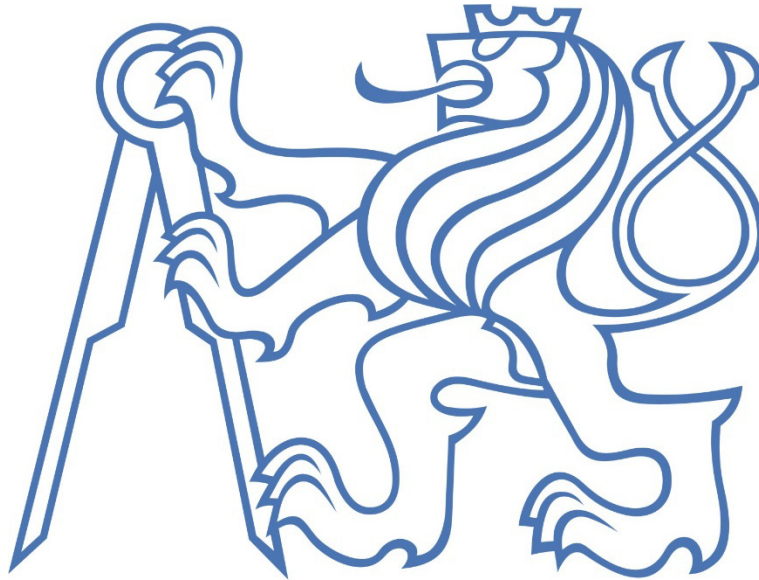


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh technologie výroby forem pro vibrolité materiály

Autor: Michal Slaný

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kyncl

2016/2017

Zadání

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je optimalizace výroby forem užívané pro žárovzdorné vibrolité materiály na základě dat společnosti P-D Refractories CZ a.s. V první části diplomové práce je podle literární rešerše rozepsána teorie používaných materiálů při zpracování technologického postupu výroby a zpracování forem a žárovzdorných tvárnic.

V další kapitole je popsán současný stav výroby společnosti P-D Refractories CZ a.s., včetně používaných pracovních postupů a od návržení formy až po uložení použitých forem.

Praktická část se skládá z nově navrženého postupu výrobního procesu na základě daných parametrů reflektující zlepšení stavu výroby z hlediska časové a finanční náročnosti.

Abstract

The purpose of this Diploma's thesis is optimization of developing and production process of vibrocasted refractory materials in the cooperation with P-D Refractories CZ a.s. In the first part of this thesis is literary research based on used materials during the technological process of production of refractory bricks.

In the next part of thesis is described current status of production the company P-D Refractories CZ, a.s. from design of the form to storage to the warehouse.

The practical part is based from newly developed procedure of production of refractory blocks. The background for improvement of manufacturing process were determined parameters to improve the duration and financial difficulty of the production.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, Ing. Jiřímu Kynclovi, za jeho odborný dohled a rady, které mi pomohly práci dokončit.

Dále bych rád poděkoval společnosti P-D Refractories CZ a.s., za poskytnutí důvěrných informací a podkladů, na jejichž základě jsem diplomovou práci zpracoval.

Obsah

Abstrakt	3
Abstract	3
Čestné prohlášení	4
Poděkování	5
1 Úvod	9
2 Vibrolité žárovzdorné materiály	10
2.1 Výroba žárovzdorných produktů v P-D Refractories CZ a.s.	10
2.2 Vlastnosti žárovzdorných vibrolitých materiálů	13
2.3 Složení	14
2.3.1 Surové materiály	14
2.3.2 Pojiva	17
2.3.3 Aditiva	17
2.4 Materiálové chování	19
3 Hodnocení stavu výroby forem	22
3.1 Současný stav výroby	22
3.2 Průběžná doba výroby tvarové cihly	23
3.3 Zhodnocení současného stavu	24
3.4 Požadavky na novou technologii výroby	25
3.4.1 Zkrácení výrobních časů	26
3.4.2 Snížení pracnosti výroby forem	26
3.4.3 Snížení podílu ruční práce	26
3.4.4 Využití nových kapacit	27
3.4.5 Zvýšení kvality výroby tvarovek	27
3.4.6 Metodika výroby	27
3.4.7 Snížení nákladů na skladování	28
3.4.8 Shrnutí požadavků	28
3.5 Požadavky na optimální formu	29
4 Analýza výrobního portfolia	30
4.1 Nezávislá analýza charakteristiky	31

4.1.1	Výška	31
4.1.2	Šířka a hloubka	32
4.1.3	Hmotnost	34
4.1.4	Jádro	35
4.1.5	Vnější tvar	36
4.1.6	Vnitřní tvar	36
4.1.7	Zhodnocení analýzy	37
4.2	Výběrová analýza charakteristik	38
4.3	Výběr výrobního představitele	42
5	Návrh materiálového řešení forem	45
5.1	Dřevo	45
5.2	Hliníkové slitiny	46
5.3	Plasty	46
5.3.1	Umělé dřevo	46
5.3.2	Pěny	46
5.4	Materiály pro úpravu funkčních ploch	49
6	Návrh konstrukčního a technologického řešení forem	54
6.1	Návrh koncepce řešení formy	54
6.2	3D tisk	54
6.2.1	FDM - Fused deposition modeling	55
6.2.2	SLA - Stereolitografie	56
6.2.3	PolyJet	56
6.2.4	Hodnocení	57
6.3	Odlití formy pomocí modelu tvarovky	58
6.3.1	Hodnocení	58
6.4	Obrábění dutin	59
6.5	Sestava dílů	59
7	Navržená konstrukční řešení	61
7.1	3D tisk dutiny	61
7.2	Monolitický odlitek	61
7.3	Dělený odlitek	63
7.4	Sestava obráběných dílů	65

7.4.1	Sestava bez podpůrného rámu	66
7.4.2	Sestava s podpůrným rámem	68
7.4.3	Stavebnice rámu	69
8	Testy obrábění	73
8.1	Obráběné materiály	73
8.2	Popis experimentu	74
8.3	Výsledky experimentu	76
8.4	Závěr experimentu	81
9	Závěr	82
10	Seznam použitých zdrojů	83
11	Seznam obrázků	85

1 Úvod

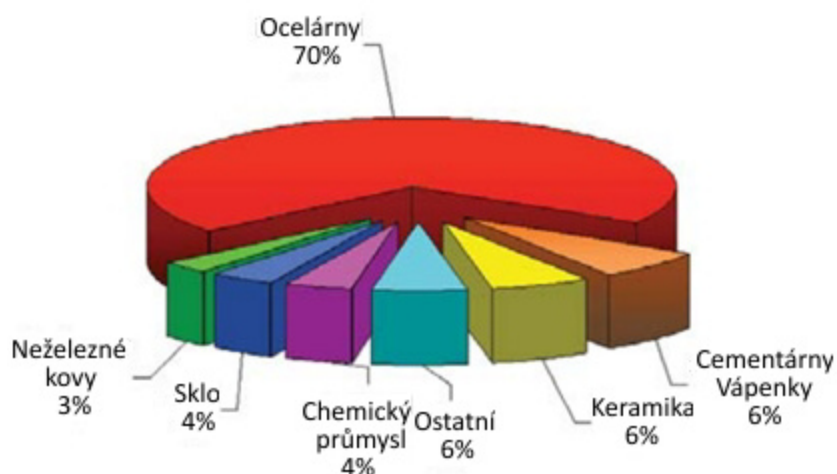
Závěrečná práce je napsána za spolupráce s jedním z největších dodavatelů žárovzdorných výrobků a surovin, se společností P-D Refractories CZ a.s., dříve známou jako Moravské šamotové a lupkové závody, a.s.

V diplomové práci je provedena odborná analýza současného stavu výroby vibrolitých tvarovek a již vyprodukovaného portfolia společnosti. Následně byl vypracován návrh nových výrobních technologií pro výrobu forem na odlévání tvarovek. Návrh byl vypracován z technologického a konstrukčního hlediska se zaměřením na zvýšení produktivity, snížení nákladů a celkovou optimalizaci a modernizaci výroby.

Závěrečná diplomová práce se v závěru zaměřuje na výběr vhodného řešení z navržených variant a ekonomické zhodnocení.

2 Vibrolité žárovzdorné materiály

Žárovzdorné stavební materiály, v anglické literatuře refractories, jsou důležitým prvkem pro celý průmysl a závisí na nich také jeho rozvoj. Hlavním odběratelem a naprosto závislým na tomto odvětví, je výroba a zpracování oceli, dle obrázku (1) představuje 70 % veškeré produkce.



Obrázek 1 - Graf použití žárovzdorných materiálů (1)

Materiály pro vibrolití jsou zvláštními druhy směsí určených pro výrobu žárovzdorných tvarových cihel. Využívají se především pro složité tvary cihel, které nelze vyrábět pomocí lisování nebo jiným způsobem. Ve společnosti P-D Refractories a.s., slouží výroba vibrolitím převážně jako doplňková činnost k technologii lisování, pro kusové až malosériové zakázky s vysokou tvarovou náročností.

2.1 Výroba žárovzdorných produktů v P-D Refractories CZ a.s.

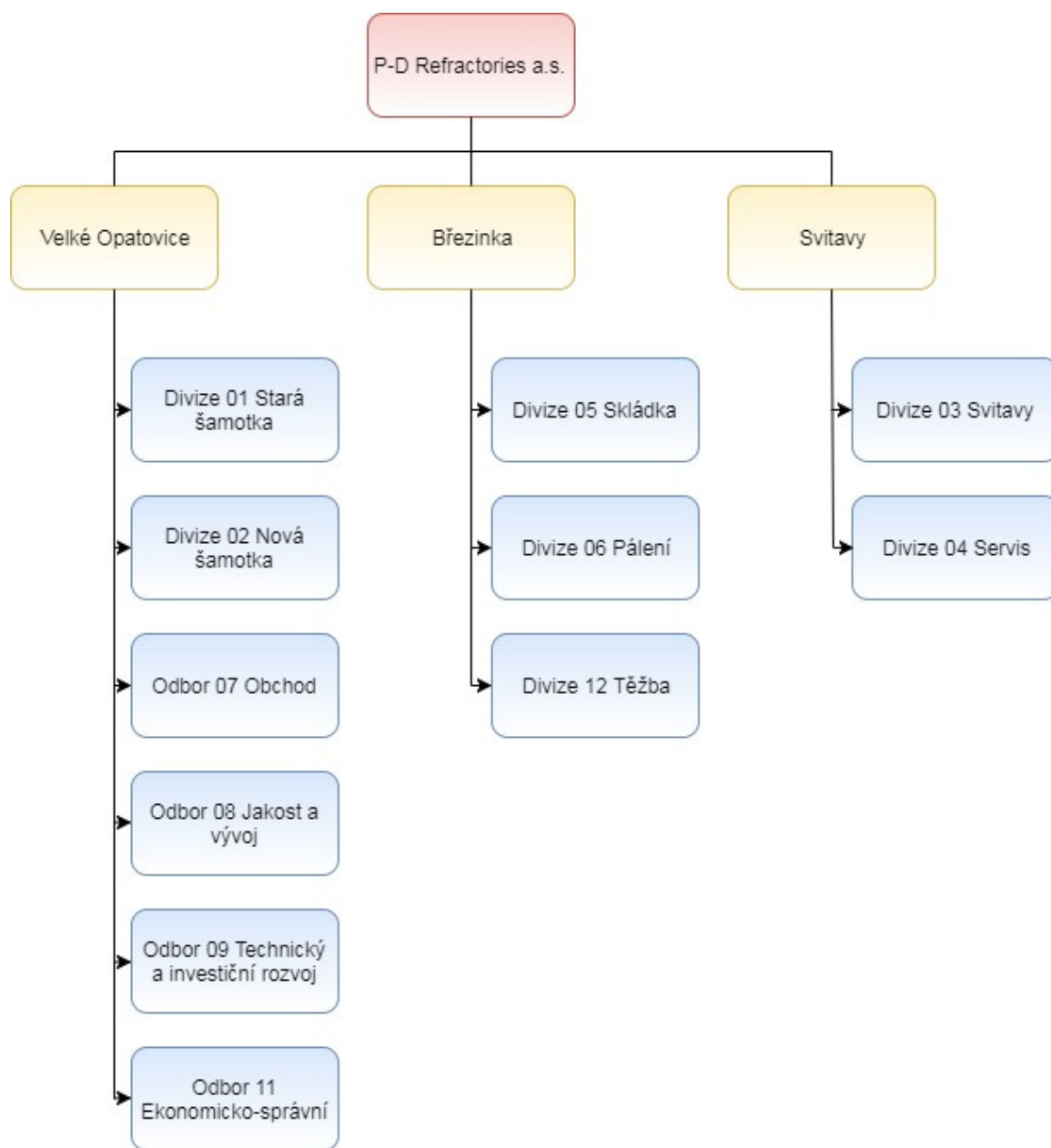
Společnost P-D Refractories CZ a.s., patří k největším světovým výrobcům a dodavatelům žárovzdorných výrobků a surovin. Hlavním odběratelem těchto produktů je kovozpracující průmysl. Produkty odebírá ve formě vyzdívek koksových pecí, vysokých pecí a ohříváčů větru. Dalším odběratelem je například energetický průmysl. V případě

těchto zakázek je společnost schopna plně vyhovět požadavkům na individuální návrh zákazníka.



Obrázek 3 Výrobní portfolio

Společnost P-D Refractories a.s., se v současnosti dělí na základní výrobní jednotky, jimiž jsou menší divize se samostatnou působností na různých místech republiky. Tyto výrobní divize se nachází ve Velkých Opatovicích, konkrétně se jedná o Divizi 01 - Stará šamotka a Divizi 02 - Nová šamotka, ve Svitavách, kde se nachází Divize 03 – Dinaska a Divize 04 Servis, v Březině Divize 06 - Pálení Anna a v Březince, kde se nachází Divize 12 - Těžba.



Obrázek 4 Rozdělní společnosti

2.2 Vlastnosti žárovzdorných vibrolitých materiálů

Žárovzdorností je nazývána schopnost dlouhodobě odolávat vysokým teplotám bez rapidního zhoršení fyzikálních a chemických vlastností.

Jako žárovzdorné jsou materiály definovány, pokud jsou schopny odolávat žaru vyššímu než 1500°C. Nad 1800°C jsou potom nazývány vysoce žárovzdornými. Základním prvkem žárovzdorných materiálů bývají převážně oxidy chemických prvků, případně jejich sloučeniny. Dále mohou být používány také karbidy boridy, nitridy případně uhlík ve zvláštních aplikacích.

Podle obsahu oxidů lze žárovzdorné hmoty rozdělit do skupin:

1. kyselé žárovzdorné materiály
 - dinas, kyselý šamot, křemičitan zirkonu
2. neutrální žárovzdorné materiály
 - hmoty na bázi korundu, mullitu, spinelidů a fosforitů
3. zásadité žárovzdorné materiály
 - hmoty na bázi magnezitu, chrom magnezitu a dolomitu

Podle vnitřních vazeb je možné žárovzdorné materiály rozdělit na materiály s:

- keramickou vazbou
- hydraulickou vazbou
- organickou chemickou vazbou
- anorganickou chemickou vazbou

2.3 Složení

2.3.1 Surové materiály

Převážná většina produkce žárovzdorných hmot je stále vyráběna z nerostných surovin získávaných těžbou. Neustále vzrůstající nároky na lepší vlastnosti materiálu, úměrně zvyšují nároky na potřebnou kvalitu a čistotu surovin, které se k výrobě žárovzdorných materiálů používají. Jsou stále více využívány syntetické základní materiály. Mezi nejběžnější surové materiály patří například jíly a křemičité písky.

Tabulka 1 Surové materiály 1

Typ surového materiálu	Hlavní minerální fáze	Hlavní chemické složky	Komentáře
Křemenec, křemičitý písek	Křemen	> 97 % SiO ₂	Velký nárůst objemu při vypalování
Tavený křemen	Sklo	> 99.8 % SiO ₂	Velmi malá tepelná roztažnost nad 1000 °C
Hlinitý jíł	Křemen	> 83 % SiO ₂ , 4-12 % Al ₂ O ₃	Jílem lepený křemenný písek, použití pro monolitické produkty
Pyrofylyt	Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂ ·2H ₂ O	20-30 % Al ₂ O ₃ , nepatrný obsah alkálií	Lze používat nepálené.
Žárovzdorné jíly	Kaolinitické a další jílové minerály (křemen)	20-45 % Al ₂ O ₃ , < 3 % Fe ₂ O ₃ , < 3 % Na ₂ O + K ₂ O	Speciální druh: kaolin, křemen, jíł plastové pojivo. Při vypalování transformace do mullitové, kristobalitové a sklovité fáze
Šamot (pálený jíł)	mullite (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂) skleněné fáze	Žárovzdorné jíly	Vypalovací teploty cca 1200-1500 °C v závislosti na obsahu Al ₂ O ₃ a alkalického oxidu.
Sillimanit, andalusit, kyanit	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ , Různé krystalové struktury a hustota	60-65 % Al ₂ O ₃ , nízký obsah alkalických oxidů	Přeměna mullitu a SiO ₂ nebo sklovité fáze začíná na cca 1250 °C v závislosti na chemickém složení a velikosti zrna.
Mullit	mullit	50-70 % Al ₂ O ₃	Předvypálená dávka z kaolinitických jíłů obsahuje bauxit
Slinutý mullit, tavený mullit	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ 2Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	72-75 % Al ₂ O ₃	Pórovitost a velikost krystalů
Žárovzdorný bauxit	korund, mullit	85-88 % Al ₂ O ₃ , < 4% TiO ₂ , < 2 % Fe ₂ O ₃ ,	Při vypalování bauxitu zůstává pórovitost. Velikost zrna <10%
Slinutý korund	Korund (3-Al ₂ O ₃)	> 99.5 % < 0.5 % Na ₂ O	Pórovitost slinutého zrna 10%, objemové změny 2%
Hnědý korund		94-97 % Al ₂ O ₃ cca 3 % TiO ₂	Vypalování v elektrické obloukové peci
Nadouvaný korund	korund	> 99.5 % < 0.5 % Na ₂ O	Bubliny cca průměru 2-4 mm, obvykle vytvořené foukáním v tavenině
Kalcinované oxidy hlinité	γ-Al ₂ O ₃ korund	> 99.5 % < 0.5 % Na ₂ O	Základní materiál: speciální forma reaktivního oxidu hlinitého
Hexahlinitan vápníku	CaO · 6 Al ₂ O ₃ (CA ₆) CaO, 2 Al ₂ O ₃	> 90 % Al ₂ O ₃ 8.5 % CaO	Hydrotermální výrobu pórovitost 75%, objemová hmotnost 0,75 g/cm ³
Hexahlinitan vápníku			Slinování směsi z Al ₂ O ₃ a CaO surového materiálu

Tabulka 2 Surové materiály 2

Typ surového materiálu	Hlavní minerální fáze	Hlavní chemické složky	Komentáře
Slinutý oxid Tavený oxid hořečnatý	Hydrogen- fosforečnan, křemičitan vápenatý, křemičitany vápenaté	85-99.8 % MgO, 0.1-3.5 % CaO, 0.1-3% SiO ₂ , 0.1-8%Fe ₂ O ₃ , < 0.3 % B ₂ O ₃ , 97-99.8 %MgO, < 2 % CaO, < 1 % SiO ₂ , <0.3 % Fe ₂ O ₃	Pórovitost zrna, slinuté magnézie <8%, tavený oxid hořečnatý <2%
Slinuté a tavené dolomity	CaO	56-62 % MgO, 36-40 % CaO,	Citlivý na hydrataci
Slinuté a tavené vápno	CaO	> 98 % CaO	z CaCO ₃
Chromit	(FeO,MgO)•(Cr ₂ O ₃ ,Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	11-20 % MgO 32-50 % Cr ₂ O ₃ 12-27 % Al ₂ O ₃ < 6 % SiO ₂	
Oxid hořečnatý, chromit	Periklas spinel	Obvykle nad 25 % Cr ₂ O ₃	Slinování granulí magnesia a chromitu
Oxid hořečnatý dolomit	Periklase CaO	MgO and CaO	Slinování vápence a oxidu hořečnatého
Picrochromite	(MgO•Cr ₂ O ₃)	19 % MgO 79 % Cr ₂ O ₃	Vyrobeno z magnesia a chrom oxidu
Slinutý a tavný spinel	(MgO•Al ₂ O ₃)	66-90 % Al ₂ O ₃ 9-33 % MgO	Vyrobeno z magnesia a oxidu hlinitého
Olivín	Forsterit (2MgO• SiO ₂)- fayalite (2FeO •SiO ₂)	40-50 % MgO 35-45 % SiO ₂ <6 % Fe ₂ O ₃	Horniny obsahující olivín
Zirkon	Zirkon (ZrSiO ₄)	66 % ZrO ₂ +HfO ₂	Extrahované z písku, velikost zrna <0,3 mm, nad 1450 ° C dekompozice
Oxid zirkoničitý	Baddeleyite (monoklinický)	> 99 % ZrO ₂ > 94 %ZrO ₂ 2-6 % CaO, MgO, Y ₂ O ₃	Prášek vyrobený chemicky nebo tepelným rozkladem křemičitanu zirkonu
Oxid chromu	(Cr ₂ O ₃)	> 98 % Cr ₂ O ₃	Jemný prášek
Karbid křemíku	SiC (Si, free C)	> 93 % SiC	Vyroběn z SiO ₂ a uhlíku
Přirodní grafit	Grafit	75-98.5 % C	S lupínkovým grafitem
Diatomit (křemelina)	Obsahuje SiO ₂	> 75 % SiO ₂	Jemné porézní SiO ₂
Perlit	Sklo	65-80 % SiO ₂ ,12- 16 % Al ₂ O ₃	Vyrobeno ohříváním křemičité vulkanické horniny na cca 1000 °C
Vermikulit	Slídy	45 % SiO ₂ , 31% MgO, 13 % Al ₂ O ₃ , 7 % Fe ₂ O ₃	Velmi lehký

2.3.2 Pojiva

Vhodné pojivo, nebo jejich kombinace, je přidáváno do směsi surového materiálu. Tím lze zajistit dostatečná pevnost polotovaru během jednotlivých kroků procesu výroby tvarovky. Pojiva ovlivňují pevnost v tahu za vysokých teplot a také korozní odolnost.

