

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav strojírenské technologie

**ANALÝZA ROZMĚROVÉ STABILITY ODLITKŮ  
LITÝCH TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Autor:** Bc. Michaela Brathová

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

PRAHA 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, že jsem uvedla všechny použité zdroje a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia

V Praze dne .....

.....

Podpis

#### Poděkování:

Děkuji všem zaměstnancům firmy Prague Casting Services a. s. za podporu při provádění experimentů. Speciální poděkování patří Jiřímu Kočovskému, Ondřeji Bezuchovi a celému týmu TPV za pomoc a konzultace při vyhodnocování experimentů. Za vedení diplomové práce děkuji Ing. Petru Zikmundovi. V neposlední řadě patří mé poděkování za podporu i mým rodičům, kteří mi umožnili studium na ČVUT v Praze.

## Abstrakt

Cílem této diplomové práce je popsat hlavní vlivy na rozměrovou stabilitu výroby odlitku lopatky 3. stupně metodou vytavitelného modelu a určit, která z výrobních operací má největší vliv na rozměrovou stabilitu odlitku, a navrhnout možná řešení pro zvýšení rozměrové stability. Pro určení rozměrové stability byly použity odchylky rozměrů lopatek naměřené v kritických sekcích lopatky pomocí optického 3D spektrometru ATOS.

## Klíčová slova:

Metoda lití na vytavitelný model, rozměrová stabilita, deformace.

## Abstract

The aim of this diploma thesis is description of main influences to dimensional stability of 3<sup>rd</sup> stage blade produced by investment casting technology and identification of the manufacturing operation with considerable influence on dimensional stability of cast and suggesting several solutions for increase of the dimensional stability. For identification of dimensional stability were used dimensional deviations measured in CTQ sections. For measurement was used 3D optical scanning system ATOS.

## Key words:

Investment Casting, dimensional stability, deformation.

# Obsah

1	Úvod .....	7
2	Historie lití na vytavitelný model .....	8
2.1	Současnost lití na vytavitelný model.....	9
3	Obecný popis metody výroby odlitků technologií vytavitelného modelu .....	10
3.1	Pre-procesy.....	10
3.1.1	Výroba voskového modelu .....	10
3.1.2	Sestava „stroměčku“ .....	16
3.1.3	Výroba keramické skořepiny .....	17
3.1.4	Lití.....	25
3.2	Post – procesy .....	29
3.2.1	Odstraňování skořepiny .....	29
3.2.2	Oddělování odlitků od vtokové soustavy .....	30
3.2.3	Odstranění zbytků keramiky.....	31
3.2.4	Cídění .....	32
3.2.5	Vady odlitků.....	32
3.2.6	Kontrola kvality.....	34
4	Určení CTQ bodů .....	37
4.1	Určení CTQ bodu na voskovém modelu.....	38
4.1.1	Posun vosk – kov .....	39
4.1.2	Měření CTQ bodů .....	41
4.1.3	Neplánované deformace .....	42
5	Rozbor rozměrové stability lopatky 3. stupně .....	43
5.1	Lisování 1. set.....	43
5.2	Lisování 2. set.....	46
5.3	Lisování 3. set.....	48
5.3.1	Shrnutí rozměrové stability operace lisování .....	51
5.4	Možné vlivy výrobních operací na rozměrovou stabilitu ocíděných lopatek 3. stupně.....	52

5.5	Srovnání rozměrové stability ve směru osy X všech setů po cídění.....	54
5.5.1	1. set.....	54
5.5.2	2. set.....	55
5.5.3	3. set.....	56
5.5.4	Shrnutí rozměrové stability odlitku ve směru osy X .....	56
5.6	Srovnání rozměrové stability ve směru osy Y všech setů po cídění.....	57
5.6.1	1. set.....	57
5.6.2	2. set.....	57
5.6.3	3. set.....	58
5.6.4	Shrnutí rozměrové stability odlitku ve směru osy Y .....	59
5.7	Srovnání rozměrové stability rotace A všech setů po cídění .....	59
5.7.1	1. set.....	59
5.7.2	2. set.....	59
5.7.3	3. set.....	60
5.7.4	Shrnutí rozměrové stability odlitku rotace A.....	60
5.8	Zhodnocení rozměrové stability.....	61
5.9	Vliv cídění odlitků .....	61
6	Keramický obal.....	63
6.1	Experiment pro zjištění rozměrů dutiny skořepiny .....	63
6.1.1	Výsledek experimentu.....	65
6.2	Chování keramické skořepiny při lití .....	67
7	Definice rozptylu výroby .....	70
8	Závěr.....	73
9	Použitá literatura .....	75
10	Přílohy .....	78

# 1 Úvod

Lití na vytavitelný model je metoda sloužící pro výrobu tvarově složitých odlitků. Řadí se mezi metody near-net-shape (téměř na hotovo), které podávají již v prvovýrobě odlitky tvarově velmi podobné výsledným výrobkům. Hlavní oblastí užití této metody jsou odvětví vyžadující velmi přesné, tvarově složité odlitky, obvykle vyráběné z drahých materiálů. Často se využívá ve zdravotnictví pro výrobu kloubních náhrad a chirurgických nástrojů, ve zbrojním průmyslu, v energetice a letectví.

Výroba odlitků touto technologií je z větší části prováděna ručně. Náklady na výrobu formy pro lisování voskového modelu, materiál a zdroje vedoucí k výrobě jednorázové keramické formy a zdroje, nástroje a prostředky pro kontrolu odlitků řadí tuto technologii mezi nejdražší slévárenské technologie. Pro maximální snížení nákladů a zmetkovitosti výroby je nezbytné přísně sledovat výrobní proces a přesně definovat výrobní postupy. Na výši výrobních nákladů má zásadní vliv rozměrová stabilita odlitků. Čím je rozměrová stabilita produkce vyšší, tím snazší je normalizace výrobních postupů. Pro definici optimálních výrobních postupů je třeba analyzovat současné výrobní postupy a určit jejich vliv na výsledné rozměry odlitků a jejich stabilitu.

Cílem této práce je popsání vlivu výrobních operací na rozměrovou stabilitu odlitku a určení operací, které na ní mají největší vliv. V teoretické části bude popsán postup výroby odlitků metodou vytavitelného modelu. V praktické části bude předmětem zkoumání rozměrová stabilita lopatky 3. stupně. Rozměrová stabilita bude zhodnocena ve všech výrobních operacích, u kterých se předpokládá vliv na rozměry tohoto odlitku. Nejprve zde bude vyhodnocena rozměrová stabilita již vyrobených setů na základě dříve provedených měření. Následně bude zkoumán vliv vybraných výrobních operací na rozměrovou stabilitu lopatky.

## 2 Historie lití na vytavitelný model

Metoda lití na vytavitelný model používaná v novodobém slévárenství vzešla z technologie tzv. ztraceného vosku. Důkazy o používání této technologie pochází už z období okolo 3000 – 4000 let př. n. l.

Touto metodou se odlévaly především tvarově složité sošky a jiné dekorativní předměty. Díky tomu, že se kolem modelu vytvoří jednorázová forma tzv. skořepina a vosk se z jejího vnitřku vytaví, získáváme možnost výroby jakkoliv složitého modelu i s negativními úkoly. Tento fakt patří k největší výhodě této technologie. Další z výhod je tvorba malých detailů, které se díky struktuře skořepiny objeví i na výsledném odlitku.

Původní civilizace zabývající se touto technologií byly obyvatelé Mezopotámie a Thajci. Následně se tato technologie objevila v Číně a Egyptě. Při vykopávkách ve Spojeném království byly objeveny střeptiny jílových forem z 1. stol. př. n. l. a fragmenty kování z vozů a postrojů pro koně vyrobené metodou vytavitelného modelu. Z toho se dá usoudit, že technologie ztraceného vosku byla rozšířená po celém světě. Ve všech starověkých kulturách byla využívána především pro umělecké, zvláště náboženské, předměty.

Tato technologie se v Evropě ve 13. století stala výhradní metodou pro tvorbu bronzových posmrtných masek králů a královen. Takovouto masku Jindřicha III. je možné vidět ve Westminsterském opatství.

Technologie lití na vytavitelný model se největšího uměleckého rozkvětu dožila v renesanční Itálii, kde se její pomocí tvořily odlitky velkých rozměrů, jako např. jezdecké sochy nebo socha Persea držícího hlavu medúzy. [1]



Obrázek 1 – busta vyrobená metodou vytavitelného vosku [1]



## 2.1 Současnost lití na vytavitelný model

Na začátku 30. let se technologie lití na vytavitelný model zařadila do slévárenských metod použitelných pro strojírenský průmysl. Tento přesun od umění do strojírenství byl dán její užitečností pro výrobu leteckých součástí, která se během druhé světové války velmi rozvinula, a technologie obrábění již neměla dostatečnou kapacitu pro stávající objem výroby. Dalším podnětem pro použití této technologie byl objev vzduchových turbín a následná potřeba odlévat žárupevné slitiny, které byly a jsou výrazně dražší než např. vysokopevné oceli. Po druhé světové válce potřeba odlitků vyrobených technologií na vytavitelný model začala pozvolna stoupat. Tento nárůst byl dán rozšířením sortimentu výrobků vyráběných touto technologií (medicína, jaderná energetika a energetika všeobecně) a nárůstem produkce v leteckém průmyslu. V dnešní době jsou největšími producenty odlitků vyrobených touto metodou Anglie, Spojené státy Americké, západní Evropa a Japonsko. Dalšími producenty jsou Rusko a Čína. Nejzajímavějšími aplikacemi jsou stále letectví, kosmonautika a vojenská technika. [1]

## 3 Obecný popis metody výroby odlitků technologií vytavitelného modelu

Výroba odlitků metodou lití na vytavitelný model se skládá ze dvou částí, a to z pre-procesů a post-procesů. V pre-procesech se zpracovává voskový model a keramická skořepina. Jsou to veškeré operace, kterými model projde až do odlití. Po odlití se již jedná o post-procesy, ve kterých se zpracovává samotný odlitek. Vzhledem k tomu, že se jedná o metodu, ve které se vyrábí velmi přesné odlitky, s přesností kolem 0,1%, s minimálními přídávky, jejichž povrch se již od výsledného výrobku příliš lišit nebude, je třeba v každé části výroby dbát na přesnost a zvýšenou opatrnost při manipulaci. [2]

### 3.1 Pre-procesy

#### 3.1.1 Výroba voskového modelu

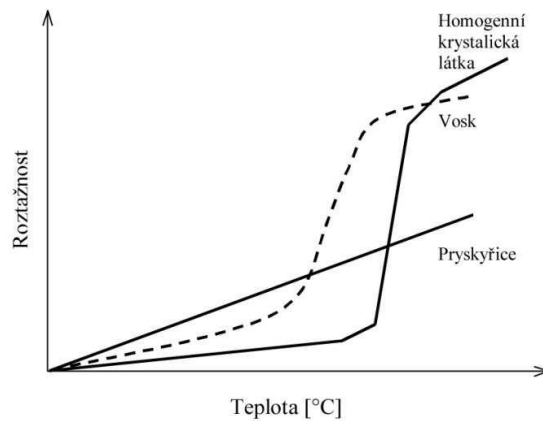
Voskový model se dá vyrobit buď litím, nebo vstříkáním. V současnosti se pro hromadnou výrobu používá vstříkávání, kvůli možnosti dosažení vyšší přesnosti, rozměrové stability a v neposlední řadě také rychlosti výrobního cyklu. Metoda lití se používá pouze výjimečně, a to především na kusovou výrobu nebo pro ověření správných rozměrů modelu. Ve výjimečných případech se používá pro některé pomocné detaily potřebné pro výrobu „stroměčku“. [2]

##### 3.1.1.1 Lisování

Jedná se o proces, ve kterém je roztavený vosk za určité teploty a rychlosti vstříkáván do kovové formy, která je zatížena specifickým tlakem. Lisování modelu je třífázový proces. V první fázi je do kovové formy s vnějším chlazením vstříknut roztavený vosk. Ve druhé fázi je vosk udržován ve formě pod specifickým tlakem, dokud nezuhne. Tyto dvě fáze se dají popsat vstříkovacím cyklem s pevnými parametry, závisujícími na velikosti modelu, požadavcích na rozměrovou stabilitu a viskozitě vstříkovaného vosku. Třetí fází je vyjmutí voskového modelu z formy pomocí vyhazovače tak, aby nedošlo k jeho deformaci.

