení a na odstranění vzduchových bublin. Tato směs se má odlévat z malé výšky, aby se nevytvářely ve formě další vzduchové bubliny.

Model sloužící k odlití formy musí mít dokonale hladký povrch.

Při odlévání formy můžeme přidat tenké ohnuté trubky, které mohou sloužit k odvodu tepla při tvarování. [1]

#### 3.5.5 Formy vyrobené z vrstvených materiálů

Formy vyrobené z těchto materiálů mají všechny již uvedené přednosti. Jsou velmi trvanlivé, pevné a nejsou citlivé na vysoké teploty. Jsou rozměrově stálé. V některých případech je jejich použití vhodnější než kovové formy. Tyto formy jsou vhodné pro výrobu velmi vysokého počtu vylisků. Nevýhodou je vyšší cena při složitějších tvarech.

Postup výroby formy z vrstvených materiálů[1]:

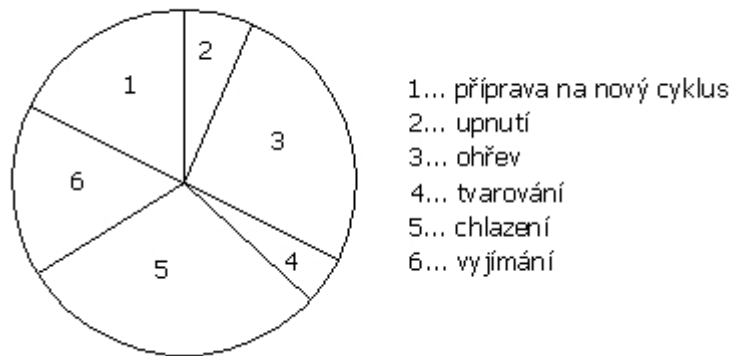
1. Vytvoření modelu z modelářské hlíny podle výkresové dokumentace.
2. Hliněný model se natře separátorem a ručně se na něj klade střídavě sklotextil a živice.
3. Po vytvrdnutí se forma sejme z modelu, její okraje se ořežou, vnitřek se vyčistí od separátoru a vybrousí. Na větší nerovnosti se použije tmel.
4. Nanese se povrch čisté živice.
5. Po zatvrdnutí pryskyřice se povrch vybrousí a vyleští pomocí leštící pasty.

Podobným způsobem můžeme upravit povrch sádrové, cementové nebo dřevěné formy.

### **3.5.6 Kovové formy**

Pro obrovské série je vhodné používat formy vyrobené z hliníku nebo slitin lehkých kovů. Výhodou použití kovových forem je jejich tepelná vodivost, která umožňuje temperaci formy během tvarování a tím dosažení požadované teploty tvarování. Mezi nevýhody patří dlouhá doba výroby a tím i vyšší výrobní cena. Kovové formy se mohou vyrábět třískovým obráběním, případě odléváním. Moderním způsobem je elektroerozivní obrábění. Některé druhy forem se mohou galvanizovat, čímž se sníží doba a náklady na výrobu.

## 4 TECHNOLOGIE VAKUOVÉHO TVAROVÁNÍ



Obr. 12 Schéma cyklu vakuového tvarování

### 4.1 Příprava fólií a desek

Termoplastické desky a fólie by se měly skladovat v suchých prostorech s teplotou  $t = 18$  až  $28^{\circ}\text{C}$ . Je-li teplota nižší, desky mohou křehnout a praskat. Taky mohou absorbovat do sebe vlhkost, což může zapříčinit problémy při samotném procesu tvarování. V některých případech můžeme desky před tvarováním vysušet.

Desky nebo fólie připravujeme před tvarováním na požadovaný rozměr na stříhacím zařízení. V případě že máme desky větších tloušťek, používáme okružní nebo pásovou pilu. Aby nedocházelo při dělení materiálu k praskání, doporučuje se materiál nahřát na teplotu asi  $20$  až  $25^{\circ}\text{C}$ .

Před samotným tvarováním by desky měli být alespoň 24 hodin v místnosti, kde probíhá tvarování, aby se desky aklimatizovaly. [1]

### 4.2 Upevnění formy a kontrola vakuového stroje

Zhotovená forma musí být pevně uchycena na stůl vakuového stroje. Pod formu se dává gumové těsnění z důvodu vzduchotěsnosti. Způsob uložení na stůl závisí na typu formy a stroje a taky na způsobu tvarování.

Před tvarováním se provádí kontrola vakuového stroje:



1. Vyzkoušení ohřívacího zařízení (nastavení výkonu ohřevu, vzdálenosti ohřívacího panelu od desky).
2. Kontrola vakuového systému.
3. Nastavení vhodného chlazení vylisků a jejich vyjímání z formy. [1]

### 4.3 Teplota formy a její význam

Při tvarování může docházet k tvarování vylisků nerovnoměrných tloušťek, a to tím, že se ohřátá deska při tvarování dostane do kontaktu se studeným povrchem formy. Tím se sníží teplota desky a tak i její tvarovatelnost. Proto je vhodné ohřívat i formu.

Na formy pro menší počet vylisků používáme materiály s nižší tepelnou vodivostí, a to z důvodu toho, že forma odebírá pomalu teplo z desky ale taky se pomalu ohřívá na vyšší teplotu.

Pro větší série vylisků používáme materiály s vyšší tepelnou vodivostí. Tyto se rychleji ohřívají a rychleji odvádí teplo. Je potřeba mít instalované chladicí zařízení.

Při větších sériích je vhodné, aby se teplota formy udržovala na konstantní teplotě. K tomu slouží regulační zařízení, které teplotu formy buď zvyšují, případně formu chladí, vzroste-li teplota. Správná teplota formy by měla být asi 45 až 110 °C, v závislosti na tvarovaném materiálu. [1]

Druh materiálu	Nejvhodnější teplota tvarování [ t ]	Nejvhodnější teplota formy [ t ]
Tvrký PVC	100 až 130 °C	45 až 50 °C
Polystyren	110 až 135 °C	60 až 75 °C
n-Polyethylen	120 až 140 °C	75 až 80 °C
v-Polyethylen	110 až 140 °C	50 až 75 °C
Polypropylen	150 až 170 °C	50 až 80 °C
Polymethylmetakrylát	120 až 150 °C	60 až 80 °C
Acetát celulózy	130 až 150 °C	70 až 80 °C
Polykarbonát	175 až 180 °C	90 až 110 °C

Tab. 1 Vhodná teplota formy pro různé druhy materiálů

#### 4.4 Ohřev na tvarovací teplotu

Z ekonomických důvodů by bylo nejvhodnější, kdyby ohřev desky nebo fólie byl co nejkratší, avšak krátké doby ohřevu jsou obtížně regulovatelné. I při ohřevu nejtenčích desek a fólií má být nastaven ohřev na minimálně  $\tau = 4$  s.

Při ohřevu tlustších desek nemá být výkon ohřívacího zařízení příliš vysoký. Kdybychom ohřívali s velmi vysokou teplotou, docházelo by k přehřátí povrchových vrstev desky, a vrstvy ve spodních částech by byli nedokonale prohřáté.

V případě že chceme zkrátit dobu ohřevu, můžeme použít dvojstranný ohřev.

Na dobu ohřívání má vliv několik parametrů. Například výkon ohřívacího zařízení, vzdálenost ohřívacího panelu od desky, tloušťka desky apod. Parametry různých strojů se liší. Proto nemusí údaje získané na jednom stroji platit i na jiných zařízeních. [1]

Druh materiálu	Tvarovací teplota [°C]	Tloušťka fólie [mm]	Doba ohřívání [s]
Tvrký PVC(emulzní)	100 až 125	0,4	18
VC-VAC	90 až 130	0,4	17
Polystyren	110 až 135	0,4	15
Polyethylen	120 až 140	0,4	40
Polypropylen	150 až 170	0,4	31
Acetát celulózy	130 až 150	0,4	19
Polykarbonát	175 až 180	0,2	12

Tab. 2 Doby ohřevu různých materiálů na tvarovací teplotu

Materiál	Tloušťka desky	Doba ohřívání [ $\tau$ ]	
		Jednostranný ohřev	Dvojstranný ohřev
PVC	0,3 mm	10 s	4 s
Polystyren	1 mm	60 s	25 s
Polystyren	5 mm	240 s	95 s
Polypropylen	6 mm	14 min	5,4 min

Tab. 3 Srovnání délky ohřevu jedno a dvojstranného ohřevu

#### 4.5 Teplota vzduchu a jeho dávkování při pneumatickém předtvarování

To, zda-li má být stlačený vzduch při pneumatickém předtvarování ohřátý či nikoliv, závisí na mnoha faktorech. Zejména na tvaru výlisku, na druhu a tloušťce termoplastické desky nebo fólie kterou tvarujeme. Plýtké výlisky můžeme tvarovat i pomocí neohřátého vzduchu. Vzduch, který přivádíme bez ohřevu, může mít teplotu až  $t = 50^{\circ}\text{C}$ , a to vlivem průchodu přes odsávací kanálky ohřáté formy.

Při použití ohřátého vzduchu musíme brát v úvahu tvarovací teplotu desky, a proto by měl být vzduch ohřátý přibližně na tuto teplotu, tzn.  $t = 100$  až  $180^{\circ}\text{C}$ , v závislosti na druhu materiálu.

Pro tvarování tenkých fólií je ohřátý vzduch potřeba, protože tyto rychle ztrácejí tvarovací teplotu, protože jsou tenké.

Velmi důležité je taky dávkování stlačeného vzduchu. Dávkování různého množství stlačeného vzduchu má vliv na rozdělení tloušťky stěn výlisku.

- Použijeme-li malé množství vzduchu, získáme výlisek se silnější vrchní částí, ale boční stěny budou tenké.
- Správně odměřené množství vzduchu zaručí rovnoměrné rozdělení tloušťky stěny.
- Použitím velkého množství stlačeného vzduchu se tvarovaná deska hodně roztáhne, a proto se nevytváří dostatečně ve všech místech formy. Vznikají nežádoucí záhyby. [1]

## 4.6 Předtvárník

Při mechanickém předtvarování termoplastické desky je potřeba mít ve vakuovém stroji předtvarovací zařízení. To se skládá z pístu a desky, na kterém je připevněn předtvárník. Jeho hlavním úkolem je stlačit dovnitř formy dostatečné množství materiálu k vytvarování hlouběji položených míst tak, aby tloušťka výlisku po celé jeho ploše byla co nejrovnoměrnější.

Vlastnosti předtvárníku:

- hladký povrch, aby materiál lehce klouzal po jeho povrchu,
  - má být vyrobený z tepelně izolačního materiálu, nebo má být udržován na tvarovací teplotě,
  - jeho velikost má být asi 0,7 násobek rozměrů formy,
  - musí mít správně nastavenou dráhu a rychlost pohybu,
  - jen v hrubých obrysech má znázorňovat výlisek,
  - nemusí být dimenzovaný na velké síly, ke stlačení ohřáté desky je potřeba malá síla.
- [1]

## 4.7 Rychlost tvarování

Rychlost tvarování je stejně důležitá jako tvarovací teplota. Vyšší rychlost tvarování nám dává větší možnosti tvarování.

Při pomalém tvarování se část fólie, která již dosedla na povrch formy ochladí, a tím se sníží její tvarovací schopnosti. Ostatní pásma desky se natahují více, čímž dojde k velkému ztenčení desky.

Při vyšší rychlosti se ohřátá deska nemůže natolik ochladit aby ztratila tvarovací schopnosti, a proto se soustavně natahuje, a tím získáme rovnoměrnější rozložení tloušťky stěny po celé ploše výlisku. [1]

## 4.8 Ochlazování a vyjímání výlisků z formy

Při vakuovém tvarování můžeme vyjmout výlisek až tehdy, poklesne-li jeho teplota pod dolní hranici teploty zatvrdnutí. V případě, že výlisek vyjmeme dříve, může měnit libovolně svůj tvar.

Jestliže používáme kovové formy, výlisek bude chladnout rychleji díky tepelným vlastnostem kovu. Abychom snížili dobu chladnutí, můžeme použít stlačený studený vzduch. Rychlost chlazení je závislá na tloušťce stěn výlisku a na intenzitě chlazení. V sériové výrobě je nutné mít dobu chlazení co nejkratší, avšak některé materiálu nepovolují svými vlastnostmi rychlé ochlazení z důvodu vzniku pnutí.

Při ochlazování se výrobek smršťuje, což má vliv na vyjímání výlisku z formy. Výlisky tvarované v negativní formě se vyjímají jednodušeji, kdežto výlisky tvarované v pozitivní formě se vyjímají složitěji.

K ulehčení vyjímání výlisku se používá stlačený vzduch, který se přivádí přes odsávací kanálky mezi formu a výlisek. [1]

## 4.9 Oddělování vytvarovaných výlisků

### 4.9.1 Stříhání na stolních nůžkách

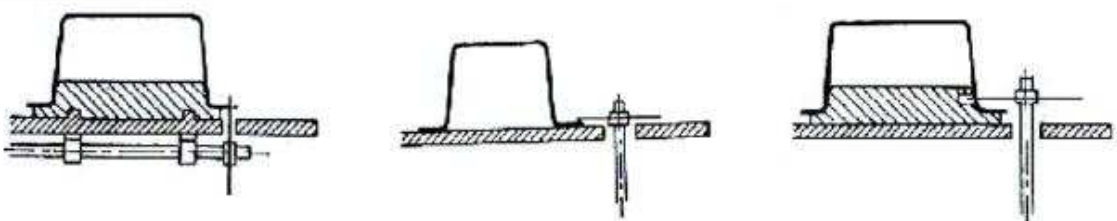
Nejjednodušší způsob ořezávání výlisků. Je vhodný především pro výlisky s rovinnými okraji a pro velkoplošné výlisky. Z důvodu zamezení praskání je vhodné aby byly výlisky ohřáté na teplotu  $t = 30$  až  $40^{\circ}\text{C}$ , případně aby byli nože ohřáté na určitou teplotu. Tím dosáhneme hladký řez. [1]

### 4.9.2 Ořez na okružní nebo pásové pile

Při ořezu okružní nebo pásovou pilou platí tato pravidla:

1. Pilové listy mají mít jemné zuby s negativním úhlem řezu a rozstupem 2 až 3 mm.

2. Tloušťka pilového listu má být pro okružní pilu 2 až 3 mm, pro pásovou pilu 0,6 až 1 mm.
3. Rozchod zubů má být stejný nebo větší než při řezání dřeva.
4. Pilové listy mají být z rychlořezné oceli a kvalitně ostřené. [1]



Obr. 13 Způsoby ořezání výlisku okružní pilou

#### 4.9.3 Frézování na horní fréze

Tento způsob je vhodný zejména pro výlisky s větší tloušťkou stěny. Používají se frézy s otáčkami 6 000 až 18 000  $\text{min}^{-1}$ . Zuby mají být co nejjemnější, aby nedocházelo k vyštipování materiálu. [1]

#### 4.9.4 Vyseknutí pomocí patrice a matrice

Tento způsob je známý ze zpracování plechu. Tolerance mezi patricí a maticí má být maximálně 0,4 mm v závislosti na tloušťce desky. Na patrici bývá většinou zařízení, které si samo upraví výlisek do střední polohy. Patrice bývá většinou vyrobena z měkkého materiálu aby se netupilo ořezávací zařízení. Patrice i matrice mohou být i ve vícenásobném provedení a můžeme tak vysekávat více výlisků najednou. [1]