Tabulka 3 Pojiva

typ pojiva	podíl	komentář
jíly plastické jíly	< 25 %	Zlepšují pevnost po vysušení. Keramická vazba začíná na cca. 1000°C
hliníkové cementy	< 25 %	40-50 % Al ₂ O ₃ , 38 % CaO, 3-10 % Fe ₂ O ₃ , 4-6 % SiO ₂ 70-80 % Al ₂ O ₃ , 19-27 % CaO hydraulická vazba do 600°. při dehydrataci vzniká keramická vazba nad 1000 °C
hlinitý roztok	< 5 % P ₂ O ₅	vytvrzení začíná na cca 200°C kondenzační reakce při 1300°C tvorba AlPO ₄ ; nad 1500 °C odpaření P ₂ O ₅
hořečnatý fosfát	< 5 %	Přísada jemné MgO způsobuje rychlé vytvrzení po přidání vody.
kyseliny fosforečné + MgO	cca 5%	Rychlé vytvrdnutí díky MgO a kyseliny zajišťují lepší sušení.
alkalické křemičitany (vodní sklo)	< 10 %	Pomáhají vytvrzení při pokojové teplotě reakcí CO ₂ nebo za pomoci dalších tvrdidel
etyl silikát (Si(C ₂ H ₅ O) ₄)		Napomáhá při lití.
síran hořečnatý (MgSO ₄ • 7H ₂ O)	cca 5 %	Pojivo pro chemicky vázané cihly.
síran hlinitý	cca 5 %	Použití především pro plastové směsi pro zvýšení pevnosti za sucha.
gely SiO ₂ a Al ₂ O ₃		pojiva pro keramicko vláknité materiály

2.3.3 Aditiva

Úkolem aditiv, při výrobě žárovzdorných produktů, je upravit jejich zpracovatelnost. Napomáhají upravit vlastnosti pojiva a tím pádem procesu tuhnutí a tvrzení. Aditiva lze podle jejich účinku rozdělit do několika kategorií na stabilizátory, koagulanty, inhibitory, plastifikátory a nadouvadla.

Stabilizátory jsou přísady bránící změně některých chemických složek obsažených ve směsi během tuhnutí a také možným krystalickým změnám. Například CaO se používá pro stabilizaci sloučenin zirkonu.

Koaguláty mají za úkol ve spojení s pojivy zajistit ztuhnutí směsi před samotným vypálením cihly.

Inhibitory jsou používány k úplnému potlačení nebo zpomalení některých chemických reakcí. Například přidáním MgO je možné zabránit růstu krystalů korundu ve struktuře během vysokých teplot. Některými přísadami je možné zabránit příliš rychlému ztuhnutí namíchaných směsí, které by jinak bylo obtížné lisovat.

Plastifikátory umožňují vylepšit chování směsi během zpracovávání. Například upravením povrchového napětí, změnou polárního chování rozptýlených částic a jejich velikostí. Těchto efektů lze dosáhnout například přidáním bentonitu, polyvinyl chloridu, dextrinu a škrobů. Dále je možné vylepšit chování použitím tzv. superplastifikátorů, které umožňují dále snížit viskozitu směsi nebo snížit množství použité vody a tím zkrátit čas sušení cihly.

Dalšími přídavnými materiály jsou nadouvadla, která vytváří ve směsi uzavřené póry, a tyto směsi jsou výhodnější pro izolační vyzdívky. Materiály jako kyanit nebo křemen, které dokáží kompenzovat objemové změny při zahřívání a chladnutí a tím zabraňují vzniku trhlin. Keramická či organická vlákna se používají pro zlepšení mechanických vlastností.

2.4 Materiálové chování

Zásadní vlastností vibrolitých žárovzdorných hmot, jsou objemové změny, ke kterým dochází během procesu tuhnutí. Směs se vlivem reakcí pojiva zmenšuje a v případě dutin a vnitřních rozměrů je nutné tyto změny kompenzovat vhodným řešením formy.

Na základě zkušeností a znalosti chování vibrolitých materiálů, bylo zaměstnanci P-D Refractories vybráno následujících 5 vibrolitých materiálů, které reprezentují rozdílné typy vibrolitých hmot:

1) A45FB

Jedná se o nízkocementovou hmotu (LCC), obsah vysocehlinitanového cementu (CAC) je 5 %. Hlavní podíl ostřiva je tvořen lupkem A111VS, max. velikost zrna 8 mm. Hmota je bez vláken.

2) A75MF

Jedná se o bezcementovou hmotu (NCC). Hlavní podíl ostřiva je tvořen mullitem, max. velikost zrna 5 mm. Hmota je bez vláken.

3) A65SF

Jedná se o ultranízkocementovou hmotu (ULCC), obsah CAC je 2 %. Hlavní podíl ostřiva je tvořen silimanitem, max. velikost zrna 5 mm. Hmota je bez vláken.

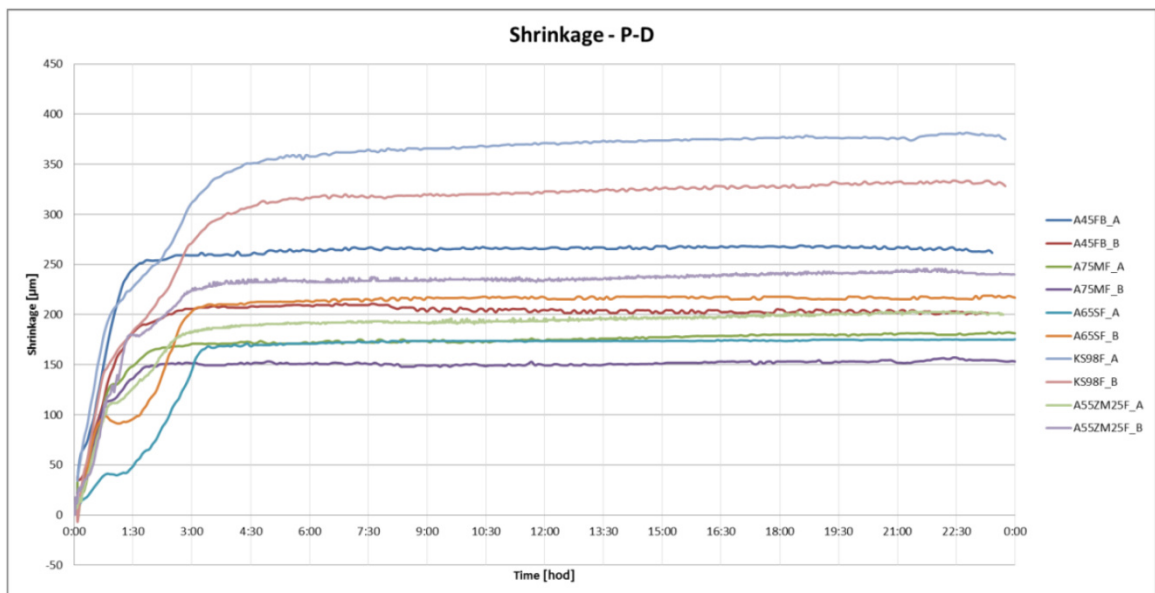
4) KS98F

Jedná se o hmotu s bílým portlandským cementem (PC 52,5N), obsah cementu je 2 %. Hlavní podíl ostřiva je tvořen křemenným sklem, max. velikost zrna 4 mm. Hmota obsahuje polypropylénová vlákna.

5) A55ZM25F

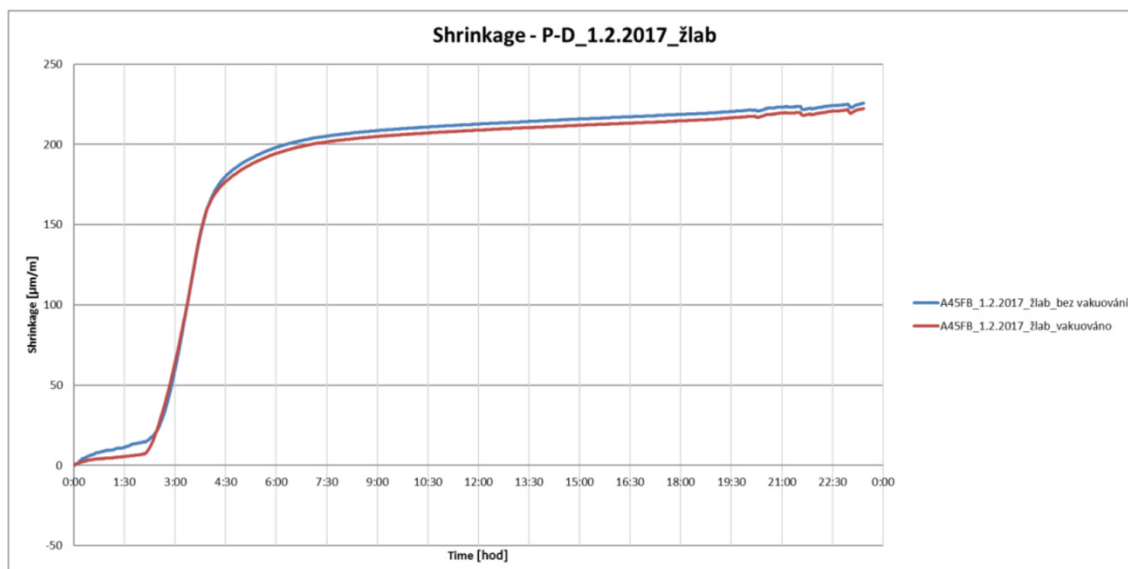
Jedná se o bezcementovou hmotu (NCC). Hlavní podíl ostřiva je tvořen zirkonmullitem, max. velikost zrna 5 mm. Hmota je bez vláken.

Pro analýzu smrštění vybraných typů vibrolitých materiálů bylo použito laboratorní zařízení Shleibinger Geräte, na kterém byly měřeny absolutní smrštění jednotlivých vzorků. Ze srovnání těchto hodnot v na Obrázek 5 je zřejmé, že největším smrštěním trpí vzorek A45FB.



Obrázek 5 Relativní smrštění vibrolitých směsí

V rámci stanovení objemových změn byla v návaznosti na předešlé výsledky vybrána zmíněná směs A45FB, u které byla stanovena absolutní hodnota objemových změn v mm/m. Taktéž pro tuto směs byl zároveň sledován dopad jejího vakuování na objemové změny.



Obrázek 6 Smrštění směsi A45FB

Jak je vidět na Obrázek 6, k markantnímu stažení začne docházet zhruba po dvou hodinách, po čtyřech hodinách dosáhne 80 % maxima a poté se rychlost smršťování zvolna zpomaluje.

Z těchto provedených testů vyplývá konečná hodnota smrštění, která je stanovena na 0,223 mm/m.

3 Hodnocení stavu výroby forem

Před vlastním návrhem nové možné technologie výroby, bylo potřeba analyzovat slabá místa stávající výroby a jasně je shrnout do požadavků, pomocí kterých by mělo být dosaženo zlepšení výroby.

3.1 Současný stav výroby

V současnosti nemá výroba forem ve společnosti pevný pracovní postup. Nejsou zpracovány technologické postupy a vše je založeno pouze na zkušenostech a umu pracovníků ve výrobě. Proto se velmi těžko určuje doba výroby formy. Stanovená doba je opět na odhadu pracovníka. Při výrobě se používají konvenční stroje na obrábění dřeva, proto se složité výrobky vyrábějí problematicky a ne s potřebnou tvarovou nebo geometrickou přesností. Formy také často nelze rozměrově kontrolovat a kontrolují se pouze rozměry, které lze změřit konvenčními měřicími přístroji. Zbylé rozměry je možné měřit pouze po odlití tvarovky a následná úprava formy je mnohem složitější.

Dokumentace výroby a systematizace také není v nejlepším stavu. Na základě poptávky k výrobním podkladům zákazníka kontaktuje Výrobní divize servisní divizi s úkolem stanovit cenu a termín výroby. V případě kladné odezvy Výrobní divize a zákazníka, začne servisní divize zpracovávat potřebnou dokumentaci pro výrobu v podobě 3D modelů a následně výkresů zadané tvarové cihly. Na výkresech jsou technologem následně ručně doplněny hodnoty rozměrů, které je potřeba kompenzovat kvůli smrštění tvarovky během výpalu. Takto doplněný výkres se stává podkladem pro výrobu formy. Vedoucí výroby předá vedoucímu dílny výkres s další dokumentací, jenž obsahuje název formy, číslo výrobní zakázky, odhadovaný čas na výrobu formy spolu s materiály, ze kterých bude forma zhotovena.

Výkresy pro poptávanou formu, samotnou si tvoří sami pracovníci, jimž byla zadána její výroba, pouze na základě výkresu cihly upraveného technologem. K celé formě jsou bohužel nakresleny pouze pomocné skici a kompletní zpětně dohledatelná

dokumentace tak není dostupná. Většina forem se skládá z minimálně pěti částí představujících čtyři stěny a dno, na které mohou dále připevněny další díly pro složitější tvarové prvky.

Další možností pro jednoduché tvary je výroba modelu tvarovky na základě upraveného výkresu, tento model je připevněn na základní desku. Model se vyrábí buď konvenčními způsoby, nebo se obrábí na CNC centru v kooperaci s jinými dodavateli. Dále se vyrobí základní rám formy, který je postaven na desce s připevněným modelem. Do dutiny mezi rámem a modelem je pryskyřice, která bude po ztuhnutí a vyjmutí modelu tvořit formu.

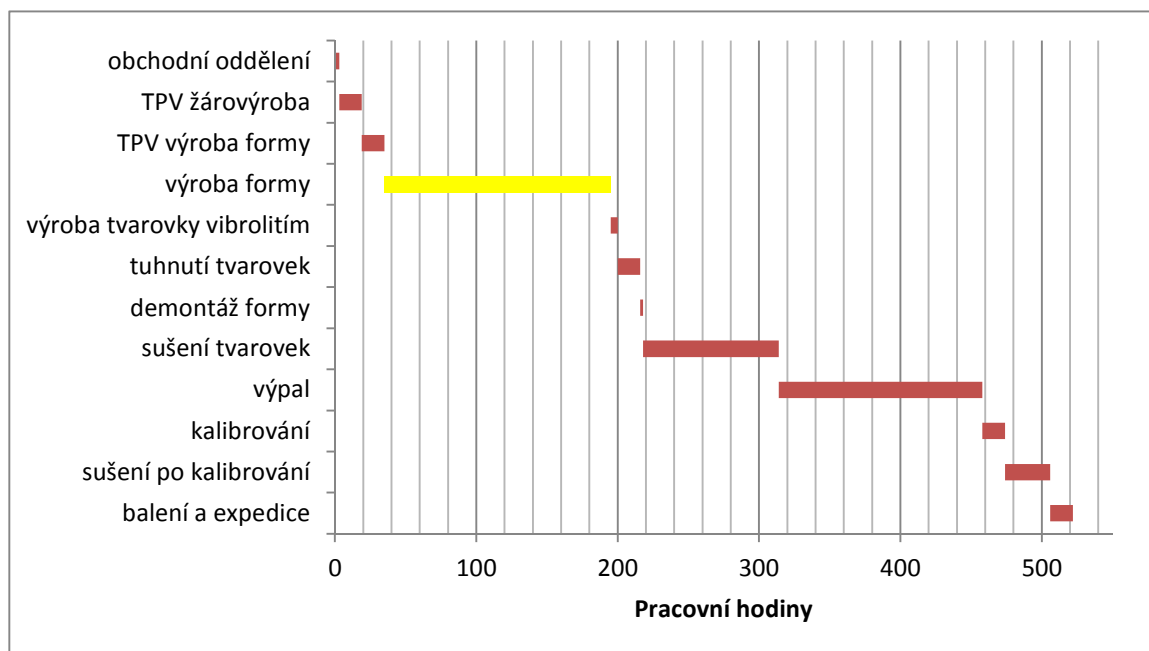
Rozměrová kontrola formy se také neprovádí v plném měřítku, ale kontrolují se pouze rozměry jdoucí měřit jednoduchými konvenčními měřidly, kterými je současná dílna vybavena. Rozměry, které nelze kontrolovat na formě, jsou měřeny až na hotové odlité zkušební tvarovce.

3.2 Průběžná doba výroby tvarové cihly

Částečně byla popsána současná struktura výroby tvarovek v bakalářské práci (2), která obsahovala hodnocení časové náročnosti jednotlivých operací v Ganttově diagramu (Obrázek 7). Tento diagram je ovšem příliš obecný a obtížně reflektuje složitost různých tvarovek. U jednodušších druhů tvarovek je výroba prováděna ve větších sériích, proto může výroba samotných tvarovek zabrat více času než výroba formy.

Toto tvrzení platí, pokud by se výroba nevydala souběžnou produkcí více forem a tím i tvarovek. Stanovení optimálního počtu forem není bez systematizace návrhu příliš možné.

Pro kusové tvarovky zvláště velké hmotnosti, se návrh a výroba formy stává dominantní částí celého procesu.



Obrázek 7 Ganttův diagram výroby tvarovky

3.3 Zhodnocení současného stavu

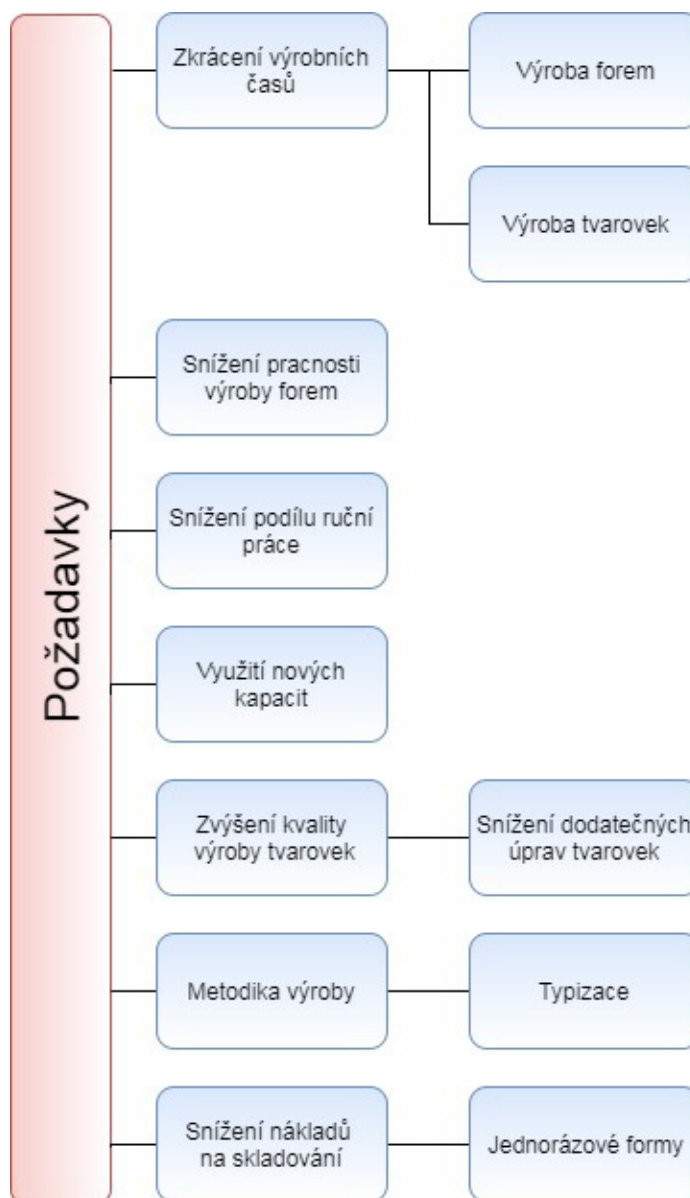
Popsaný stávající stav výroby není pro zvyšující se množství zakázek dále využitelný. Výrobní dokumentace forem je dostupná pouze v ručně kreslené podobě, která navíc nemusí zahrnovat všechny použité prvky. To zhoršuje její snadné uchování a případné použití jako podklad pro podobné formy nebo opětovnou výrobu stejné formy pro případ dodatečné výroby cihly, pokud zákazník například provádí opravu zařízení. Samotná výroba formy je také závislá spíše na zručnosti a zkušenostech pracovníků, kteří je sami vytváří.

Neexistuje tedy jednotná metodika, jak formy navrhovat a každá forma je také unikátní bez jakékoli unifikace alespoň vnějších rozměrů, jejichž předběžná výroba by mohla ušetřit čas přípravy. Významný podíl ruční výroby také prodlužuje výrobní časy a zhoršuje její opakovatelnost. Také klade větší důraz na měření, které je se současným vybavením obtížné a případné chyby tvaru nebo rozměrů mohou být odhaleny až po zkušebním lití, což může představovat zbytečné prodloužení výrobního času.

Velká míra pracnosti spolu s náklady vyloženými na vytvoření formy, si také vynucuje, pro zmíněné případné opravy zákazníka, skladovat již použité formy. Což s sebou nese další dodatečné náklady, které by mohly být odstraněny.

3.4 Požadavky na novou technologii výroby

Zmíněné nedostatky a rezervy v možných postupech stanovují požadavky, kterými by mělo být dosaženo zvýšení efektivity práce, snížení časových nároků a ideálně také snížit současné vysoké náklady na materiál a lidskou práci.