K lisování voskových modelů se používají lis, které jsou schopny vstříkovat vosk o různé viskozitě. Dle viskozity vosky rozdělujeme na tekuté, semi-plastické a tuhé. Požadované viskozity dosahujeme ohřátím vosku v zásobníku lisu. [3]

Viskozita vosku při vstříkávání má velký vliv na výslednou rozměrovou stabilitu a kvalitu povrchu voskového modelu. Rozměrová stabilita vosku je závislá na teplotě viz graf 1. S vyšší teplotou roste i tepelná roztažnost vosku, a tím i velikost smrštění. [3]



Graf 1 – Závislost roztažnosti na teplotě [3]

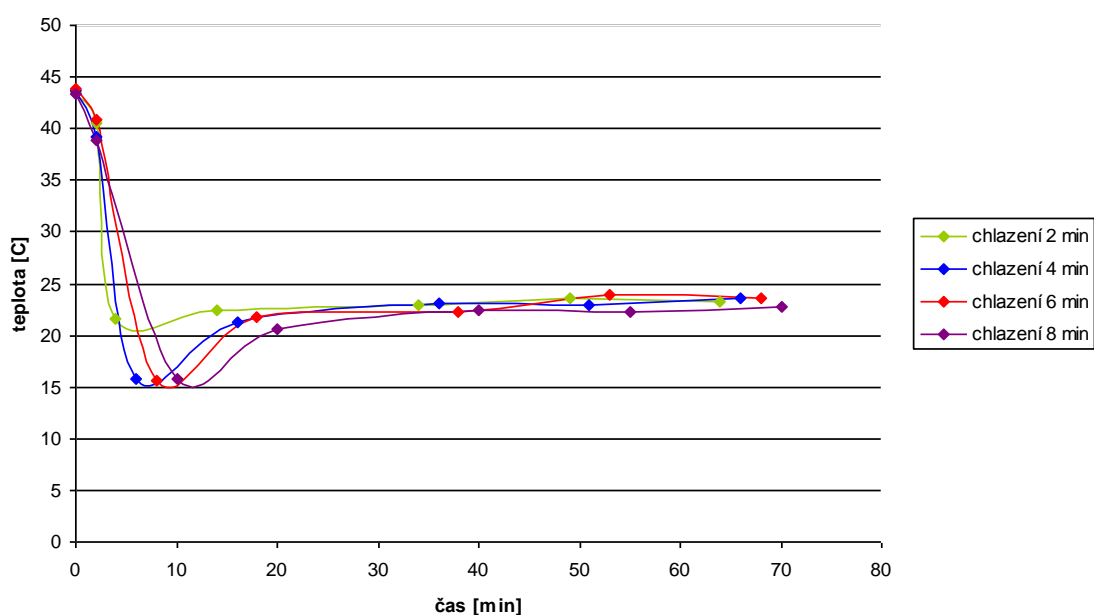
Tekutý vosk je schopen úplně vyplnit dutinu formy, a to i nejtenčí části formy, a také při jeho použití získáme dokonale hladký povrch. Jeho nevýhodou je nižší rozměrová stabilita a zvýšená pravděpodobnost výskytu staženiny v objemnějších částech modelu. Vosk v semiplastickém stavu má větší rozměrovou stabilitu, ale oproti tomu získáváme horší kvalitu povrchu. [2]

Parametry, které nejvíce ovlivňují výsledek lisování, jsou teplota trysky, vstřikovací tlak a doba cyklu. Teplota trysky a doba cyklu závisí na charakteru lisovaného modelu. Jedná-li se o tenkostěnný model nebo naopak silnostěnný model, jaká je možnost manipulace při jeho vyjímání z formy, popř. jestli se používá pro předdeformaci modelů reformer. Doba cyklu je tím delší, čím je delší čas vstřikování a doba dotlaku a čím je model objemnější. Vstřikovací tlak se u vstřikování tekutého vosku pohybuje mezi 3,5 - 8 MPa, u semiplastického je tlak vyšší. [2]

Pro dosažení co největší rozměrové stability se okamžitě po odlisování aplikuje zchlazení do lázně s vodou o teplotě cca 10 °C. Při tomto postupu je třeba respektovat chování vosku, a proto by čas strávený v chladicí lázni neměl přesáhnout 2 minuty. Při této době ochlazování se model dostatečně podchladí, ale zároveň nedochází k velké teplotní změně při jeho vyrovnání na okolní teplotu. K vyrovnání teploty voskového modelu a okolí dojde za cca 24 hodin. Po této době je možná další manipulace s modelem (přesun na další operaci). Průběh chladnutí voskového modelu po vyjmutí z chladicí lázně v závislosti na době ochlazování můžete vidět na grafu 2. [4]

Ve voskovém modelu dochází z fyzikálních důvodů ke změně tvaru. Zchlazením tyto vlivy minimalizujeme, avšak v některých případech se stejně nedaří získat správný rozměr modelu. Proto se používá tzv. reformer (chladicí přípravek). Tento přípravek slouží k předdeformaci voskového modelu. Voskový model je do něj upevněn okamžitě po odlisování a následně je vložen do chladicí lázně.

Vliv na výslednou kvalitu modelu má i materiál formy. Pro kusovou výrobu modelů se používají formy sádrové nebo pryžové, nejčastěji z Lukoprenu. Voskové modely vyrobené v těchto formách nejsou příliš přesné a jejich rozměry nejsou reprodukovatelné. Také jejich povrchová kvalita a trvanlivost nejsou dostačující. Na formy pro sériovou výrobu jsou požadavky vyšší, těmi hlavními jsou trvanlivost, výsledná kvalita voskového modelu a opakovatelnost. Proto se používají formy kovové, převážně se jedná o neželezné kovy, které mají větší korozní odolnost, snáze se vyrábí a kvůli jejich nižší hmotnosti se s nimi i snáze manipuluje. Tradičními materiály jsou nízkotavitelné slitiny, především slitiny hliníku, které mají dobrou tepelnou vodivost, což zvyšuje produktivitu. Nevýhodou je jejich nízká odolnost proti nárazu. Tuto nevýhodu řeší formy ze zinkových slitin, které jsou odolné vůči nárazu a opotřebení. [5], [6]

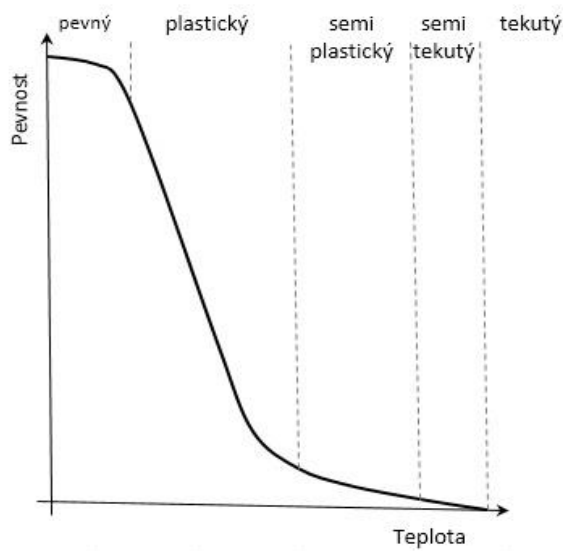


Graf 2 – Průběh chlazení voskového modelu v závislosti na době zachlazení [4]

### 3.1.1.2 Druhy vosků

Vosk je nejstarším termoplastickým polymerem známým člověku. V počátcích výroby odlitků (především uměleckých předmětů) metodou ztraceného vosku se používal včelí vosk. V dnešní době se používají vícedruhové směsi, jejichž vlastnosti jsou podobné tomuto vosku, ale dosahují vlastností vhodnějších pro jejich zpracování při výrobě součástí metodou vytavitelného modelu. Obvykle se skládají z přírodních uhlovodíkových vosků, esterů, syntetických vosků, přírodních i syntetických pryskyřic, organických plniv, vody a dalších polárních skupin. Kombinace a poměr těchto materiálů závisí na požadovaných vlastnostech voskové směsi, jakými jsou bod tání, tvrdost, viskozita, lineární deformace a objemová deformace a další. Fyzikální vlastnosti těchto složek závisí na délce jejich uhlovodíkového řetězce. Je-li řetězec kratší, má polymer např. nižší bod tání a nižší tvrdost a jinou lineární roztažnost než materiál s delším řetězcem. Složky používané na výrobu

voskových směsí v technologii lití na vytavitelný model jsou kombinací složek s různou délkou řetězce. U voskových směsí probíhá změna jejich skupenství působením tepla graduálně, protože se nejdříve rozpouští složky s kratšími uhlovodíkovými řetězci a až po té složky s delšími uhlovodíkovými řetězci. Prudkou změnu v pevnosti materiálu můžeme vidět na grafu 3. [1] [10]



Graf 3 – Závislost pevnosti voskové směsi na teplotě [1]

Kontrola kvality vosku je důležitou součástí produkce voskových modelů. Kvalitu vosků kontroluje nejen zákazník, ale i prodejce a je ve většině vlastností řízena striktními pravidly. Jednoduchá kontrola má pozitivní efekt na náklady, protože pomáhá předcházet plýtvání výrobních časů a navyšování nákladů vlivem nevhodných vlastností vosku. Vlastnosti, které se u vosků kontrolují, jsou:

- Bod skápnutí
- Bod tuhnutí
- Obsah popela
- Penetrace
- Viskozita[1]

**Bod skápnutí** je definován teplotou, při které dojde k oddělení kapky vzorku od celkového objemu. Tato teplota se získá z testu na zjištění bodu tuhnutí. Pro výrobní proces tato teplota znamená snazší určení teploty lisování.

**Obsah popela** je definován nespalitelnou částí pevných částic obsažených ve voskové směsi. Vzhledem k jeho negativním vlivům na kvalitu odlitků je jeho požadovaná hodnota co nejnižší.

**Penetrace** voskové směsi je definována v desítkách milimetrů, které standartní jehlou proniknou vertikálně do vzorku materiálu pod hodnotou konstantních hodnot zatížení,

teploty a času. Tato hodnota udává představu o tvrdosti vosku. Je-li hodnota penetrace stoupající, ale stále v limitu, jedná se o měkčí vosk a bude tedy třeba při lisování prodloužit čas výdrže ve formě. Je-li hodnota klesající, bude tomu naopak.

### Viskozita

Viskozita se dělí na kinematickou a dynamickou. Kinematická viskozita se definuje jako objem protékající přes kapiláry. [1] Dynamická viskozita je numerickým výsledkem kinematické viskozity a hustoty při stejné teplotě. [1]

Hodnoty z testů viskozity dávají výrobcům představu o tekutosti vosku a výši tlaku potřebného pro vstřikování vosku.

Existují i další možnosti testování vosků, které se např. zabývají objemovou roztažností, lineární kontrakcí, silou apod. [1]

Při zpracování vosků je důležitá i možnost jejich recyklace. Vosky se dají recyklovat dvěma způsoby, a to regenerací a rekonstitucí.

### Regenerace vosku

Regenerace se dá provádět sedimentací, filtrací a odstředěním. Při sedimentaci se vosk roztaví a nečistoty obsažené ve vosku se usadí na dně nádoby. Vosk se odlije a znovu použije. Tento proces recyklace je nejstarším ze způsobů a také nejvíce časově náročný. Filtrace se provádí ve filtračním lisu. Roztavený vosk se do něj vlije přes textilií, a tím se z něj odfiltrují nečistoty a plnivo. Recyklace odstředěním se používá pro vosky s vyšším obsahem plniva. Roztavený vosk se nalije do centrifugy a nečistoty se z něj kvůli své vyšší hustotě odstředí. Částice s podobnou hustotou, jako jsou kupříkladu popeloviny, se z vosku odstředí v nižší míře než při jiných způsobech regenerace. Regenerované vosky se poté dají využít na výrobu vtokových soustav a pomocných dílů pro sestavu. [11] [4]

### Rekonstituce vosku

Při rekonstituci se vosk čistí i filtruje a následně jsou do něj přidána plniva, čímž se obnoví jeho původní vlastnosti. Takto recyklované vosky se dají použít i pro výrobu voskových modelů. [11] [4]

### Vosky na modely

Vosky používané na výrobu modelů mají tu nejvyšší kvalitu, a to nejen co se týče fyzikálních vlastností, ale i čistoty materiálu. Vosky na modely se dají dělit do tří skupin