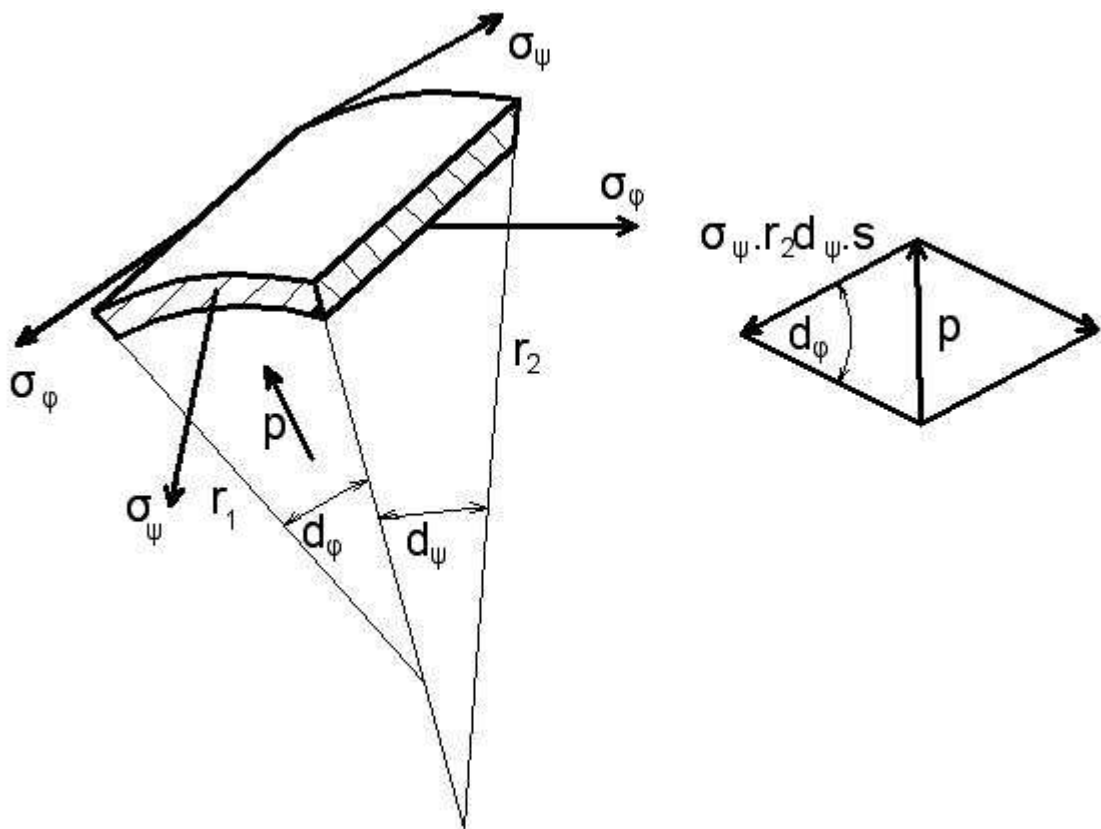
#### 4.9.5 Ořezávání pomocí CNC frézky

V moderní době se nejčastěji používá ořezávání na CNC frézce. Výlisek se upevní do rámu stroje a posléze se spustí program pro daný výlisek. Výhodou je rychlost opracování, možnost ořezávání mnoha výlisků pouze výměnou programu. Nevýhodou je však vyšší cena zařízení a nutnost školení pracovníků na tvorbu programu pro ořez. [1]

## 5 VÝPOČTOVÉ VZTAHY V TECHNOLOGII VAKUOVÉHO TVAROVÁNÍ

### 5.1 Výpočet tloušťky stěny tvarovaných výrobků

Jestliže desce zabezpečíme dostatečný tvarovací rozsah, a za předpokladu isotropního materiálu, při přetlakovém nebo podtlakovém tvarování desky nebo fólie, lze je považovat za membrány. Silové poměry viz Obr. 14. [2]



Obr. 14 Napětí na membráně

Rovnice rovnováhy sil po úpravě:

$$\frac{\sigma_{\varphi}}{r_1} + \frac{\sigma_{\psi}}{r_2} = \frac{p}{s} \quad (1)$$

kde  $\sigma_{\varphi}, \sigma_{\psi}$  jsou normálová napětí v uvažovaném místě [Pa],

$r_1, r_2$  poloměry křivosti v uvažovaném místě [m],

$p$  vnější tlak [Pa],

$s$  tloušťka membrány [m].

Mezními případy jsou plocha kulová, kde  $r_1=r_2$ :

$$\frac{\sigma_\varphi}{r_1} = \frac{p}{2s} \quad (2)$$

a plocha válcová, kde jeden z poloměrů roste donekonečna:

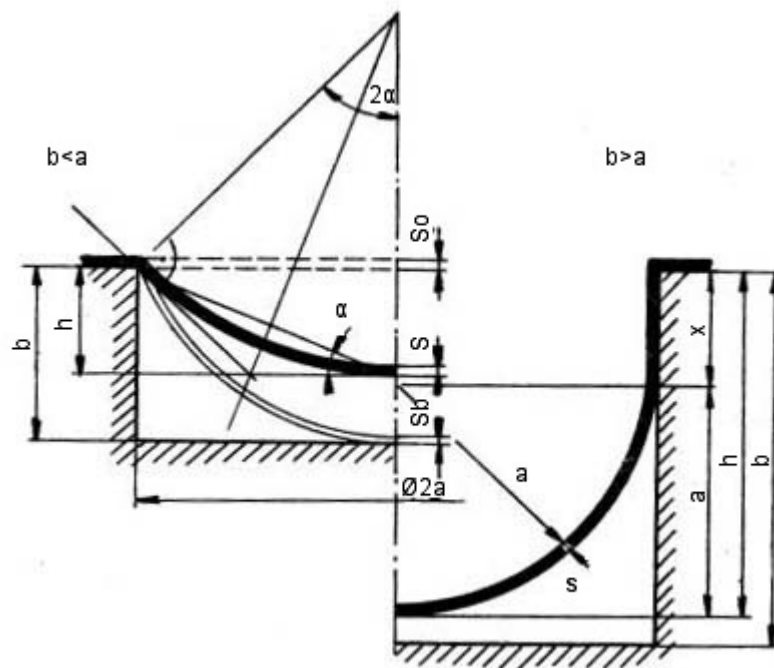
$$\frac{\sigma_\varphi}{r_1} = \frac{p}{s} \quad (3)$$

Ze vztahů tedy vyplývá, že napětí je funkcí poloměru křivosti, tloušťky desky a vnějšího tlaku. Čím bude poloměr křivosti menší, tím větší tlak bude muset působit na desku. Prakticky to znamená, že nelze tvarovat ostrou hranu  $r = 0$ , protože tlak by rostl donekonečna.

[2]

Zanedbáme-li vliv upnutí okrajů a bude-li deska isotropní a dokonale prohřátá, bude hmotnost kulového vrchlíku

$$m = \rho \cdot \pi \cdot a^2 \cdot s \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha} \quad (4)$$



Obr. 15 Tvarování do volného prostoru

Během tvarování se hmotnost vrchlíku nemění, na počátku tvarování tedy bude

$$m = \rho \cdot \pi \cdot a^2 \cdot s_0 \quad (5)$$

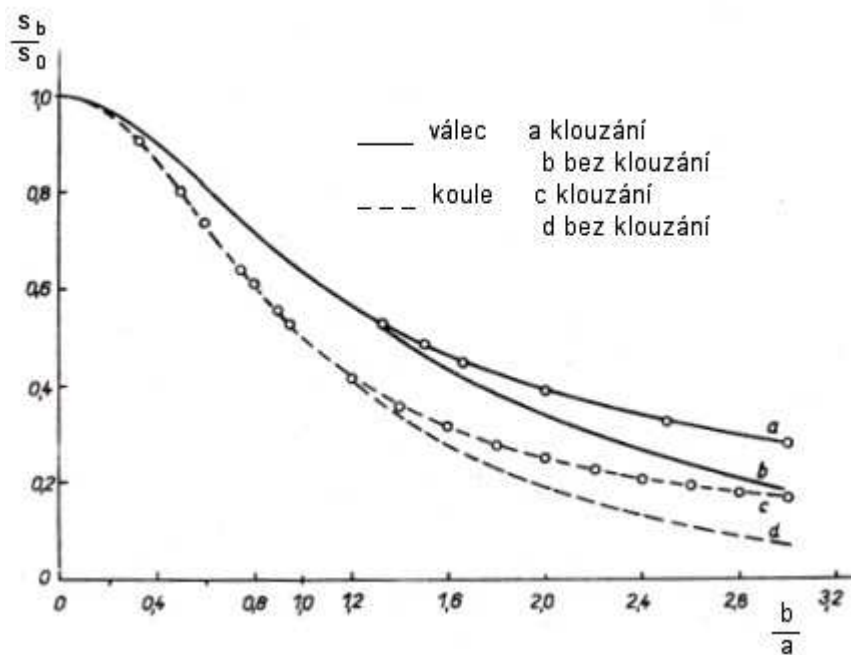


- kde  $m$  je hmotnost kulového vrchlíku [kg],  
 $\rho$  hustota materiálu tvarované desky [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $a$  poloměr zaoblání výlisku [m],  
 $h$  hloubka výlisku [m],  
 $b$  hloubka formy [m],  
 $s, s_b, s_0$  tloušťka stěny výlisku [m].

Dosazením do rovnic a úpravou dostaneme pro  $h = b, (a > b), s = s_b$

$$\frac{s_b}{s_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (6)$$

Bude-li však  $a < b$  může dojít k tomu, že se zablokuje možnost klouzání materiálu po stěně formy, nebo materiál bude volně klouzat.



Obr. 16 Závislost změny tloušťky  $\frac{s_b}{s_0}$  tvarované fólie na poměru  $\frac{b}{a}$

V prvním případě  $s \ll a$  zvětšením hloubky o  $dx$  se blokuje na stěně objem  $2\pi \cdot a \cdot s \cdot dx$  o který se zmenší objem tvarované kulovité části

$$\ln s = -\frac{x}{a} + c \quad (7)$$

pro  $x=0$  bylo stanoveno  $s = s_b = \frac{s_0}{2}$

$$c = \ln \frac{s_0}{2}$$

pro  $h = b$  tedy

$$\frac{s_b}{s_0} = \frac{1}{2} e^{-\frac{b}{a}} \quad (8)$$

Závislost je exponenciální.

V případě klouzání materiálu po stěně  $a < b$  platí po úpravě

$$\frac{s_b}{s_0} = \frac{1}{2^{\frac{b}{a}}} \quad (9)$$

Uvedené vztahy platí pro isotropní materiály, v praxi však některé materiály mohou být anisotropní, což může být způsobeno nerovnoměrným ohřevem, předchozí historií desky apod.

## 5.2 Tepelný tok deskou

Ohřev společně s chlazením jsou nejnáročnějšími operacemi tvarovacího cyklu. Deska se obvykle ohřívá přímo na tvarovacím stroji sálavým teplem. Tepelný tok  $\dot{Q}$ , který zdroj vysílá je

$$\dot{Q} = f_{12} \cdot \varepsilon_{12} \cdot S_{12} \cdot \left[ \left( \frac{T_Z}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_O}{100} \right)^4 \right] \quad (10)$$

kde  $f_{12}$  součinitel ozáření [-],

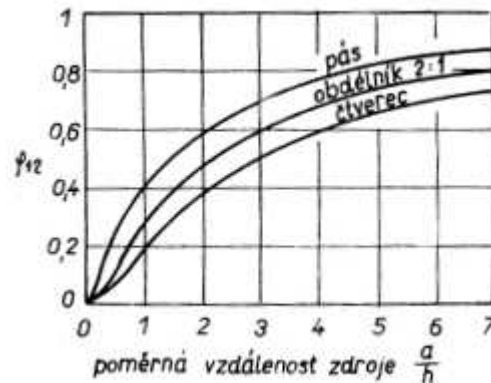
$\varepsilon_{12}$  součinitel pohltivosti a sálavosti, u ohřevu desek bývá 0,8 - 0,9 [-],

$T_Z$  teplota sálavého zdroje, bývá 870 – 920 [K],

$T_O$  teplota povrchu ohřívané desky [K],

$S_{12}$  plocha [m<sup>2</sup>].

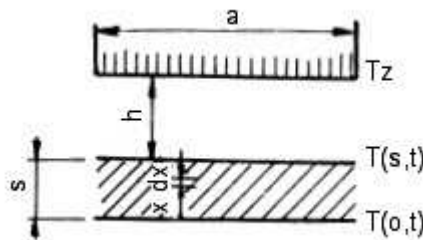
Součinitel ozáření závisí na uspořádání desek vzhledem k sobě, viz Obr. 17.



Obr. 17 Závislost koeficientu ozáření

na poměrné vzdálenosti

Zářiče pracují s poměrným výkonem  $P = 2-3 \text{ W.cm}^{-2}$ . Vzdálenost desky od zářiče bývá  $h = 100 - 200 \text{ mm}$ . Ohříváme-li desku jen z jedné strany, bude teplota na ohřívaném povrchu  $T(s,t)$  a na protějším povrchu bude teplota  $T(o,t)$ .



Obr. 18 Schéma jednostranného ohřevu desky

Základní rovnice tepelného toku deskou bude

$$\frac{\dot{Q}}{S_{12}} = \lambda \cdot \frac{\partial T_{(s,t)}}{\partial x} \quad (11)$$

Současně platí

$$T_{(x,o)} = T_0, \frac{\partial T_{(o,t)}}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

Řešením rovnice je pak

$$T_{(x,t)} - T_0 = \frac{\dot{Q}}{S_{12}} \cdot \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{a \cdot t}{s} - \frac{s_2 - 3x^2}{6s} + s \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{k_i^2} \cos k_i \cdot \frac{x}{s} \cdot e^{-k_i^2 \cdot \frac{a \cdot t}{s^2}} \right] \quad (13)$$

Je potřeba zachovat malé teplotní rozdíly aby se nepříznivě neovlivňovala kvalita tvarovaných výrobků. Při použití oboustranného ohřevu bude ohřev čtyřnásobně kratší. Doba ohřevu

$$\tau_{ohř} = \frac{s^2 \cdot F_0}{a} \quad (14)$$

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této práce je vyhledání nejvhodnějšího rozložení teplotních polí při ohřevu termoplastického materiálu v technologii vakuového tvarování tak, aby tloušťka stěny výsledného vylisku byla po celé ploše co nejrovnoměrnější.

K technologickým experimentům byl použit vakuovací stroj FORMECH 300X, který je k dispozici v laboratoři ÚVI.

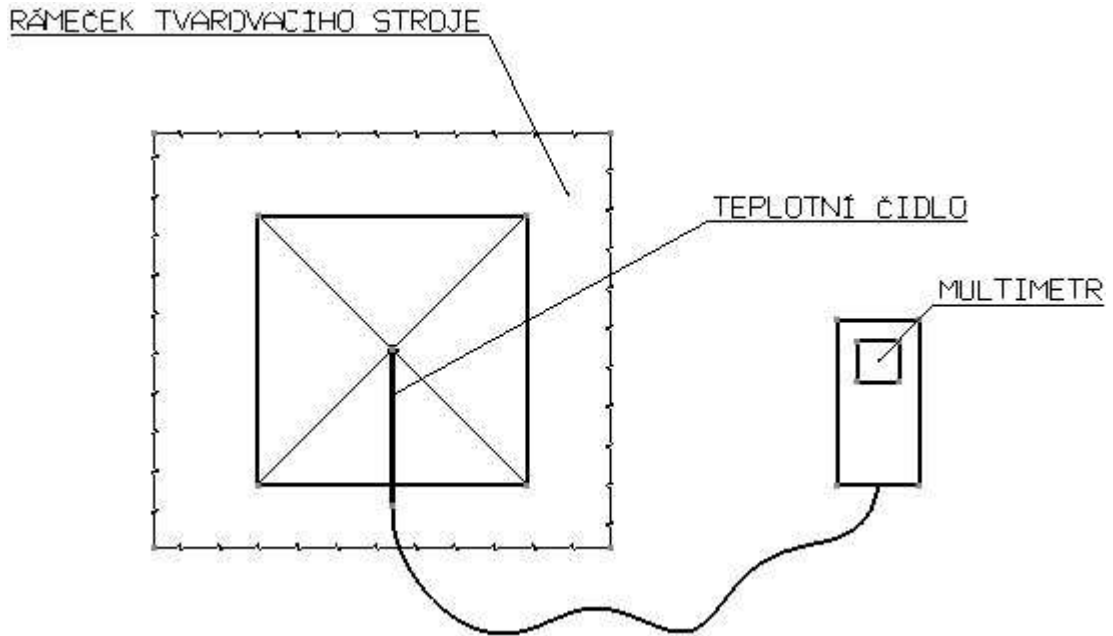
## 7 POPIS VAKUOVÉHO STROJE FORMECH 300X

Jedná se o menší laboratorní ruční stroj, který je vhodný především pro laboratoře a školní výuku.