Obrázek 8 Požadavky na novou technologii výroby

3.4.1 Zkrácení výrobních časů

Na Ganttově diagramu časové náročnosti výroby (Obrázek 7) je patrné, že z celého procesu výroby tvarovky zabírá vytvoření formy více než třetinu výrobního času, což v závislosti na složitosti formy může představovat 100 pracovních hodin a více. Zkrácení produkce formy může představovat snížení nákladů na vynaloženou práci, dále zrychlit proces dodání zakázek a získání větších kapacit pro potenciální růst množství vykonaných zakázek.

Při snížení cenové náročnosti forem a urychlení jejich výroby, může v případě potřeby vyústit ve výrobu více forem na zakázky s větším množstvím stejných kusů. Z tohoto důvodu by mohlo být umožněno souběžné lití více cihel najednou a v návaznosti urychlení výroby tvarovek. Díky tomu bude možné další uvolnění kapacit a rozšíření výroby, stejně jako potenciální možnost rychlejšího dodání zakázek.

3.4.2 Snížení pracnosti výroby forem

Pracnost produkce kombinuje dohromady několik vnějších požadavků, které je možné označit jako největší omezení konstrukce a výroby za stále stejných nebo podobných výrobních procesů. Tyto procesy mohou být buď z pohledu konstrukce typizovány, nebo z pohledu výroby automatizovány tak, aby došlo primárně k co největší minimalizaci nákladů.

3.4.3 Snížení podílu ruční práce

Jak bylo řečeno v kapitole 3.3, stávající vysoký podíl ruční práce, především truhlářů, představuje vysoké nároky na čas a případnou nemožnost opakovatelnosti výroby. V nově navržené technologii by tento faktor měl být co nejvíce potlačen a nahrazen prací nových CNC strojů, které jsou schopny vysoce produktivně obrábět s daleko větší přesností, než je v současnosti dosahováno.

Číslicové řízení rovněž přináší daleko širší možnosti výrobitelných tvarů a umožňuje tak zcela jiný přístup k úvodnímu konstrukčnímu návrhu formy.

3.4.4 Využití nových kapacit

V současné době již Divize ve Svitavách vlastní pětiosou modelářskou frézku, jejíž nově využitelné kapacity by měly být ideální možností pro výrobu forem. Toto řešení představuje nové a rychlejší možnosti výroby přímo uvnitř Výrobní divize.

3.4.5 Zvýšení kvality výroby tvarovek

Jakost povrchu tvarovek, byť není z pohledu funkce většinou příliš důležitá, je pro zákazníka částečně ukazatelem kvality a zvládnutí technologie jejich výrobcem. Z tohoto důvodu, by měla navržená technologie poskytnout co nejlepší povrch přímo odlitím za účelem vyhnutí se pozdější nutnosti cihly vyrábět s přídavkem a následně broušeny, což prodlužuje čas na výrobu a také zvyšuje náklady.

3.4.6 Metodika výroby

Zavedení metodických postupů pro návrh forem, by mohlo přinést snížení zátěže na vedoucí pracovníky konstrukce a technologie. Rovněž zavedení společných typizovaných prvků, jako je například vnější rám formy, by přineslo urychlení jak návrhu, tak výroby. Větší důraz by měl být kladen na uchování výrobní dokumentace, která společně s využitím nových kapacit v podobě CNC frézky, může zabezpečit zjednodušení konstrukce a výroby u forem tvarově podobných cihel nebo různých variací jedné cihly.

3.4.7 Snížení nákladů na skladování

Současné formy jsou pro případ opakované výroby skladovány několik let v prostorách P-D Refractories CZ a.s. Možnost využití levně a rychle vyrobitelné formy, byť s omezenou životností, kterou by bylo možné v případě nutnosti rychle vyrobit, by přineslo zmenšení nutných prostor pro jejich uložení a tím pádem odstranění části nákladů na prostory.

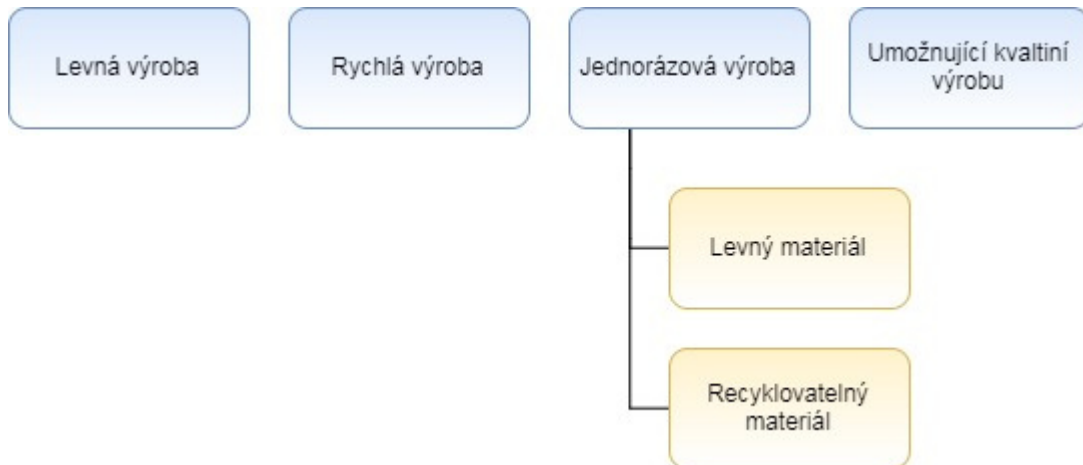
3.4.8 Shrnutí požadavků

Všechny tyto požadavky vyjmenované v předchozích kapitolách, lze v jádru vystihnout, jako snahu o snížení nákladů a zkrácení výrobního procesu. Zkrácením výrobního procesu je myšleno převážně snížení pracnosti a veškerých vedlejších časových nákladů tak, aby bylo opět dosaženo co nejnižší ceny výroby a maximální efektivity.

Požadavky na samotné tvarovky a formy se vzájemně ovlivňují, a proto je potřeba řešit celou technologii výroby najednou. Kvalita ploch cihel je přímo závislá na kvalitě ploch formy, a pokud se chceme vyhnout dodatečným úpravám broušením, jež mohou prodloužit výrobní čas a zvýšit náklady, je nutné se na tuto charakteristiku zaměřit u počátku navrhování forem. Byť jakost povrchu není z funkčního hlediska většinou výrazným faktorem, z pohledu zákazníka může být ukazatelem kvality zpracování a je potřeba se na ní zaměřit.

3.5 Požadavky na optimální formu

Výrobní požadavky na nový druh forem se dají shrnout do několika jednoduchých charakteristik:



Obrázek 9 Vlastnosti ideální formy

Nejnižší náklady jsou samozřejmě důležitým faktorem. Rychlá výroba a jednorázová výroba, by mohly přinést výraznou změnu ve výrobě díky možnosti vyrobit více forem dle jednoho výrobního postupu a urychlit tím výrobu tvarovek souběžnou výrobou. Současně by také mohlo dojít ke snížení nákladů na skladování forem pro případy možných oprav či opětovného použití. Při použití současných výrobních technologií, by mohla být veškerá potřebná dokumentace uložena pouze v datové podobě a v případě nutnosti rychle použita k výrobě nové formy, která by nemusela být skladovány fyzicky.

4 Analýza výrobního portfolia

Před návrhem výrobní technologie byla provedena analýza skladby již vyrobených zakázek, které P-D Refractories CZ a.s. vyrobila, za účelem identifikovat společné znaky výrobků a samozřejmě získat přehled o a samotných tvarovkách a formách. V letech 2013 až 2016 bylo vyprodukováno celkem 428 druhů tvarovek, k nimž bylo vyrobeno 570 forem pro potřeby vylisování 10 897 kusů tvarovek. K vyhodnocení byla použita Paretova (ABC) analýza, na základě které lze graficky znázornit spektrum produkce. Cílem byla snaha najít základní společné znaky vyráběných forem, a bylo možné navrhnout jednotnou technologii. Samotný soubor dat je majetkem P-D Refractories CZ a.s., a proto není obsahem této práce jako její příloha.

K jednotlivým druhům tvarovek podrobených analýze, byly podle výkresu přiřazeny charakteristiky: výška, šířka, délka, hmotnost, použití jádra, zvláštní vnější tvary a vnitřní tvary, které ovlivňují konstrukci formy. Rovněž byly sepsány také náklady na materiál a náklady na práci pro jednotlivé druhy tvarovek.

Pro délkové rozměry bylo zvoleno jednoduché rozdělení intervalu po 100 mm. Rozměr výšky je kolmý na plochu určenou k lití materiálu do formy. Hmotnost byla kvůli většímu rozptylu hodnot rozdělena na řadu 1, 3, 6, 10, 18, 30, 50, 120, 180, 250, 315, 400, 500, 800, 1200 kg, aby lépe pokryla rozložení hodnot. Tvarové charakteristiky byly rozděleny pouze na „ano“ a „ne“.

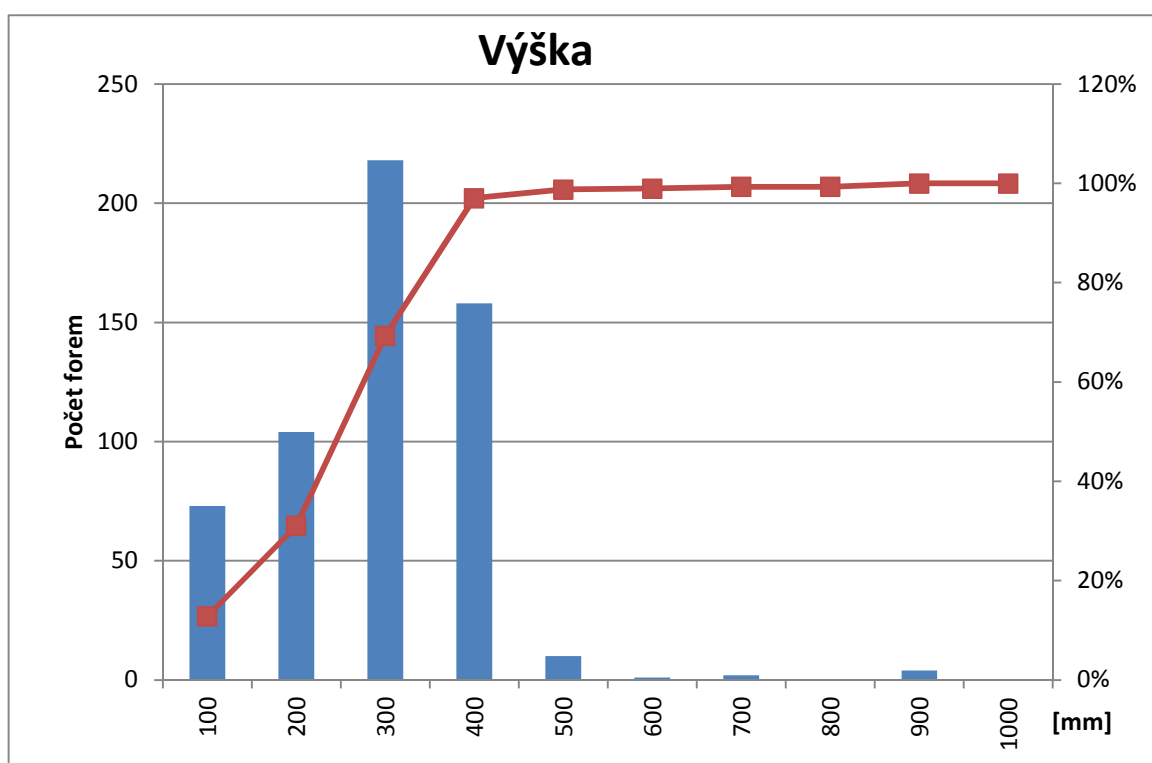
Úvodní analýza měla za úkol nastínit rozložení hodnot v jednotlivých charakteristikách a získat hodnotu rozměru, které odpovídá přibližně 80 až 90 % vyrobených forem. Po získání těchto hodnot byla provedena obdobná analýza, v níž ovšem dochází k postupnému odfiltrování nesplňujících rozměrů. Po dokončení postupného výběru bude možné z úvodního souboru dat vyplynout většinová množina portfolia, která představuje jádro produkce. Z této množiny může být následně vybrána zastupující tvarovka, která může být použita pro hodnocení nově navržených technologií.

4.1 Nezávislá analýza charakteristiky

Prvotní zpracování dat slouží k získání přehledu o skladbě výroby a k pomoci získání hodnot jednotlivých charakteristik, které by mohly spojovat vyrobené tvarovky. Dále je analýza charakteristik důležitá z pohledu návrhu technologie výroby, která by měla nároky na výrobu co největšího množství tvarovek.

4.1.1 Výška

Vyhodnocení výšky není obtížné a jasně vyplývá, že 97 % produkce nepřesahuje 400 mm. Nejvíce zastoupeny jsou tvarovky s výškou v intervalu 200 ÷ 300 mm. Prozatímni nejvyšší tvarovka v portfoliu měřila do 900 mm.

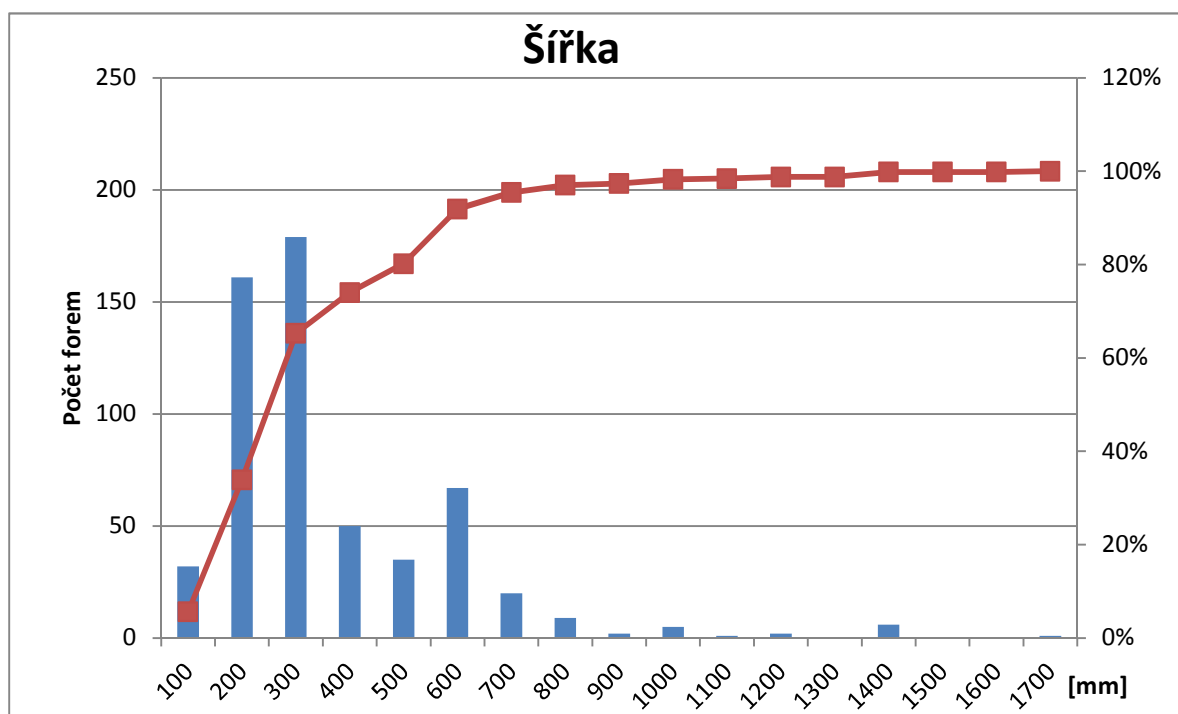


Obrázek 10 Výška - nezávislá

4.1.2 Šířka a hloubka

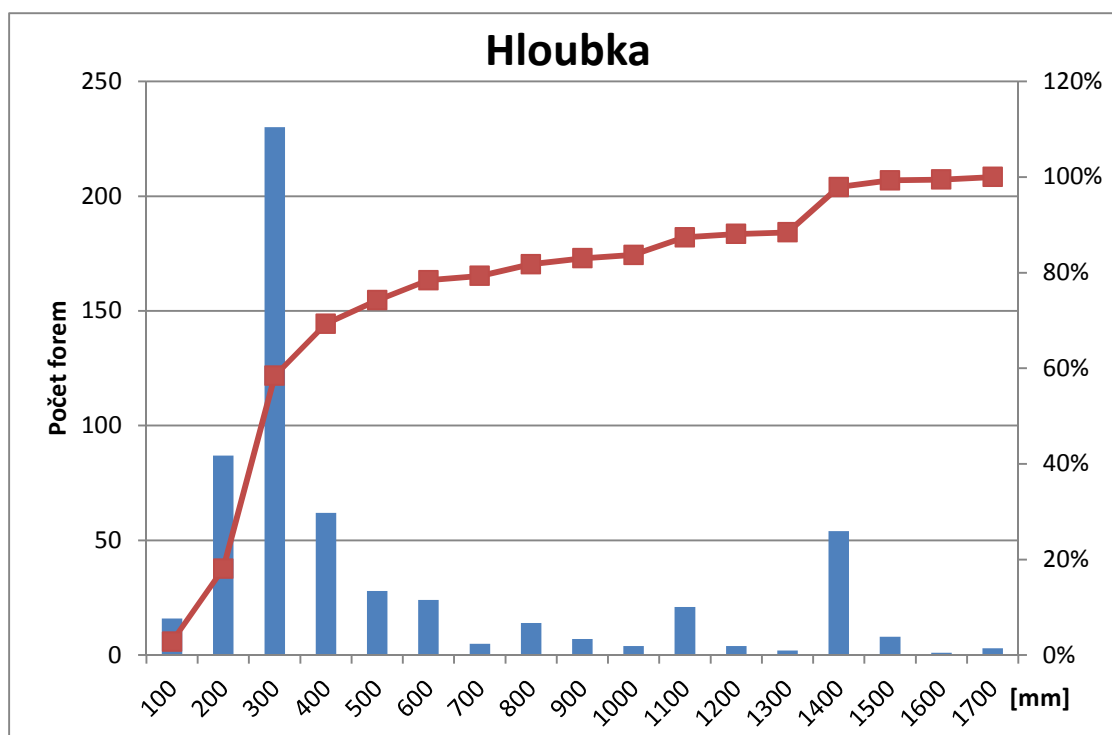
Šířka a hloubka mohou být z pohledu identifikace zaměnitelné, proto byla šířka brána, jako větší z obou rozměrů. Hodnocení Paretovou (ABC) analýzou v tomto případě není tak jasné jako u výšky.

Nejvýraznější počty tvarovek podle výšky tvoří skupiny v intervalech 100 ÷ 200 mm a 200 ÷ 300 mm. Jako interval spojující většinu tvarovek byl zvolen rozměr do 500 mm tvořící 80 % produkce. Maximální zaznamenaný rozměr je menší než 1 700 mm.



Obrázek 11 Šířka - nezávislá

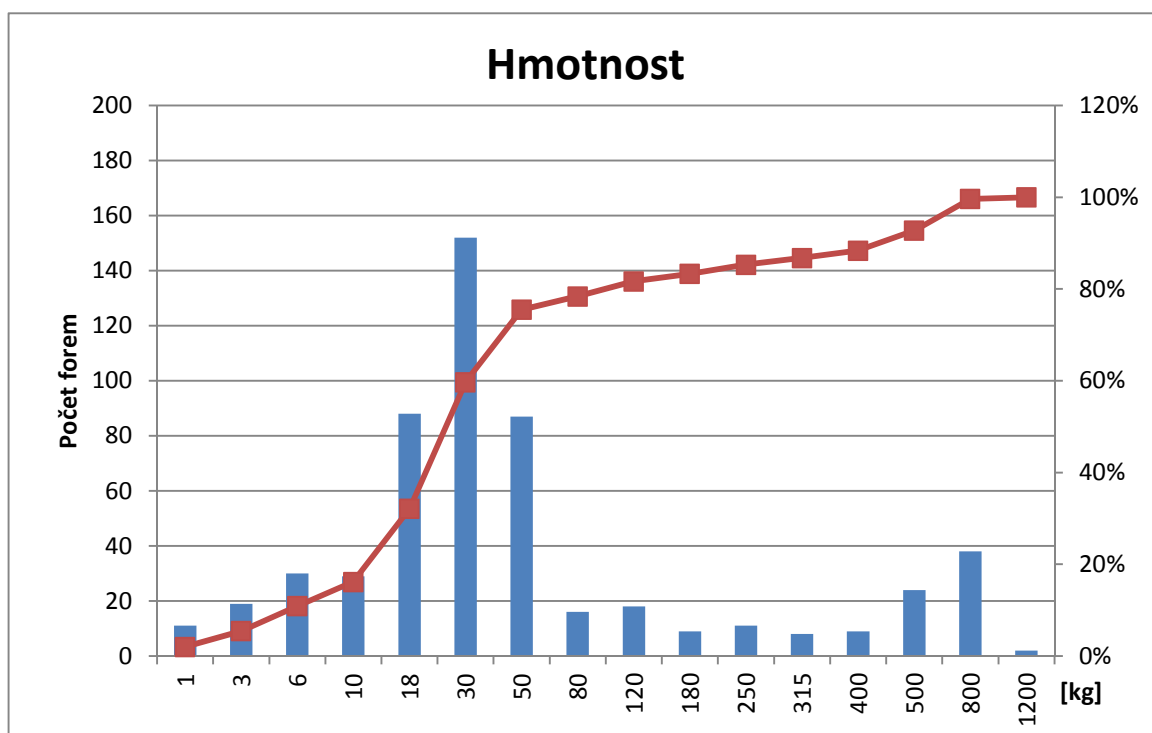
Největší podíl je tvořen intervalem rozměru 200 ÷ 300 mm. Pokud zahrneme rozměry do 500 mm, získáme 74% výroby tvarovek. Největší zaznamenaná rozměr je shodně jako u délky 1700 mm.