- Přímé neplněné vosky
- Emulgované vosky
- Plněné vosky

**Přímé neplněné vosky** jsou směsí mnoha vosků a pryskyřic. Povrch modelů vytvořených z těchto vosků dosahuje vysoké jakosti, je velmi hladký a lesklý. Jejich složení umožňuje regeneraci i rekuperaci. Jejich nevýhodou je vznik propadlin v oblastech nahromaděného materiálu. Tento nedostatek lze omezit chlazením formy. **Emulgované vosky** mají podobné složení a vlastnosti, jako vosky neplněné. Rozdílem je obsah 7-12% vody nebo vzduchu. Příměs těchto dvou složek zvyšuje rozměrovou stabilitu modelu a zároveň se zachovává dobrá kvalita povrchu. **Plněné vosky** jsou nejpoužívanější skupinou v technických aplikacích lití na vytavitelný model. Pojivo těchto vosků je obdobné, jako v předcházejících dvou případech, ale navíc obsahují plnivo, jehož obsah dosahuje 20-40%. Obvyklými plnivy jsou organické materiály v podobě prášku. Plniva se do vosků přidávají pro zvýšení rozměrové stability a snížení procenta vzniku propadlin. Požadavky na plniva jsou takové, aby měli hustotu podobnou hustotě voskového pojiva, aby nedocházelo k jejich usazování nebo hromadění, a aby byly úplně spalitelné bez zanechání popela. Také se musí zvolit vhodná zrnitost, aby nedocházelo ke zhoršení kvality povrchu. Často používaným plnivem je polystyren. Jeho hlavním přínosem je zmenšení smrštění až o 50% oproti neplněnému vosku. Negativní vlastností tohoto plniva je snížení viskozity, a to až o 600% při obsahu 40% plniva a teplotě 100 °C. Dalším negativní vlastností je zvýšení bodu měknutí a skápnutí, což ovlivňuje výrobní proces. [12] [4] [1] [13]

#### Vosková směs Hyfill B417

Vosková směs Hyfill B417 od firmy REMET je používána pro výrobu voskových modelů zkoumaných v této práci. Jedná se o plněný vosk s obsahem plniva okolo 30 %. Co se týče fyzikálních vlastností, tak jsou v bodě měknutí, bodě skápnutí a bodě tuhnutí velmi podobné. Bod měknutí a skápnutí je mezi 67 a 69 °C. Tento vosk tuhne při 65 °C. Výraznější rozdíl se projeví až u viskozity, která se výrazně zvyšuje. Při teplotě 100 °C se pohybuje okolo 180 cPs, což je o 87 cPs víc, než u běžného neplněného vosku. Velkou výhodou je nižší objemová roztažnost při lisovací teplotě. Ta je o skoro 20 % nižší než u neplněného vosku. Ještě pozitivněji působí na lineární smrštění, které se zmenší až o 60 % oproti neplněnému vosku tj. na 0,76 %. Plnivo též zlepšuje mechanické vlastnosti. Kvalita povrchu sice není tak vysoká, jako v případě neplněných vosků, ale i tak je dostačující. Tento vosk zcela odpovídá požadavkům na vlastnosti vosku pro výrobu modelů. [14] [13]

#### Vosky na vtokové soustavy

Jsou na podobné bázi jako vosky na modely, ale jejich složení je uzpůsobeno tak, aby byly schopny unést váhu stromečku. Často se na výrobu vtokové soustavy používají recyklované vosky. Tyto vosky mají nižší bod tání než vosky plněné, používající se na výrobu modelů. Speciální je vodou rozpustný vosk používaný na výrobu složitých dutin, které by se těžko vyráběly jinou metodou. [1] [4]

### 3.1.1.3 Hrotování

Hrotování je konečná úprava voskových modelů před slepením do „stroměčku“. V této operaci se odstraňují otřepy vzniklé z dělicí roviny formy a opravují se povrchové vady a nedokonalosti na povrchu modelu. Tato operace je velmi důležitá, protože ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu odlitků a výši nákladů vzniklých potřebou oprav v post-procesech.

Vzhledem k tomu, že každý vylisovaný kus je originál, nedá se tato operace provádět strojově. Proto ji provádí speciálně zaškolené dělnice pomocí skalpelu, horkých kovových nástrojů a opravného vosku, který má většinou jinou barvu než je barva modelu. Z těchto důvodů se jedná o část pre-procesů, která významně ovlivňuje výsledný geometrický tvar a kvalitu povrchu voskového modelu. Kvůli tomu, že vosk začíná ztrácet svůj tvar již při 30 °C, je potřeba tuto operaci provádět v co nejkratším čase a za co nejmenšího množství vneseného tepla. Především v množství vneseného tepla je velké úskalí této operace. Jelikož teplota lidského těla je 36 °C, dělnice musí mít při manipulaci s voskovým modelem nasazené bavlněné rukavice, čímž aspoň omezí velikost přenosu tepla do modelu. Dalším opatřením proti vnášení tepla do modelu jsou zástěny, které oddělují topné těleso sloužící k nahřívání nástrojů a udržování tekutosti opravného vosku, od pracovní plochy určené k opravě modelu. [7]

Protože vosk je po vychladnutí křehký, musí dělnice s modely zacházet velmi opatrně, aby nedošlo k porušení jejich geometrického tvaru. Porušení geometrického tvaru (odštípnutí rohu modelu aj.) je vada neopravitelná a jedná se tedy o neshodný kus.



Obrázek 2 – Voskové modely (příprava na sestavu)

### 3.1.2 Sestava „stroměčku“

Stroměček je obecně používané pojmenování sestavy voskových modelů a vtokové soustavy. Pro sériovou výrobu se tvoří sestava standardní, jejíž konstrukce je odvozena od:

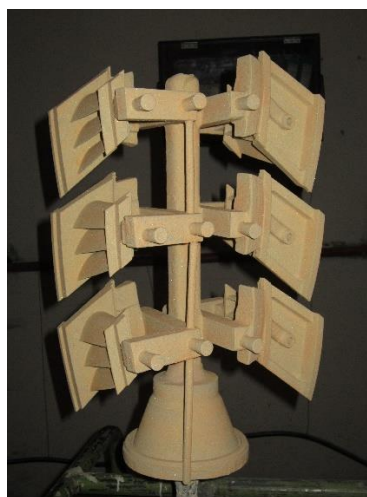
- Možnosti připojení modelu
- Obalování



- Vytavování
- Způsobu lití
- Možnosti oddělení odlitku od vtokové soustavy
- Standardizace dílů vtokových soustav [2]

Tvar stromečku by měl být vždy co nejvíce symetrický vůči vtokovému kůlu, aby při lití docházelo k rovnoměrnému plnění formy. Veškeré dutiny, které jsou buď součástí voskového modelu nebo vzniknou sestavením „stromečku“, musí být umístěny směrem dolů, aby z nich při obalování mohla vytéct přebytečná břečka a došlo tak k vytvoření rovnoměrně silné skořepiny. Důležité je také správné umístění voskových modelů z důvodu vytavení vosku v autoklávu. Nelze-li modely umístit tak, aby došlo k úplnému vytavení vosku z dutiny formy, je třeba přidat výfuky, které umožní odstranění modelového vosku z dutiny formy. V případě, že pro dokonalé vytavení nestačí ani výfuky, umísťují se na „stromeček“ vytavovací kolíky, které se po vypálení skořepiny zatmelí. [2]

Sestavování stromečku je prováděno ručně pomocí lepidla z tavné pistole a zahlazení spojů, kvůli zvýšení pevnosti spoje, se provádí horkými kovovými nástroji. Podle hmotnosti voskového modelu se na vtokovou soustavu lepí jeden nebo více modelů. Hmotnost stromečku je omezena nejen manipulovatelností, ale i maximální nosností vtokového kůlu a lepeného spoje. Sestava stromečku je poslední operací pre-procesů, ve které můžeme ovlivnit výslednou kvalitu odlitku. Proto jsou po sestavení stromečky důkladně vizuálně kontrolovány, aby se předešlo výrobě neshodných kusů.



Obrázek 3 – „Stromeček“ po první lícní vrstvě

### 3.1.3 Výroba keramické skořepiny

Výroba keramické skořepiny je rozhodující operací při výrobě odlitků metodou lití na vytavitelný model. Jinými slovy by se dalo říci, že rozměry odlitků a kvalita povrchové vrstvy je tak dobrá, jak dobrá je forma, do které se kov odlévá. Postup její výroby, volba materiálu pro její tvorbu a její tloušťka je odvislá od chování vosku, respektive od koeficientu tepelné

roztažnosti vosku, který je výrazně vyšší než koeficient tepelné roztažnosti keramiky ( $\text{Al}_2\text{O}_3$   $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ; parafín  $307 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), od způsobu lití, ale i použité slitiny. Slitina, kterou odléváme, má na tvorbu keramické skořepiny vliv nejen z hlediska licích teplot, ale i chemického složení. Zjednodušeně by se daly požadavky na keramickou skořepinu shrnout v šesti bodech. Skořepina má být:

- pevná i při licích teplotách, ale ne tak pevná, aby docházelo k tvorbě trhlin a prasklin odlitků
- snadno odstranitelná po lití
- prodyšná
- rozměrově stabilní
- být inertní vůči vosku i odlévané slitině
- žáruvzdorná [1] [8] [9]

Výroba keramické formy spočívá v několikavrstvém obalení stromečku obalovou hmotou tzv. břeckou, která je tvořena pojivem a plnivem a následně zasypána ostřivem. Obvyklý počet vrstev je mezi 7 a 15 a jejich složení se mění podle toho, o kolikátou vrstvu se jedná. První lícní obal je tvořen řidší břeckou a jemným ostřivem, aby došlo k dokonalému okopírování tvaru stromečku a především odlitku. Následuje primární obal na vodné bázi, ten má 3 vrstvy, aby došlo k vytvrzení skořepiny a schne na vzduchu. Sekundární obal je na alkoholové bázi. [4]

Obalováním se dají vytvořit i méně hluboké dutiny. Úzké hluboké dutiny, které se v odlitcích vyráběných technologií lití na vytavitelný model často vyskytují, protože se ve vysoké míře jedná o lopatky do letadlových motorů a plynových turbín, takto vytvářet nelze. Břečka by v těchto dutinách neuschla a při vytavování vosku by mohlo dojít k rozpadu skořepiny. Nejjednodušším způsobem, jak dutinu vytvořit, je zalisování keramického jádra do voskového modelu. Toto jádro se po vytavení vosku stane součástí keramické formy. Jádra se vyrábí vstříkáním těstovité keramiky do jaderníku. Hmota se následně vypálí, a tím materiál zesiluje. [4]

Jak je zmíněno výše, keramická forma se vytváří obalením stromečku v „břečce“ skládající se z plniva a pojiva a zasypáním ostřivem.

### Pojivo

Pojivo je kapalná složka břecky. Dělí se do dvou skupin, pojiva na vodné bázi a pojiva na alkoholové bázi. Požadavky na vlastnosti pojiva jsou stejné jako na vlastnosti formy, tj. musí být inertní vůči vosku i odlévanému kovu. Speciálním požadavkem je, že nesmí reagovat s plnivem a snižovat žáruvzdornost formy. Některé sloučeniny jsou sami o sobě žáruvzdorné, ale při jejich smíchání dochází ke snížení teploty tání obou z nich. Pojivo též musí po ztuhnutí dosahovat odpovídající pevnosti, aby se při lití forma nedeformovala.

Pojiva na vodné bázi by se daly též označit jako „vodné křemičité koloidní roztoky“. Koloidní roztok má vlastnosti mezi roztokem a kašovitou hmotou. Typická obalová břečka je neprůhledná směs kapaliny a keramického prášku, který se po čase usazuje na dně nádoby s kapalinou. Charakteristickou vlastností pojiva je schopnost přecházet z tekutého stavu do gelovitého stavu. Tento proces se nazývá gelace. Křemičité koloidní roztoky jsou schopny delším působením vzduchu přejít až do pevného stavu, k čemuž jim dopomáhají i různá aditiva. Tato pojiva se používají na primární obal. Vyrábí se převážně smícháním ethylsilikátů s vodou, čímž vznikne koloidní roztok o 40 % hm. koncentraci křemíku. K této hydrolyzaci je zapotřebí i malého množství kyseliny, která funguje jako katalyzátor. Aby se pojivo správně zesíťovalo a vytvořilo hydrolyzovaný roztok, je třeba dosáhnout pomocí kyseliny roztoku o pH 2. Ve chvíli, kdy začneme hydrolyzovat ethylsilikát, začíná stárnoucí proces, který vede až k vytvrzení. Doba schnutí pojiv na vodné bázi je cca 5 hod. mezi každou vrstvou. Pojiva na alkoholové fázi schnou asi 2,5 hod. mezi každou vrstvou. [1] [2] [4]

Pojiva na alkoholové bázi se používají na sekundární obal. Tvoří se hydrolyzováním ethylsilikátu vodným koloidním roztokem místo čisté vody. Tím dostaneme hybridní pojivo, které je na alkoholové bázi, protože veškerá obsažená voda je spotřebována hydrolytickou reakcí. Pojiva na alkoholové bázi tuhnou rychleji. Lze do nich přidat i vodu, aby se oddálila tuhnutí reakce. Přidáním vody však snižujeme životnost pojiva. Do některých pojiv se přidává aditivum, které ruší tyto účinky vody, ale jejich složení je přísně chráněno patenty a společnostmi, které je vlastní. Vytvrzování obalů s pojivy na alkoholové bázi probíhá v amoniakové atmosféře. Z hygienických důvodů se používají při automatizovaném obalování. [6]