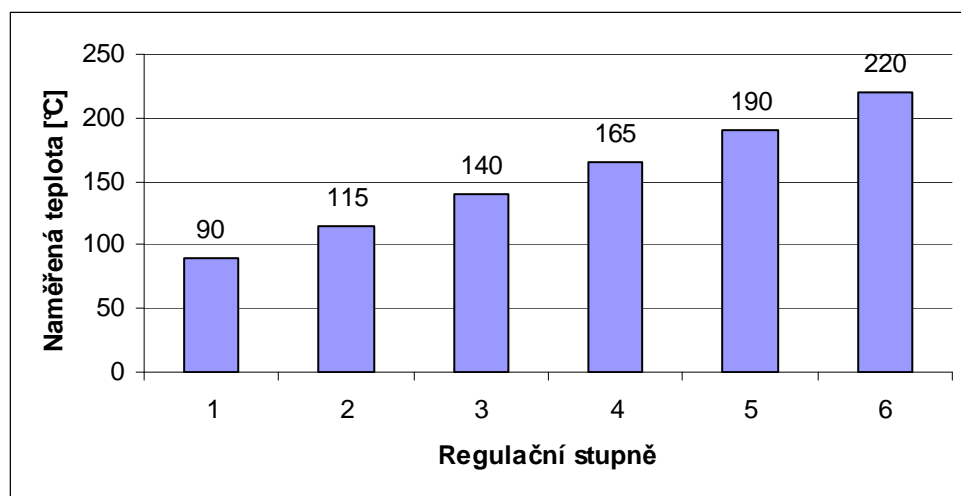
Obr. 19 Vakuovací stroj Formech 300X

Ohřívací zóna je složena ze dvou na sobě nezávisle regulovatelných pásem s infračervenými keramickými zářiči. Pro naše potřeby bylo využito pouze vnitřní pásmo. Regulace teplot pásem je stupňovitá, bez vyznačení teplot, tzn. pouze stupně 1 – 6. Proto bylo nutné provést dle následujícího schématu měření teplot uvnitř rámečku při jednotlivých stupních.



Obr. 20 Schéma měření teploty v rámečku

Po asi dvacetiminutové temperaci každého stupně byla zapsána teplota, závislost byla vynešena do následujícího grafu.



Obr. 21 Teploty regulačních stupňů vakuovacího stroje

Z grafu je patrné, že jeden stupeň na regulaci vakuového stroje odpovídá asi 25°C.

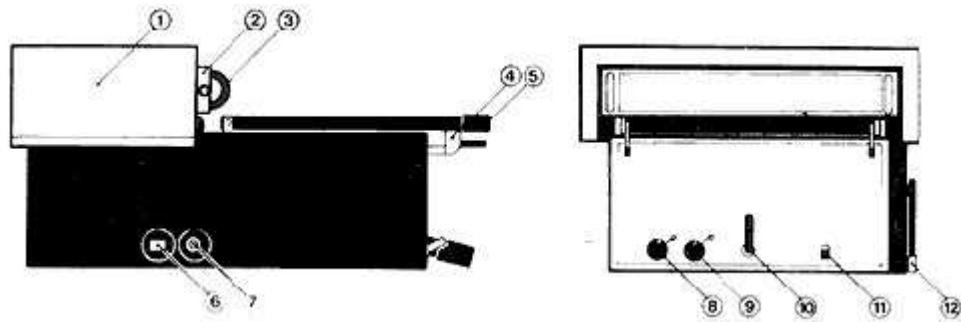
Technická specifikace stroje:

- Rozměr materiálu: 450 x 300 mm
- Tvarovací prostor: 4300 x 280 mm
- Maximální hloubka vytažení: 180 mm



- Maximální tloušťka materiálu: 6 mm
- Rozměry stroje: 610 x 430 x 920 (š x v x h)

Popis stroje:



Obr. 22 Schéma vakuovacího stroje Formech 300X

- 1...bezpečnostní kryt
- 2...posuvný ohřívací panel
- 3...rukojeť ohřívacího panelu
- 4...upínání rámečku
- 5...rukojeť rámečku
- 6...přívod elektrické energie
- 7...vývod tepla z ohřívacího panelu
- 8...regulace vnitřního pásma
- 9...regulace vnějšího pásma
- 10...přepínač mezi podtlakem a přetlakem
- 11...spínač pumpy
- 12...rukojeť pro vytažení modelu

## 8 NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU

Při vakuovém tvarování je nutno dodržovat veškeré předepsané postupy a technologické parametry jako jsou teplota ohřáté desky, čas ohřevu, aby došlo k dokonalému prohřátí desky, dále se musí volit dostatečný čas působení vakua, aby došlo k preciznímu natvarování desky na povrch modelu.

### 8.1 Návrh použitých modelů

Pro vakuové tvarování bylo potřeba vytvořit několik modelů. Jako materiál jsme zvolili tzv. umělé dřevo. Mezi výhody tohoto materiálu patří především jeho cena, mechanické a tepelně-izolační vlastnosti a jeho snadná obrobitelnost.

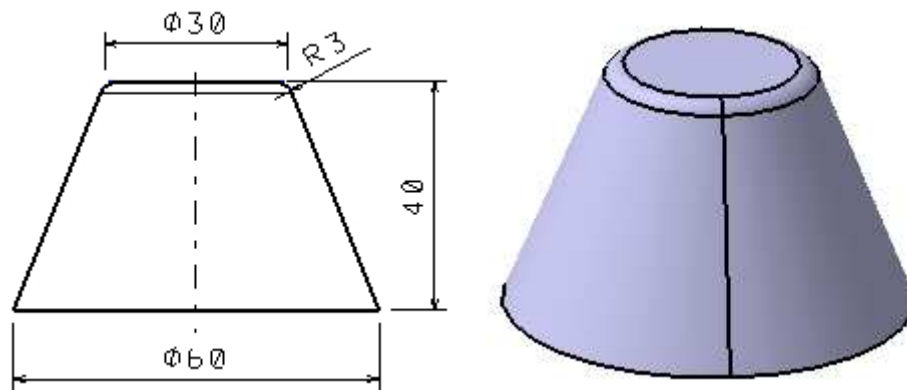
Na základě výkresové dokumentace byly vytvořeny modely v programu Catia V5R17 a posléze byl vytvořen NC kód v programu Surf CAM pro výrobu modelů na 3D CNC frézce v laboratoři ÚVI.

Velikost modelů byla volena vzhledem k velikosti rámečku vakuovacího stroje.

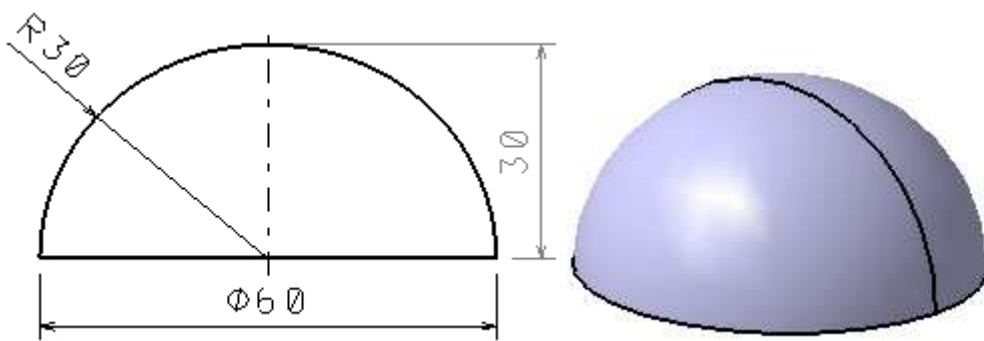
Pro další práci s modely byly tyto označeny písmeny A, B, C, D.



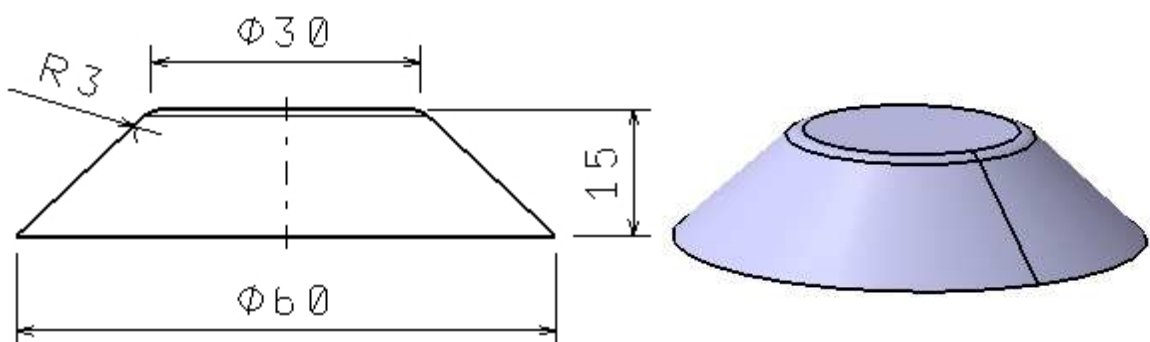
Obr. 23 Výroba modelů na 3D CNC frézce



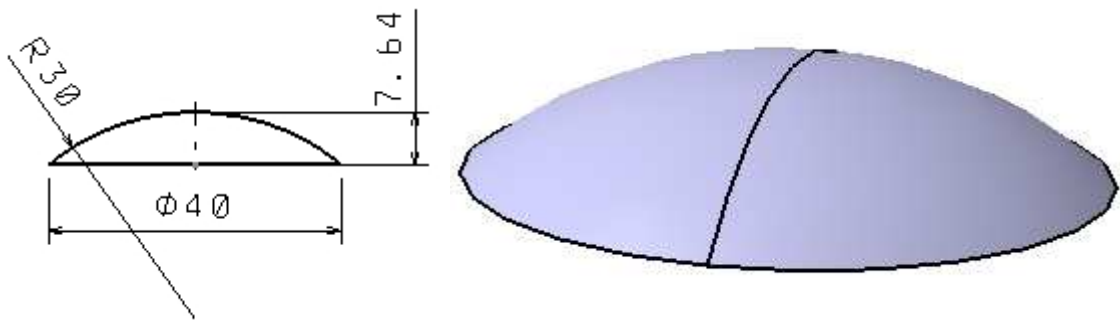
Obr. 24 Rozměry modelu A



Obr. 25 Rozměry modelu B



Obr. 26 Rozměry modelu C

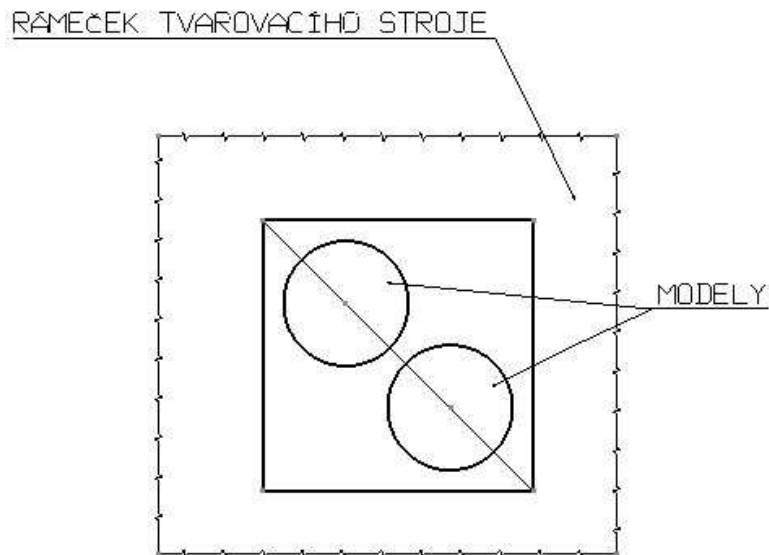


Obr. 27 Rozměry modelu D

## 8.2 Návrh metodiky porovnávání tvarovaných desek

Pro výsledné porovnání vytvarovaných výlisků se naskýtají dvě možnosti jakým způsobem výlisky tvarovat.

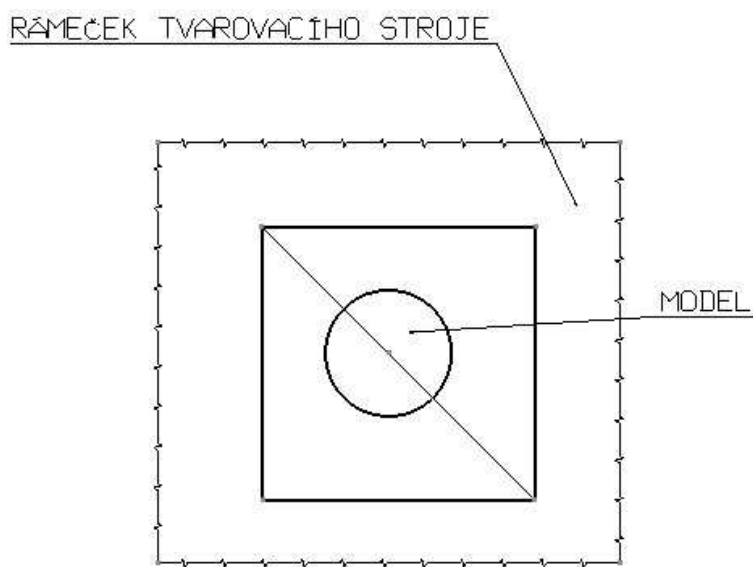
- Dva modely v rámečku, kdy by byli vedle sebe úhlopříčně uloženy dva totožné modely a na ně by se natvarovala deska tak, že jedna část desky by byla stíněná a druhá by byla ohřívána plným ohřevem. Výhodou tohoto způsobu jsou rovnocenné podmínky tvarování, ušetření materiálu a času. Nevýhodou je vznik přeloženin při tvarování, které vznikají v důsledku nedodržení technologických vzdáleností.



Obr. 28 Metoda dvou modelů v rámečku

- Jeden model, uložený uprostřed rámečku, kdy by se zvlášť tvarovaly stíněné výlisky a zvlášť výlisky s plným ohřevem. Výhodou je dokonalé natvarování bez vzniku přeloženin, více možností nastavení stínění pomocí azbestových pásků, nevýhodou

naopak větší spotřeba materiálu a nedosažení rovnoměrných podmínek při tvarování.



Obr. 29 Metoda jednoho modelu v rámečku

Po odzkoušení obou metod byla vybrána metoda pouze jednoho modelu, tzn. metody b, především kvůli značnému vzniku přeloženin u metody a, které vznikají vlivem nedodržení technologických vzdáleností při uložení modelů v rámečku.



Obr. 30 Vznik přeloženin vlivem nedodržení technologických vzdáleností

### 8.3 Podmínky pro tvarování

Naším tvarovaným materiálem je polystyren. Pro tento materiál se doporučuje teplota tvarování 110 až 135°C. Laboratorní stroj nemá přesnou regulaci teploty, proto byl zvolen na základě měření teplot uvnitř rámečku stupeň ohřevu 3, tzn. cca 140°C.