Obrázek 12 Hloubka - nezávislá

4.1.3 Hmotnost

Hmotnost jasně souvisí s rozměry. Důležitá je spíše z pohledu jednoduché identifikace portfolia. Rozložení skupiny intervalů, jak je popsáno výše, bylo vytvořeno řadou kvůli větší přehlednosti. Pod hranicí 50 kg na cihlu, už není počet vyráběných cihel tak markantní. Největší počet vyrobených cihel se nachází v intervalu mezi 10 ÷ 50 kg. Pokud vezmeme v potaz všechny formy pro tvarovky pod 50 kg, tvoří tato skupina 75,5 % produkce. Nejtěžší tvarovky dosahovaly hmotnosti 1 200 kg.



Obrázek 13 Hmotnost - nezávislá

4.1.4 Jádro

Jádra jsou používána pro vytvoření dutin uvnitř tvarovek. Přítomnost jádra má vliv na tvar formy. Volba technologie výroby formy a jádra se může vzájemně ovlivňovat.

Celkové vyhodnocení ukazuje, že většina tvarovek, tedy 70 %, jádro neobsahuje.

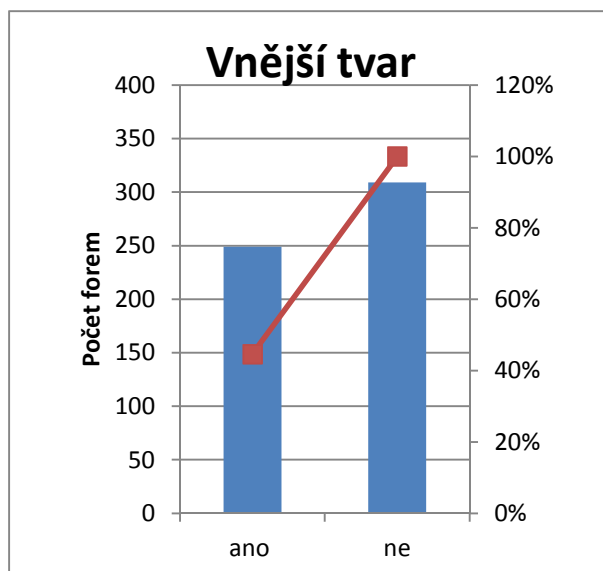


Obrázek 14 Jádro - nezávislá

V důsledku analýzy bylo zjištěno, že některé tvarovky s jádrem, jsou variantami tvarovek bez jádra.

4.1.5 Vnější tvar

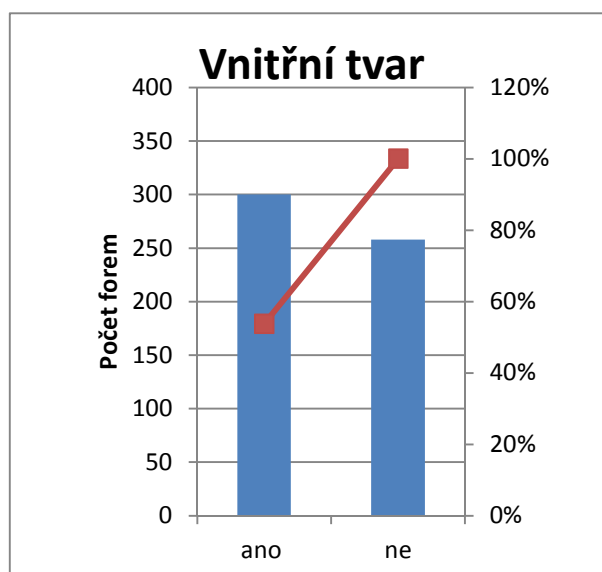
Vnější tvar představuje zvláštní tvar vystupující z tvarovky a ovlivňuje konstrukci formy, například při volbě a řešení dělicích rovin. Větší podíl (56 %) neobsahuje výrazné vnější tvary, ovšem rozdíl není výrazný.



Obrázek 15 Vnější tvar - nezávislá

4.1.6 Vnitřní tvar

Vnitřní tvar je z pohledu technologie výroby tvarové cihly důležitější, protože jsou vytvářeny částí formy obklopenou z více stran odlitým materiálem. Tato část formy je zatěžována stahováním materiálu během tuhnutí.



Obrázek 16 Vnitřní tvar - nezávislá

4.1.7 Zhodnocení analýzy

Na základě jednotlivých grafů je možné vyhodnotit hodnotu charakteristiky, která odpovídá snaze najít co největší počet forem rovný co nejmenšímu intervalu hodnot.

Vyhodnocení charakteristik nezávisle na sobě:

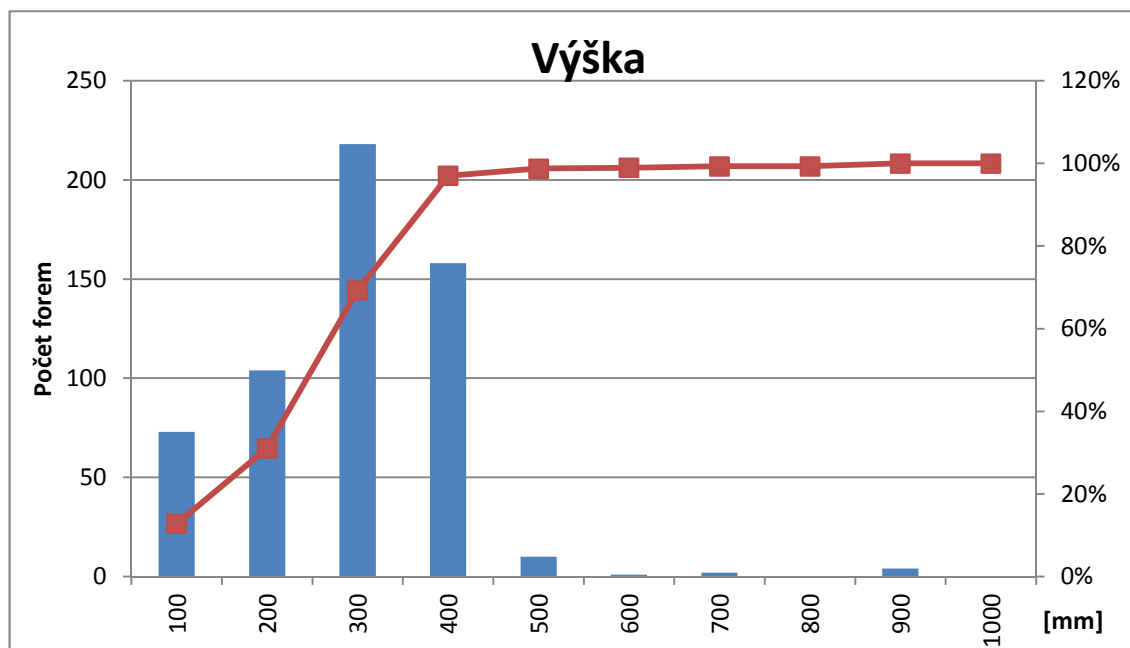
Tabulka 4 Vyhodnocení charakteristik - nezávislé

Faktor	Počet forem	Celkový počet forem	Hodnota charakteristiky	Procento forem	Procento rozměru
výška	553	570	400 mm	97	40
šířka	457		500 mm	80	30
hloubka	423		500 mm	74	29
hmotnost	416		50 kg	97	4
jádro	390		ne	70	
vnější tvar	309		ne	65	
vnitřní tvar	258		ne	47	

Toto hodnocení však není dostačné, protože spolu jednotlivé charakteristiky souvisí. Proto byla na základě hodnot charakteristik (Tabulka 4) roztříděna znovu a postupně odebírány tvarovky neodpovídající charakteristikám.

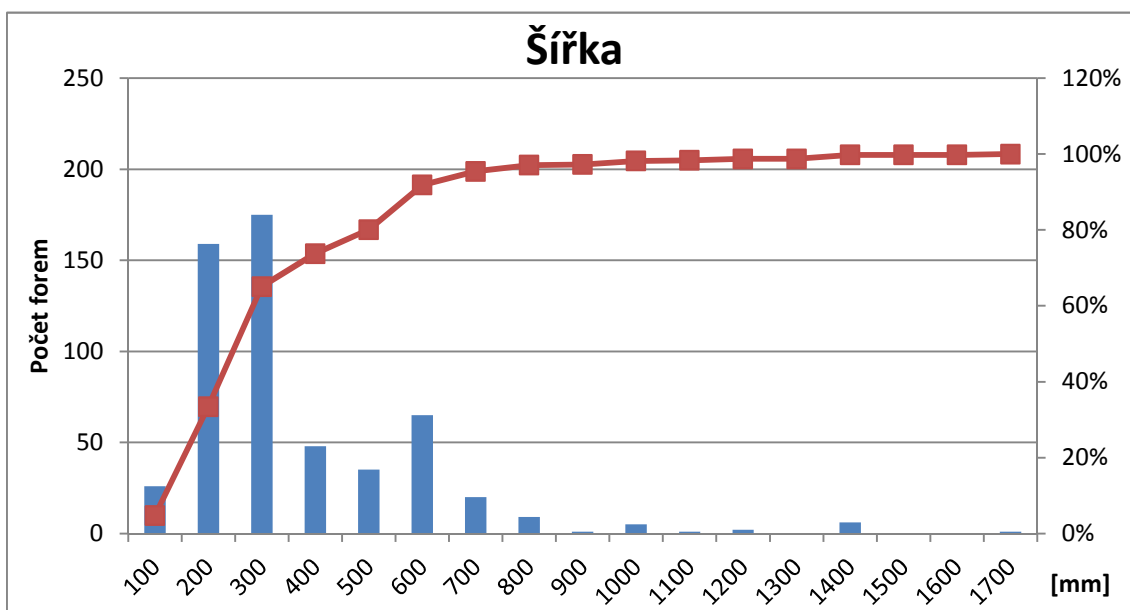
4.2 Výběrová analýza charakteristik

Podle zjištěných hodnot charakteristik v předchozí části, byla provedena výběrová analýza, která postupně vylučuje nevyhovující tvarovky. Cílem bylo identifikovat společného zástupce, použitelného pro návrh společné technologie výroby.



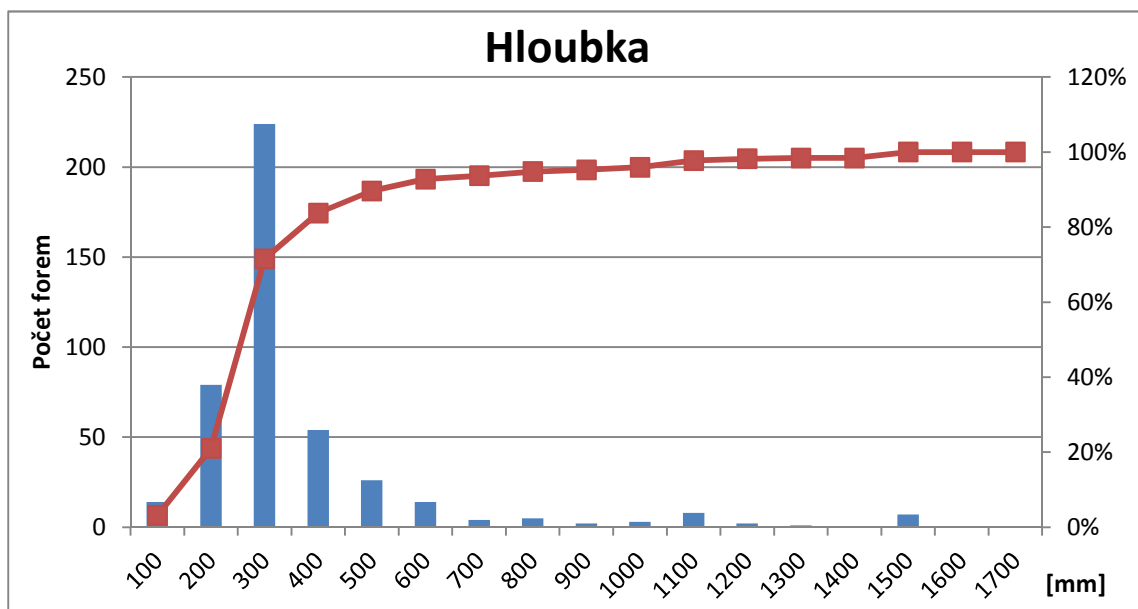
Obrázek 17 Výška - výběrová

Nezávislou analýzou byla tedy identifikována velikost limitní hodnoty výšky na 400 mm. Touto hodnotou byly pro výběrovou analýzu odfiltrovány všechny větší rozměry a výsledná data byla postoupena dále k hodnocení šířky. Z celkového počtu 570 forem byl počet snížen na 553. Samotná výška tedy není charakteristikou, kterou by došlo ke ztrátě většího objemu forem.



Obrázek 18 Výška - výběrová

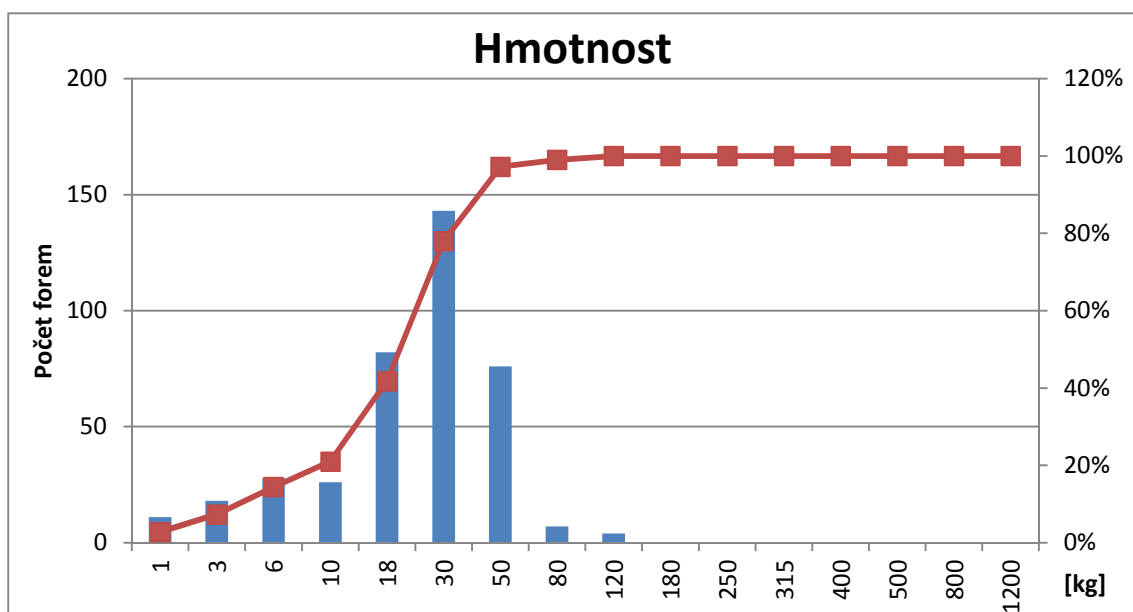
Z dat hodnot šířky forem, jsou následně odstraněny všechny formy o velikosti 500 mm a více. Tím byla zmenšena množina hodnocených forem o dalších 110 kusů na počet 443.



Obrázek 19 Hloubka - výběrová

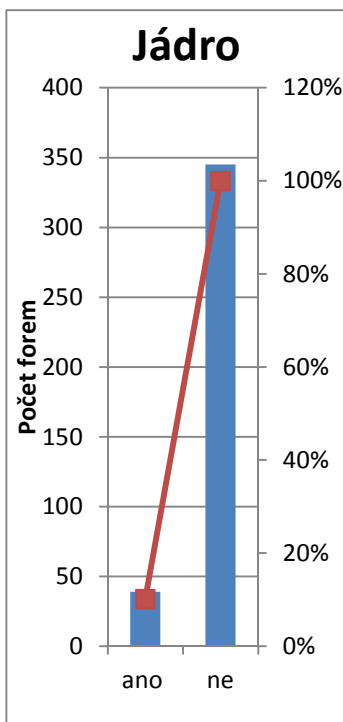
Omezení rozsahu šířky snížilo výrazně množství forem s hloubkou větších než 500 mm. Stejná limitní hodnota 500 mm, která byla vybrána i jako kritérium pro rozměr hloubky zredukovala soubor dat na 397 možných forem pro další výběrové kritérium.

Všem rozměrovým kritériím dohromady vyhovuje přibližně 70 % z počátečního souboru dat. Rozměry 400 x 500 x 500 mm vytváří dohromady objem velikosti 0,1 m³, což při typické hustotě kolem 3000 kg/m³, pro vibrolité směsi na bázi oxidů hliníku a křemíku, a úplném vyplnění objemu, odpovídá hmotnosti 300 kg. Tato hodnota pochopitelně může být různá pro specifické vibrolité směsi.

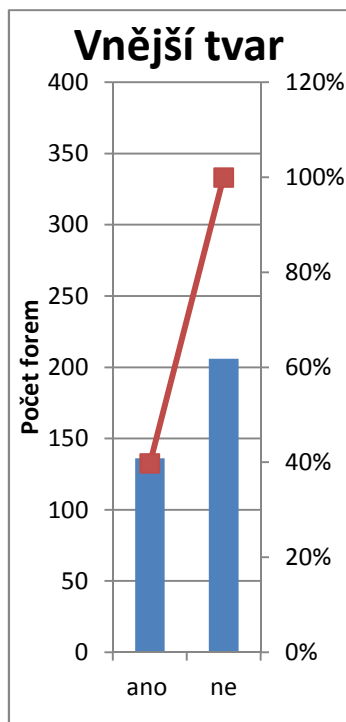


Obrázek 20 Hmotnost - výběrová

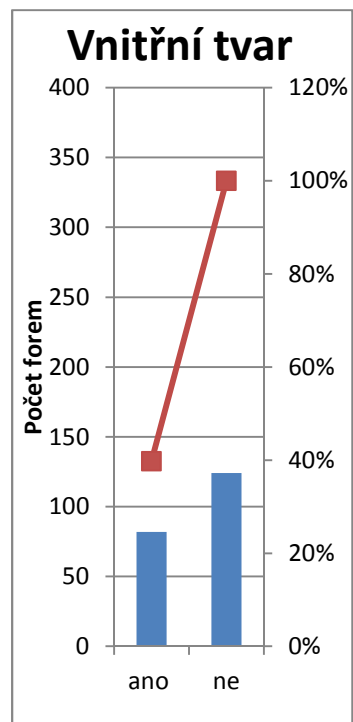
Jak lze vidět na Obrázek 20, hmotnosti 300 kg nedosahuje žádná tvarovka, a to ani blízkou hodnotou. Lze pozorovat, že pouze 3 formy z 397 (tedy méně než 1 %), byly vyrobeny pro tvárnice o hmotnosti větší, než 50 kg. To lze interpretovat tak, že maximální možný objem, který byl určen vybranými charakteristickými rozměry 400 x 500 x 500 mm, je v naprosté většině případů vyplněn pouze maximálně z necelých 18 %.



Obrázek 21 Jádro - výběrová



Obrázek 22 Vnější tvar - výběrová



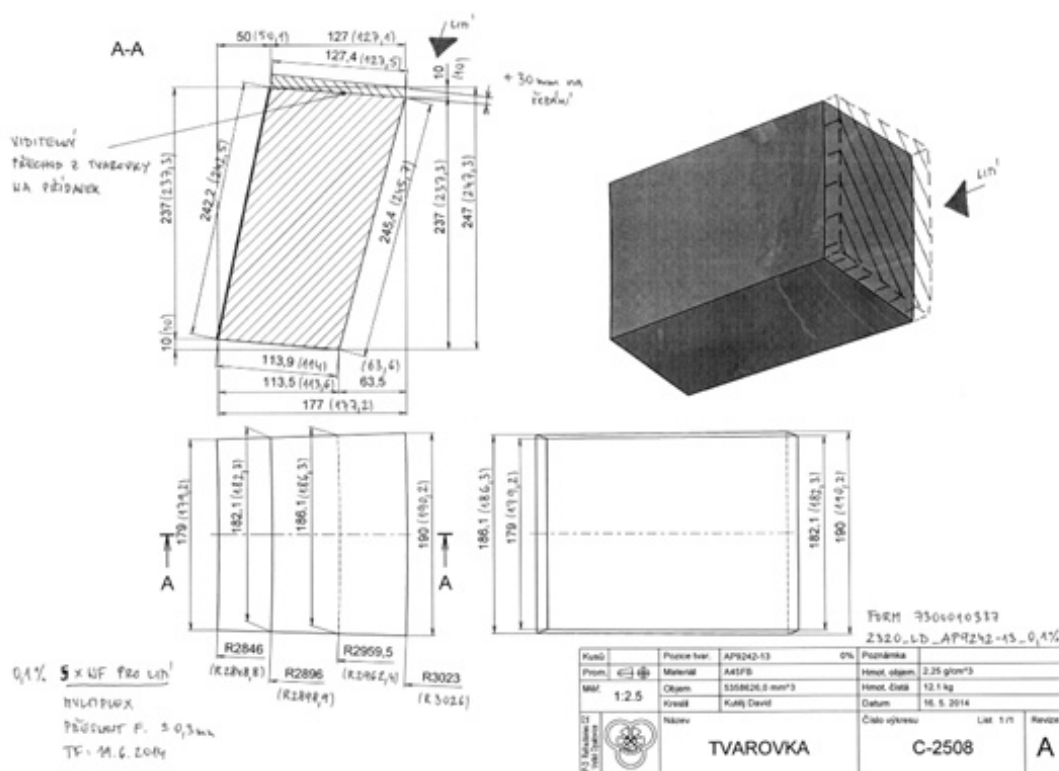
Obrázek 23 Vnitřní tvar - výběrová

Tvarové prvky jsou významné především z pohledu volby konkrétní technologie a materiálového řešení. Použití jádra odpovídá v redukovaném souboru pouze 15 %. U vnějších a vnitřních rozměrů, jsou vzájemné poměry jejich přítomnosti přibližně vyrovnané. Pokud vezme v úvahu, že v obou případech převažuje nepřítomnost těchto prvků, pak po výběrové analýze pomocí limitních hodnot charakteristik odpovídá všem požadavkům 205 druhů tvarovek, tedy 24 %. Tento počet druhů tvarovek však odpovídá 206 vyrobeným formám a tedy 36 %.