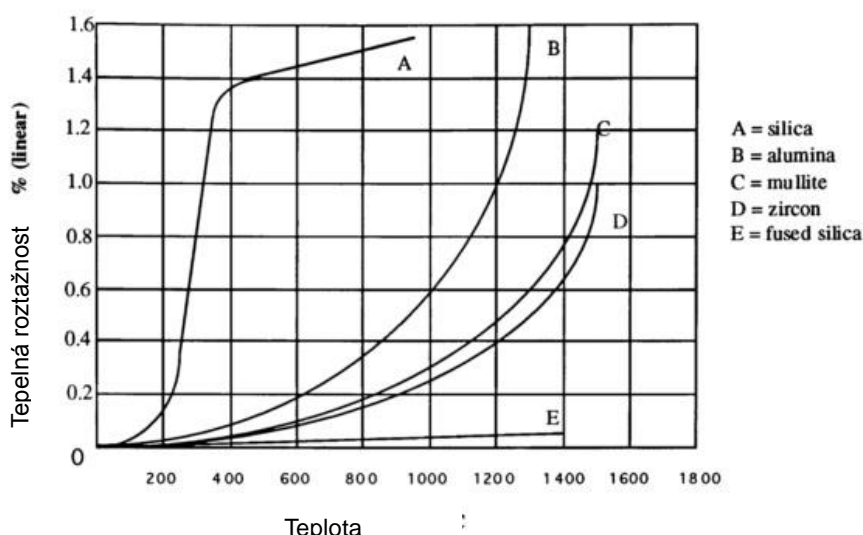
## Plnivo

Plnivo určuje základní vlastnosti formy, jakými jsou žáruvzdornost, tepelná roztažnost a netečnost vůči odlévaným kovům. [4] Materiály používanými jako plniva jsou oxidy, křemičitany, hlinitany, silicidy, karbidy aj. Výběr materiálu závisí na ceně, zrnitosti a požadovaných vlastnostech formy. Zrnitost plniva je jedním z hlavních požadavků, protože zároveň s ostřivem určuje prodyšnost formy. Nejpoužívanější jsou oxidy, především oxid hlinitý a oxid zirkoničitý a křemičitany. Hlavním důvodem jejich častého použití je jejich nízká cena, snadná dostupnost ve velkém množství, vhodná zrnitost a také dobrá žáruvzdornost. Oblíbeným křemičitanem pro obalování je Molochit, který je z 56 % složen z mullitu, obaleného ve sklovité obálce amorfního kyslíčnicku křemičitého, jehož podíl tvoří 44 %. [6] Výjimečně se používá karbid křemíku pro jeho vysokou žáruvzdornost, ale spíše jako posypový materiál pro zvýšení tepelné vodivosti formy. [4] [2]

## Ostřivo

Požadavky na ostřiva jsou stejné, jako požadavky na plniva. Není podmínkou, aby složení plniva a ostřiva bylo shodné, ale často se stává, že tomu tak je. Pro definici rozdílu mezi ostřivem a plnivem se používá hrubost zrna. Ostřivo má hrubší zrnitost než plnivo, ale i zrnitost ostřiva se liší podle jeho použití. Na primární lícni obal se používá zásyp, ve kterém se průměrná velikost zrna pohybuje mezi 0,1 – 0,25 mm. Na další obaly se používají ostřiva se zrny o průměru 0,25 – 0,5 mm. [4] [2]

Způsoby nanášení ostřiva se různí. V dnešní době se nejčastěji používá fluidní způsob. Ostřivo je nasypáno ve fluidizátoru, který vhání do ostřiva vzduch, a tím ho čeří. Do načeřeného posypového materiálu se ponoří stromeček, a tím je zajištěno rovnoměrné posypání ostřivem. Dříve se používal mechanický způsob nanášení posypového materiálu, který spočíval ve vložení stromečku do proudu volně padajících částic ostřiva. [4]



Graf 4 – Lineární roztažnost složek keramické skořepiny [15]

### 3.1.3.1 Obalování

Postup tvorby keramické formy spočívá v opakovaném obalování stromečku v „břečce“ a sypání ostřivem o vhodné zrnitosti. Mezi každou vrstvou je časová prodleva potřebná pro vysušení vrstvy. Počet vrstev ovlivňují požadavky na vlastnosti skořepiny, především požadavky na pevnost a tvrdost. Počet vrstev se pohybuje mezi pěti a patnácti. Zjednodušeně se dá říci, že čím větší a těžší odlitek vyrábíme, tím více vrstev je třeba vytvořit. [4]

Před tvorbou první lícni vrstvy je třeba stromeček očistit od nečistot z předcházející operace a odmastit ho, aby vrstva dobře přilnula. Toto čištění probíhá namočením stromečku do rozpouštědla, které je inertní vůči vosku, ale velmi účinné na odstranění mastnot a nečistot nacházejících se na povrchu modelu. Tímto rozpouštědlem může být např. aceton s lihem

v poměru 1:1 o teplotě 20 °C.

Po odmaštění se tvoří první lící vrstva. Ta je tvořena břečkou vytvořenou v poměru 5 kg plniva na litr pojiva. Plnivem je zirkonový prášek o zrnitosti 120 (většina zrn má průměr 0,120 mm) s přísadkou hlinitanu kobaltnatého, který při lití slouží jako očkovač. Toto složení je dostatečně příznivé pro dokonalé zkopírování povrchu „stroměčku“. Při namáčení je nutné se stromečkem otáčet, aby „břečka“ vytvořila rovnoměrný a celistvý obal a aby v koutech „stroměčku“ nevznikaly vzduchové bubliny. Po vyjmutí z lázně s břečkou je třeba stromečkem po nějakou dobu otáčet, aby přebytečný materiál mohl okapat. Následuje posypání žáruvzdorným ostřivem, což je v tomto případě Zirkon 120, a schnutí obalu po dobu 5 hod. Schnutí probíhá v klimatizované místnosti za stálých teplot v rozmezí 20 – 24 °C a stálé vlhkosti 50 – 70 %, kde stále proudí vzduch. Podmínky v této místnosti jsou neustále kontrolovány a zaznamenávány. V případě, že potřebujeme schnutí obalu urychlit, lze zvýšit proudění vzduchu až na 250 m/min a teplotu vzduchu na 25 – 27 °C. Dobu schnutí můžeme urychlit i chemickým vytvrzením. Po uschnutí prvního lícího obalu následuje tvorba primárního obalu a následně sekundárního obalu. Zrnitost ostřiva se s následujícími vrstvami zmenšuje, aby byla vytvořena dostatečně prodyšná forma. Podmínky schnutí jsou u každé nově vytvořené obalové vrstvy stejné, jen doba schnutí po vytvoření celého obalu je delší vlivem větší tloušťky materiálu a jeho nasákavosti. [2]

Před vytavením je třeba odřezat obal z vrchu lící jamky, výfuků a vytavovacích kolíků, aby měl vosk kudy odtékat z dutiny formy.



Obrázek 4 - Obalování

### 3.1.3.2 Vytavování

Po dokonalém uschnutí obalu následuje operace vytavení. V této operaci musí být za působení zvýšených teplot a tlaků odstraněn veškerý vosk z dutiny formy. Veškeré formy se před touto operací vizuálně zkontrolují. Prosákne-li na povrch formy vosk, indikuje to některou z vad, např. prasklinu nebo delaminaci formy. [1]

K vytavování vosku dochází ve speciálním zařízení náhlým zahřátím formy. Vosk nelze

vytavovat postupným zahříváním formy v peci, protože tepelná roztažnost vosku je několikanásobně větší než tepelná roztažnost keramiky, a tak by došlo k prasknutí formy. Principem je dosáhnout rychlého zahřátí skořepiny, aby došlo k velmi rychlému natavení voskového povrchu těsně přiléhajícímu k prvnímu obalu skořepiny. K natavení povrchové vrstvy musí dojít dřív, než se začne zbytek voskového stromečku prohřívat a expandovat. Způsoby, jak dosáhnout vytavování bez porušení skořepiny jsou:

- Vytavení v autoklávu
- Vytavení v peci za vysoké teploty
- Vytavení v peci za nízké teploty
- Vytavení při dielektrickém ohřevu
- Vytavení pomocí horkého vzduchu [1]

### Autokláv

Nejpoužívanějším způsobem je vytavování v autoklávu. Hlavním důvodem je velmi šetrné odstranění vosku bez porušení skořepiny, a to i v případě vytavování z tenčích skořepin. Obalené stromečky se vloží do autoklávu, který by se dal zjednodušeně popsat jako tlaková nádoba, protože pracuje na principu působení vodní páry a zvýšeného tlaku. Pracovní tlak se pohybuje mezi 0,8 a 0,7 atm a teplota páry se tím zvýší až na cca 170 °C. Doba vytavení se pohybuje v řádech minut, obvykle do 30 minut u běžně velkých „stromečků“. Vytavený vosk je zachycován ve sběrné nádobě a po recyklaci je znovu používán. [7] [4]



Obrázek 5 - Autokláv

### Vytavení za vysoké teploty

K vytavení za vysoké teploty dochází v peci předehřáté na 750 °C. V průběhu vytavování se v peci dosáhne teploty 900 – 1100 °C, čímž dojde po vytavení zároveň k vypálení skořepiny. Tímto způsobem odstranění vosku ze skořepiny dochází k 10 – 15 % ztrátám na vosku, proto je tento způsob nevýhodný. Doba vytavení a vypálení trvá dohromady 15-25 minut. [2]

### Vytavení za nízké teploty

Vytavování za nízké teploty probíhá vložením stromečku do roztavené hmoty, nejčastěji stejného složení, jako je materiál voskového modelu, popřípadě do nízkotavitelných slitin nebo do vody. Vytavování ve stejném materiálu probíhá cca 10-15 min a princip je podobný jako u autoklávu. Mezi vnitřní stěnou skořepiny a voskovým modelem se vytvoří spára vzniklá rychlým natavením povrchu modelu. Obdobný proces je i u vytavování v nízkotavitelných slitinách. Mírný rozdíl je u vytavování ve vroucí vodě. Doba vytavení je mezi 10 a 20 minutami a ohřev probíhá nasátím vody do skořepiny. Také zde dochází k nasátí jen malého množství roztaveného vosku do skořepiny. Vosk ze skořepiny vyplave na povrch vodní lázně. [2]

### Vytavení dielektrickým ohřevem

Před vytavením dielektrickým ohřevem je třeba navlhčit skořepinu vodou. Poté se vloží do pole s vysokofrekvenční oscilací, a tím dojde k rychlému ohřevu skořepiny a vytavení vosku. [2]

### Vytavování horkým vzduchem

K vytavování horkým vzduchem dochází zevnitř modelu. Proces probíhá zahřátím vtokového kúlu horkým vzduchem, čímž dojde k natavení vosku okolo vtokového kúlu a ten začne odtékat ven. [2]

#### 3.1.3.3 Vypalování skořepiny

Další operací je vypálení skořepiny. Tato operace je velmi důležitá pro další použití skořepiny, protože při ní dochází k vypálení zbytků vosku, odstranění těkavých látek, vody a také k úplnému vytvrzení skořepiny. Vypálením skořepiny dojde k získání jejích inertních vlastností vůči odlévanému kovu a také k získání vysoké stability. Mechanické vlastnosti skořepiny také úzce souvisí s procesem vypalování. Při nesprávném nastavení vypalovacího procesu se při lití mohou uvolňovat plyny, a tím způsobit nezaběhnutí odlitku, nebo se mohou objevit jiné vady odlitku. [1]

Teploty uváděné v kapitole 3.1.3.2 jsou vhodné pro skořepiny vyrobené z oxidu křemičitého. Náběh teploty při vypálení musí být plynulý a jeho rychlost nízká, protože dochází ke krystalografickým přeměnám křemene. Počáteční teplota v peci je 350 °C a ohřev na vyšší teplotu probíhá rychlostí 5-6 °C za minutu. Po dosažení teploty 573 °C se zařadí 30 minutová výdrž, při níž dojde ke krystalografickým přeměnám křemene. Skořepiny jsou při této teplotě náchylné ke vzniku prasklin a deformací. Po této době znovu pokračuje ohřev pomalou rychlostí až na žíhací teplotu, tj. 950-1100 °C. Použijeme-li k výrobě skořepiny oxid hlinitý, musíme skořepinu žíhat při teplotách kolem 1500 °C. Skořepiny z oxidu hlinitého jsou odolnější vůči nárazovým změnám teploty, proto můžeme pec, do které skořepinu

zakládáme předehřát na vyšší teplotu než v případě skořepiny z oxidu křemičitého. [4]