Doba působení vakua je důležitá pro dokonalé natvarování desky na model. U desky s tloušťkou 1 mm byl volen čas přibližně 20 sekund, u desky o tloušťce 2 mm jsme zvolili čas 30 sekund. Posléze se natvarovaná deska ochladila stlačeným vzduchem a byla vydána z rámečku.

Doba ohřevu desek byla stanovena experimentálně ohřevem první desky tak, aby deska měla kožovitý povrch a byla lehce tvarovatelná. Pro desku o tloušťce 1 mm jsme tedy zvolili dobu působení tepelného záření 120 sekund, a v případě silnější desky dvojnásobek, čili 240 sekund.

Nejvhodnějším způsobem simulace teplotních pásem by bylo zařízení, které by nám dovolilo nastavit rozdílnou teplotu v různých pásmech. To je ale na školním stroji nemožné, proto byla nasimulována rozdílná teplotní pole použitím stínění z azbestových pásek. Těmito pásky byla deska nechána zastíněná po část doby ohřevu, a to po dobu 45 sekund v případě 1 mm desky, a v druhém případě po dobu 90 sekund. Tímto zastíněním dojde k rozdílnému ohřevu v různých místech desky, čímž dojde ke změně mechanických vlastností desky v různě ohříváných místech, a tím k výsledným rozdílům při tvarování desky.

Tloušťka desky	Teplota ohřevu	Celková doba ohřevu	Ohřev se stíněním		Doba působení vakua
			Doba působení stínění	Celková doba ohřevu	
1 mm	140°C	120 s	45 s	120 s	20 s
2 mm	140°C	240 s	90 s	240 s	30 s

Tab. 4 Shrnutí podmínek pro tvarování

## 9 VYHODNOCENÍ TECHNOLOGICKÝCH EXPERIMENTŮ

Zhotovené vzorky byly měřeny digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo a následně vyhodnoceno v programu Excel.

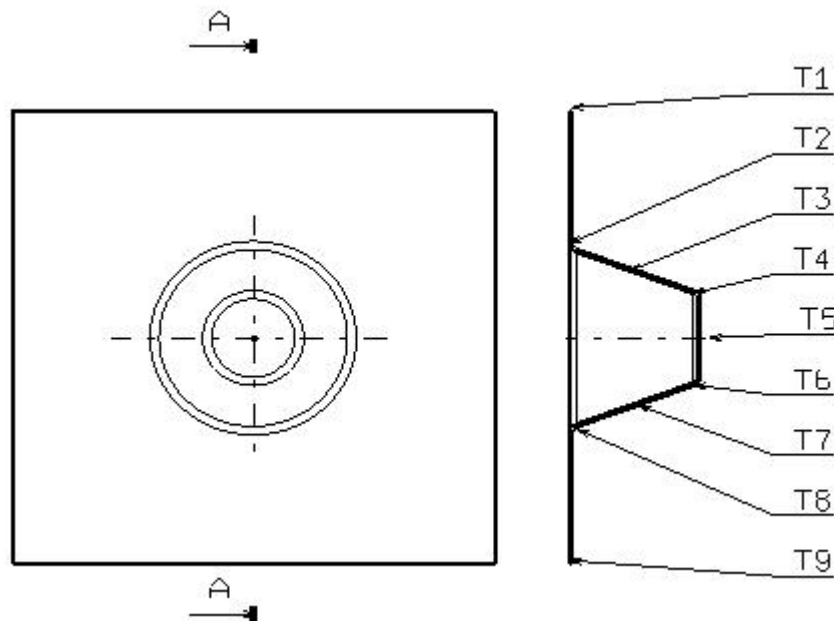
### 9.1 Vyhodnocení změny tloušťky desky

Pro vyhodnocení bylo potřeba vzorky rozřezat dle zobrazených schémat. Vzorek byl měřen v označených místech T1 – T9.

#### 9.1.1 Model A

Jedná se o komolý kužel, rozměry viz Obr. 24.

##### 9.1.1.1 Plný ohřev



Obr. 31 Vyznačení tlouštěk v řezu vylisku A při plném ohřevu

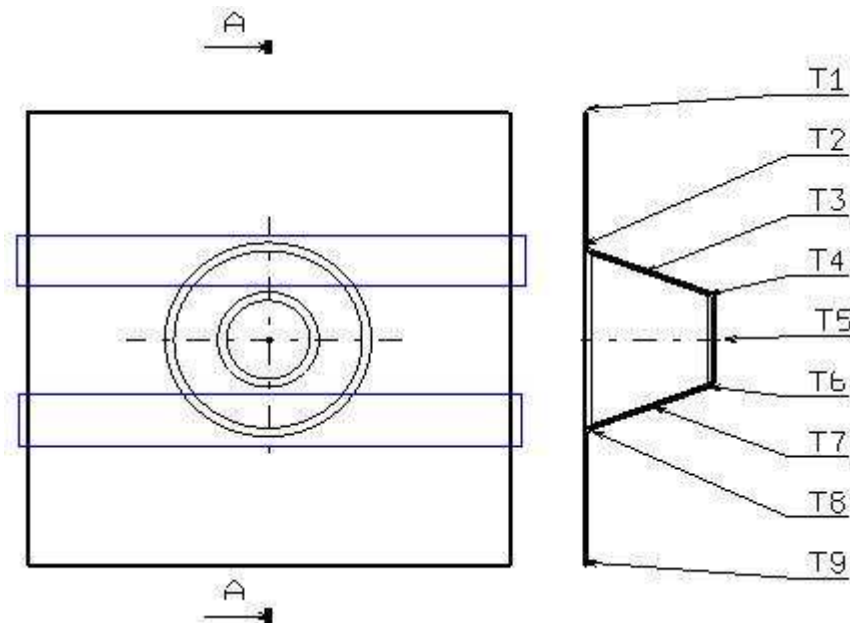
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>A1</b>	0,99	0,83	0,60	0,56	0,73	0,61	0,68	0,86	0,96
<b>A2</b>	0,89	0,78	0,63	0,73	0,83	0,66	0,63	0,84	0,90
<b>A3</b>	0,86	0,75	0,63	0,58	0,78	0,64	0,66	0,78	0,88
$\bar{A}$	<b>0,91</b>	<b>0,79</b>	<b>0,62</b>	<b>0,62</b>	<b>0,78</b>	<b>0,64</b>	<b>0,66</b>	<b>0,83</b>	<b>0,91</b>
$\pm \sigma$	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>

Tab. 5 Vyhodnocení vylisku A tloušťky 1 mm při plném ohřevu

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
<b>A1</b>	1,80	1,63	1,36	1,41	1,52	1,35	1,37	1,62	1,73
<b>A2</b>	1,79	1,56	1,39	1,43	1,45	1,41	1,28	1,50	1,74
<b>A3</b>	1,77	1,49	1,34	1,33	1,46	1,27	1,31	1,40	1,74
$\bar{A}$	<b>1,79</b>	<b>1,56</b>	<b>1,36</b>	<b>1,39</b>	<b>1,48</b>	<b>1,34</b>	<b>1,32</b>	<b>1,51</b>	<b>1,74</b>
$\pm\sigma$	<b>0,01</b>	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	<b>0,09</b>	<b>0</b>

Tab. 6 Vyhodnocení výlisku A tloušťky 2 mm při plném ohřevu

### 9.1.1.2 Ohřev se stíněním



Obr. 32 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku A při použití stínění

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
<b>A1</b>	0,85	0,65	0,63	0,64	0,71	0,65	0,63	0,68	0,80
<b>A2</b>	0,82	0,61	0,59	0,60	0,72	0,65	0,64	0,59	0,86
<b>A3</b>	0,95	0,91	0,85	0,84	0,77	0,70	0,91	0,89	0,96
$\bar{A}$	<b>0,87</b>	<b>0,72</b>	<b>0,69</b>	<b>0,69</b>	<b>0,73</b>	<b>0,67</b>	<b>0,73</b>	<b>0,72</b>	<b>0,87</b>
$\pm\sigma$	<b>0,06</b>	<b>0,13</b>	<b>0,11</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,07</b>

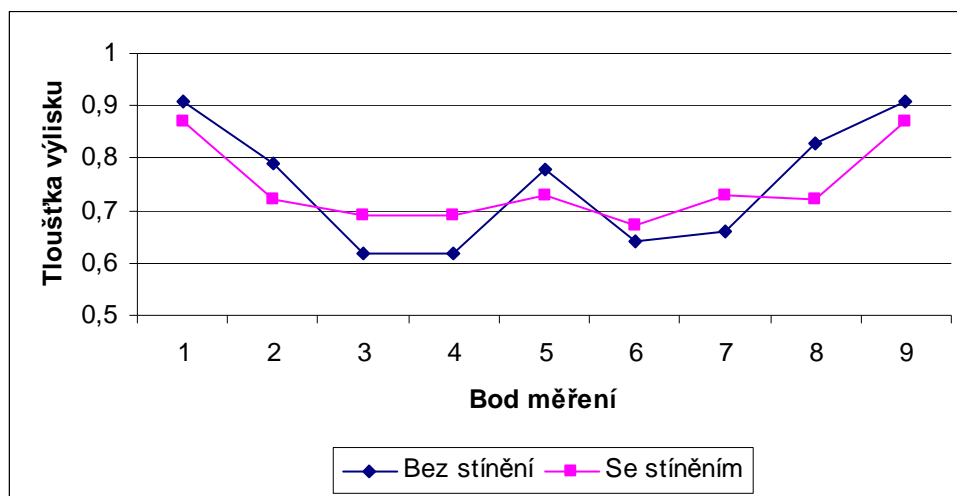
Tab. 7 Vyhodnocení výlisku A tloušťky 1 mm při použití stínění

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
<b>A1</b>	1,60	1,46	1,32	1,30	1,60	1,38	1,40	1,42	1,73
<b>A2</b>	1,68	1,45	1,45	1,37	1,57	1,42	1,42	1,43	1,76
<b>A3</b>	1,76	1,50	1,51	1,47	1,54	1,49	1,45	1,42	1,73
$\bar{A}$	<b>1,68</b>	<b>1,47</b>	<b>1,43</b>	<b>1,38</b>	<b>1,57</b>	<b>1,43</b>	<b>1,42</b>	<b>1,42</b>	<b>1,74</b>
$\pm\sigma$	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>	<b>0,08</b>	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0</b>	<b>0,01</b>

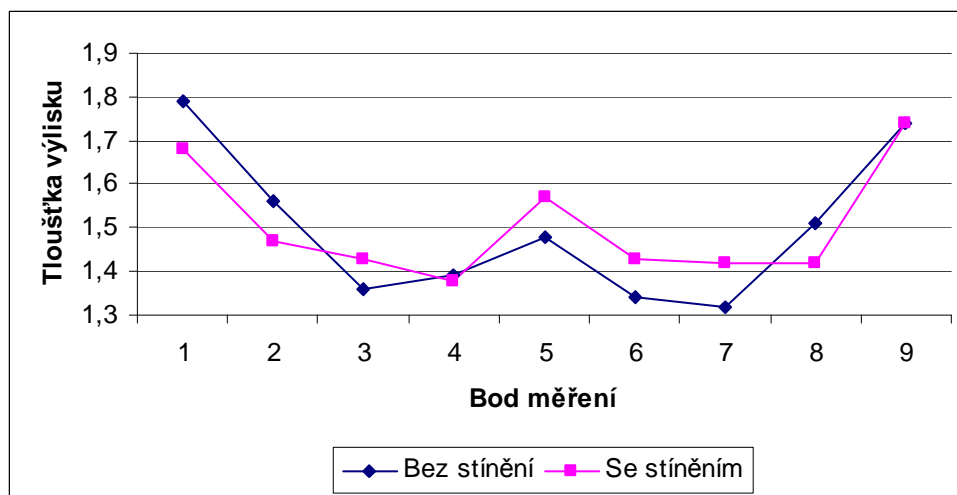
Tab. 8 Vyhodnocení výlisku A tloušťky 2 mm při použití stínění



## 9.1.1.3 Grafické porovnání tloušťek výlisků modelu A



Obr. 33 Porovnání tloušťek výlisků modelu A desky 1 mm

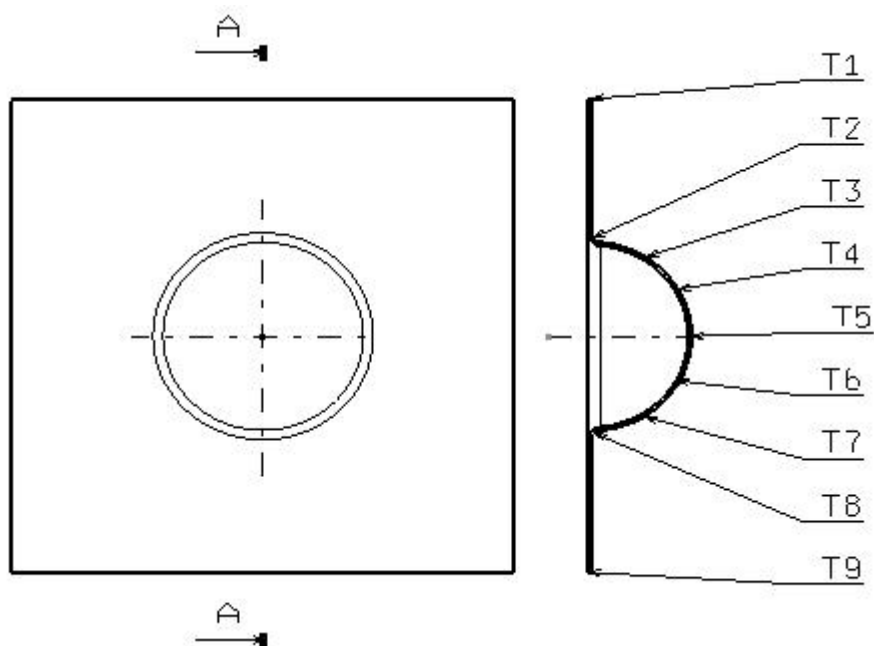


Obr. 34 Porovnání tloušťek výlisků modelu A desky 2 mm

### 9.1.2 Model B

Jedná se o polokouli o poloměru 30 mm, viz Obr. 25.