Nepřítomnost zvláštních tvarů je ovšem z pohledu technologie výroby mnohem méně náročná než při jejich přítomnosti. Proto pokud budeme brát v úvahu všechny cihly, ať už mají či nemají tyto společné prvky, bude výsledná množina dat představovat 54,5 %, v absolutních číslech tedy 299 kusů z původních 570 vyrobených forem.

4.3 Výběr výrobního představitele

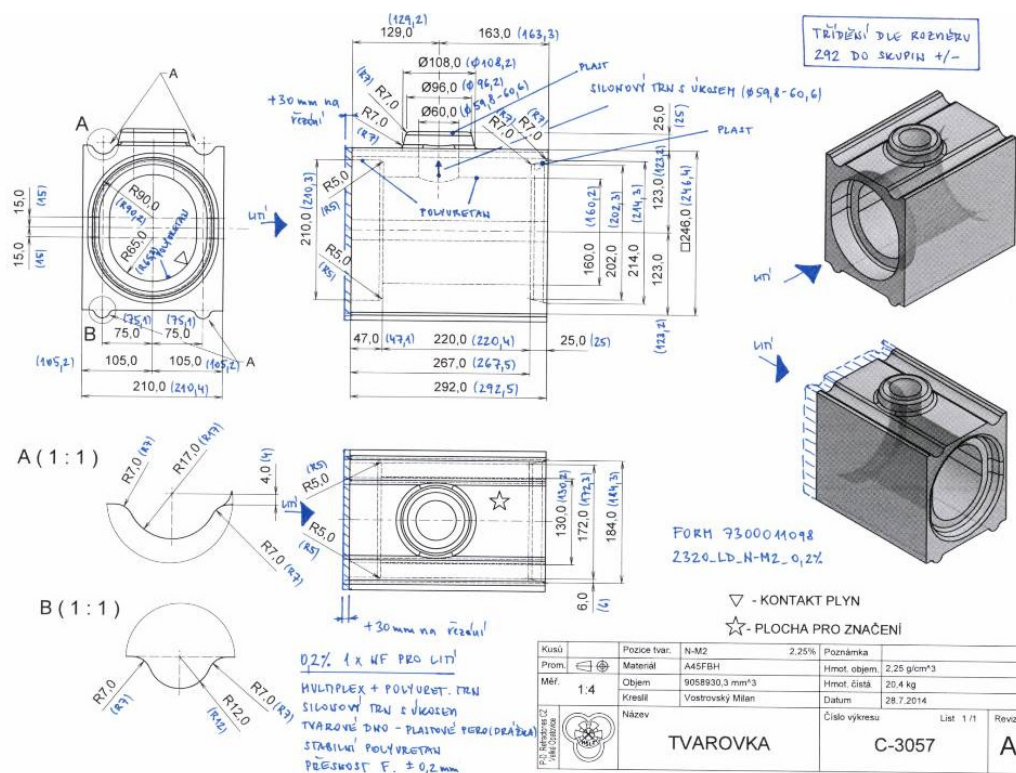
Jako zástupce, který splňuje všechny kritéria včetně nepřítomnosti zvláštních tvarů, byla zvolena tvarovka podle výkresu C-2508. K výrobě této tvarovky bylo vytvořeno 5 forem, do kterých bylo odlito 140 tvarovek. Tvarově podobné je několik dalších tvarovek jako C-2211, C-2212 a další. To přidává dalších 6 vyrobených forem a dalších zhruba 200 vyrobených tvarovek.



Obrázek 24 Výkres tvarovky C-2508

Vzhledem ke skutečnosti, že vnitřní tvar ve tvarovce klade vyšší nároky na materiál formy, bylo rozhodnuto o vybrání jiného zástupce, který obsahuje jak vnější tvar, tak jádro. Nejčastěji zastoupeným intervalem rozměrů jak pro výšku, šířku tak hloubku je 200 až 300 mm. Těmto typickým rozměrům spolu s přítomností všech tvarových prvků odpovídá tvarová cihla C-3057.

Přestože k této tvarovce byla vyrobena pouze jediná forma, která sloužila pro odlití 194 cihel. Původní forma rovněž zahrnovala použití měkkých materiálů, které umožnily kompenzovat smrštění kolem komplikovanějšího jádra.



Obrázek 25 Výkres tvarovky C-3057

Tvarovka C-3057 bude použita při návrzích nové technologie se všemi složitostmi, které výroba formy může přinést. Rovněž na tento návrh bude aplikováno výsledné technickoekonomické zhodnocení.

Tabulka 5 Informace o tvarovce C-3057

Výkres tvarovky	C – 3057
Materiál formy	Polyuretanová licí hmota GM 725 Polyuretanová licí pryskyřice GM 958 Umělé dřevno PW 920
Počet forem	1
Počet vylisovaných kusů	194
Nárůst materiálu	+ 0,2 %
Kalkulované hod	75
Rozměry	247 x 177 x 190
Hmotnost	12,1 kg

Tabulka 6 Původní náklady na tvarovku

Materiál	5 306 Kč
TPV	1 968 Kč
Práce	40 470 Kč
Celkem	47 744 Kč

Celkové náklady na tuto tvarovku patří mezi nadprůměr vůči ostatním tvarovkám v souboru dat. Není to vinou nákladu na materiál, které se pohybují mezi průměrem a mediánem.

Tabulka 7 Časové náklady na tvarovku

Celkový čas výroby formy	38 dní
TPV	4 hodiny
Výroba formy	63,25 hodin

Nejvyšším nákladem je vynaložená práce na vytvoření formy, která činí 40 470 Kč, při více než 63 výrobních hodinách. Tyto náklady patří mezi jedny z nejvyšších, které byly zaznamenány. Nutné je ovšem zdůraznit, že všechny tyto náklady vedly pouze k jedné formě, do níž bylo odlito všech 194 tvarovek.

5 Návrh materiálového řešení forem

Následující kapitola se zabývá přehledem materiálů, které by potenciálně mohly sloužit nebo jsou v současnosti již používány k výrobě forem. Základními požadavky na tyto materiály, je schopnost odolávat zatížením způsobeným hydrostatickým tlakem lité směsi, která se při vibracích chová jako kapalina. Nenasákavost pro materiály, které jsou v přímém kontaktu se směsí.

5.1 Dřevo

Silnostěnné překližkové desky jsou v současné době základním konstrukčním materiálem pro výrobu forem. Byť se jedná ve srovnání s ocelí pro lisované cihly o relativně levný a jednoduše zpracovatelný materiál, není materiálem nejvhodnějším. Z principu tvorby polotovaru je to materiál pouze k obrábění, ovšem obtížně dostupný ve větších tloušťkách, při komplikacích s homogenitou a v případě překližky také anizotropními vlastnostmi. Dřevo také při kontaktu s vibrolitou směsí trpí na vstřebávání vlhkosti a s tím spojené objemové a tvarové změny.

Kromě překližky připadá v úvahu také použití dřevovláknitých desek, často označovaných anglickými názvy MDF (medium- density fibreboard) a HDF (high - density fibreboard). Tento materiál se často používá pro tvorbu forem a modelů například pro výrobu plastových kompozitů vyztužených uhlíkovými, skleněnými nebo polymerovými vlákny. Jeho výhodami jsou nízká cena, dostupnost tloušťky desky až 40 mm, díky které je pomocí lepení jednotlivých desek na sebe možno vyrábět libovolně tlusté bloky. Významnou nevýhodou hlavně z pohledu dlouhodobého používání, je vysoká absorpce vlhkosti a s ní spojené objemové změny vedoucí často k prasklinám, obzvláště pokud je materiál dlouhodobě skladován v nevyhovujících podmínkách. Další významnou nevýhodou je špatná kvalita obrobeného povrchu, který je nutné většinou upravit pomocí lakování, například epoxidovým lakem, jenž uzavře povrch a následné broušení.

5.2 Hliníkové slitiny

Použití válcovaných hliníkových polotovarů má z pohledu mechanických vlastností nesporné výhody. Cena a nároky na zpracování ovšem předurčují pro výrobu trvalých forem případně menších modelů pro odlévané formy.

5.3 Plasty

Plasty jsou širokou skupinou materiálů s různými mechanickými a chemickými vlastnostmi. Pro konstrukci byly již komerčně dostupné produkty.

5.3.1 Umělé dřevo

Tímto názvem je označována široká skupina synteticky vyráběných materiálů, jejichž vlastnosti obecné mechanické vlastnosti jako hustota, pevnost a textura materiálu jsou přibližně podobné přírodnímu dřevu. Postrádají ale základní nedostatky jako dostupnost velkých objemů, homogenitu a izotropní chování. Dále mohou v závislosti na složení omezit nasákavost vody a případně teplotní roztažnost. V současnosti je v P-D Refractories používáno produkty firmy ebalta Kunststoff GmbH s názvem Ebaboard.

5.3.2 Pěny

PUR

Licí pěny, zejména polyuretanové, jsou materiálem často používaným při tvorbě lehkých dekorací a rekvizit. Kvůli snadné opakovatelnosti výroby litím do jednoduchých případně pryžových forem. Z tohoto důvodu rychlé a minimálně náročné výroby, byla zkoumána možnost výroby na základě trvalého modelu. Dalším odvětvím použití PUR ve spojení s jinou aplikační technikou pomocí stříkání, je tepelná izolace budov.

Epoxidová pěna

Významným elastomerem s širokým použitím jsou epoxidové pryskyřice. V nejčastější dostupné formě jsou k dispozici jako dvě kapalné složky, jejichž vzájemná

směs po smíchání polymerizuje. Lze je využít například jako materiál pro odlévání do vytvořených dutin, jako povrchovou vrstvu nebo jako prosté lepidlo.

V tomto případě bylo uvažováno i nad použitím pěnové formy, která vzniká přidáním další složky, tzv. nadouvadla, které ve smíchané polymerizující směsi vytváří bublinky plynu. Lze tak dosáhnout strukturně pevného a tuhého materiálu s malou hustotou.

Extrudované polystyreny

Tento typ polystyrenové pěny se skládá z drobných uzavřených buněk, díky nimž má proti více známému pěnovému polystyrenu lepší jakost povrchu a vyšší tuhost. Ve větších tloušťkách se extrudovaný polystyren používá, stejně jako pěnový, ve formě bloků jako tepelné izolace budov. Těchto bloků se, ale kvůli snadné obrobiteľnosti, také často používá pro tvorbu prezentačních modelů, dekorací a jako materiál pro testy obrábění. Další výhodou je nízká nasákavost, ovšem mezi nevýhody patří horší chemická odolnost proti rozpouštědlům, například benzínu nebo acetonu.

Pryže

Pryžové materiály se v konstrukci forem používají zejména v místech s očekávaným smrštěním tvarovky, kdy by mohla vyšší tuhost formy způsobit zničení tvarovky.

Litý polyuretan nebo silikon, se běžně používá pro výrobu pružných forem z původního modelu. Forma může zkopírovat detailní tvary včetně textury povrchu modelu. Zároveň je možné reprodukovat i menší podkosení bez nutnosti rozdělování formy, případně může být forma rozdělena až po odlití. Takto vyrobené formy mohou sloužit k odlévání pryskyřic, pěnových polymerů nebo i stavebních hmot. Vyrábí se takto například dlažba z betonových směsí nebo zvláštní obkládací dlaždice.

Oba druhy pryží jsou na trhu k dispozici v širokém rozsahu tvrdostí od 15 do 80 Sh A.



Obrázek 26 Forma z pružného polyuretanu

Dále bylo zvažováno použití termoplastových pryží, které by přinesly možnost úspor díky recyklaci. Již použitý materiál by mohl být roztaven a využit pro odlití na nové formy. V tomto případě není výběr komerčních produktů ani zdaleka tak široký jako u reaktoplastů. Během rešerše byly nalezeny pouze tři dostupné produkty, pravděpodobně na bázi PVC. Dostupné jsou v tvrdostech 40 až 70 Shore 00, maximálně tedy přibližně 27 Shore A.

Charakter pryžových materiálů samozřejmě umožňuje jejich deformaci, pokud se ovšem nemá forma deformovat, tak vzhledem k tomu, že se jedná o celistvý nestlačitelný materiál, dojde popraskání části formy nebo tvarovky. Tento stav může nastat u jader, která jsou z pravidla tvořena vnějším pryžovým obalem a vnitřním nosným prvkem. V některých případech se tak může stát, že pokud nedojde během tuhnutí k vyjmutí nosného prvku, pryž se nemá kam deformovat a tvarovka popraská.

Z tohoto důvodu byl hledán materiál, podobné tvrdosti a tuhosti jako již používané ovšem v pěnové podobě. Těmto potřebám odpovídá polyuretanová licí pěna

Flexfoam-iT 25, který po smísení složek expanduje do zhruba dvounásobného objemu. Praktický test zatím prokázal, vhodnost z pohledu tuhosti a proti vlhkosti.

5.4 Materiály pro úpravu funkčních ploch

Zkoumané lehčené materiály tvrdá PUR pěna a XPS představují, přes dostatečné mechanické vlastnosti ve velkém objemu, další výzvu v podobě řešení odolnosti funkčních ploch proti poškození a zlepšení jejich kvality. Pro tento účel bylo vytipováno několik možných druhů materiálů, které by k tomuto účelu mohly sloužit.

Karosářský tmel

Tmel patří mezi levnější materiály určené pro tento účel, jeho nevýhodou je velice obtížné nanášení zvláště na tvarové plochy. V úvodní fázi nanášení na povrch vyžaduje důkladné rozprostření hmoty nejlépe v tenké vrstvě, aby bylo usnadněno následné broušení a nedošlo k ovlivnění rozměrů. Nanášení a broušení je zvláště komplikované u vnitřních tvarů s ostrými rohy, v mnoha případech může být i prakticky nemožné.

Plnič pórů na vodní bázi

Plnič pórů, v tomto případě na vodní bázi, bývá většinou používán pro vyhlazení drobných nerovností po předchozím použití tmelu. Tradičně se plnič nanáší stříkáním v několika tenkých vrstvách s odstraněním nerovností broušením mezi jednotlivými vrstvami pomocí brusného papíru. Během pokusů byla kapalina nanášena štětcem, aby vytvořila souvislý povrch. Na polyuretanu se projevila povaha materiálu, jehož vytvrzení spočívá v odpaření přítomného rozpouštědla, čímž dojde ke ztenčení a propadnutí v místě větší pórů. Výsledný povrch na pěnovém polyuretanu není vůbec hladký (Obrázek 27).



Obrázek 27 Vzorky ošetřené plničem

Epoxidový nátěr

V tomto případě byl zkušěn nátěr Epsilon® na epoxidové bázi. Dvousložková kapalina je určena k nanášení štětcem ve dvou vrstvách. Na obou materiálech se tento produkt ukázal jako funkční. Na hladkém povrchu polystyrenu byla dostačující i pouze jediná vrstva, u porézní pěny byl potřeba první nátěr k uzavření povrchu a druhý k jeho vyrovnání do relativně hladké podoby. Výsledné povrchy vykazovaly drobné vady v důsledku uvolněných prachových částic přímo z povrchu vzorků, případně drobných bublinek v nátěru způsobených při promíchávání složek. Obě vady je možné rychle odstranit rychlým přebroušením smirkovým papírem. Případně odstranit bublinky už před nanášením vakuováním smíchaných složek.



Obrázek 28 Nátěr Epsilon na PUR pěně

Plastový nátěr

Nejčastěji se lze s tímto materiálem setkat pod názvem tekutá guma nebo pod variací na komerční název PlastiDip. Tekutý polymer s rozpouštědlem je určen k nanášení stříkáním, nátěrem nebo ponořením. Po nanesení a polymerizaci dojde k vytvoření celistvé vrstvy pružného plastu. Nejlepší výsledků je možné dosáhnout při aplikaci stříkáním v tenkých vrstvách na již předem upravený hladký povrch, v tomto případě je možné kontrolovat tloušťku vrstvy. Jednoduchým způsobem nanášení je pomocí ponoření, kdy přebytečný materiál může ze součásti odkapat. V tomto případě ovšem dojde k obtížně kontrolovatelné tloušťce vrstvy hlavně na svislých plochách.

Během testování byla zjištěna vzájemná nekompatibilita s polystyrenem, protože ředidlo obsažené v tzv. tekuté gumě jej rozpouští. U polyuretanu k tomuto efektu nedošlo, avšak nepodařilo se najít vhodnou koncentraci s přidaným ředidlem, která by měla optimální viskozitu pro rozetření a zároveň spolehlivě vyplnila otevřené póry.

Akrylátová sádra

Od běžné sádry mísitelné s vodou se liší především nižší tuhostí a větší přilnavostí k polystyrenové pěně. Během testů se ale sádra neukázala jako vhodný materiál, vzhledem k proměnlivé viskozitě během nanášení a výslednému hrubšímu matnému povrchu. Vyhlazení porozity bylo rovněž obtížné.

Samolepící folie

Samolepící plastová fólie používaná pro potahování karoserií aut byla vytipována jako jednoduše aplikovatelný materiál. Při zahřátí je fólie schopna hladce kopírovat podklad, je ovšem obtížně použitelná pro komplexní prostorové tvary, případně větší množství tvarů, které na sebe plynule nenavazují. Rovněž je potřeba, aby povrch, na který je folie lepena, byl celistvý a hladký. Tento požadavek vylučuje použití na hrubý porézní povrch bez předchozí aplikace plniče.

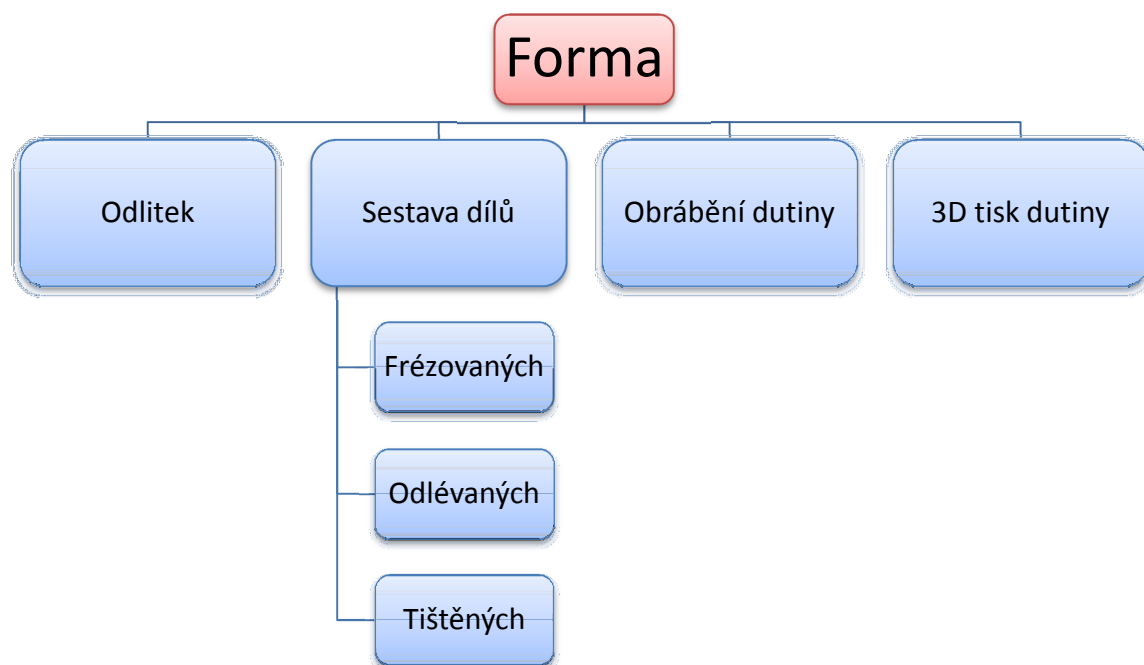
Tabulka 8 Srovnání cen materiálů

Materiál		Tvrдост	Hustota kg/dm ³	Cena Kč/kg	Cena Kč/dm ³
Překližka		70 D Sh	0,72	18	13
MDF deska		50 D Sh	0,7	6	5
Hliník EN AW 6061 – T6		85 HB	2,78	100	278
Umělé dřevo					
	Ebaboard 60-1	57 D Sh	0,6	125	75
	Ebaboard L-1	45 D Sh	0,45	171	77
	Ebaboard PW 920	85 D Sh	1,22	174	212
	Ebaboard 0780	67 D Sh	0,78	144	112
Konstrukční plasty					
	POM - C	85 D Sh	1,41	262	370
	PA6	85 D Sh	1,14	175	200
Epoxidová pryskyřice					
	GM 725-7	87 D Sh	1,15	61	70
Licí pěnový PUR					
	Foam-iT 3	-	0,048	454	22
	Foam-iT 5	-	0,08	454	36
	izopianol 50/110	-	0,11	200	22
XPS					
	URSA XPS N-V-L	-	0,034	179	6
	FIBRAN XPS 500-L	-	0,034	162	6
	AUSTRO TOP 70SF	-	0,038	370	14
	URSA XPS UFN VII L	-	0,036	139	5,0
PVC					
	Gelflex	13 A Sh	1,18	482	569
PUR					
	Flexfoam-iT 25	40 A Sh	0,40	606	242
	VytaFlex	60 A Sh	1,04	485	504
	GM 958	60 A Sh	1,08	275	297
	GM 955-55	55 A Sh	1,27	234	297
Silikon					
	Silastic T-4	40 A Sh	1,1	550	605

6 Návrh konstrukčního a technologického řešení forem

6.1 Návrh koncepce řešení formy

K výrobě formy je možné přistoupit několika způsoby bez ohledu na použitou technologii. V jednoduchosti je forma pouze dutinou v celistvém materiálu, takže koncepční otázkou je jak tuto dutinu vytvořit.