Ve formě je kromě vosku obsažen i malý podíl alkoholu, který je třeba odstranit, a podíl vody. K úplnému odpaření alkoholu dochází již při teplotě 100 °C. U vody je to složitější. Teplota varu je sice 100 °C, ale při této teplotě k jejímu úplnému odstranění nedojde. Na to jsou vyžadovány vyšší teploty, v některých případech i 1000 °C. Konkrétní teploty vypalování závisí na použitých materiálech. [1]

Jak je uvedeno výše, u vypalování jde o odstranění zbytků vosku. K tomu, aby shořel, je třeba přístupu kyslíku. U plynových a elektrických pecí, které jsou k tomuto účelu používány, je vyžadován obsah 8 – 10 % volného kyslíku. V elektrických pecích se kyslík dostává do pracovního prostoru pece přes ventilaci. U plynových pecí je dosažení potřebného množství volného kyslíku obtížnější, protože kvůli hoření plynu zde dochází k jeho spalování. Obsah kyslíku v pracovním prostoru pece musí být monitorován, aby neklesl, protože by nedošlo k dokonalému vypálení zuhelnatělého vosku, a tím by ve formě zbyl uhlík. Tento zbytkový uhlík reaguje s odlévanými ocelmi a superslitinami a negativně ovlivňuje jejich vlastnosti. Aby k tomu nedošlo, musíme dodržet minimální teplotu pro vypálení vosku 500 °C, ale vhodnější je dosáhnout 800 °C. Následně se teplota zvýší až na 1000 – 1200 °C, kdy dojde k zesintrování keramiky a forma se takto předehřátá předává na licí pole, kde dojde k odlití kovu. U plynových pecí je proces z důvodů spalování kyslíku složitější, a proto se zde uplatňuje dvoustupňový proces. To znamená, že při nižších teplotách se vypálí zbytky vosku, skořepina se ochladí a následně vypálí před samotným litím. Vypálení před litím nevyžaduje speciální přísun kyslíku. [1] [4]

Dvoustupňová metoda má výhodu v možnosti kontroly vnitřku skořepiny, nedošlo-li k odloupení kousku skořepiny, což by mohlo způsobit neshodnost odlitku (nekovový vměstek) nebo k prasknutí skořepiny. Proto se často využívá při vypalování v elektrických pecích. V elektrických pecích takto probíhající proces trvá 8 hodin. Zhruba 4 hodiny trvá dosažení 800 °C, poté následuje 4 hodinová výdrž na této teplotě, kdy dojde k úplnému vypálení zbytků vosku. [1]

Ke **kontrole skořepiny** se používají jednoduché zkoušky. Skořepina se nejdříve vypláchne proudem vody a její obsah je vylit na síto. Tím se zjistí, zda-li nedošlo k odloupení části skořepiny. Pro nalezení prasklin se používá penetrační zkouška, kdy se do dutiny skořepiny nalije penetrační činidlo a nechá se chvíli působit, poté se vylije a skořepina se z vnějšku prohlédne. Prasklina se projeví vyvzlínáním penetračního činidla na povrch skořepiny. Po té se forma nechá úplně vyschnout a předá se na další operaci.





Obrázek 6 – Elektrická vypalovací pec

Je-li potřeba, dojde ještě k tepelné izolaci skořepiny skelnou vatou, aby došlo k pomalejšímu tuhnutí odlitého kovu, a tím k rovnoměrné krystalizaci. Před odlitím je forma vložena do pece, přehřátá na 1000 – 1200 °C podle odlévané slitiny. Zde dojde k zesintování keramiky a také přehřevu formy, který je potřeba pro lití, aby vlivem proudu taveniny o teplotách kolem 1400 °C nedošlo k prasknutí skořepiny.

Vyrábíme-li odlitky z nízkotavitelných slitin, je proces vypalování skořepiny odlišný. Vypalovací teplota se pohybuje okolo 850 °C. Vypalování keramické formy při nižších teplotách oproti teplotám používaným na skořepiny pro oceli nebo superslitiny je důležité kvůli zachování nižší pevnosti této skořepiny. Nízkotavitelné slitiny více lineárně i objemově smršťují a při vyšších pevnostech skořepin by docházelo k jejich praskání. [1]

### 3.1.4 Lití

Poslední operací řadící se do pre-procesů je lití. Tato operace je poměrně náročná, protože zde může dojít ke spoustě komplikací. Většina těchto komplikací je spojená s tím, že je lití prováděno výhradně lidmi.

Přípravě taveniny, jejímu lití i tuhnutí je třeba věnovat stejnou pečlivost jako přípravě skořepiny. Velký vliv na výslednou kvalitu odlitku má výběr podmínek lití, jakými jsou pec použitá pro tavení, použití vakua nebo ochranné atmosféry při tavení a lití, lící teploty, lící časy, rychlost tuhnutí taveniny, ale i použitá vtoková soustava a vhodné umístění náliťků.

#### 3.1.4.1 Tavicí agregáty

Účelem každé pece je co nejeekonomičtěji natavit požadovaný objem vybrané slitiny na lící teplotu. Nejeekonomičtější řešení však nemusí být nutně levné, protože každá slitina vyžaduje jiné podmínky tavení. To se týká nejen teploty tání slitiny, ale i reaktivnosti s okolní

atmosférou a šířkou pásu likvidu. Slévárny přesného lití mají specifický požadavek na tavicí pece, protože potřebují tavit širší spektrum slitin v ne až tak velkých objemech. Slitiny se podle teploty tání dají dělit na nízkotavitelné, středně tavitelné a vysokotavitelné. Při popisu tavicích agregátů se omezím na ty, které jsou používané pro tavení vysokotavitelných slitin, jakými jsou např. superslitiny a oceli. [1]

### Elektrické indukční pece

Elektrické indukční pece jsou ve slévárnách přesného lití nejčastěji používaným tavicím agregátem. Jejich největší výhodou je, že se v jedné peci dají tavit různé slitiny i v malých objemech. Nejužívanějšími typy elektrických indukčních pecí jsou:

- Indukční bezjádrové
- Indukční vakuové tavicí a licí pece

Princip tavení spočívá ve vložení vsázky (elektricky vodivý materiál) do střídavého magnetického pole. Měděná cívka obepínající tavený materiál napojená na střídavý proud indukuje napětí v taveném materiálu, tím vznikají vířivé proudy, které se uvnitř materiálu uzavírají. Tím vznikne ztrátový výkon, který způsobuje ohřev vsázky. [1] [16]

**Indukční bezjádrové pece** fungují na principu uvedeném výše. Navíc jejich fungování podporuje měděná cívka s chladicí kapalinou, obklopující vyzdívku pece nebo kelímek se vsázkou. Frekvence, při které je možno vsázku v bezjádrových pecích tavit, má široký rozsah. Nejběžněji se však používá 200 - 3000 Hz. Oproti plynovým pecím mají ty indukční výhodu v nepřehřívání vsázky, protože k jejímu natavení dochází až těsně před litím. Tento rychlý tavicí systém navíc umožňuje tavení na každou formu zvlášť, čímž se stává velmi praktickým a ekonomickým. Uvnitř těla pece může být buď žáruvzdorná vyzdívka, nebo vyjímatelný keramický kelímek. Kelímek má výhodu v možnosti tavení slitin o různém složení hned za sebou v případě, že je pro každou slitinu používán speciální kelímek. Do kelímku by neměli dávat slitiny o různém složení hned za sebou, aby nedošlo ke kontaminaci vsázky. Možné je to pouze v případě, kdy se chemické složení následující slitiny neovlivní nebo před tavením slitiny o jiném chemickém složení kelímek vypláchnout. [1]

**Indukční vakuové tavicí a licí pece** se používají v případě, že celý licí proces musí proběhnout v kontrolovaném prostředí. Užitím vakua se předchází vzniku oxidace, reakcím taveniny s okolní atmosférou a kontaminaci taveniny kyslíkem, dusíkem nebo vodíkem ze vzdušné vlhkosti.

Tavení slitiny a odlévání probíhá v oddělených komorách. Důležitou součástí procesu je i operační tlak, který je kontrolován během celého tavicího i licího procesu. Obvyklým pracovním tlakem je  $10^{-3}$  mbar. Licí cyklus ve vakuové peci je tvořen třemi stádii - tavením, supertavením a litím. Sekvence těchto kroků je určena speciálně pro každou slitinu a

odlévanou součást. Obvyklá rychlost tavení je 10 kg/min. Lití je prováděno ručně pomocí jednoduchého překlápěcího systému. Tento proces je často používán pro výrobu součástí plynových turbín, v leteckém průmyslu, v námořních aplikacích atd. Všechny tyto aplikace vyžadují vysokou vnitřní kvalitu součástí vyrobených z žáruvzdorných superslitin. [1]

#### 3.1.4.2 Superslitiny používané v technologii lití na vytavitelný model

Superslitiny jsou speciální vysokoteplotně odolné materiály používané na aplikace vyžadující vysokou teplotní odolnost v pracovních podmínkách. Těmito aplikacemi jsou především plynové turbíny užívané v energetice a letadlových motorech, části raket a tepelné výměníky. Superslitiny vynikají výbornou mechanickou i chemickou odolností. Charakteristickou vlastností je schopnost výdrže v pracovních teplotách blízko jejich teploty tání ( $T_p/T_T > 0,6$ ), což znamená, že je-li  $T_T = 1455 \text{ °C}$ , tak  $T_p = 1000 \text{ °C}$ . Jejich pracovní teploty se pohybují v rozmezí 850 – 1150 °C. Žáropevnost těchto slitin je dána obsahem cca 20% Cr a Ti a Al < 5%. Pro odolnost kolem teplot 1100 °C jsou legovány 2 – 11 % Mo a 2 – 10 % Co. Další charakteristickou vlastností je značná odolnost mechanické degradaci za delších časových period. U vysokoteplotních aplikací dochází k tečení materiálu, avšak superslitiny jsou schopny tomuto tečení odolávat delší čas. Superslitiny mají též schopnost odolávat obtížným provozním podmínkám, např. spalinám z tepelné elektrárny obsahujících síru nebo kerosinu z leteckých paliv. Aby bylo možné tyto slitiny svařovat, je třeba snížit jejich obsah uhlíku pod hranici 0,1 %. [17] [18]

#### Superslitiny na bázi niklu

Niklové superslitiny jsou tvořeny na základě Ni-Cr, Ni-Cr-Fe a Ni-Cu. Podle těchto složek se dají dělit do tří skupin:

- Monely (Ni + 30-32% Cu)
- Inconely (Ni + 16-29%Cr + 6-19,5% Fe, příp. 3-16% Mo)
- Incoloy (Ni + 20% Cr + 30% Fe + 5% Mo) [18]

Niklových slitin existuje velké množství druhů, ale tyto tři skupiny jsou nejrozsáhlejší. **Monely** jsou vhodné pro užití v oxidačních prostředích. Vynikají výbornou koroziodolností na vzduchu, ve vodě i v mořské vodě a v neorganických kyselinách. Díky této koroziodolnosti a výborným mechanickým vlastnostem ( $R_m = 550 - 1070 \text{ MPa}$ ,  $A_5 = 25 - 45 \%$ ) se používají ke stavbě lodí, ropných rafinerií, ve farmaceutickém průmyslu a také pro výrobu trubek kondenzátoru. **Inconely** také odolávají silně oxidačnímu prostředí, speciálně kyselině solné. Jejich zvýšená koroziodolnost je dána obsahem Mo nebo Cu. **Incoloy** má zase vysokou odolnost vůči působení kyseliny sírové, proto se hodí pro výrobu turbín do spalovacích elektráren. Bohužel je náchylný k mezikrystalové korozi. Tato náchylnost se dá snížit dolegováním Ti, Nb a Cu. [18]

Tabulka 1 – Chemické složení vybraných niklových slitin [17]

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Nb	Re	Ru	Hf	C	B	Zr	Ni
AM1	7.0	8.0	2.0	5.0	5.0	1.8	8.0	1.0	—	—	—	—	—	—	Bal
CM247LC	8.0	9.3	0.5	9.5	5.6	0.7	3.2	—	—	—	1.4	0.07	0.015	0.010	Bal
CMSX-2	8.0	5.0	0.6	8.0	5.6	1.0	6.0	—	—	—	—	—	—	—	Bal
EPM-102	2.0	16.5	2.0	6.0	5.55	—	8.25	—	5.95	3.0	0.15	0.03	—	—	Bal
GTD-222	22.5	19.1	—	2.0	1.2	2.3	0.94	0.8	—	—	—	0.08	0.004	0.02	Bal
IN-738LC	16.0	8.5	1.75	2.6	3.4	3.4	1.75	0.9	—	—	—	0.11	0.01	0.04	Bal
Mar-M200Hf	8.0	9.0	—	12.0	5.0	1.9	—	1.0	—	—	2.0	0.13	0.015	0.03	Bal
MC-NG	4.0	—	1.0	5.0	6.0	0.5	5.0	—	4.0	4.0	0.1	—	—	—	Bal
MX4	2.0	16.5	2.0	6.0	5.55	—	8.25	—	5.95	3.0	0.15	0.03	—	—	Bal