#### 9.1.2.1 Plný ohřev



Obr. 35 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku B při plném ohřevu

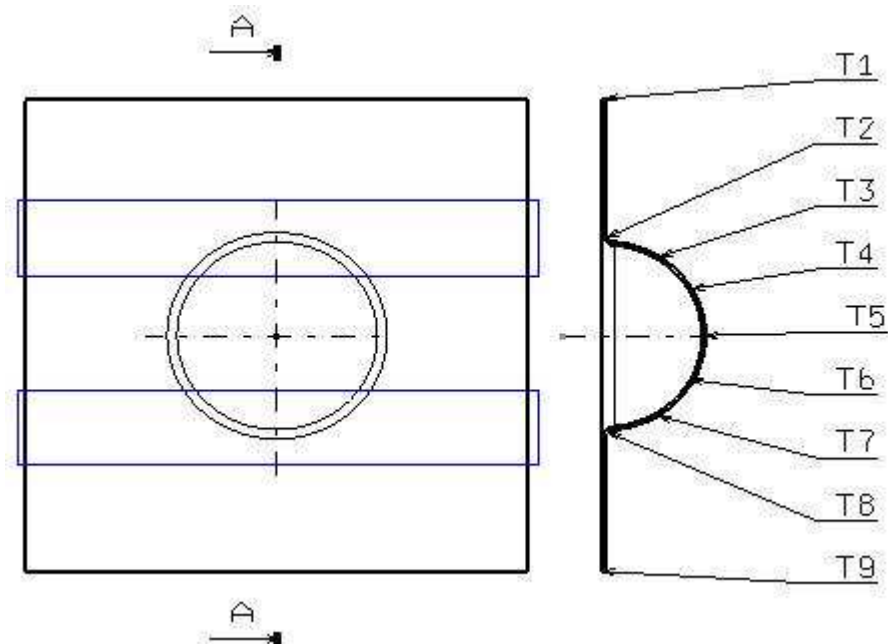
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>B1</b>	1,01	0,84	0,72	0,75	0,83	0,77	0,72	0,85	0,97
<b>B2</b>	1,02	0,79	0,73	0,76	0,84	0,80	0,74	0,79	1,00
<b>B3</b>	1,01	0,83	0,75	0,80	0,83	0,81	0,75	0,84	0,99
$\bar{B}$	<b>1,01</b>	<b>0,82</b>	<b>0,73</b>	<b>0,77</b>	<b>0,83</b>	<b>0,79</b>	<b>0,74</b>	<b>0,83</b>	<b>0,99</b>
$\pm \sigma$	<b>0</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>

Tab. 9 Vyhodnocení výlisku B tloušťky 1 mm při plném ohřevu

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>B1</b>	1,83	1,72	1,51	1,72	1,76	1,69	1,57	1,69	1,89
<b>B2</b>	1,82	1,70	1,55	1,71	1,76	1,68	1,52	1,68	1,88
<b>B3</b>	1,81	1,63	1,52	1,67	1,78	1,70	1,53	1,65	1,84
$\bar{B}$	<b>1,82</b>	<b>1,68</b>	<b>1,53</b>	<b>1,70</b>	<b>1,77</b>	<b>1,69</b>	<b>1,54</b>	<b>1,67</b>	<b>1,87</b>
$\pm \sigma$	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>

Tab. 10 Vyhodnocení výlisku B tloušťky 2 mm při plném ohřevu

## 9.1.2.2 Ohřev se stíněním



Obr. 36 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku B při použití stínění

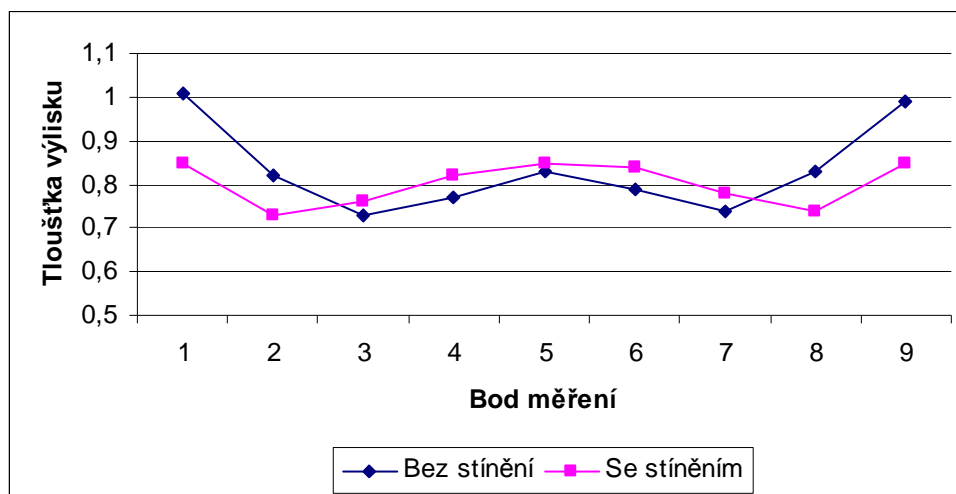
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>B1</b>	0,84	0,77	0,74	0,81	0,84	0,83	0,75	0,70	0,79
<b>B2</b>	0,85	0,73	0,74	0,82	0,86	0,84	0,81	0,75	0,89
<b>B3</b>	0,87	0,68	0,80	0,82	0,85	0,85	0,78	0,76	0,86
$\bar{B}$	<b>0,85</b>	<b>0,73</b>	<b>0,76</b>	<b>0,82</b>	<b>0,85</b>	<b>0,84</b>	<b>0,78</b>	<b>0,74</b>	<b>0,85</b>
$\pm \sigma$	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>

Tab. 11 Vyhodnocení výlisku B tloušťky 1 mm při použití stínění

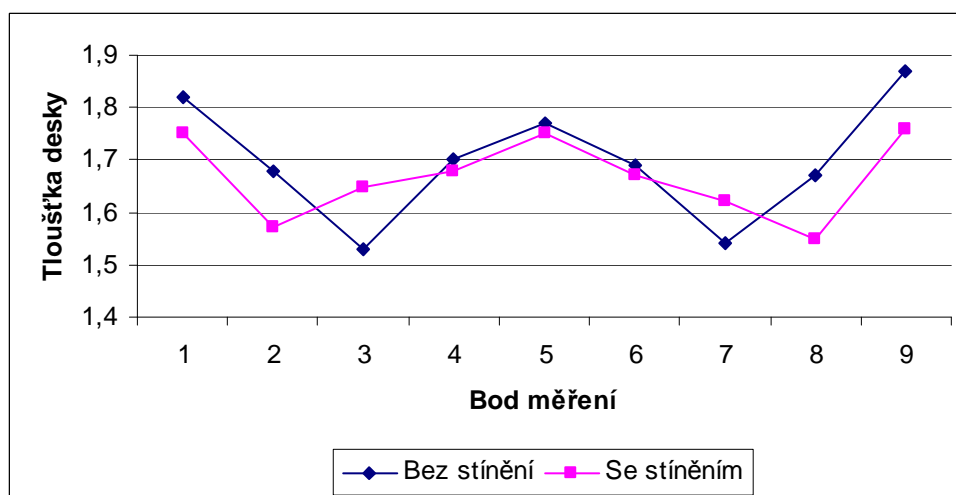
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>B1</b>	1,70	1,56	1,69	1,72	1,77	1,70	1,65	1,55	1,78
<b>B2</b>	1,71	1,60	1,68	1,69	1,75	1,67	1,62	1,60	1,76
<b>B3</b>	1,84	1,55	1,59	1,62	1,74	1,63	1,58	1,49	1,75
$\bar{B}$	<b>1,75</b>	<b>1,57</b>	<b>1,65</b>	<b>1,68</b>	<b>1,75</b>	<b>1,67</b>	<b>1,62</b>	<b>1,55</b>	<b>1,76</b>
$\pm \sigma$	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>

Tab. 12 Vyhodnocení výlisku B tloušťky 2 mm při použití stínění

## 9.1.2.3 Grafické porovnání tloušťek výlisků modelu B



Obr. 37 Porovnání tloušťek výlisků modelu B desky 1 mm

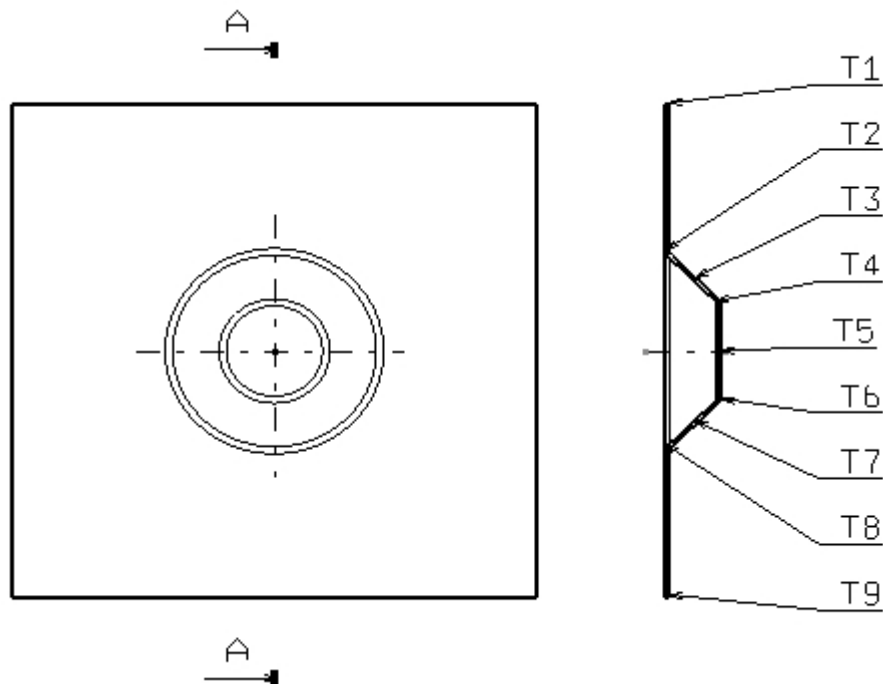


Obr. 38 Porovnání tloušťek výlisků modelu B desky 2 mm

### 9.1.3 Model C

Jedná se o komolý kužel s větším skosením a nižší výškou, přesné rozměry viz Obr. 26.

#### 9.1.3.1 Plný ohřev



Obr. 39 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku C při plném ohřevu

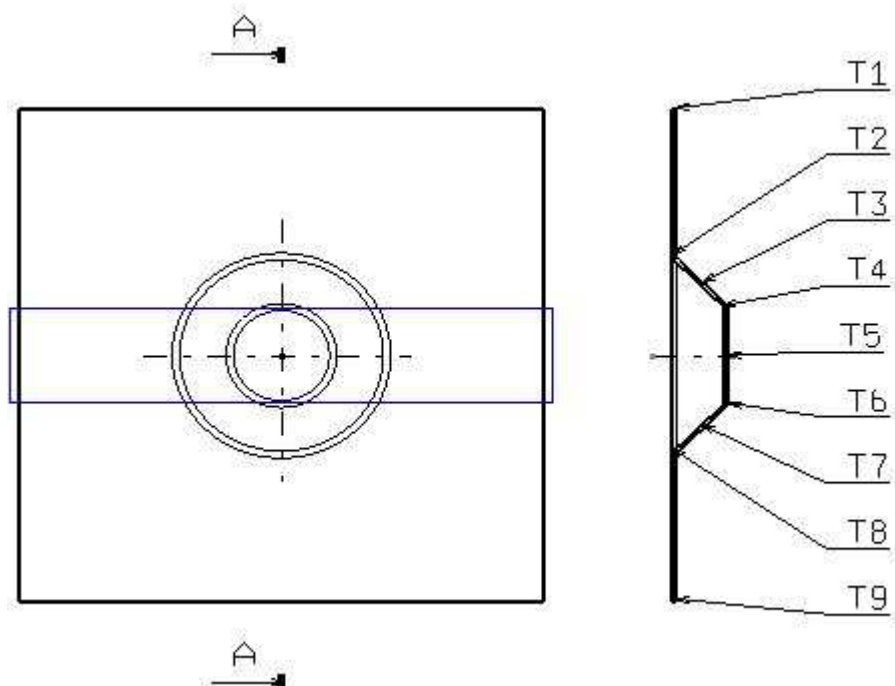
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>C1</b>	1,01	0,97	0,86	0,85	0,93	0,83	0,84	0,95	1,01
<b>C2</b>	1,02	0,97	0,87	0,84	0,88	0,85	0,87	0,98	1,01
<b>C3</b>	1,06	0,94	0,88	0,81	0,89	0,86	0,87	0,97	1,05
$\bar{C}$	<b>1,03</b>	<b>0,96</b>	<b>0,87</b>	<b>0,83</b>	<b>0,90</b>	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	<b>0,97</b>	<b>1,02</b>
$\pm \sigma$	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>

Tab. 13 Vyhodnocení výlisku C tloušťky 1 mm při plném ohřevu

$\emptyset$	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>C1</b>	1,96	1,98	1,81	1,72	1,83	1,75	1,78	1,91	1,99
<b>C2</b>	1,99	1,89	1,82	1,70	1,86	1,78	1,81	1,85	1,98
<b>C3</b>	1,96	1,96	1,82	1,75	1,83	1,72	1,82	1,92	2,02
$\bar{C}$	<b>1,97</b>	<b>1,94</b>	<b>1,82</b>	<b>1,72</b>	<b>1,84</b>	<b>1,75</b>	<b>1,80</b>	<b>1,89</b>	<b>2,00</b>
$\pm \sigma$	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>

Tab. 14 Vyhodnocení výlisku C tloušťky 2 mm při plném ohřevu

## 9.1.3.2 Ohřev se stíněním



Obr. 40 Vyznačení tloušťek v řezu výlisku C při použití stínění

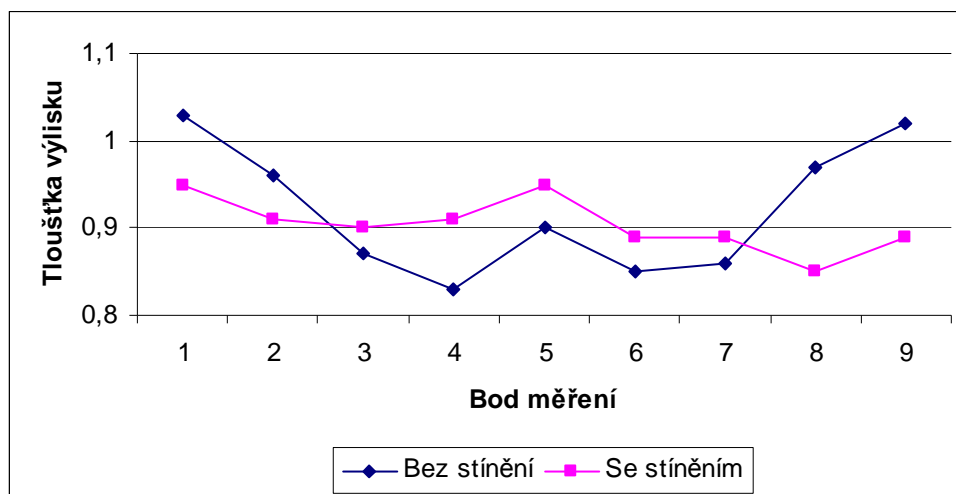
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>C1</b>	0,95	0,90	0,92	0,91	0,95	0,89	0,91	0,86	0,89
<b>C2</b>	0,92	0,90	0,91	0,92	0,94	0,92	0,89	0,84	0,91
<b>C3</b>	0,97	0,92	0,88	0,89	0,95	0,87	0,86	0,86	0,86
$\bar{C}$	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>	<b>0,95</b>	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>	<b>0,85</b>	<b>0,89</b>
$\pm \sigma$	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>

Tab. 15 Vyhodnocení výlisku C tloušťky 1 mm při použití stínění

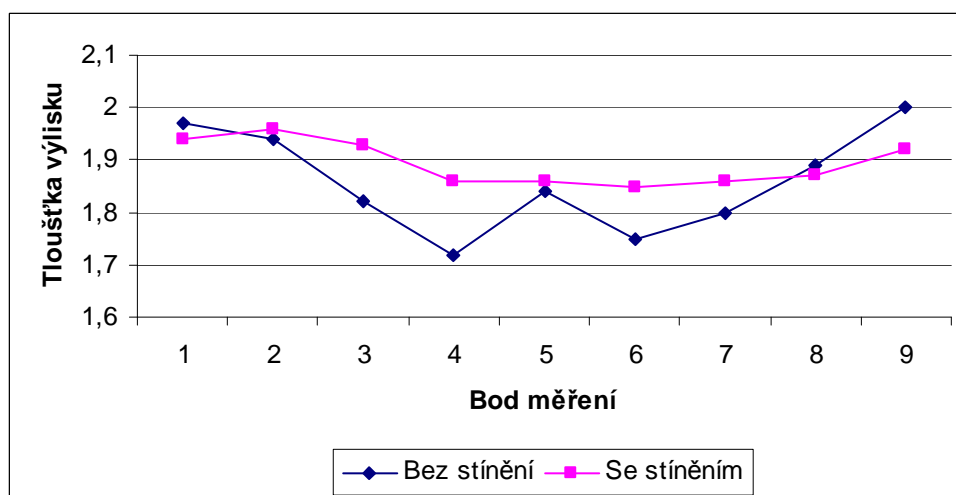
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
<b>C1</b>	1,86	1,86	1,88	1,86	1,87	1,83	1,89	1,86	1,93
<b>C2</b>	1,98	1,99	2,00	1,84	1,85	1,85	1,81	1,89	1,99
<b>C3</b>	1,99	2,02	1,90	1,88	1,85	1,88	1,87	1,87	1,85
$\bar{C}$	<b>1,94</b>	<b>1,96</b>	<b>1,93</b>	<b>1,86</b>	<b>1,86</b>	<b>1,85</b>	<b>1,86</b>	<b>1,87</b>	<b>1,92</b>
$\pm \sigma$	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,06</b>