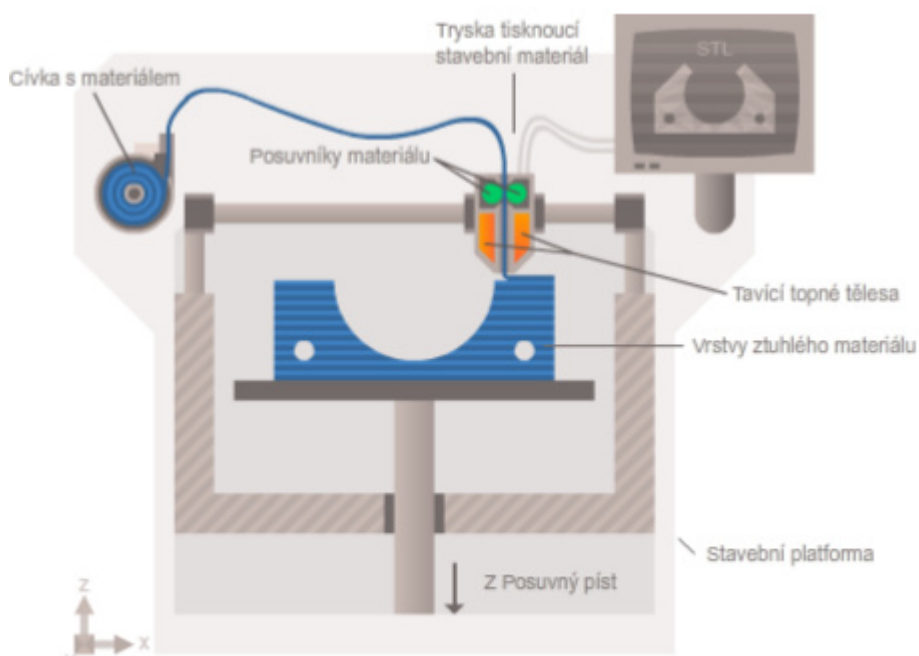
Obrázek 29 Varianty řešení forem

6.2 3D tisk

3D tisk byl jako vysoce perspektivní technologie v současnosti podroben zkoumání, zda odpovídá, jako vhodná technologie pro výrobu forem. Zkoumány byly nečastější zástupci, tedy technologie FDM, SLA a také PolyJet, které umožňují souběžné nanášení více materiálů včetně pružných polymerů.

6.2.1 FDM - Fused deposition modeling

Metoda je založena na vytlačování roztaveného materiálu tryskou tiskárny na předem určenou dráhu. Existuje několik typů tiskáren podle pohybu trysky a stavební platformy. Existují dva základní typy. V prvním případě se pohybuje tryska v osách x, y a stavební platforma se pohybuje v ose z (směrem dolů při tisku dalších vrstev). U druhé varianty probíhá tisk jenom pomocí trysky, která se pohybuje ve všech třech osách. Další rozdělení může být podle toho, jestli je tiskárna schopna tisknout jeden, nebo dva materiály. Při tisku dvou různých materiálů, se většinou využívají dvě trysky a stejně jako u metody polyjet, je zde možné kombinovat materiály různých vlastností. [4]

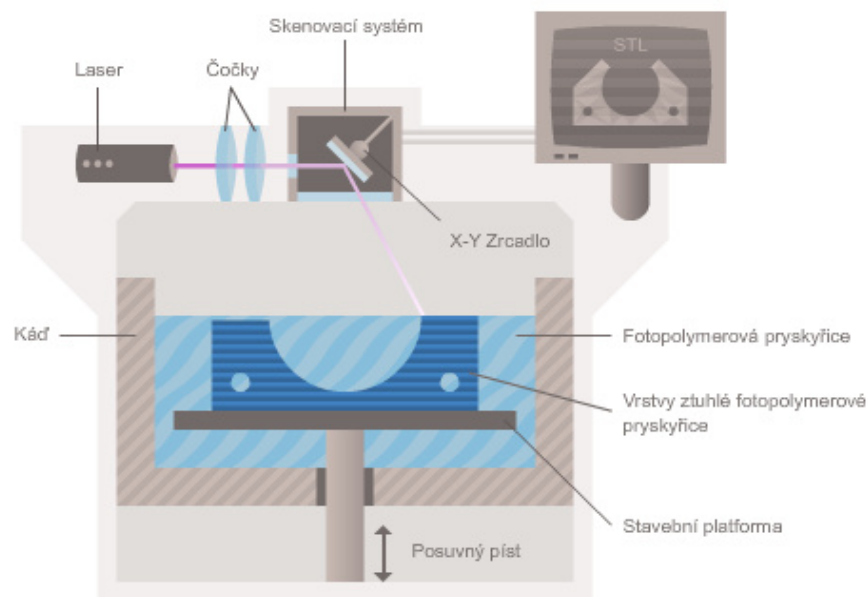


Obrázek 30 FDM

6.2.2 SLA - Stereolitografie

Proces tisku funguje na principu vytvrzování fotopolymeru pomocí ultrafialového záření. Zařízení se skládá z nádoby obsahující tekutý fotopolymer, skenovacího systému a laseru.

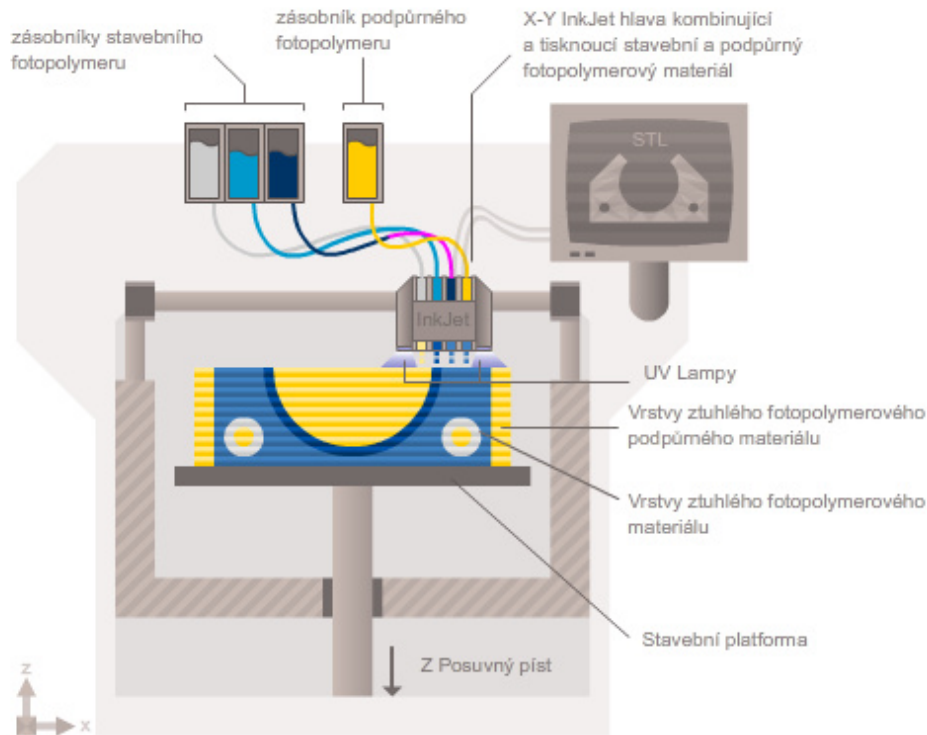
Model vzniká působením laserového paprsku na tekutý fotopolymer, který se působením laseru vytvrdí a připojí se tak k již vytisknuté části modelu nebo k podstavci (v případě první vrstvi). Po dokončení vrstvy se podstavec posune směrem dolů o výšku vrstvy. [4]



Obrázek 31 SLA

6.2.3 PolyJet

Technologie je založena na vstřikování fotopolymeru na stavební platformu, takto nanesený fotopolymer ve formě kapek je vytvrzen okamžitě pomocí UV záření, které je vyzařováno z obou stran tisknoucí hlavy. Zařízení je složeno ze stavební platformy a tisknoucí hlavy, která je napojena na zásobník s fotopolymerem. Lepší tiskárny dokáží materiál kombinovat až ze tří různých materiálů s různými vlastnostmi během jednoho tisku. [4]



Obrázek 32 PolyJet

Případnou výhodou této technologie je možnost tisku více různých polymerů najednou, přičemž některé z těchto materiálů mohou mít po vytvrzení formu pryže. Touto technologií tedy lze automatizovaně vyrábět formy, které jsou schopny díky měkkému povrchu kompenzovat objemové změny materiálu cihly během tuhnutí.

6.2.4 Hodnocení

Příliš velké časové nároky na tisk a náklady na materiál brání, alespoň u ukázaných technologií, jejich efektivnímu použití. 3D tisk by mohl být vhodnou technologií pro výrobu jednorázových forem, které by mohly být po zatvrdnutí materiálu zničeny kvůli vyjmutí tvarovky pro vypálení. To by ovšem vyžadovalo mnohem rychlejší tisk a také levnější základní materiál. Taková technologie zatím není nedostupná, proto se 3D tisk nedá doporučit jako vhodný proces výroby.

6.3 Odlití formy pomocí modelu tvarovky

Tímto způsobem jsou částečně vyráběny formy již v současnosti. Základem je tedy vyrobení modelu tvarovky pomocí obrábění. Model může být buď vcelku, ale to vzhledem ke složitějším tvarům některých tvarovek není možné kvůli vyjmutí modelu z formy. Proto by bylo potřeba vytvářet spíše modely rozdělené podle navržených dělicích rovin.

Nevýhodou tohoto procesu je nutnost zajistit výrobu kvalitního modelu, protože se kvalita povrchu přenáší z ploch modelu na formu a z formy na hotovou cihlu.

V rámci zkoušek využití lehčích a levnějších materiálů, než v současnosti používané epoxidové pryskyřice, bylo zkoumáno použití polyuretanových licích pěn o gramáži 48 kg/m^3 a 110 kg/m^3 a také pěnové epoxidové pryskyřice.

Další možností, jakou by mohla být čistě odlévaná formy vytvořena, je za použití pružných polymerů. Takto odlitá pružná forma vyžaduje současné vyztužení podpůrným rámem, který pomáhá zachovat tvar během procesu lisování tvarovek. Tento proces výroby je často používán u výroby ozdobných tvarových cihel nebo při výrobě rekvizit.

6.3.1 Hodnocení

Použití PUR pěn je čistě z hlediska použitelnosti pro výrobu forem dle několika testů možné. Materiál má, při dodržení poměru složek, vyhovující mechanické vlastnosti a je schopen vyhovět i nárokům na kvalitu povrchu. Ta je ovšem podmíněna vhodnou separací modelu, aby mohlo dojít ke správnému zkopírování tvaru, ale zároveň zabránění přilnutí polymeru k modelu a bylo tak zaručeno jednoduché oddělení vyrobené formy.

Pěnová epoxidová pryskyřice nebyla schopna, přes výrazně vyšší tuhost a pevnost, dosáhnout požadované kvality povrchu, který byl velmi vrásčitý a nekopíroval zkušební formu. Pro funkční části tedy tento materiál vhodný není, ale mohl by být případně použit jak nosná výplň pro formy extrémně velkých tvarovek.

Možnosti dodatečných úprav odlitých vzorků frézováním jsou zkoumány níže v kapitole.

6.4 Obrábění dutin

Obrábění dutin do monolitního materiálu je bezesporu možná metoda, ovšem jen v případě velice jednoduchých tvarů s velice omezenými možnostmi při nutnosti vytvářet ostré hrany. Při těchto omezeních ale není nutné využít k výrobě tvarových cihel vibrolité materiály a je možné vyrobit z levnějšího materiálu pouhým lisováním.

Frézování ovšem může být velice produktivní technologie v kombinaci s vhodným materiálem, při dostatečné přesnosti a s použitím současných CNC strojů ve vysoce opakovatelné výrobě.

Bez vhodné konstrukční přípravy formy tak, aby mohla být rozložena na jednotlivé prvky, které budou vhodné k obrobění a následně sestaveny, se tato technologie neobejde.

6.5 Sestava dílů

Sestava dílů pochopitelně může být postavena na částech vyrobených zmíněnými technologiemi, ale také jejich případnou kombinací. Použití více částí a dělicích rovin formy bylo zmíněno výše u odlévaných forem. Tento způsob zhotovení je však nutné kombinovat se systémem, který bude držet vše pohromadě. Toho je možné docílit například:

- vnějším podpurným rámem
- zajištění polohy kolíky/ tvary se silovým spojením například šrouby
- tvarovými zámkami na jednotlivých částech

Vnější podpurný rám je výhodný kombinovat zvláště pro materiály, s nižší tuhostí a tvrdostí jako například extrudovaný polystyren. Pomáhá definovat jak vzájemnou polohu jednotlivých dílů formy, tak zabraňuje jejich deformaci během vlastního lití

vibrolité směsi a také poskytuje částečnou ochranu proti neopatrné manipulaci. Nevýhodou je samozřejmě větší počet dílů potřebný ke složení formy.

Tvarové zámky přináší další komplikace s přesností a provedením výroby, stejně jako komplikují prvotní návrh formy.

Zajišťování polohy kolíky je výhodnější metodou zajištění vzájemné polohy, protože obnáší pouze výrobu jednotlivých děr s odpovídající přesností průměru a vzájemné polohy.

7 Navržená konstrukční řešení

V této kapitole jsou popsány možné postupy výroby spolu s hrubými předpokládanými náklady, které by měly pomoci při rozhodování o vhodnosti navržené technologie.

7.1 3D tisk dutiny

Byť je 3D tisk velice perspektivní technologií, z hlediska produktivity a nákladů nepatří rozhodně mezi technologie vhodné k tomuto použití. V případě tisku i té nejjednodušší netrvalé skořepiny, již pouze náklady za materiály vysoce přesahují cenu při výrobě původní technologií.

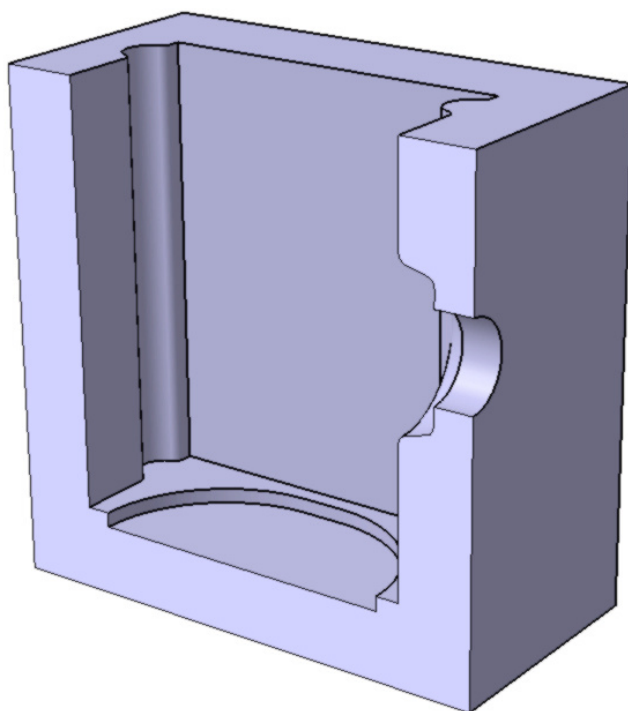
Tabulka 9 Náklady 3D tištěných technologií

	Cena materiálu [Kč]	Náklady na strojní práci [Kč]	Náklady celkem [Kč]
SLA	171 000	6 875	Cca 185 000
FDM	81 900	177 500	Cca 260 000

3D tisk proto nelze doporučit ani jako postup vhodný pro výrobu částí sestavy.

7.2 Monolitický odlitek

Jednoduché vytvoření formy v jednom kuse může přinést úspory v samotné přípravě výroby, ale v některých případech může komplikovat proces samotného odlévání tvarovek. Odlití formy nelze oddělit od nutné výroby základního modelu, který musí být obráběn.



Obrázek 33 Řez monolitní formou

Tvrdá PUR pěna

Celkový odlitek formy je v případě zvoleného druhu tvarovky obtížné zhotovit, protože samotný model by šel obtížně vyjmout. Musel by být vyroben dělený model, který by mohl být vyjmut postupně. Rovněž samotná forma by musela být použita pouze jako jednorázová.

Tabulka 10 Náklady na pěněnou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – Ebaboard L-1	1500
Obrábění modelu	660
Materiál rámu - Překližka	900
Vytvoření rámu	130
Materiál formy – Izopianol 50/110	610
Výroba formy	125
Úprava povrchu – Epoxidový nátěr Epsilon	110
Nanášení nátěru	250
Celková cena	4390

Je nutné brát v úvahu, že tyto cenové náklady je potřeba vynaložit na každou cihlu, protože během jejího vyjímání dojde ke zničení formy.

Pružný PUR

Řešení monolitického odlitku je možné využít pouze u pružných materiálů jako PUR nebo silikon. Elasticita materiálu dovoluje vyjmutí cihel s negativními úkosy nebo vnějšími tvary. Pro zjednodušení vyjímání je možné tento typ formy možné, například v místě rohu rozdělit pomocí skalpelu a umožnit tak částečné otevření formy. Správně by řez měl mít nepravidelný tvar s výraznými zuby, aby po opětovném sesazení obou stran řezu došlo tvarovému spojení a části formy nebyly proti sobě posunuty.

Tabulka 11 Náklady na pružnou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – Ebaboard L-1	1500
Obrábění modelu	660
Materiál rámu - Překližka	900
Vytvoření rámu	130
Materiál formy – GM 958	8200
Výroba formy	250
Celková cena	11700

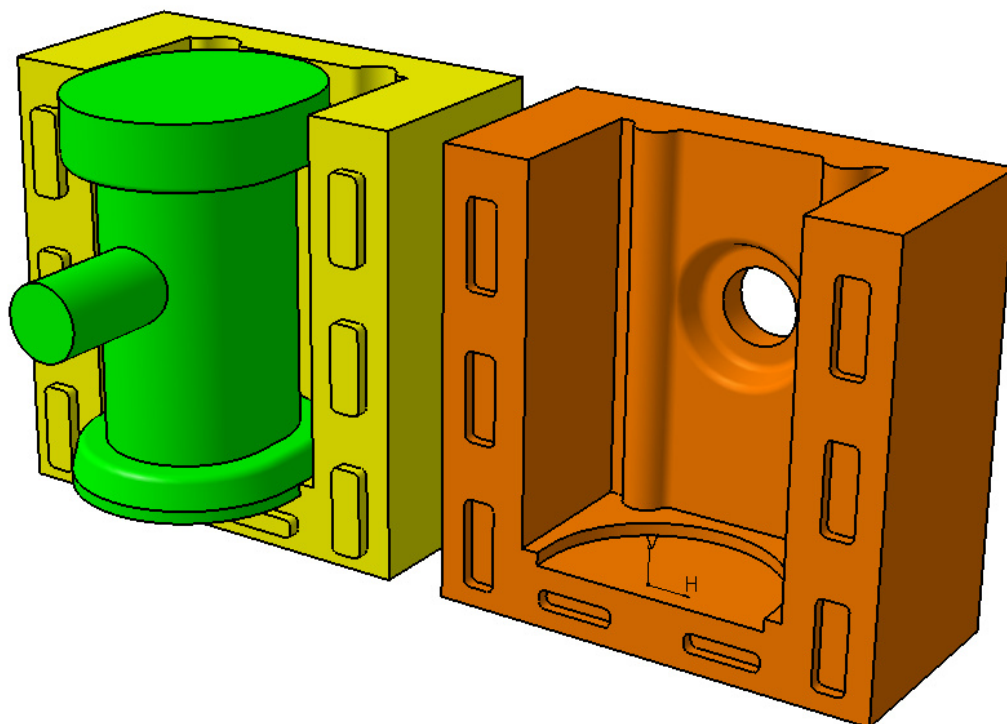
Náklady na materiál, u tohoto typu formy tvoří významnou část ceny. Ovšem jedná se o formu, která je schopna opakovaného použití s odhadovanou životností 40 až 150 kusů.

7.3 Dělený odlitek

Forma s dělicí rovinou umožňuje výrobu jak tvarově náročnějších ploch, tak zároveň použití tužšího materiálu, jako například PUR pěny. Komplikací je vhodná volba dělicích rovin, u zástupné tvarovky je možné formu rozdělit jednoduše jen v jednom místě na dvě poloviny.

Pokud se forma skládá ze dvou částí, je možné přistoupit k výrobě způsobem, kdy jsou buď obě poloviny formy vyrobeny zvlášť, nebo je napřed vyrobena jedna polovina formy, která následně slouží jako součást dělicí roviny pro druhou polovinu. Ve druhém případě je zajištěno spolehlivé dosednutí v dělicí rovině a případné spojení pomocí

tvarových zámků. U obou polovin je potřeba zajistit jejich polohu pro zamezení vzájemnému posunutí.