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Nb	Re	Ru	Hf	C	B	Zr	Ni
Nasair 100	9.0	—	1.0	10.5	5.75	1.2	3.3	—	—	—	—	—	—	—	Bal
PWA1422	9.0	10.0	—	12.0	5.0	2.0	—	1.0	—	—	1.5	0.14	0.015	0.1	Bal
Rene 125	9.0	10.0	2.0	7.0	1.4	2.5	3.8	—	—	—	0.05	0.11	0.017	0.05	Bal
TMS-162	2.9	5.8	3.9	5.8	5.8	—	5.6	—	4.9	6.0	0.09	—	—	—	Bal

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Ta	Fe	Hf	C	B	Zr	Ni
Hastellov S	15.5	—	14.5	—	—	0.3	—	—	1.0	—	—	0.009	—	Bal
Haynes R-41	19.0	11.0	10.0	—	—	1.5	3.1	—	5.0	—	0.09	0.006	—	Bal
Incolov 925	20.5	—	—	—	—	0.20	2.1	—	29.0	—	0.01	—	—	Bal
Inconel 718	19.0	—	3.0	—	5.1	0.5	0.9	—	18.5	—	0.04	—	—	Bal
Inconel 738	16.0	8.5	1.75	2.6	0.9	3.4	3.4	1.7	—	—	0.11	0.01	0.05	Bal
ME3	13.1	18.2	3.8	1.9	1.4	3.5	3.5	2.7	—	—	0.030	0.030	0.050	Bal
MERL-76	12.4	18.6	3.3	—	1.4	0.2	4.3	—	—	0.35	0.050	0.03	0.06	Bal
Nimonic 80A	19.5	—	—	—	—	1.4	2.4	—	—	—	0.06	0.003	0.06	Bal

### Superslitiny na bázi kobaltu

V kobaltových superslitinách se obsah kobaltu pohybuje v rozmezí 35 – 75 %. Superslitiny na bázi kobaltu jsou odolnější vůči korozi než niklové superslitiny. Kromě kyseliny dusičné odolávají veškerým oxidačním prostředím. Zároveň mají dobré mechanické vlastnosti, zejména pevnost a tvrdost. Všechny tyto výhody si zachovávají i při pracovních teplotách. Díky těmto vlastnostem jsou využívány na výrobu řezných nástrojů pracujících v agresivním prostředí a na ventily a jejich sedla. Speciální využití je v biomedicině pro výrobu biokompatibilních implantátů (Vitallium- 65% Co). Kobaltové slitiny jsou obtížněji svařitelné, a proto se doporučuje používat metody svařování pod ochrannými plyny jako TIG a GMAW. I tak je potřeba použít přehřev, aby nedošlo ke vzniku trhlin za tepla. [18] [19]

Tabulka 2 – Chemické složení vybraných kobaltových slitin [20]

Material	Základní složení [hm%]											Ostatní
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	W	Nb	Zr	Fe		
Kobaltové slitiny												
AiResist 13, c	0.45	0.5	—	21	1	bal	11	2	—	2.5	3.5 Al, 0.1 Y	
X-40, c	0.5	0.5	0.5	25	10	bal	7.5	—	—	1.5	—	
MAR-M302, c	0.85	0.1	0.2	21.5	—	bal	10	—	0.15	—	9 Ta, 0.005 B	
MAR-M918	0.05	0.2	0.2	20	20	bal	—	—	0.1	0.5	7.5 Ta	

bal = zbytek ; c = na odlitky

## Makrostruktura

Tvar zrn a jejich rozložení v odlitku má také vliv na mechanické vlastnosti a creepovou odolnost. Makrostruktura odlitků vyrobených ze superslitin může být:

- Polykrystalická
- Sloupovitá
- Monokrystalická

Polykrystalická makrostruktura odlitku, jak z názvu vyplývá, obsahuje velké množství zrn o různé velikosti. Velikost zrn je závislá na tloušťce materiálu, ve které dochází k tuhnutí. Usměrněné tuhnutí způsobí tvorbu několika sloupovitých zrn v podélném směru odlitku. Všechna zrna jsou rovnoběžná. Usměrněným tuhnutím je také možno vytvořit monokrystal, kdy je celá lopatka tvořena pouze jedním krystalem, který je orientován v podélném směru lopatky. Youngův modul monokrystalických lopatek může být vyšší než polykrystalických. Jeho velikost závisí na směru zatěžování vzorku. Pro vysokotlaké turbíny se kvůli požadavkům na vysokou pevnost používají monokrystalické lopatky. Pro nízkotlaké turbíny jsou polykrystalické lopatky dostačující. Pro polykrystalickou strukturu je velmi důležitá tvorba karbidů na hranicích zrn, která vytvoří optimální pevnost a tvárnost odlitku. Velikost zrn u polykrystalické struktury se dá ovlivnit primárním obalem, lící teplotou a tepelnou izolací formy při lití. [19]

## 3.2 Post – procesy

### 3.2.1 Odstraňování skořepiny

Po vychladnutí odlitku je z něj třeba odstranit skořepinu, aby jej bylo možné dále zpracovávat. Toto odstranění probíhá mechanicky buď pomocí běžného kladiva, nebo vibračního kladiva. Vibrace působící na odlitek způsobí odpadávání kusů skořepiny, která působením vysoké teploty při lití a následným zchladnutím zkrěhla.

Při odstraňování skořepiny ručně, běžným kladivem, je třeba úder směřovat na vtok a vtokovou soustavu. Nikdy ne na odlitek, protože by mohlo vlivem působící síly dojít k jeho deformaci nebo prasknutí. Při vytloukání lopatek s dlouhou listovou částí nikdy neustavujeme stromeček na bandáž lopatek, aby nedošlo k průhybu listu lopatky nebo jiným deformacím. Odstranění skořepiny tímto způsobem je otázkou pár minut, v závislosti na složitosti odlitku a jeho rozměrech. Tento proces je velmi hlučný a prašný, a proto je důležité dodržovat při něm hygienické podmínky, jakými jsou nošení respirátoru a protihlukových sluchátek.

Skořepinu je též možno odstraňovat vibračním kladivem. K tomu slouží mechanizované zařízení, které je sestaveno ze vzduchotěsné komory s vibračním kladivem a sběrací

nádoby na odpad (zbytky skořepin). Toto zařízení odstraní skořepinu rychleji než ruční vytloukání, většinou do 1 minuty. Tento proces je také oproti ručnímu vytloukání bezprašný. [4]

Odstraňování skořepiny z hlubokých dutin většinou není možné ani ručně, ani vibračním kladivem. Proto se na její odstranění používá otryskávání nebo vrtání, popř. ruční sekáče. [4]

### 3.2.2 Oddělování odlitků od vtokové soustavy

Po odstranění skořepiny následuje operace, při které se oddělují odlitky od vtokové soustavy. Toto dělení se provádí pomocí řezných kotoučů, složených většinou z umělého korundu nebo umělého diamantu spojeného umělou pryskyřicí. Složení a velikost kotouče závisí na řezaném materiálu a velikosti. Odlitky se dají odřezávat dvěma způsoby. Prvním z nich je odřezávání úhlovou bruskou, kdy je nástroj v pohybu a „stromeček“ je zaaretován v přípravku. Druhou možností je použití dělicí brusky, která je pevně spojena se stolem a pohybuje se „stromeček“. Každý ze způsobů má své využití. Úhlová bruska se hodí pro odřezávání odlitků ze složité vtokové soustavy, kdy by mohlo při odřezávání na dělicí brusce dojít k porušení celistvosti odlitku. Další vhodné použití úhlové brusky je na těžké odlitky, se kterými by se při užití dělicí brusky obtížně manipulovalo. Nevýhodou úhlové brusky jsou delší pracovní časy a potřeba manuální zručnosti u dělníka, který s ní zachází. Dělicí bruska se tedy hodí na „stromečky“, u kterých je vhodně navržena vtoková soustava. Odřezávání na této brusce je přesnější a rychlejší než na úhlové. Avšak i při odřezávání lehčích dílů je vhodné použití odřezávacího přípravku, který nejen usnadní manipulaci obsluze, ale i zkrátí pracovní časy. [1]

U oddělování odlitku je kromě porušení celistvosti odlitku důležité dbát i na tepelné ovlivnění odlitku. Při řezání odlitku dochází k vývinu obrovského tepla, které je tím větší, čím delší je čas řezání a odpor řezaného materiálu vůči řezání větší. Toto teplo může vést i k tepelnému ovlivnění odlitku nebo propalu materiálu. Z těchto důvodů je velmi důležité volit řezný kotouč podle řezaného materiálu a také odřezávat odlitek dál od vtoku a tento přebytek obrousit v následující operaci. Pro správné odřezání odlitku se dá stanovit pár pravidel, kterými jsou:

- Užívat všechnu použitelnou sílu a řezat tak rychle, jak to jde
- Volit řeznou rychlost kotouče blízko jeho maxima, ale nikdy ji nepřekračovat
- Svírat nebo upevnit odřezávanou část tak bezpečně a pevně, jak je možné
- Nastavovat brusku na optimální řezné podmínky a pravidelně kontrolovat otáčivé i neotáčivé části, jestli se snadno pohybují, popř. jestli jsou správně upevněny [1]

## Broušení vtoků

Broušení vtoků je operací, ve které se odstraňují zbytky vtoků po odřezání odlitků od vtokové soustavy. Cílem je dosáhnout geometrického tvaru odlitku v místě vtoku. Tato operace je prováděna ručně, a proto vyžaduje jistou zručnost ze strany dělníků. Broušení je prováděno buď na pásových bruskách nebo brusných kotoučích, nejčastěji vyrobených z rozdrčeného umělého korundu nebo karbidu křemíku zalisovaných v keramickém pojivu.

### 3.2.3 Odstranění zbytků keramiky

Odstranění zbytků keramiky se dá provádět buď mechanicky, nebo chemicky. Mechanicky je prováděno tryskáním a chemicky loužením.

#### Mechanicky – tryskáním

Tryskání se řadí mezi abrazivní metody a dá se rozdělit do dvou skupin a to na tlakové tryskání a tryskání bez použití vzduchu.

**Tlakové tryskání** zahrnuje nosné médium, kterým je voda nebo plyn a abrazivum, které je tímto médiem roznášeno. Použití nosného média závisí na tryskaném materiálu. Pro oceli není voda jako nosné médium příliš vhodná.

Tlakové tryskání pracuje na dvou principech. Prvním principem je přímý tlakový systém, kde je nosným médiem vzduch. Vzduch je společně s abrazivem stlačen v nádobě a při otevření trysky je abrazivum velkou rychlostí vytlačeno ven. Druhý princip, tzv. sací, funguje na základě Venturiho efektu, kdy je proud vzduchu zaveden hned za trysku. Oba principy jsou schopny vytvořit tlak až 5 barů (0,5 MPa). Čím větší tlak je při tryskání použit, tím je čistící proces kratší. Vliv na rychlost otryskání má také druh abraziva. Hlavními druhy abraziv jsou kovové broky a keramická drť (písek). Kovové broky jsou nejčastěji vyrobeny z oceli a využívá se u nich síly nárazu. U písku se jedná spíše o obrábění a drhnutí. Nejčastěji se jedná o oxid hlinitý, karbid křemíku nebo směs oxidu hlinitého s oxidem zirkoničitým. Účinnost tlakového tryskání je definována zrnitostí abraziva, použitým tlakem, úhlem tryskání a pracovní vzdáleností. [1]

**Tryskání bez použití vzduchu** funguje na mechanickém principu, kdy je abrazivum (kovové broky nebo keramický písek) vhazováno na opracovávaný povrch lopatkovým rotačním systémem pod velkou rychlostí.