Tab. 16 Vyhodnocení výlisku C tloušťky 2 mm při použití stínění

## 9.1.3.3 Grafické porovnání tloušťek výlisků modelu C



Obr. 41 Porovnání tloušťek výlisků modelu C desky 1 mm

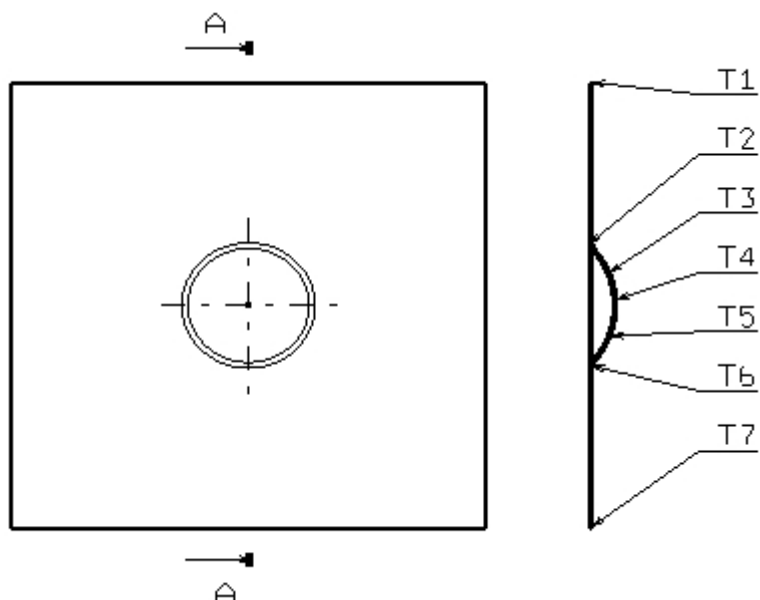


Obr. 42 Porovnání tloušťek výlisků modelu C desky 2 mm

### 9.1.4 Model D

Jedná se o kulový vrchlík s poloměrem 30 mm, viz Obr. 27.

#### 9.1.4.1 Plný ohřev



Obr. 43 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku D při plném ohřevu

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>
<b>D1</b>	1,02	0,97	0,86	0,87	0,89	0,99	1,04
<b>D2</b>	1,06	0,95	0,87	0,86	0,85	0,94	1,00
<b>D3</b>	0,97	0,94	0,89	0,91	0,90	0,89	0,92
$\bar{D}$	<b>1,02</b>	<b>0,95</b>	<b>0,87</b>	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>
$\pm \sigma$	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>

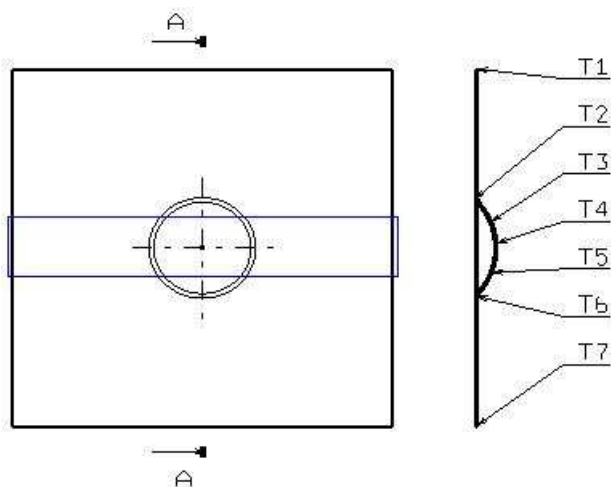
Tab. 17 Vyhodnocení výlisku D tloušťky 1 mm při plném ohřevu

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>
<b>D1</b>	2,01	2,02	1,87	1,92	1,85	2,00	1,99
<b>D2</b>	2,06	2,11	1,83	1,94	1,89	2,03	2,06
<b>D3</b>	2,03	2,03	1,86	1,94	1,90	1,98	2,01
$\bar{D}$	<b>2,03</b>	<b>2,05</b>	<b>1,85</b>	<b>1,93</b>	<b>1,88</b>	<b>2,00</b>	<b>2,02</b>
$\pm \sigma$	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>

Tab. 18 Vyhodnocení výlisku D tloušťky 2 mm při plném ohřevu



## 9.1.4.2 Ohřev se stíněním



Obr. 44 Vyznačení tlouštěk v řezu vylisku D při použití stínění

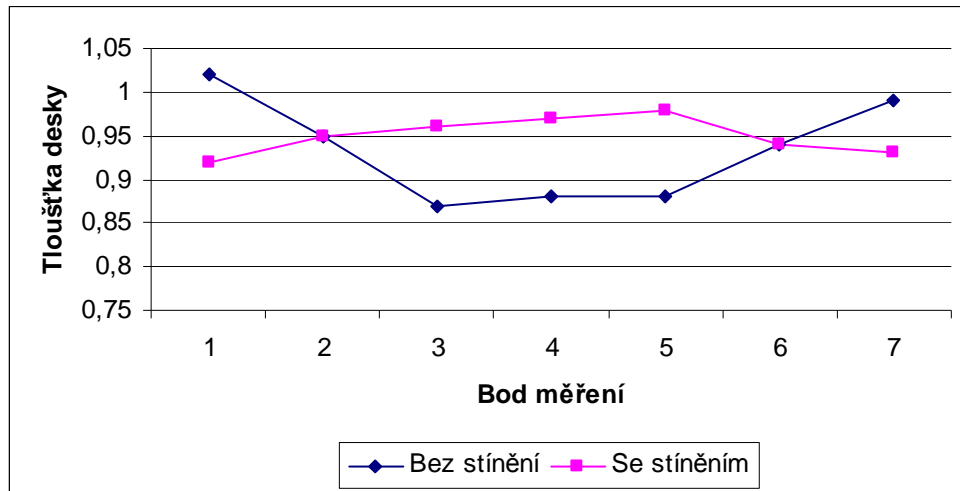
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>
<b>D1</b>	0,85	0,88	0,86	0,91	0,92	0,90	0,87
<b>D2</b>	0,98	0,97	1,00	0,97	0,96	0,95	1,01
<b>D3</b>	0,94	1,00	1,03	1,02	1,06	0,97	0,91
$\bar{D}$	<b>0,92</b>	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	<b>0,93</b>
$\pm \sigma$	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,07</b>	<b>0,04</b>	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>

Tab. 19 Vyhodnocení vylisku D tloušťky 1 mm při použití stínění

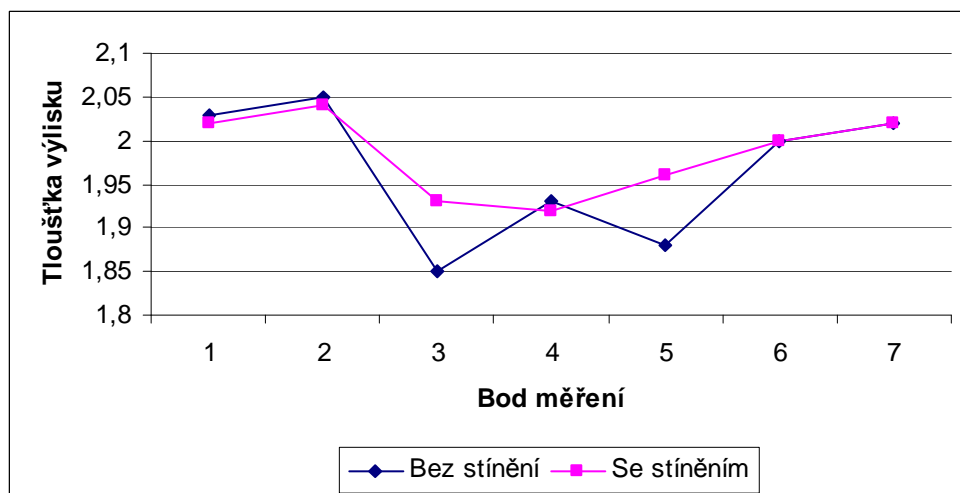
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>
<b>D1</b>	2,05	2,04	1,90	1,89	2,01	1,99	2,06
<b>D2</b>	2,00	2,05	1,96	1,92	1,94	1,98	2,03
<b>D3</b>	2,02	2,03	1,92	1,94	1,93	2,02	1,98
$\bar{D}$	<b>2,02</b>	<b>2,04</b>	<b>1,93</b>	<b>1,92</b>	<b>1,96</b>	<b>2,00</b>	<b>2,02</b>
$\pm \sigma$	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>

Tab. 20 Vyhodnocení vylisku D tloušťky 2 mm při použití stínění

### 9.1.4.3 Grafické porovnání tloušťek výlisků



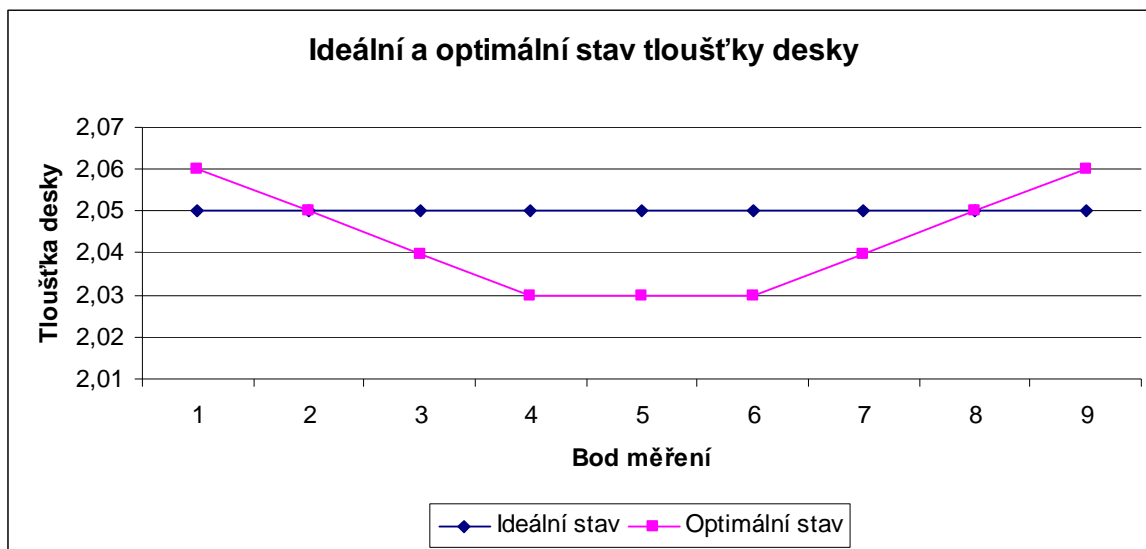
Obr. 45 Porovnání tloušťek výlisků modelu C desky 1 mm



Obr. 46 Porovnání tloušťek výlisků modelu C desky 2 mm

### 9.1.5 Ideální a optimální tloušťka výlisku

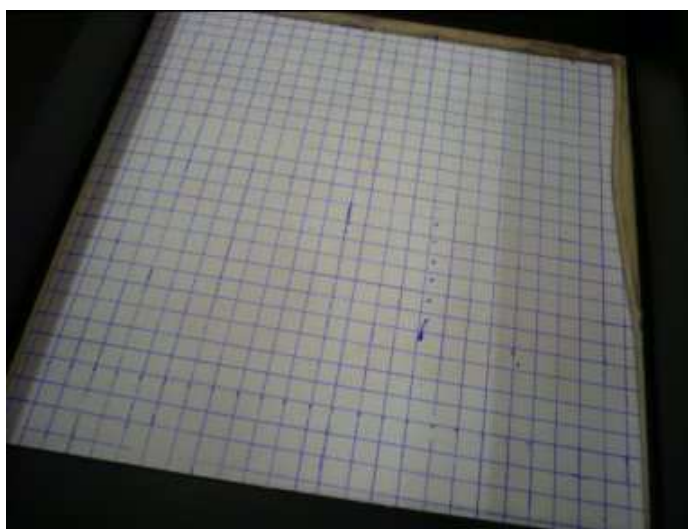
Z hlediska tloušťky vytvarované desky je pro nás ideálním stavem konstantní tloušťka desky po celé ploše výlisku. To je ale z technologického hlediska nemožné, proto je snahou dosažení nejrovnoměrnější tloušťky po celé ploše, tzn. optimálního stavu (viz Obr. 47).



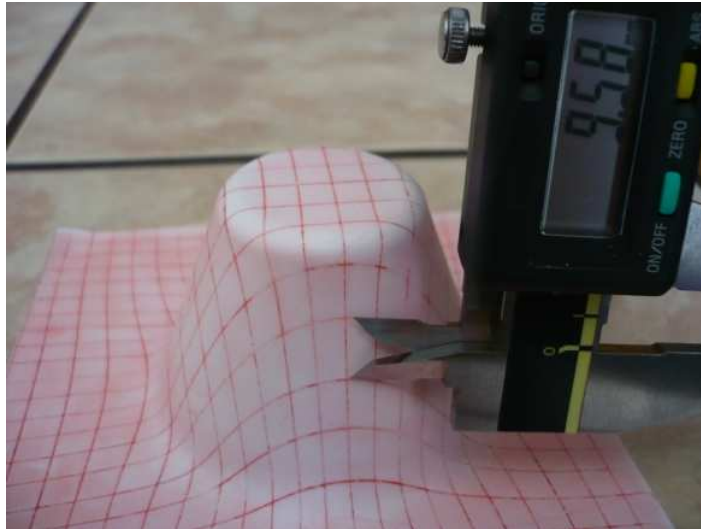
Obr. 47 Ideální a optimální stav tloušťky desky

## 9.2 Vyhodnocení změny rastru

Protože deska při tvarování mění nejen svoji tloušťku, ale zároveň se protahuje ve všech směrech, byl vytvořen pro lepší znázornění plastických deformací rastr o rozměrech 5 x 5 mm, na kterém jsme posléze měřili a pozorovali změnu rozměrů rastru.



Obr. 48 Rastr 5 x 5 mm



Obr. 49 Změna rastru vytvarované desky

Pro vyhodnocení změny rastru bylo použito rovnice:

$$\text{Rozdíl} = \frac{R}{\bar{R}_i} \cdot 100[\%] \quad (15)$$

kde  $R$  narysovaný rastr původních rozměrů 5 x 5 mm

$\bar{R}_i$  protažený rastr v daném místě daného modelu.

Rozdílem je tedy myšleno, o kolik procent se protažený rastr změnil oproti původnímu rastru 5 x 5 mm.

### 9.2.1 Model A

Jedná se o komolý kužel, viz Obr. 24.