Obrázek 34 Příklad lité dělené formy

Tvrdá PUR pěna

Na rozdíl od monolitního řešení, nejde pouze o jednorázově použitelný produkt, ale vzhledem k možnosti vyjmout cihlu bez poškození formy, lze formu použít opakovaně. Výslednou životnost forem nelze bez praktických zkoušek odhadnout.

Tabulka 12 Náklady na dělenou pěněnou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – Ebaboard L-1	1500
Obrábění modelu	660
Materiál rámu - Překližka	100
Vytvoření rámu	900
Materiál formy – Izopianol 50/110	620
Výroba formy	250
Úprava povrchu – Epoxidový nátěr Epsilon	110
Nanášení nátěru	250
Celková cena	4490

Odhadované náklady jsou podobné jako při monolitní formě s perspektivou výrazně větší životnosti než jen jednorázové použití.

Pružný PUR

Výrobní postup je rámcově stejný jako v případě tvrdé pěny s rozdílem, že v případě lití směsi pružného polyuretanu není nutné rám formy ničím uzavírat, aby došlo ke správnému vyplnění.

Tato skutečnost přináší další možný postup výroby. V případě tohoto typu cihly by bylo možné umístit celkový model do rámu pro lití formy, vyplnit rám polyuretanem zhruba po plánovanou dělicí rovinu formy, vytvořit pomocí přípravku známky pro zajištění polohy a nechat zatuhnout. Po zatuhnutí by měla být odstraněn přípravek pro známky, je zde možnost naseparovat dělicí rovinu a odlít druhou polovinu formy.

Tabulka 13 Náklady na dělenou pružnou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – Ebaboard L-1	1500
Obrábění modelu	660
Materiál rámu - Překližka	900
Vytvoření rámu	130
Materiál formy – GM 958	8200
Výroba formy	500
Celková cena	12000

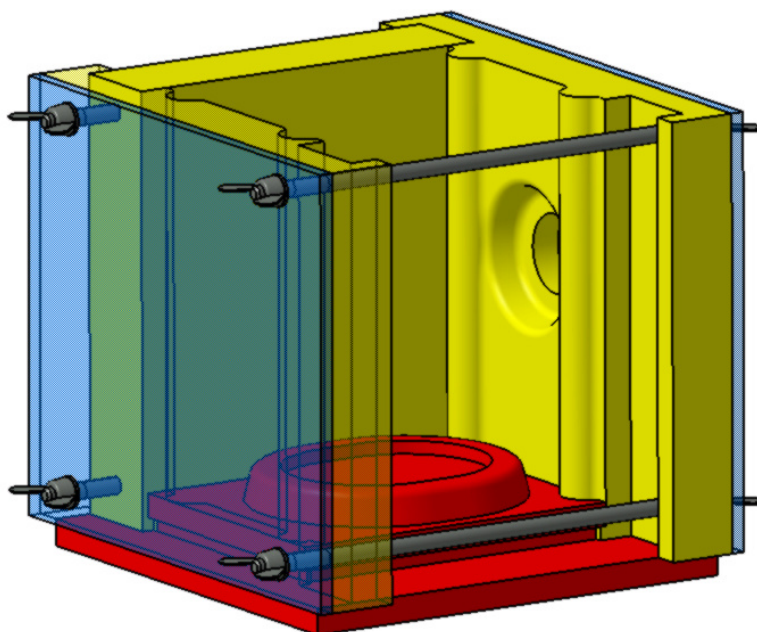
7.4 Sestava obráběných dílů

Pro obrábění byly hodnoceny dva použitelné materiály v podobě umělého dřeva Ebaboard L-1 a extrudovaného polystyrenu URSA XPS UFN-VII-L v konstrukčních variantách s vnějším rámem a bez něj.

7.4.1 Sestava bez podpůrného rámu

Samonosné řešení představuje komplikovanější úvodní návrh, protože vyžaduje, aby jednotlivé díly byly vůči sobě jednoznačně definovány a zároveň vydržely veškerá zatížení. U navrhovaného extrudovaného polystyrenu je toto samozřejmě podtrženo výrazně nižší pevností proti umělému dřevu.

Konstrukce je tvořena čtyřmi stěnami a dnem, které do sebe vzájemně zapadají tvarovými spoji. Spojení zajišťují v případě tohoto návrhu závitové tyče, stahující přes dvě překližkové desky díly k sobě. Díry vrtané skrz podélně skrz formu, nejsou z pohledu technologičnosti konstrukce optimální, ale v rámci koncepčního návrhu jsou dostačujícím řešením.



Obrázek 35 Schématický model sestavy bez rámu

Extrudovaný polystyren

Tabulka 14 Náklady obráběnou polystyrenovou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – URSA XPS UFN VII L	370
Obrábění modelu	5000
Materiál rámu - Překližka	450
Vytvoření rámu	45
Příprava na vytvoření formy	125
Úprava povrchu – Epoxidový nátěr Epsilon	110
Nanášení nátěru	250
Celková cena	6430

Množství materiálu, který je potřeba odstranit obrábění se projevuje výrazně na celkové ceně skoro 7000 Kč. Cena samotného extrudovaného polystyrenu je v tomto případě zanedbatelná.

Umělé dřevo

V případě umělého dřeva je možné odstranit z konstrukce dřevěné desky, které mají za úkol rozložit zatížení na větší plochu. Tím je možné odstranit část nákladů a času potřebného pro výrobu.

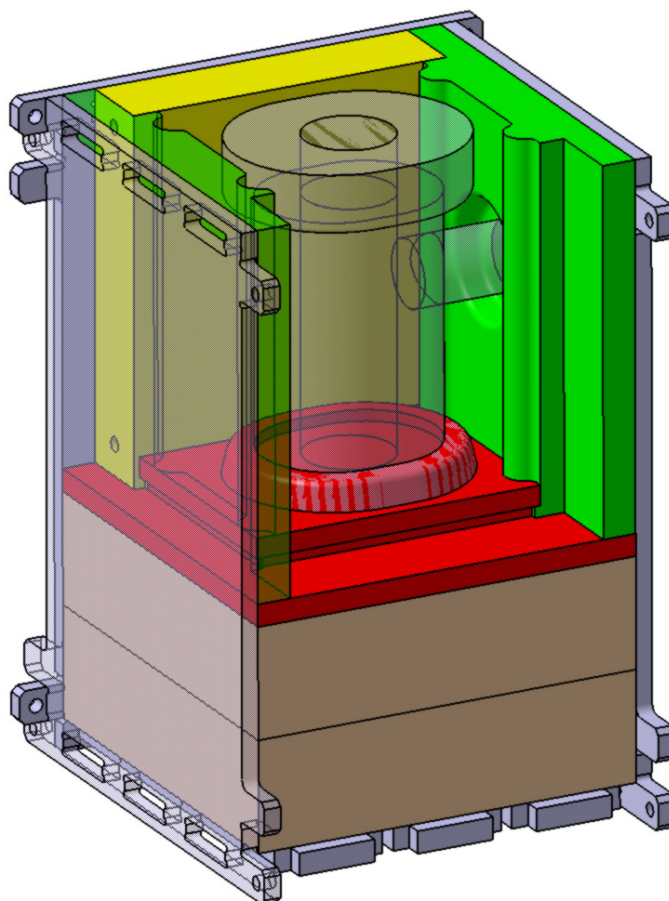
Tabulka 15 Náklady na pěněnou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – Ebaboard L-1	5410
Obrábění modelu	5000
Materiál rámu - Překližka	900
Vytvoření rámu	110
Příprava na vytvoření formy	125
Celková cena	11685

Řádově vyšší náklady na vynaložený materiál Ebaboard L-1 jsou už výsledné ceně patrné a proti polystyrenu jsou dvojnásobné.

7.4.2 Sestava s podpůrným rámem

Nosný rám by měl vyztužovat a držet pohromadě jednotlivé prvky formy a zároveň usnadňovat celou manipulaci. Pro urychlení výroby byl vypracován koncepční plán stavebnicového systému z překližkových desek s tvarovými zámky. Cena rámu je přes možnost znovu opakovatelného použití zahrnuta do ceny formy.



Obrázek 36 Forma s vnějším nosným rámem

Extrudovaný polystyren

Nároky na obrábění doznaly v tomto případě snížení, ovšem jak bylo zmíněno výše, pokud započítáme i výrobu rámu, jsou nároky spolu s cenou podobné jak v případě konstrukce formy bez rámu.

Tabulka 16 Náklady obráběnou polystyrenovou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – URSA XPS UFN VII L	325
Obrábění modelu	4020
Materiál rámu - Překližka	50
Vytvoření rámu	900
Příprava na vytvoření formy	125
Úprava povrchu – Epoxidový nátěr Epsilon	110
Nanášení nátěru	250
Celková cena	5940

Umělé dřevo

Při použití umělého dřeva slouží rám pouze k vzájemné fixaci polohy jednotlivých částí formy a pro její vyztužení není nutný.

Tabulka 17 Náklady na pěňnou formu

Náklad	Cena [Kč]
Materiál modelu – Ebaboard L-1	4790
Obrábění modelu	4020
Materiál rámu - Překližka	900
Vytvoření rámu	110
Příprava na vytvoření formy	125
Celková cena	10085

I při použití pomocné ho rámu se cena jeví nižší než u samonosné konstrukce. Při opakovaném použití rám může být cena teoreticky o třetinu nižší.

7.4.3 Stavebnice rámu

Stavebnice se skládá pouze z bočnic a desek tvořících dno. Stavebnicový systém byl zvolen proto, aby umožnil rychlejší návrh a produkci nových forem podle již předem navrženého vnějšího obalu a každý rám tak nemusel být unikátní k tvarovce jako doposud. Konstruktor v případě vhodné tvarovky pak zvolí odpovídající rozměr rámu, pro který navrhne funkční vnitřní část, a pracovník výroby jej pouze složí dohromady z již vyrobených dílů. Stejně tak je možné využít jeden rám pro umístění více forem.

Podpurný rám

Rozměry bočnic jsou zvoleny tak, aby do nich bylo možné umístit formy pro vybraný rozsah cihel 400 x 500 x 500 mm. V těchto rozměrech byly zvoleny funkční šířky 150, 250, 350, 450 a 550 mm a výšky 250, 350 a 450 mm. Pro každou výšku jsou vyrobeny šířkové variace. Výška 150 mm byla vyloučena kvůli snížení počtu variant, vzhledem k výsledné velikosti není nezbytně nutný a lze nahradit jinou variantou. Celkový počet možných variant bočnice byl takto stanoven na 15.

Tabulka 18 Rozměrové varianty rámu – 1. návrh

Varianty	Výška		
Šířka	150 x 250	150 x 350	150 x 450
	250 x 250	250 x 350	250 x 450
	350 x 250	350 x 350	350 x 450
	450 x 250	450 x 350	450 x 450
	550 x 250	550 x 350	550 x 450

Pro každý rám jsou potřeba čtyři bočnice, aby mohla být složena libovolně velká varianta je potřeba vyrobit celkem šedesát kusů těchto bočnic.

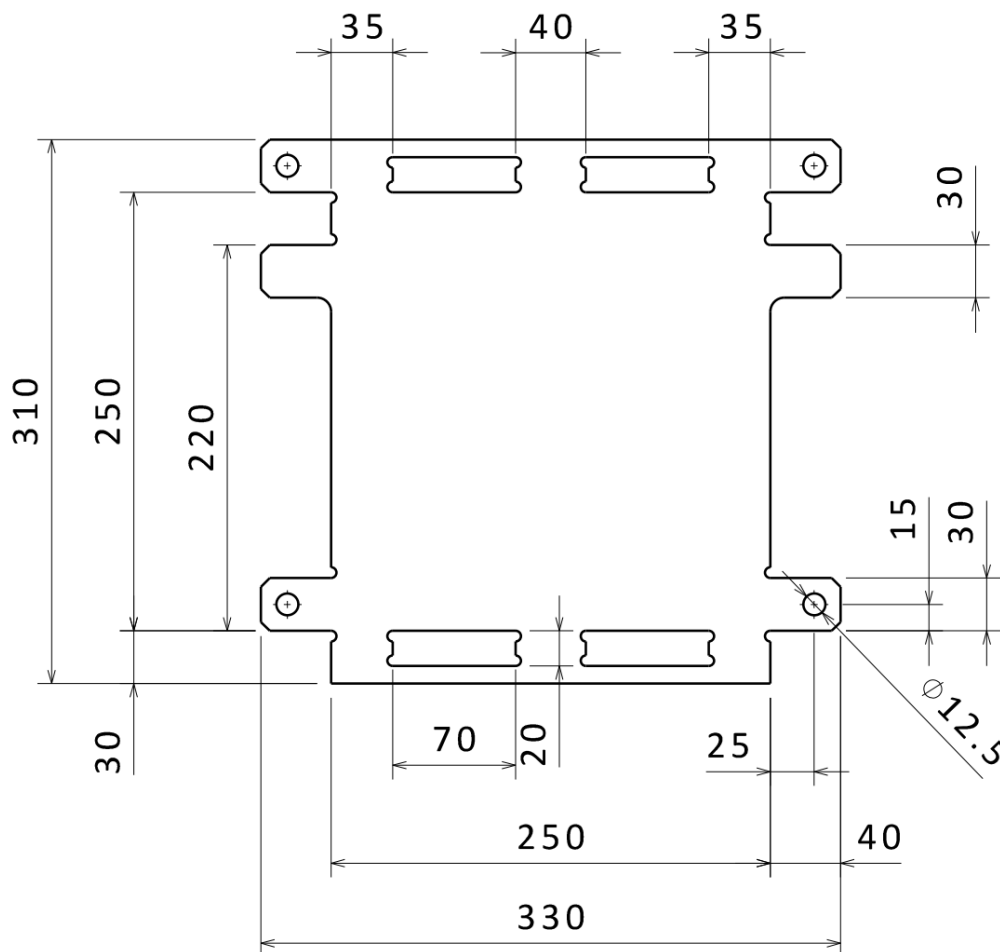
Tento návrh byl navržen na základě redukce počtu možných kombinací rozměrů a ještě více tak usnadnit proces volby v počáteční konstrukční fázi, stejně jako při sestavení během samotné výroby. Forma samotná nutně nemusí vyplňovat celý prostor rámu. Buď může být do většího rámu ustanoveno několik menších forem, nebo může být zbytkový prostor vymezen pouze například polystyrenovými kvádry sloužícími jako výplň.

Byly v důsledku tohoto rozhodnutí rozměry šířky omezeny na hodnoty 350 a 550 mm. Rovněž rozměry výšek byly zahrnuty pouze v hodnotách 250 a 450 mm. To představuje pouze 4 varianty jednotlivých bočnic. Celkově je tedy na libovolný rám potřeba vyrobit 16 desek.

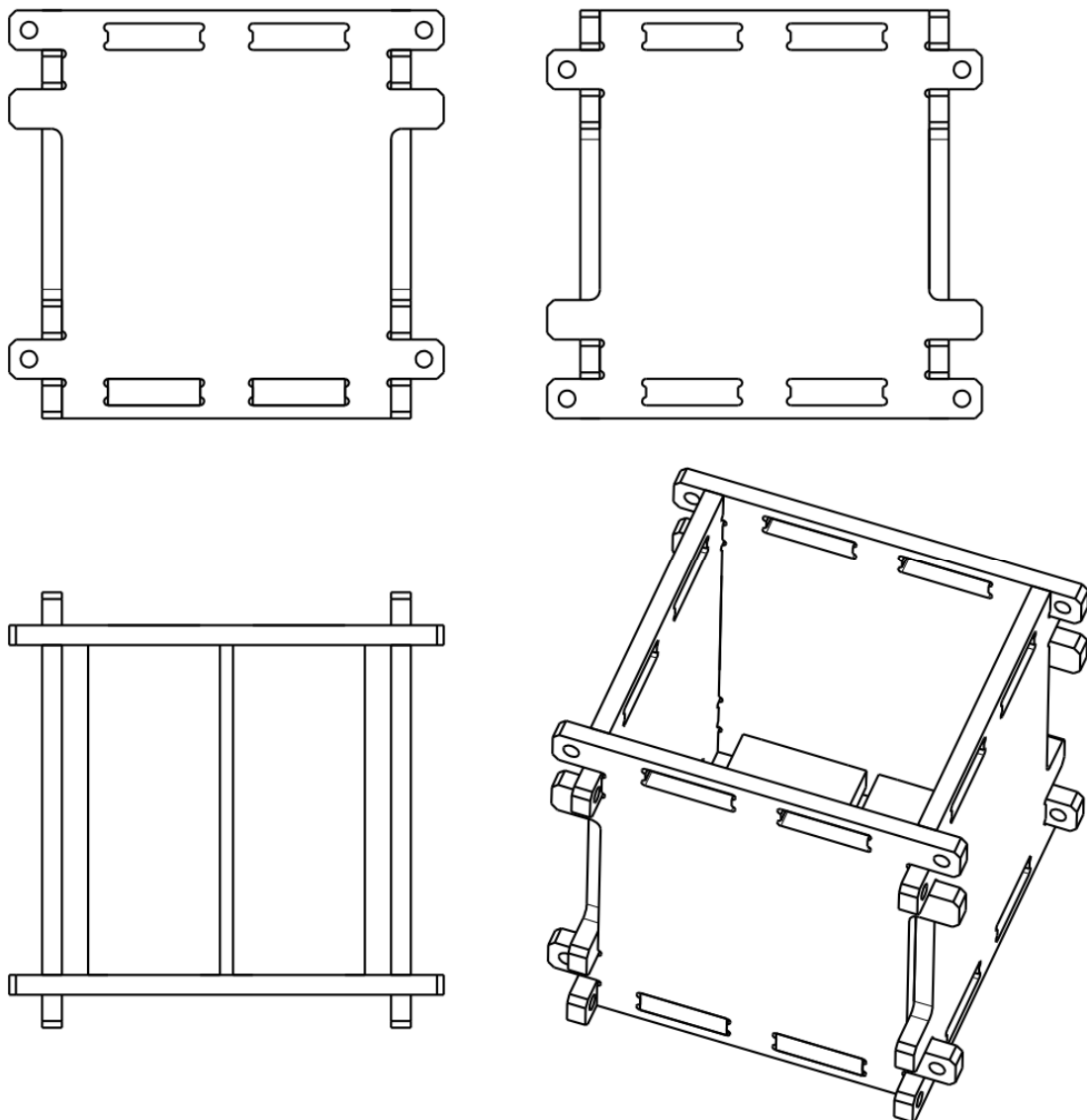
Tabulka 19 Rozměrové varianty rámu - 2. návrh

Varianty	Výška	
Šířka	350 x 250	350 x 550
	550 x 250	550 x 550

Základem koncepce bočnice je použití jediného tvaru, který by mohl být použit na všech stranách rámu a přitom umožňoval stále definovaně sestavit všechny strany dohromady. Návrh je postaven tak, aby byl jednoduše parametricky upravitelný a se stávajícími prostředky také jednoduše výrobitelný. Zvolená geometrie tak může být použita k vytvoření různě velkých rámu, pokud bude dodržena řada 100 mm přírůstků.



Obrázek 37 Schématický náčrt bočnice pro rozměry 250x250mm



Obrázek 38 Schéma rámu pro rozměry 250x250x250mm

8 Testy obrábění

U materiálů dostupných v polotovarech určených k následnému obrobení jednotlivých dílů formy bylo potřeba zjistit jejich obrobiteľnost. Samotná vlastnost těchto pěn být třískově obráběn není problém, předmětem zkoumání byla spíše kvalita obrobeného povrchu a vliv řezných podmínek na povrch.

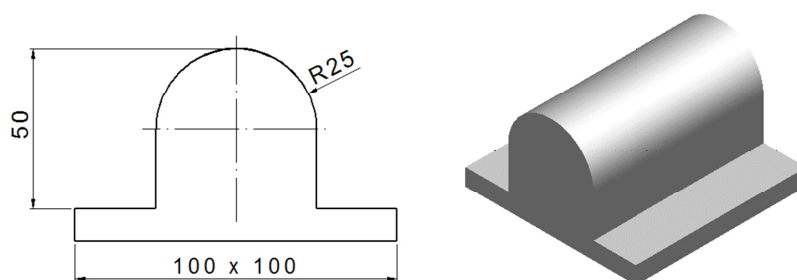
8.1 Obráběné materiály

V již proběhlých testech bylo zkoumáno obrábění těchto pěn

označení	typ	označení výrobce / bližší informace
P1	extrudovaný polystyren	URSA XPS N-V-L (tloušťka 120mm)
P2		FIBRAN XPS 500-L (tloušťka 120mm)
P3		AUSTRO TOP 70FS (tloušťka 200mm)
P4		URSA XPS UFN VII L (tloušťka 120mm)
PUR5	PUR Deska (50 kg/m ³)	Lepená (40mm)
4	PUR pěna (≈110 kg/m ³) (A) Purinova 50/48P + (B) Purocin B 1611P0688	(A) 0,10 + (B) 0,10
5		(A) 0,08 + (B) 0,08
7		(A) 0,085 + (B) 0,085
8		(A) 0,09 + (B) 0,09
9		(A) 0,08 + (B) 0,11
10		(A) 0,11 + (B) 0,08
21	PUR pěna (≈48 kg/m ³)	(A) 0,135 + (B) 0,035
22		(A) 0,045 + (B) 0,045
23		(A) 0,05 + (B) 0,05
24		(A) 0,04 + (B) 0,05
25		(A) 0,05 + (B) 0,04
31	Epoxydová pěna (LG 100 + HG30 + FC3)	
32		
33		
34		

Tabulka 20 Seznam obrobených pěn

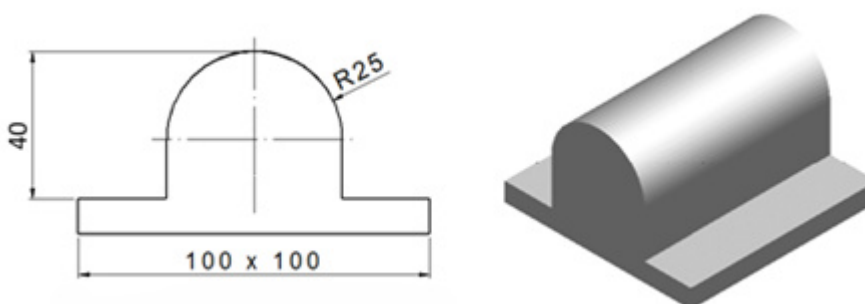
8.2 Popis experimentu



Obrázek 39 Schéma testovacího modelu 1

Pro testování obrábitelnosti byl navržen model (Obrázek 39), který obsahuje jak plochy rovinné, tak i plochy tvarové (část válce). Polotovarem pro obrábění byla krychle o straně 100 mm.