Zásobník s abrazivem je umístěn tak, aby se abrazivum mohlo dostat do středu rozváděcího kola, odkud se odstředivou silou dostane na list lopatky a ta ho rychlostí 73 m/s vymrští směrem k opracovávanému povrchu. Toto tryskání je účinné a navíc je ekonomicky výhodnější než tlakové tryskání. [1]

**Tryskání vodním paprskem** se dá provádět buď v otevřeném prostoru, nebo v uzavřené skříni. Tryskání vodním paprskem v otevřeném prostoru je stejné jako tlakové tryskání, kde je nosným médiem vzduch. Tryskání v uzavřené skříni je prováděno za vysokých tlaků vody, kdy je proud vody o vysoké rychlosti přiváděn na čištěný povrch, a tím jsou odstraněny zbytky keramiky. Uzavřená metoda byla speciálně vyvinuta pro odstranění keramického obalu a jeho zbytků ze „stroměčku“ v jedné operaci. [1]

### 3.2.4 Cídění

Cídění se řadí mezi technologie obrábění. Jedná se o broušení a frézování povrchu odlitku pro dosažení požadované kvality povrchu a mírné úpravy rozměrů. V některých případech se jedná o opravnou operaci, kdy se vyfrézuje povrchová vada pro možnost tvorby návaru.

Po operacích pracujících s voskovými modely, je cídění nejnáchylnější operací na vnášení deformací a jejich rozptylu. Tato náchylnost je způsobena tím, že cídění je prováděno ručně a úběr materiálu se jen velmi těžko kontroluje.

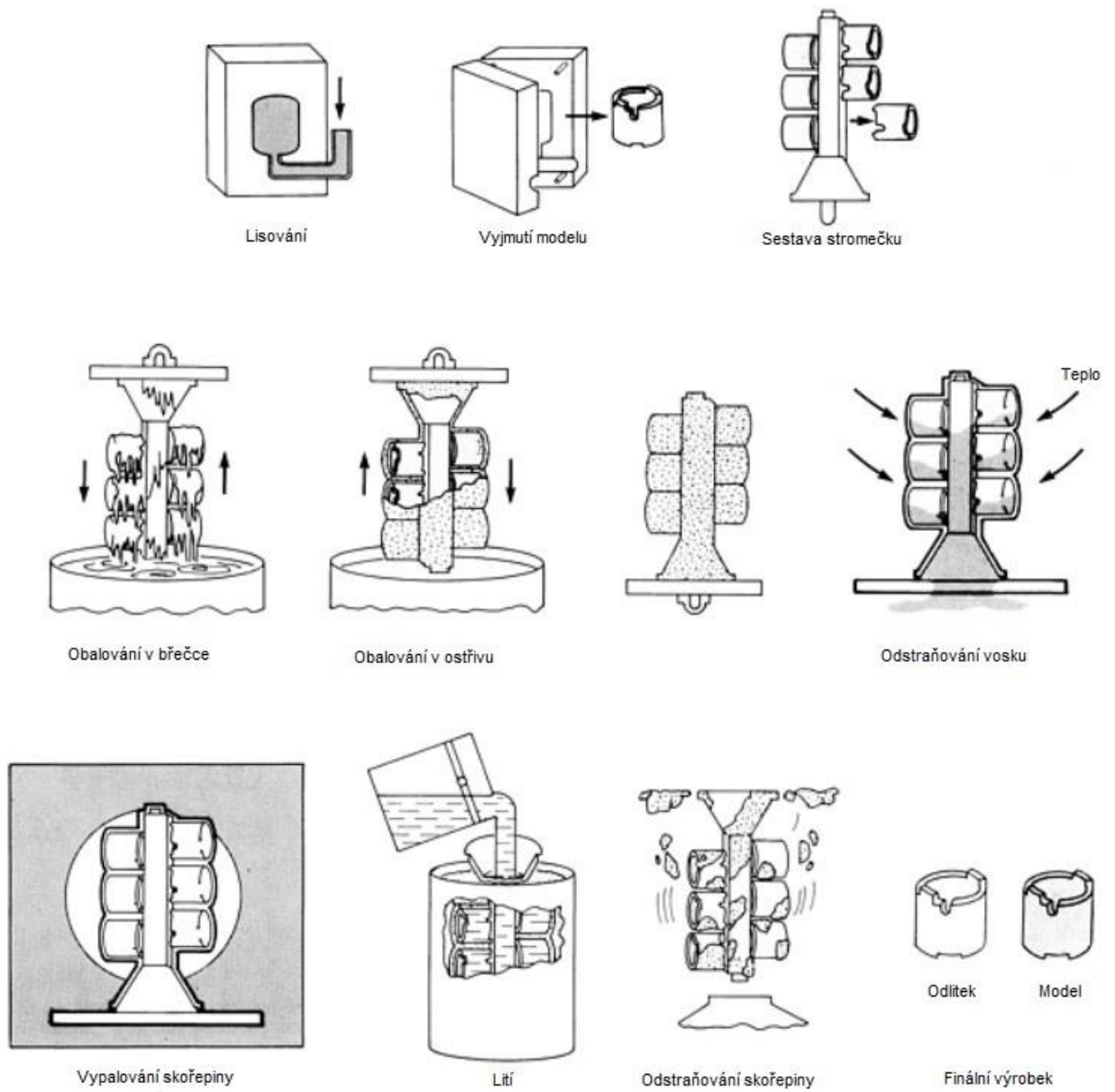
Stroje, které se pro cídění používají, jsou pásové brusky, stopkové brusky, vibrační brusky a stojanové brusky. Pro cídění velkých ploch se více hodí pásové brusky, protože se snáze přizpůsobí tvaru cíděného povrchu. Pro jemné detaily a různé záhyby je vhodné použít brusku stopkovou, s možností výměny nástroje. U stopkových brusek je možno nástroj vyměnit velmi snadno. Nástroje používané do stopkové brusky jsou brusné kameny různých tvarů, hrubostí a velikostí a ocelové frézky malých rozměrů s různým průměrem a počtem zubů pro velmi malý i větší úběr materiálu. Také je možné po výměně nástavce použít na stopkové brusce jako nástroj malý brusný pás. [1]

Jak je uvedeno v druhém odstavci této kapitoly, přesný úběr materiálu je velmi těžko kontrolovatelný, proto je důležité, aby se cídění věnovala řádně zaškolená osoba. I přes veškeré zkušenosti cídiče není možné dosáhnout stejného úběru na všech místech odlitku, a tím vzniká rozptyl u měřených hodnot. V některých oblastech lze využít i automatizované cídící systémy. Tyto systémy se zatím nevyužívají v průmyslových oblastech, ale spíše pro spotřební zboží jako jsou ocelové golfové hlavy. [1]

### 3.2.5 Vady odlitků

Vady odlitků vznikají v různých fázích výroby. Příčinou jejich vzniku může být nedokonale opravený voskový model, nevhodné zacházení s keramickou skořepinou, kdy dojde k odlupu části primárního obalu, nebo nedodržením technologického postupu lití, popř. špatným návrhem vtokové soustavy. Některé povrchové vady lze opravit cíděním nebo vyvařením. Těmito opravami se vnáší do výrobního procesu rozměrová nestabilita.





Obrázek 7 – Postup výroby metodou lití na vytavitelný model [24]

### 3.2.6 Kontrola kvality

Pro zjištění výskytu vad a deformací odlitku je ve výrobních podnicích zavedena kontrola kvality. V leteckém a energetickém průmyslu, pro který je většina odlitků z technologie lití na vytavitelný model vyráběna, je potřeba kontrolovat odlitky několikastupňově, aby byly zjištěny veškeré vlastnosti a nedostatky odlitků. Běžně se používá vizuální kontrola, fluorescenční defektoskopie, RTG zkouška a různé mechanické zkoušky.

Metody zjišťování kvality se dají dělit na:

- Nedestruktivní
- Destruktivní

#### 3.2.6.1 Nedestruktivní metody

Mezi nedestruktivní metody použité pro kontrolu kvality zkoumaného odlitku se řadí:

- Vizuální kontrola
- Kapilární zkouška (fluorescenční)
- Radiografická zkouška (RTG)

První a nejjednodušší kontrolou je **kontrola vizuální**. Ta zjišťuje povrchové vady a kontroluje rozměry. Pomůckami pro vizuální kontrolu jsou oči, lupa, různé měrky, kalibry apod. Pro správné provedení vizuální zkoušky je třeba mít zaškoleného pracovníka a dodržovat normou definované pracovní podmínky.

**Kapilární zkouška** slouží k odhalování povrchových vad a vad těsně pod povrchem. Kapilární zkouška se může provádět dvěma metodami, barevnou indikací a fluorescenční metodou. Indikovaná vada je rozpoznávána vizuálně, popř. CCD kamerou. Zkoušení probíhá odmaštěním zkoušené součásti, nanesením penetrantu a ořtením jeho přebytku, nanesením vývojky a vyhodnocením zkoušky. Rozměry povolených vad, jejich tvar a hodnocení je definováno normou nebo zákazníkem. [21]

**RTG zkouška** slouží k odhalování vnitřních vad odlitku. Dojde při ní k prozáření odlitku  $\gamma$  – zářením. Na foto papíru se zobrazí negativ odlitku. Na snímku se zobrazí odlitek světle a okolí zčerná. Tam, kde se v odlitku vyskytuje vada, se objeví tmavá skvrna rozměru a tvaru vady. Pro definici typu vady a její velikosti se používá atlas vad. Postup této zkoušky vyžaduje zvýšená bezpečnostní opatření a důkladné proškolení pracovníků, kteří tuto zkoušku provádí, ale i těch, kteří by mohli s pracovištěm přijít ke styku. Vyhodnocení i postup RTG zkoušky je definováno normou.

### 3.2.6.2 *Destruktivní metody*

Destruktivní metody zkoušení slouží k určování mechanických vlastností a zjišťování vnitřní struktury odlitků. Vnitřní struktura se určuje po rozřezání odlitého kusu v definovaných místech. Místa, ve kterých se odlitek rozřezává, jsou definována zákazníkem a vychází z požadavků na mechanické vlastnosti odlitku a míst s nejpravděpodobnějším výskytem vnitřních vad. Pro určení mechanických vlastností se používají zkušební tělesa, která mohou být vyříznuta a ofrézována přímo z odlitku nebo se odlijí speciálně.

Destruktivní metody zkoušení slouží k určení:

- Meze pevnosti a pružnosti
- Tažnosti
- Tvrdosti
- Meze pevnosti v tečení
- Meze tečení
- Mikrostruktury
- Vnitřních vad atd.

### 3.2.6.3 *Měření rozměrů pomocí optického 3D skenování*

V dnešní době existuje modernější a přesnější metoda zjišťování rozměrů, a to je 3D skenování. Metoda 3D skenování se používá nejen k měření rozměrů, ale mnohem častěji se využívá v oblasti reverzního inženýrství. Kvalita měření 3D skenery je definována **přesností** (rozdíl mezi skutečnou a měřenou hodnotou), **rozlišitelností** (nejmenší možná vzdálenost v prostoru, kterou lze změřit), **měřícím objemem** (rozsah měření na jeden záběr) a **rychlostí** (počet naskenovaných bodů za sekundu). Metod 3D skenování je velké množství a dají se dělit podle způsobu snímání, mobility zařízení a principu digitalizace. Pro měření rozměrů lopatek v této práci byla použita metoda 3D optického skenování pomocí systému ATOS od firmy GOM, a proto se zaměřím na její popis. [22]

**Metody snímání optických skenerů se dají dělit na:**

- **Fringe light projection** (Projekce světelného vzoru) – umožňuje měřit i velký objem (2x2x2 m), získává data ve velké hustotě (800 000 – 4 000 000 bodů/1 snímek) s velkou rychlostí, dosahuje vysoké přesnosti a rozlišitelnosti, negativní vliv reflexnosti povrchu na kvalitu snímku. Metoda je používaná systémem ATOS.
- **LED tracker** umožňuje digitalizaci skrytých bodů, pro měření využívá sondy a značky, nevhodný pro skenování složitých ploch (pomalý), není ovlivněn barvou a reflexností skenované plochy. Měří v menším objemu, proto je vhodný pro menší součásti např. chirurgické pomůcky.

- **Vision skeners** se vyznačuje nízkou cenou, hodí se i pro měření 2D profilů, nepřiliš přesný při měření větších hloubek. Využívá se v reklamě a animacích. [22] [23]

### 3D skener ATOS

Mobilní bezkontaktní optický 3D skener funguje na principu triangulace, fotogrammetrie a fringe projekce, kdy se na snímáný objekt promítají pruhy světla, které jsou snímány dvěma kamerami s CCD čipem (světlocitlivý čip využívající fotoefektu). 3D skener ATOS umožňuje skenování v různých objemech a je vhodný pro průmyslové využití v oblasti kontroly kvality.