#### 9.2.1.1 Plný ohřev

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
A1	9,7	9,8	10,5	8,7	8,6	8,2
A2	9,2	9,3	10,4	8,1	10,1	8,2
A3	9,2	8,9	9,4	8,5	8,3	8,2
$\bar{A}$	9,37	9,33	10,1	8,43	9	8,2
$\pm \sigma$	0,24	0,37	0,5	0,25	0,79	0
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>87,33</b>	<b>86,67</b>	<b>102</b>	<b>68,67</b>	<b>80</b>	<b>64</b>

Tab. 21 Vyhodnocení změny rastru modelu A při plném ohřevu

### 9.2.1.2 Ohřev se stíněním

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	1	2	3	1	2	3
<b>A1</b>	8,1	8,2	8,4	8,3	8,6	8,4
<b>A2</b>	8,8	8,9	9,6	8,2	8,5	8,2
<b>A3</b>	8,5	8,7	9,2	8,3	8,1	7,8
$\bar{A}$	8,47	8,6	9,07	8,27	8,4	8,13
$\pm \sigma$	0,29	0,29	0,5	0,05	0,22	0,25
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>69,33</b>	<b>72</b>	<b>81,33</b>	<b>65,33</b>	<b>68</b>	<b>62,67</b>

Tab. 22 Vyhodnocení změny rastru modelu A při použití stínění

### 9.2.2 Model B

Jedná se o polokouli o poloměru 30 mm, viz Obr. 25.

#### 9.2.2.1 Plný ohřev

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	1	2	3	1	2	3
<b>B1</b>	8,2	7,1	7,1	6,6	6,8	6,2
<b>B2</b>	8,1	7,2	7,2	7,2	7,1	6,1
<b>B3</b>	7,9	7,5	6,2	7,4	7,2	6,0
$\bar{B}$	8,07	7,27	6,83	7,07	7,03	6,1
$\pm \sigma$	0,12	0,17	0,45	0,34	0,17	0,08
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>61,33</b>	<b>45,33</b>	<b>36,67</b>	<b>41,33</b>	<b>40,67</b>	<b>22</b>

Tab. 23 Vyhodnocení změny rastru modelu B při plném ohřevu

#### 9.2.2.2 Ohřev se stíněním

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	1	2	3	1	2	3
<b>B1</b>	7,2	7	6,8	6,5	5,9	6,2
<b>B2</b>	7,3	6,8	6,5	6,6	6,2	5,8
<b>B3</b>	6,9	6,2	6,1	6,8	6,1	5,9
$\bar{B}$	7,13	6,67	6,47	6,63	6,07	5,97
$\pm \sigma$	0,17	0,34	0,29	0,12	0,12	0,17
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>42,67</b>	<b>33,33</b>	<b>29,33</b>	<b>32,67</b>	<b>21,33</b>	<b>19,33</b>

Tab. 24 Vyhodnocení změny rastru modelu B při použití stínění

### 9.2.3 Model C

Jedná se o nižší komolý kužel, viz Obr. 26.

#### 9.2.3.1 Plný ohřev

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	1	2	3	1	2	3
<b>C1</b>	5,8	5,9	6,1	6,1	5,3	6,1
<b>C2</b>	5,8	6,1	6,2	6,2	5,7	5,8
<b>C3</b>	6,1	6,2	6,2	6,2	5,8	5,9
$\bar{C}$	5,9	6,07	6,17	6,17	5,6	5,93
$\pm \sigma$	0,14	0,12	0,05	0,05	0,22	0,12
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>18</b>	<b>21,33</b>	<b>23,33</b>	<b>23,33</b>	<b>12</b>	<b>18,67</b>

Tab. 25 Vyhodnocení změny rastru modelu C při plném ohřevu

#### 9.2.3.2 Ohřev se stíněním

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	1	2	3	1	2	3
<b>C1</b>	5,1	5,4	5,5	5,6	5,3	5,5
<b>C2</b>	6,2	6	6,1	5,3	5,4	5,2
<b>C3</b>	5,5	5,6	5,8	5,6	5,5	5,2
$\bar{C}$	5,6	5,67	5,8	5,5	5,4	5,3
$\pm \sigma$	0,45	0,25	0,24	0,14	0,08	0,14
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>12</b>	<b>13,33</b>	<b>16</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>6</b>

Tab. 26 Vyhodnocení změny rastru modelu C při použití stínění

### 9.2.4 Model D

Jedná se o kulový vrchlík s poloměrem 30 mm, viz Obr. 27.

#### 9.2.4.1 Plný ohřev

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	1	2	3	1	2	3
<b>D1</b>	5,3	5,2	5,2	5,8	5,5	5,2
<b>D2</b>	5,4	5,6	5,8	5,6	5,3	5,1
<b>D3</b>	6,1	6,3	6,0	5,9	5,3	5,1
$\bar{D}$	5,6	5,7	5,67	5,77	5,37	5,13
$\pm \sigma$	0,36	0,45	0,34	0,12	0,09	0,05
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>13,33</b>	<b>15,33</b>	<b>7,33</b>	<b>2,67</b>

Tab. 27 Vyhodnocení změny rastru modelu D při plném ohřevu

## 9.2.4.2 Ohřev se stíněním

	Deska 1 mm			Deska 2 mm		
	1	2	3	1	2	3
<b>D1</b>	6,1	5,2	5,1	5,1	5,4	5,3
<b>D2</b>	5,9	5,3	5,4	5,1	5,2	5,1
<b>D3</b>	5,1	5,2	5,4	5,2	5,1	5,6
$\bar{D}$	5,7	5,23	5,3	5,13	5,23	5,33
$\pm \sigma$	0,43	0,05	0,14	0,05	0,12	0,21
<b>Rozdíl[%]</b>	<b>14</b>	<b>4,67</b>	<b>6</b>	<b>2,67</b>	<b>4,67</b>	<b>6,67</b>

Tab. 28 Vyhodnocení změny rastru modelu D při použití stínění

## 10 SIMULACE TEPLOTNÍCH POLÍ V PROGRAMU FEMLAB 3.1

Program FEMLAB od společnosti COMSOL Multiphysics, je program, který využívá k modelování a simulaci úloh z oblasti vědy a technické praxe parciální diferenciální rovnice. Řešení je provedeno metodou konečných prvků.

Aplikace FEMLABu je široká, program lze použít pro simulaci a modelování velkého množství jevů, které lze popsat pomocí parciálních diferenciálních rovnic.

Pro naše potřeby využijeme mód HEAT TRANSFER.

Pro modelování teplotních polí uvnitř desky je potřeba znát vlastnosti materiálu, v našem případě se jedná o desku 160 x 160 x 1 mm z PS. Počáteční teplotu desky jsme zvolili 20°C.

Vlastnosti PS:

- Součinitel teplotní vodivosti  $\lambda = 0,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Hustota  $\rho = 1050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Měrné teplo  $c_p = 1300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Jako okrajovou podmínkou byla zvolena teplota ohřívajícího povrchu, která dle našeho měření dosáhne teploty 140°C. Doba ohřevu byla volena podle našich experimentů, a to 120 s.

Po zadání všech potřebných informací do programu FEMLAB jsme spustili výpočet, po jehož konci jsme získali rozložení teplot v desce.

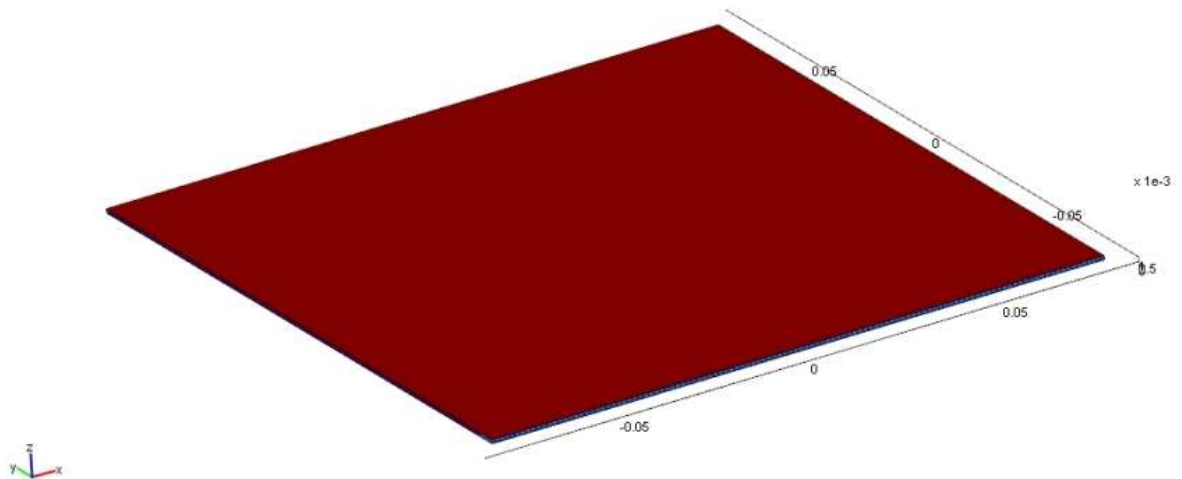
Na následujících příkladech jsou uvedeny možnosti rozložení teplotních polí pro naše modely.

### 10.1 Plně ohřívající deska

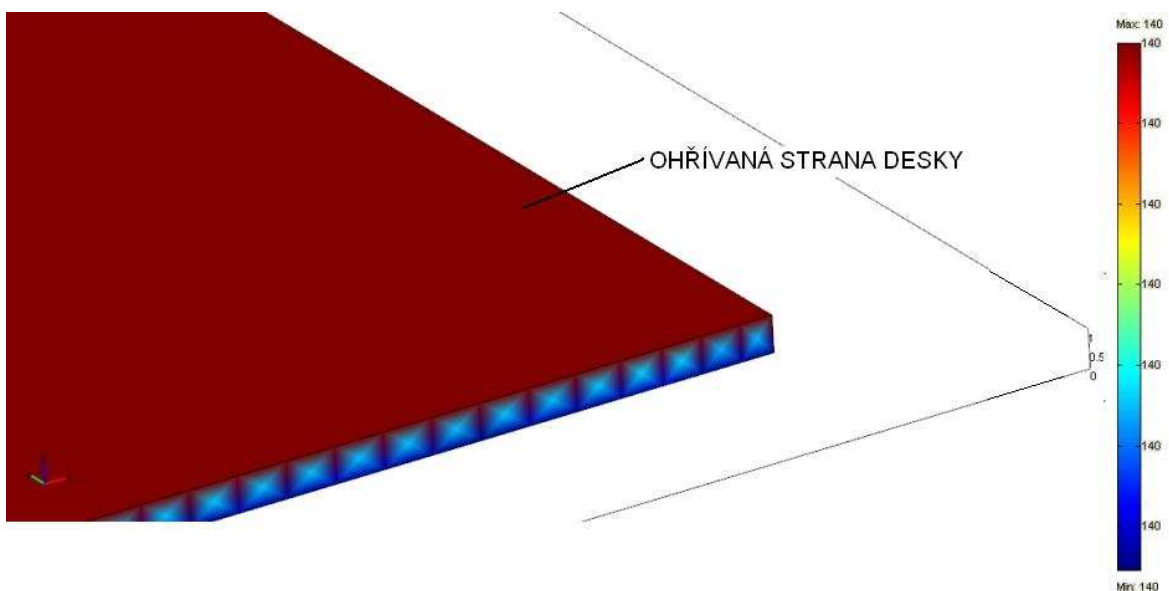
Tento případ je nejjednodušší, kdy se celá deska ohřívá na stejnou teplotu. Z měření již víme, že toto řešení není příliš vhodné a to kvůli velkým rozdílům výsledné tloušťky výlis-ku."

Na stupnici teplot lze vidět že dle programu FEMLAB je deska po 120 sekundách ohřevu dokonale prohřátá.





Obr. 50 Model teplotních polí plně ohřivané desky



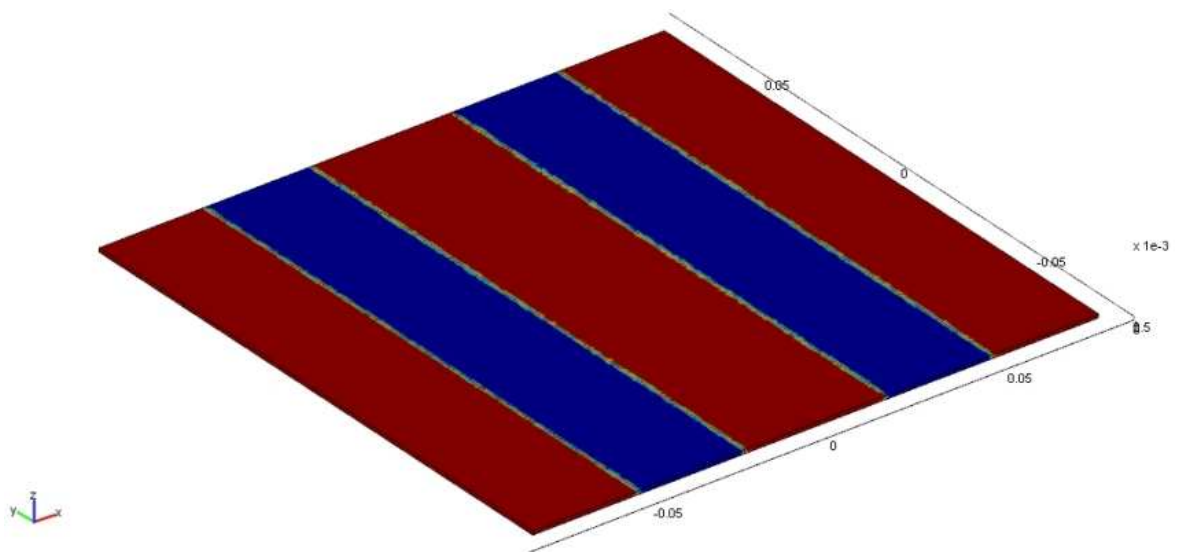
Obr. 51 Zvětšení desky a znázornění teplot

## 10.2 Rozložení teplotních polí do obdélníků

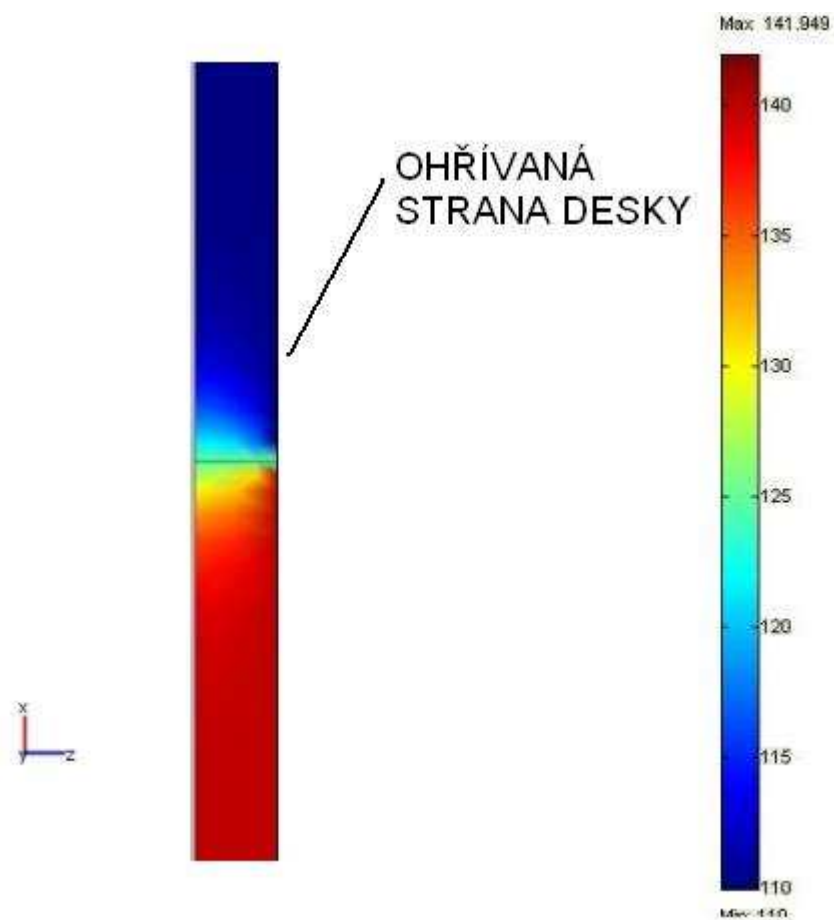
Následující rozložení teplotních polí jsme použili při technologických experimentech, kdy byly pro zastínění použity azbestové pásy. Z našeho měření vyplynulo, že se jedná o vhodnější metodu použitelnou ve výrobě vakuově tvarovaných dílců.