Pro lepší využití vzorků byl pro vzorky P3, P4, PUR5 a 21÷25 testovací model mírně změněn.



Obrázek 40 Schéma testovacího modelu 2

Pro získání porovnatelných výsledků bylo rozhodnuto o stejných řezných podmínkách pro všechny testované materiály. Pro hrubování byla zvolena čelní válcová fréza se dvěma břity z důvodu větší zubové mezery na nástroji, aby případná plastická tříška měla prostor v nástroji a neničila obrobený povrch. Tento nástroj byl rovněž použit i na obrábění rovinných a svislých ploch na čisto. Pro lepší kvalitu vodorovných ploch byl zvolen nástroj s břitem do osy nástroje. Pro dokončování tvarové plochy byla použita kulová fréza se čtyřmi zuby, neboť zde by již objem třísek neměl být takový, aby mohlo dojít k zahlcení nástroje.

Zvolené řezné podmínky (řezná rychlost v_c , hloubka třísky a_p , krok do strany a_e a posuv na zub f_z) jsou uvedené v následující tabulce. V uvedené tabulce je rovněž označení nástroje a jeho výrobce, nástroje jsou vyrobené z rychlořezné oceli s pozitivním úhlem čela. Pro dokončování povrchu bylo využito nesousledného frézování, které u měkkých materiálů zajišťuje lepší vzhled obrobeneho povrchu. Přídavek na dokončování (po hrubování válcovou frézou či dohrubování kulovou frézou) byl 1,5 mm.

Nástroj		hrubování	na čisto
válcová fréza průměr 16 mm ZPS-FN 273618.160	břity = 2 $\lambda_n = 40^\circ$ $\gamma_n = 20^\circ$	$v_c = 150$ m/min $a_p = 27$ mm $a_e = 10$ mm $f_z = 0,25$ mm/z	$v_c = 150$ m/min $a_p = 1,5$ mm $a_e = 8$ mm $f_z = 0,25$ mm/z
kulová fréza průměr 10 mm ZPS-FN 531718.100	břity = 4 $\lambda_n = 0^\circ$ $\gamma_n = 12^\circ$	$v_c = 150$ m/min $a_p = 1,5 - 5,0$ mm $a_e = 4,9$ mm $f_z = 0,25$ mm/z	$v_c = 150$ m/min $a_p = 1,5$ mm $a_e = 1$ mm $f_z = 0,05$ mm/z

Tabulka 21 Řezné podmínky nástrojů ZPS

Do testu byly rovněž zařazeny nástroje od firmy Fraisa, s řeznou geometrií původně určenou k obrábění vlákniny vyztužených plastů. Velikost posuvu na zuby lze s předchozími nástroji srovnat obtížně protože, tyto nástroje mají 14 břitů a vzhledem k průměru 10 mm nemají srovnatelně velké zubové mezery pro materiál. Velké množství zubů ovšem stále umožňuje vysoké minutové posuvy.

Nástroj		hrubování	na čisto
válcová fréza průměr 10 mm Fraisa 20060.450 HM 2713	břity = 14 $\lambda_n = -^\circ$ $\gamma_n = -^\circ$	$v_c = 141$ m/min $a_p = 25$ mm $a_e = 8$ mm $f_z = 0,08$ mm/z	$v_c = 141$ m/min $a_p = 1,5$ mm $a_e = 6$ mm $f_z = 0,8$ mm/z
kulová fréza průměr 10 mm Fraisa 20760.450 HM 2716	břity = 14 $\lambda_n = -^\circ$ $\gamma_n = -^\circ$	$v_c = 141$ m/min $a_p = 1,5 - 5,0$ mm $a_e = 4,9$ mm $f_z = 0,08$ mm/z	$v_c = 141$ m/min $a_p = 1,5$ mm $a_e = 1$ mm $f_z = 0,023$ mm/z

Tabulka 22 Řezné podmínky Fraisa

8.3 Výsledky experimentu

Všechny výše uvedené testované materiály se obráběly velmi dobře, ale mezi PUR a PS je při stejných nástrojích a podmínkách rozdíl v kvalitě povrchu a utváření třísky.

PUR pěny mají tendenci vzhledem vyšší poréznosti a křehkosti se při kontaktu s břitem rozpadat na jemná zrníčka. Obrobený povrch je proti PS hrubší, ale spíše obráběním je dán vlastní velikostí pórů v materiálu.

Vzorek P21 se vyznačoval vysokou porozitou, podle špatných rozměrů vypěněného polotovaru příliš nízkým množstvím použitých složek, které tak ani nedokázaly úplně vyplnit formu a výsledná velikost pórů je tak pravděpodobně největší (Obrázek 41). Naproti tomu vzorek P23 s větším množstvím složek měl povrch výrazně lepší a srovnatelný se vzorkem PUR5, který byl slepen ze 40 mm desky s gramáží 50 kg/m³.



Obrázek 41 Povrch vzorku P21 s výraznou porézností



Obrázek 42 Povrch vzorku P23

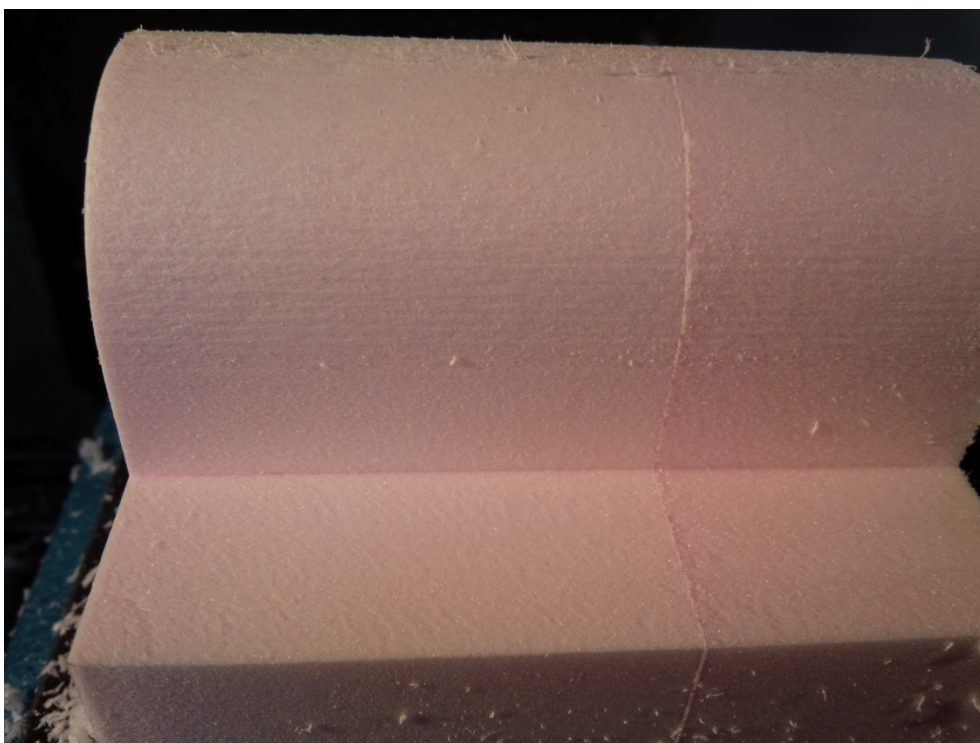
Obrábění EPS se od předchozích testů PUR pěn liší větší houževnatostí materiálu a nižší porézností, jehož třísky tak mají větší soudržnost a tvoří delší kusy a v některých případech i chuchvalce. Původně zvolenými nástroji šly testované vzorky obrábět dobře, ovšem po dokončovací operaci zůstávají na povrchu jemné chloupky. Nejpatrnější je tento jev na P2, to může být způsobeno pouze více kontrastní barvou materiálu.



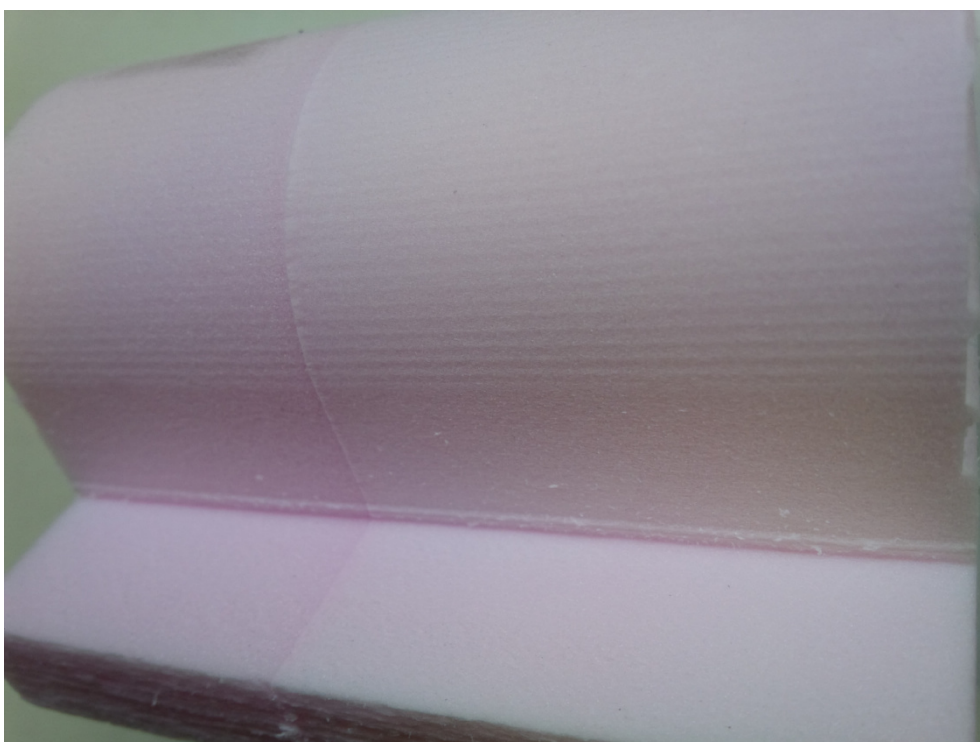
Obrázek 43 Třísky vzorku P3

Dobrou kvalitou povrchu při zvolených podmínkách měl vzorek P3. Nevyznačuje se velkou porézností a obrobený povrch je hladký a celistvý. Při bližším pohledu jsou ovšem i zde vidět drobné chloupky. Vzorek P4 má trochu hrubší povrch, díky větší poréznosti, ovšem stále hladký a má vyšší tuhost a tvrdost než P3. P1 má povrch opět hrubší. Nejnižší kvalitu povrchu má vzorek P2, ovšem při srovnatelné tuhosti a tvrdosti jako P4. Obecně lze asi tvrdit, že kvalita povrchu u testovaných vzorků z extrudovaného PS je vyšší než u vzorků z PUR.

Vzhledem k horšímu utváření třísek byly na vzorcích z PS testovány nástroje Fraisa. Tady se jejich řezná geometrie a velké množství zubů ukázaly jako výhodnější, protože po dokončení nejsou na povrchu dříve zmíněné chloupky. Minimálně pro dokončovací operace se ty to nástroje ukázaly jako lepší.



Obrázek 44 Povrch vzorku P3 po obrobení nástroji ZPS



Obrázek 45 Vzorek P3 Obrobený nástroji Fraisa



Obrázek 46 Srovnání P2 - vlevo ZPS, vpravo Fraisa

U válcové frézy Fraisa se jako nevýhodná ukázala geometrie břitů na čele nástroje. Byť je po obvodu nástroje 14 zubů, jsou přes čelo vybroušeny pouze 2. To se u některých pěn ukázalo jako nevhodné při dokončování ploch čelem vysokými minutovými posuvy. Počet břitů na čele se projevuje také při obrábění bokem nástroje. Na Obrázek 45 je v rohu obrobených stěn hranka, která zřejmě vzniká tím, že nástroj obrábí bokem při posuvu vyhovujícím 14 zubům, je tento posuv příliš vysoký pro pouze 2 zuby. Zbytek zubů začíná zhruba 1,5 mm od čela.



Obrázek 47 Válcová fréza Fraisa

8.4 Závěr experimentu

Testy obrábění ukázaly, že v případě vypěňovaných kostek může být přijatelná kvalita povrchu dosažena pouze samotným vypěněním. Dodatečné úpravy frézováním funkčních ploch pro odlévání cihel nejsou vhodné.

Vypěňování se nezdá být vhodné pro úplnou výrobu navrženého zástupce. Ovšem pro extrémně velké kusové zakázky by tato technologie mohla být použita úspěšně. Stejně jako v případě velkých sérií, kde by mohlo dojít k opakovanému jednorázovému použití tvarových prvků.

9 Závěr

Závěrečná práce napsána na základě kooperace s hlavním dodavatelem žárovzdorných výrobků a surovin P-D Refractories CZ a.s., si kladla za cíl zefektivnit a zautomatizovat výrobu forem na tyto žárovzdorné tvárnice.

Po důkladné teoretické rešerši následoval výzkum a podrobné popsání momentálního stavu výrobního procesu společnosti P-D Refractories. Následujícím krokem bylo důkladné prozkoumání kompletního portfolia výrobků, na jejichž bázi byl pomocí analýzy vybrán reprezentativní vzorek, jehož rozměry odpovídají většině vyrobených forem. Výsledek této metody jasně zobrazil ideální hodnoty rozměrů nejčastěji vyráběných forem.

Návrh na zefektivnění výrobního postupu byl vypracován s ohledem na časové, technologické a konstrukční hledisko se zaměřením zvýšení produktivity a snížení poměru lidské práce ku modernizaci výroby.

V závěru diplomové práce bylo docíleno různorodých návrhů, jež byly jednotlivě vyhodnoceny z hlediska časové a finanční náročnosti a byl doporučen ideální výrobní postup s ohledem na nejnovější technologie.

10 Seznam použitých zdrojů

1. **Garbers-Craig, A.M.** Presidential address: How cool are refractory materials? *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Září 2008, str. 16.
2. **Kodera, Michal.** *Výroba žáruvzdorných vibrolitých materiálů*. Praha : Bakalářská práce (Bc.) České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, 2014.
3. **Hájek, Vít.** *Návrh efektivní prototypové výroby forem pro vibrolité materiály*. Praha : Bakalářská práce (Bc.) České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, 2016.
4. **ROUTSCHKA, GERALD a WUTHNOW, HARTMUT.** *Handbook of refractory materials design - properties - testing*. 4. Essen : Vulkan-Verl, 2012. ISBN 9783802731624.
5. **Caniglia, Stephen a Barna, Gordon L.** *Handbook of Industrial Refractories Technology: Principles, Types, Properties and Applications*. Westwood : Noyes publication, 1992.
6. **Surendranathan, A. O.** *An Introduction to Ceramics and Refractories*. London : CRC Press, 2014.
7. **Schacht, Charles.** *Refractories Handbook*. Pittsburgh : CRC Press, 2004. str. 520. Sv. 178. ISBN 9780203026328.
8. **Michael Szycher, Ph.D.** *Handbook of Polyurethanes*. London : CRC Press, 2013. ISBN 13:9781439863138.
9. **Wischmann, K.B. a Lagasse, R.R.** . Castable Thermoplastic Urethane Elastomers I. Formulation and Applications as Removable Encapsulants. *Journal of Elastomers & Plastics*. 1. červenec 1978, str. 3.
10. **Clemitsen, I. R.** *Castable Polyurethane Elastomers*. 2. Boca Raton : CRC Press, 2015. str. 317.
11. **Strouhal, Tomáš a Kyncl, Jiří.** Analýza objemových změn vibrolitých materiálů při tuhnutí. *Programový projekt TRIO*. Praha : P-D Refractories CZ a.s., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2016. FV10057.
12. **Beránek, Libor a Kyncl, Jiří.** Programový projekt TRIO. *Příloha č. 1, roční zpráva projektu: Odborná analýza o řešení projektu FV10057 za rok 2016*. Praha : P-D Refractories CZ a.s., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2016. FV10057.
13. **Tažký, Martin.** Stanovení objemových změn vibrolitých žáruvzdorných směsí. Brno : Zkušební laboratoř při ÚTHD FAST VUT v Brně, akreditovaná Českým institutem pro akreditaci o.p.s, 2017. 1396.
14. **Henek, Milan, a další, a další.** *Žáruvzdorné materiály*. Praha : Silikátová společnost České republiky, 2016. ISBN: 978-80-02-02669-3.
15. **Büchel, Karl H., Moretto, Hans-Heinrich a Woditsch, Peter.** *Industrial inorganic chemistry, 2 rev. ed.* Weinheim : Wiley-VCH, 2000. ISBN: 978-3-527-29849-5.
16. **KTK Blansko, spol s r.o.** ebalta. [Online] www.ebalta.cz.
17. **Smooth-On, Inc.** Smooth-On. [Online] www.smooth-on.com.

11 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Graf použití žárovzdorných materiálů (1).....	10
Obrázek 2 Výrobní portfolio.....	10
Obrázek 3 Výrobní portfolio.....	11
Obrázek 4 Rozdělní společnosti	12
Obrázek 5 Relativní smrštění vibrolitých směsí	20
Obrázek 6 Smrštění směsi A45FB.....	21
Obrázek 7 Ganttův diagram výroby tvarovky	24
Obrázek 8 Požadavky na novou technologii výroby	25
Obrázek 9 Vlastnosti ideální formy	29
Obrázek 10 Výška - nezávislá	31
Obrázek 11 Šířka - nezávislá	32
Obrázek 12 Hloubka - nezávislá	33
Obrázek 13 Hmotnost - nezávislá	34
Obrázek 14 Jádro - nezávislá	35
Obrázek 15 Vnější tvar - nezávislá.....	36
Obrázek 16 Vnitřní tvar - nezávislá	36
Obrázek 17 Výška - výběrová	38
Obrázek 18 Výška - výběrová	39
Obrázek 19 Hloubka - výběrová	39
Obrázek 20 Hmotnost - výběrová	40
Obrázek 21 Jádro - výběrová.....	41
Obrázek 22 Vnější tvar - výběrová	41
Obrázek 23 Vnitřní tvar - výběrová	41
Obrázek 24 Výkres tvarovky C-2508	42
Obrázek 25 Výkres tvarovky C-3057	43
Obrázek 26 Forma z pružného polyuretanu	48
Obrázek 27 Vzorky ošetřené plíčem	50
Obrázek 28 Nátěr Epsilon na PUR pěně.....	51
Obrázek 29 Varianty řešení forem	54
Obrázek 30 FDM.....	55
Obrázek 31 SLA.....	56
Obrázek 32 PolyJet.....	57
Obrázek 33 Řez monolitní formou	62
Obrázek 34 Příklad lité dělené formy.....	64
Obrázek 35 Schématický model sestavy bez rámu	66
Obrázek 36 Forma s vnějším nosným rámem.....	68
Obrázek 37 Schématický nákras bočnice pro rozměry 250x250mm.....	71
Obrázek 38 Schéma rámu pro rozměry 250x250x250mm	72

Obrázek 39 Schéma testovacího modelu 1.....	74
Obrázek 40 Schéma testovacího modelu 2.....	74
Obrázek 41 Povrch vzorku P21 s výraznou porézností	76
Obrázek 42 Povrch vzorku P23.....	77
Obrázek 43 Třísky vzorku P3	78
Obrázek 44 Povrch vzorku P3 po obrobení nástroji ZPS.....	79
Obrázek 45 Vzorek P3 Obrobený nástroji Fraisa	79
Obrázek 46 Srovnání P2 - vlevo ZPS, vpravo Fraisa	80
Obrázek 47 Válcová fréza Fraisa	80

12 Seznam tabulek

Tabulka 1 Surové materiály 1.....	15
Tabulka 2 Surové materiály 2.....	16
Tabulka 3 Pojiva	17
Tabulka 4 Vyhodnocení charakteristik - nezávislé.....	37
Tabulka 5 Informace o tvarovce C-3057	43
Tabulka 6 Původní náklady na tvarovku	44
Tabulka 7 Časové náklady na tvarovku	44
Tabulka 8 Srovnání cen materiálů.....	53
Tabulka 9 Náklady 3D tištěných technologií.....	61
Tabulka 10 Náklady na pěňenou formu	62
Tabulka 11 Náklady na pružnou formu.....	63
Tabulka 12 Náklady na dělenou pěňenou formu.....	64
Tabulka 13 Náklady na dělenou pružnou formu.....	65
Tabulka 14 Náklady obráběnou polystyrenovou formu	67
Tabulka 15 Náklady na pěňenou formu	67
Tabulka 16 Náklady obráběnou polystyrenovou formu	69
Tabulka 17 Náklady na pěňenou formu	69
Tabulka 18 Rozměrové varianty rámu – 1. návrh	70
Tabulka 19 Rozměrové varianty rámu - 2. návrh.....	71
Tabulka 20 Seznam obroběných pěň	73
Tabulka 21 Řezné podmínky nástrojů ZPS	75
Tabulka 22 Řezné podmínky Fraisa	75