Na následujícím obrázku můžeme pozorovat dva druhy teplotních polí. Pole červenou barvou je to pole, které má vyšší teplotu, modré pole naopak značí místo zastíněné azbestovým páskem. Pro simulaci teplotních polí byla v programu FEMLAB zastíněnému místu

zadána teplota 110°C. Mezi těmito pásmy lze sledovat barevné plochy, což jsou přechody mezi teplým a chladnějším pásmem.



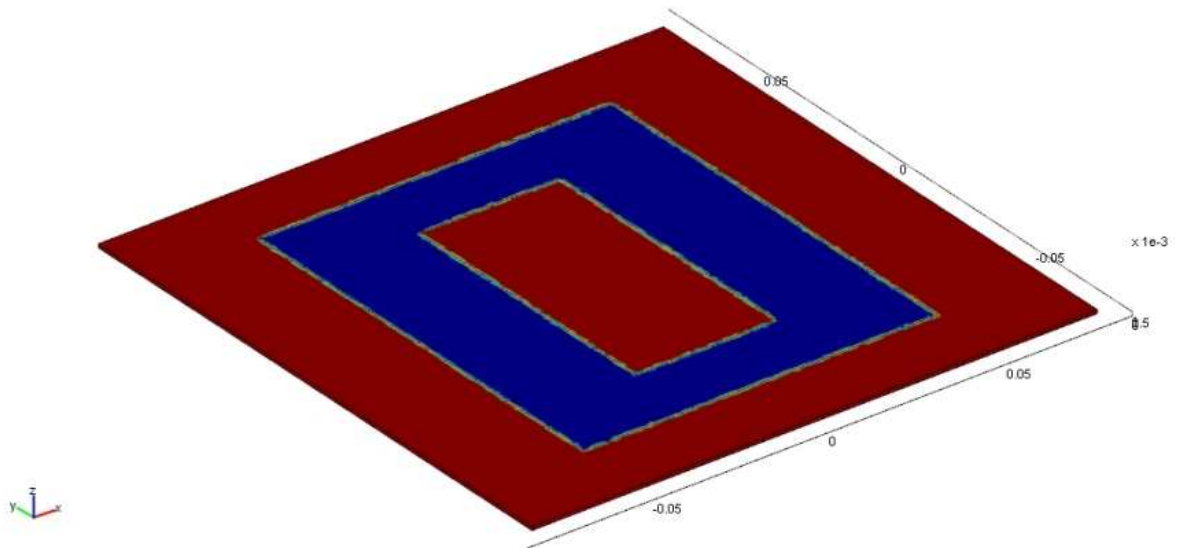
Obr. 52 Rozložení teplotních polí stíněné desky



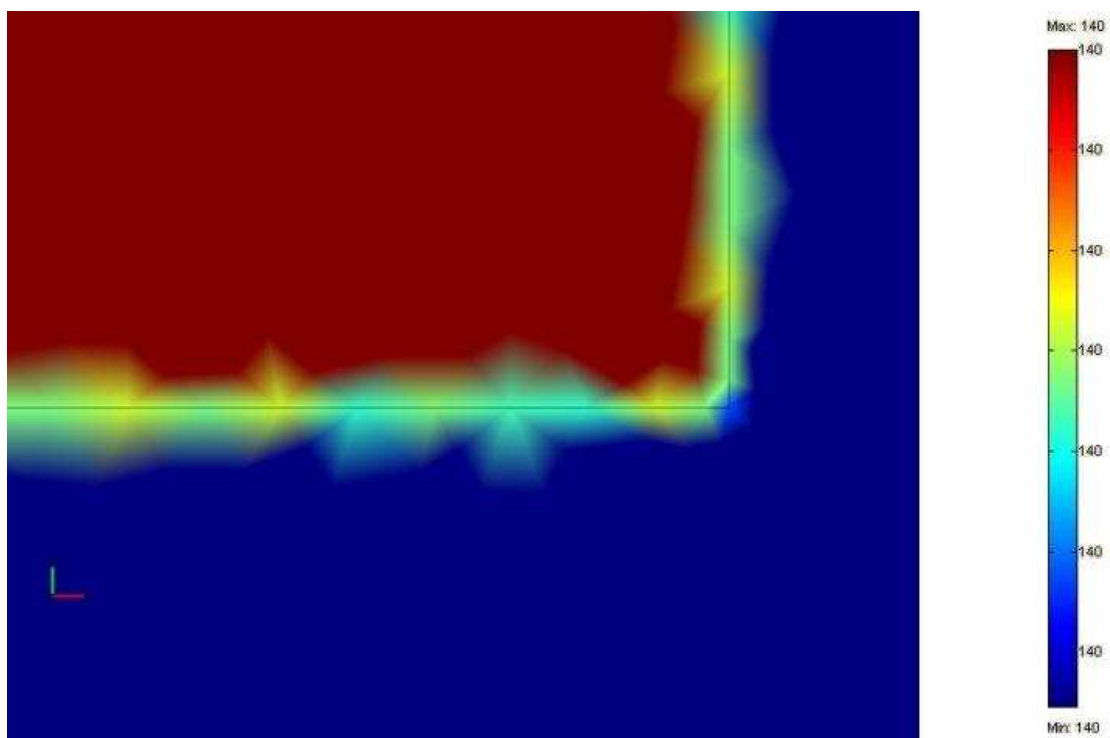
Obr. 53 Zobrazení přechodu mezi dvěma pásmy s rozdílnými teplotami

### 10.3 Rozložení teplotních polí do prstenců

Alternativou k rozložení polí 1. které jsme použili při experimentech je rozložení do několika prstenců, čímž dosáhneme rovnoměrné tloušťky po celém obvodu dílce. Stejně jako v předchozím případě jsme pro chladnější pásmo použili teplotu 110°C.



Obr. 54 Rozložení teplotních polí do prstenců



Obr. 55 Detail přechodu dvou pásem

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zjistit nejvhodnější technologické podmínky pro rozložení teplotních polí v polymerní desce při vakuovém tvarování za účelem dosažení rovnoměrné tloušťky stěny.

Během experimentů bylo změřeno rozložení teplot v různých stupních na vakuovém laboratorním stroji. Bylo zjištěno, že jeden stupeň regulace odpovídá zhruba 25°C, viz Obr. 21.

Při samotných technologických experimentech na vytvořených modelech bylo zjištěno jak rozložení teplot ovlivňuje výslednou tloušťku a protažení výlisku. Výsledek je takový, že při rozložení teplotních pásem je vhodné rozdělit tato pásma podle míst, která se více protahují při tvarování, a to tak, že nejvíce protahovaná místa ohříváme na nižší teploty než pásma méně protahovaná. Tohoto poznatku lze s úspěchem využít v případné výrobě plastových výrobků, zejména těch hlubokotažených, které jsou produkovány metodou vakuového tvarování a dosáhnout tak rovnoměrnějšího rozložení materiálu a rovnoměrnější tloušťky stěny.

V programu FEMLAB byly vytvořeny teplotní modely našich daných případů a bylo využito znázornění teplotních polí v desce. Podle tohoto programu byly časy ohřevů dostatečné k dokonalému prohřátí desky. Celkem byly vytvořeny tři teplotní modely, od nejjednoduššího modelu, kde se ohřívá celá plocha rovnoměrně, až po dva druhy teplotních polí s různým rozložením polí.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] BIŠŤAN, E., Vákuové tvarovanie termoplastov, SVTL Bratislava 1967
- [2] TOMIS, F., Základy gumárenské a plastikářské technologie, Skripta, Brno 1975-  
VUT Brno
- [3] HRBÁČEK, A., Vakuové tvarování termoplastů, Bakalářská práce UTB FT, 2007
- [4] JANÁČOVÁ, D., Procesní inženýrství tabulky, UTB FT

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PMMA	Polymethylmetakrylát
PC	Polykarbonát
$t, \tau$	čas [s]
$\sigma_\varphi, \sigma_\psi$	normálové napětí v daném místě [MPa]
$r_1, r_2$	poloměry zaoblení v daném místě [m]
$p$	tlak [MPa]
$s, s_b, s_o$	tloušťka stěny membrány [m]
$m$	hmotnost [kg]
$\rho$	hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$a$	poloměr zaoblení výlisku [m]
$h$	hloubka výlisku [m]
$b$	hloubka formy [m]
$f_{1,2}$	součinitel ozáření [-]
$\varepsilon$	součinitel pohltivosti a sálavosti [-]
$T$	teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$S$	plocha [ $\text{m}^2$ ]
T1-T9	označení místa řezu [-]
R1-R3	označení rastru [-]
$c_p$	měrné teplo [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$\lambda$	součinitel teplotní vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1A-1D. Postup negativního tvarování .....	18
Obr. 2A- 2D. Postup pozitivního tvarování .....	19
Obr. 3A-3D. Postup pozitivního tvarování s pneumatickým předtvarováním .....	21
Obr. 4A-4D. Negativní tvarování s mechanickým předtvarováním .....	22
Obr. 5A-5E. Postup negativního tvarování s .....	24
Obr. 6A-6F. Kombinované pozitivně- negativní tvarování .....	26
Obr. 7A-7D. Kombinované vakuové a přetlakové tvarování .....	27
Obr. 8 Kontinuální tvarování .....	28
Obr. 9 Princip plně kontinuálního rotačního způsobu tvarování .....	29
Obr. 10 Ohřev termoplastické desky.....	31
Obr. 11 Princip vakuového systému .....	33
Obr. 12 Schéma cyklu vakuového tvarování .....	40
Obr. 13 Způsoby ořezání výlisku okružní pilou .....	46
Obr. 14 Napětí na membráně .....	47
Obr. 15 Tvarování do volného prostoru.....	48
Obr. 16 Závislost změny tloušťky $\frac{s_b}{s_0}$ tvarované fólie na poměru $\frac{b}{a}$ .....	49
Obr. 17 Závislost koeficientu ozáření .....	51
Obr. 18 Schéma jednostranného ohřevu desky .....	51
Obr. 19 Vakuovací stroj Formech 300X.....	55
Obr. 20 Schéma měření teploty v rámečku .....	56
Obr. 21 Teploty regulačních stupňů vakuovacího stroje .....	56
Obr. 22 Schéma vakuovacího stroje Formech 300X .....	57
Obr. 23 Výroba modelů na 3D CNC frézce.....	58
Obr. 24 Rozměry modelu A.....	59
Obr. 25 Rozměry modelu B .....	59
Obr. 26 Rozměry modelu C .....	59
Obr. 27 Rozměry modelu D.....	60
Obr. 28 Metoda dvou modelů v rámečku .....	60
Obr. 29 Metoda jednoho modelu v rámečku .....	61
Obr. 30 Vznik přeloženin vlivem nedodržení technologických vzdáleností .....	61

Obr. 31 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku A při plném ohřevu.....	63
Obr. 32 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku A při použití stínění.....	64
Obr. 33 Porovnání tlouštěk výlisků modelu A desky 1 mm .....	65
Obr. 34 Porovnání tlouštěk výlisků modelu A desky 2 mm .....	65
Obr. 35 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku B při plném ohřevu.....	66
Obr. 36 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku B při použití stínění .....	67
Obr. 37 Porovnání tlouštěk výlisků modelu B desky 1 mm .....	68
Obr. 38 Porovnání tlouštěk výlisků modelu B desky 2 mm .....	68
Obr. 39 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku C při plném ohřevu.....	69
Obr. 40 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku C při použití stínění .....	70
Obr. 41 Porovnání tlouštěk výlisků modelu C desky 1 mm .....	71
Obr. 42 Porovnání tlouštěk výlisků modelu C desky 2 mm .....	71
Obr. 43 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku D při plném ohřevu.....	72
Obr. 44 Vyznačení tlouštěk v řezu výlisku D při použití stínění.....	73
Obr. 45 Porovnání tlouštěk výlisků modelu C desky 1 mm .....	74
Obr. 46 Porovnání tlouštěk výlisků modelu C desky 2 mm .....	74
Obr. 47 Ideální a optimální stav tloušťky desky .....	75
Obr. 48 Rastr 5 x 5 mm.....	75
Obr. 49 Změna rastru vytvarované desky .....	76
Obr. 50 Model teplotních polí plně ohřívané desky.....	81
Obr. 51 Zvětšení desky a znázornění teplot.....	81
Obr. 52 Rozložení teplotních polí stíněné desky .....	82
Obr. 53 Zobrazení přechodu mezi dvěma pásmy s rozdílnými teplotami.....	82
Obr. 54 Rozložení teplotních polí do prstenců .....	83
Obr. 55 Detail přechodu dvou pásy .....	83



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1	Vhodná teplota formy pro různé druhy materiálů.....	42
Tab. 2	Doby ohřevu různých materiálů na tvarovací teplotu.....	43
Tab. 3	Srovnání délky ohřevu jedno a dvojstranného ohřevu.....	43
Tab. 4	Shrnutí podmínek pro tvarování .....	62
Tab. 5	Vyhodnocení vylisku A tloušťky 1 mm při plném ohřevu .....	63
Tab. 6	Vyhodnocení vylisku A tloušťky 2 mm při plném ohřevu .....	64
Tab. 7	Vyhodnocení vylisku A tloušťky 1 mm při použití stínění .....	64
Tab. 8	Vyhodnocení vylisku A tloušťky 2 mm při použití stínění .....	64
Tab. 9	Vyhodnocení vylisku B tloušťky 1 mm při plném ohřevu .....	66
Tab. 10	Vyhodnocení vylisku B tloušťky 2 mm při plném ohřevu .....	66
Tab. 11	Vyhodnocení vylisku B tloušťky 1 mm při použití stínění.....	67
Tab. 12	Vyhodnocení vylisku B tloušťky 2 mm při použití stínění.....	67
Tab. 13	Vyhodnocení vylisku C tloušťky 1 mm při plném ohřevu .....	69
Tab. 14	Vyhodnocení vylisku C tloušťky 2 mm při plném ohřevu .....	69
Tab. 15	Vyhodnocení vylisku C tloušťky 1 mm při použití stínění.....	70
Tab. 16	Vyhodnocení vylisku C tloušťky 2 mm při použití stínění.....	70
Tab. 17	Vyhodnocení vylisku D tloušťky 1 mm při plném ohřevu .....	72
Tab. 18	Vyhodnocení vylisku D tloušťky 2 mm při plném ohřevu .....	72
Tab. 19	Vyhodnocení vylisku D tloušťky 1 mm při použití stínění .....	73
Tab. 20	Vyhodnocení vylisku D tloušťky 2 mm při použití stínění .....	73
Tab. 21	Vyhodnocení změny rastru modelu A při plném ohřevu.....	76
Tab. 22	Vyhodnocení změny rastru modelu A při použití stínění .....	77
Tab. 23	Vyhodnocení změny rastru modelu B při plném ohřevu .....	77
Tab. 24	Vyhodnocení změny rastru modelu B při použití stínění .....	77
Tab. 25	Vyhodnocení změny rastru modelu C při plném ohřevu .....	78
Tab. 26	Vyhodnocení změny rastru modelu C při použití stínění .....	78
Tab. 27	Vyhodnocení změny rastru modelu D při plném ohřevu.....	78
Tab. 28	Vyhodnocení změny rastru modelu D při použití stínění .....	79