Systém ATOS se skládá ze snímací hlavy se dvěma kamerami a fringe projektorem, stojanu pro zabezpečení stabilní polohy snímací hlavy, ovládací jednotky pro napájení a ovládání snímací hlavy a PC, výkonného PC systému a obslužného softwaru a operačního systému Linux. Vzhledem k tomu, že optické zařízení je při snímání objektu statické (dá se polohovat v osách X, Y a Z díky posuvným ramenům a stojanu, na kterém je rameno umístěno), je potřeba použít polohovací zařízení. Běžně se jedná o otočný stolek, na které se skenovaná součást umístí. Stůl s objektem se otáčí tolikrát, kolikrát je nastaveno ve skenovacím softwaru. Počet otočení závisí na složitosti a velikosti měřené součásti. Následně se součást nasnímá ze všech stran v osách X, Y a Z a snímky uloží. Software z těchto snímků vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů a následně jednotlivé snímky spojí pomocí metody aproximace, a tím se vytvoří digitalizovaný 3D model. [22] [23]

Pro dokonalé snímání je třeba použít jednobarevné kontrastní pozadí a vytvořit jednoduchý nelesklý povrch skenované součásti. Takového povrchu docílíme nanesením souvislé bílé práškové vrstvy ve spreji. Pro sestavení snímků je třeba mít na součásti referenční body. Ty nám pomáhají nejen s určením správné vzdálenosti součásti od snímací hlavy a správné definice expozice, ale i s následným spojením snímků tak, aby vytvořily co možná nejpřesnější digitální kopii skenované součásti. Pro správné sestavení snímků je třeba, aby skenovací hlava měla výhled aspoň na tři referenční body. Tyto referenční body se získají nalepením „skenovacích terčů“ na povrch součásti. Velikost referenčních bodů je volena podle měřicího objemu, a to 3 nebo 5 mm. Digitální model se po spojení snímků musí polygonizovat, tím se vytvoří hladké spojitě přechody a dojde k vyhlazení rozdílů a nepřesností vzniklých mezi jednotlivými snímky. Po polygonizaci je 3D model připraven na vyhodnocení rozměrů. [23]

Pro vyhodnocení rozměrů je třeba model naimportovat do vyhodnocovacího programu, kde dojde k porovnání s CAD modelem. Po porovnání je vyhodnocovací software schopen dát přesné údaje o odchylce rozměrů skenované součásti oproti CAD modelu. [23]

## 4 Určení CTQ bodů

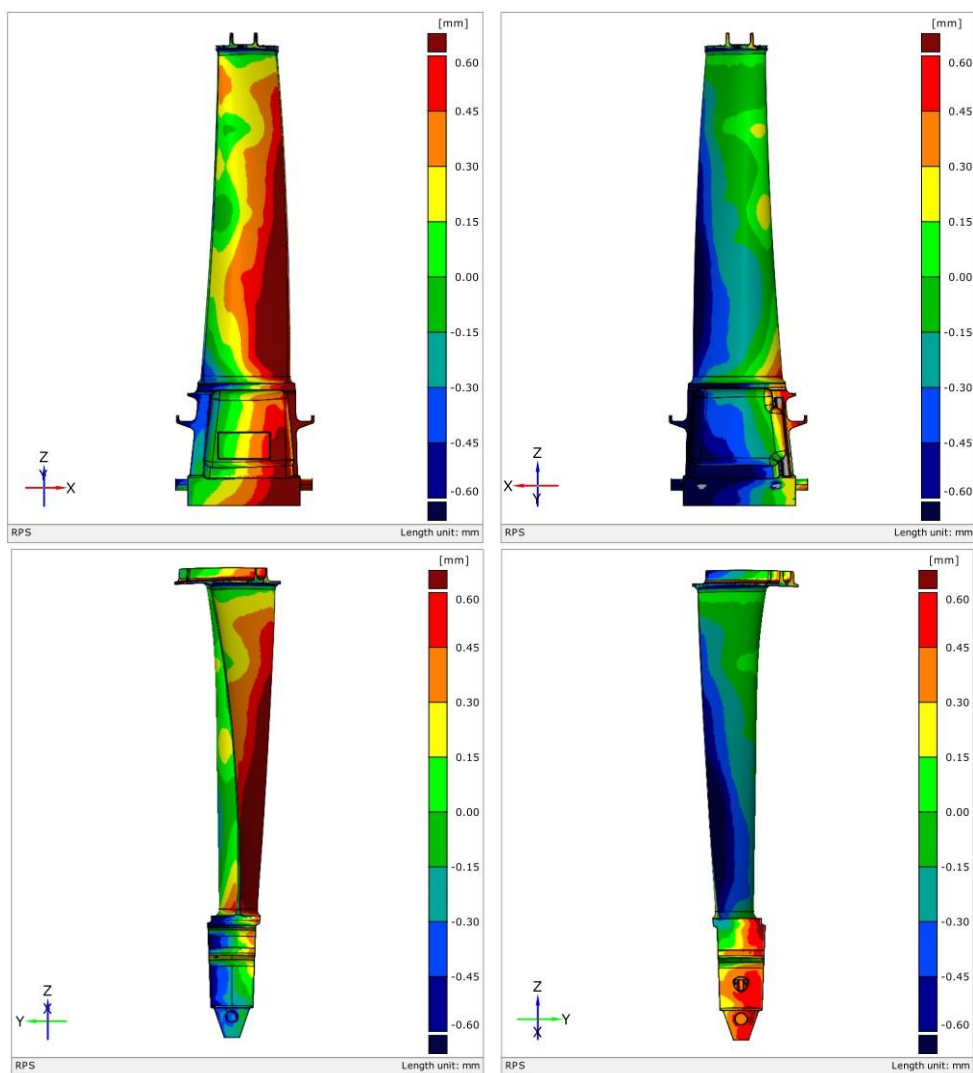
### CTQ bod

CTQ bod (Critical to Quality) je bod sloužící pro kontrolu požadavků zákazníka. V tomto konkrétním případě se jedná o body umístěné na různých částech lopatky, které se použijí pro kontrolu výsledných rozměrů lopatky. Tyto body jsou určeny tak, aby byly snadno měřitelné a porovnatelné. Stanovuje si je zákazník.

Poloha CTQ bodu je svázána s ustavovacími body lopatky, resp. CTQ bod se dá měřit až ve chvíli, kdy je lopatka ustavena, aby jeho poloha byla změřena správně. Tato poučka je velmi důležitá především v technologii lití na vytavitelný model, kdy jsou veškeré rozměry měřeny s přesností na setiny milimetru.

Zákazníkův CTQ bod je určen až na finálním výrobku, v našem případě odlitku. Vzhledem k tomu, že při lití na vytavitelný model dochází k rozměrovým změnám, objemové smrštění odlitku oproti voskovému modelu může činit i 3 %, lineární smrštění také není zrovna zanedbatelné a dochází zde i k dalším rozměrovým změnám způsobeným tuhnutím odlitku a zacházením s ním, je třeba si CTQ bod určit i na voskovém modelu.

U mnou zvoleného typu lopatky je měřeno více bodů, než je určených CTQ. Avšak vyhodnocováno je pouze 9 CTQ bodů, které jsou schopny popsat veškeré deformace na lopatce. Těmito deformacemi jsou změna délky lopatky, rotace listu lopatky (menší nebo větší natočení profilu lopatky) a posunutí listu lopatky vůči zámkové části (prohnutí nebo vybočení lopatky). Tyto vyhodnocované body se nachází na zámku lopatky, listu lopatky a bandáži. Hodnocení změny rozměru je prováděno na základě posunu CTQ bodu oproti CAD modelu. K měření těchto bodů slouží 3D skener. Změna rozměru se dá vyjádřit i graficky pomocí barevných polí zobrazujících podle barvy a intenzity jejího odstínu posun buď v plusovém nebo v mínusovém směru. Tato barevná pole jsou generována na základě hodnot naměřených 3D skenerem. Grafické zobrazení slouží ke snazšímu pochopení deformace v různých částech odlitku.



Obrázek 8 – Barevná pole deformací

## 4.1 Určení CTQ bodu na voskovém modelu

Poloha CTQ bodů se na voskovém modelu určuje na základě posunů vosk-kov. Jestliže známe polohu CTQ bodu zadanou od zákazníka a posun vosk-kov, tak se CTQ body voskového modelu nachází v místě rozdílu mezi CTQ body zákazníka a velikostí posunu.

V praxi probíhá určování CTQ bodu voskového modelu tak, že se vylisuje model, nechá se zchladit v reformeru nastaveném na nominální rozměr a změří se 3D skenerem. Po té projde výrobou až po operaci tryskání, po které je znovu změřen 3D skenerem. Hodnoty změřené na kovovém odlitku a na vosku (musí být voskový model, ze kterého byl vyroben kovový odlitek) se od sebe odečtou, a tím získáme posun vosk-kov. Nakonec hodnotu posunu odečteme od CTQ bodů daných zákazníkem, a tím získáme hodnoty CTQ bodů voskového modelu. Jakmile známe hodnoty CTQ bodů voskového modelu, nastavíme reformer tak, aby CTQ body odpovídaly vypočítané hodnotě. Nastavení reformeru můžeme provádět i několikrát, přestože jsme reformer nastavili na odpovídající rozměr již na poprvé. To je dáno složitým chováním vosku při tuhnutí a konstrukcí reformeru, který nemá

deformační žebra na všech měřených CTQ bodech. U následujících nastavení již nevyužíváme posun vosk-kov, ale snažíme se předdeformovat voskové modely na hodnoty CTQ bodů vypočítaných z prvního měření. Správnou předdeformaci voskového modelu kontrolujeme měřením těchto modelů 3D skenerem a porovnáváním naměřených hodnot s hodnotou CTQ bodu ideálního voskového modelu. U veškerých měření je samozřejmě definováno toleranční pole. U voskových modelů je toto toleranční pole užší, než u odlitků, protože během výroby dochází ke zvětšování odchylky od nominálního rozměru, a tak se zúženým tolerančním polem u voskových modelů předchází vzniku neshodných kusů.

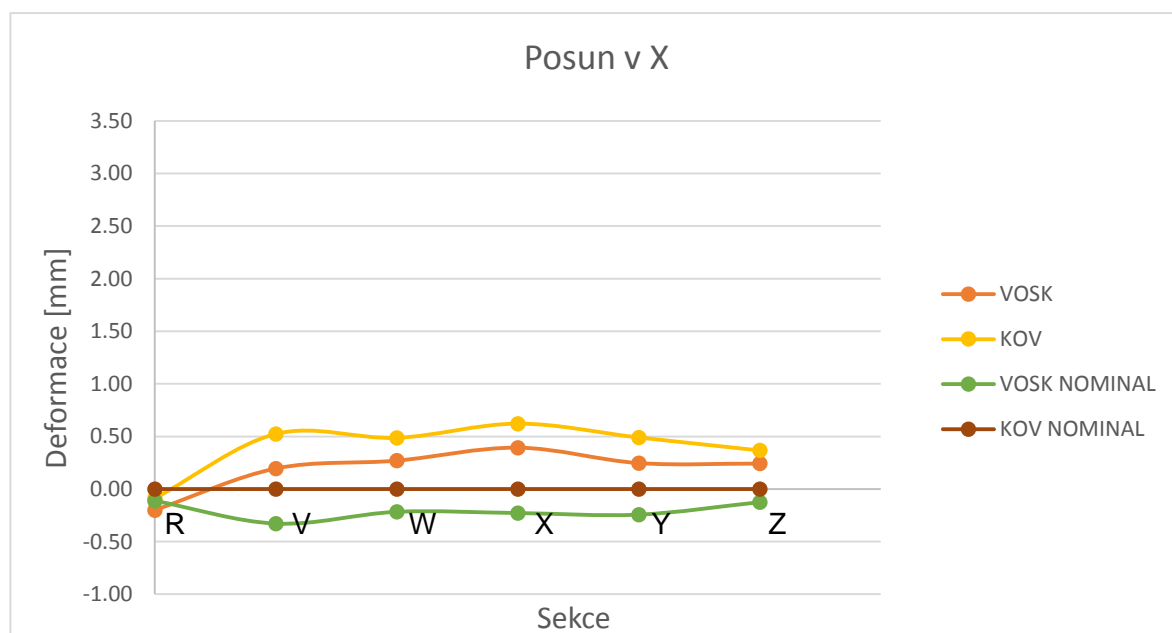
#### 4.1.1 Posun vosk – kov

Posun vosk-kov je různě velký podle toho, v jakém směru se měří. Obvykle se nejedná o hodnoty větší než 1 mm. Při definici posunu vosk – kov se hodnotí směr X, Y a A (rotace).

##### Směr X

Po ustavení lopatky vede směr X příčně přes lopatku, je vodorovný s podložkou a kolmý na směr Y. V tomto směru dochází obvykle k menším deformacím. Deformace v tomto směru vznikají nevhodným zacházením s modelem a přirozeným tuhnutím a chladnutím vosku. Deformace dosahují cca 0,5 mm. K největší deformaci dochází ve středním sektoru listu lopatky, i když by bylo její maximum očekáváno na konci listu lopatky.

Posun vosk-kov z grafu 5 není příliš velký, pohybuje se okolo 0,3 mm.



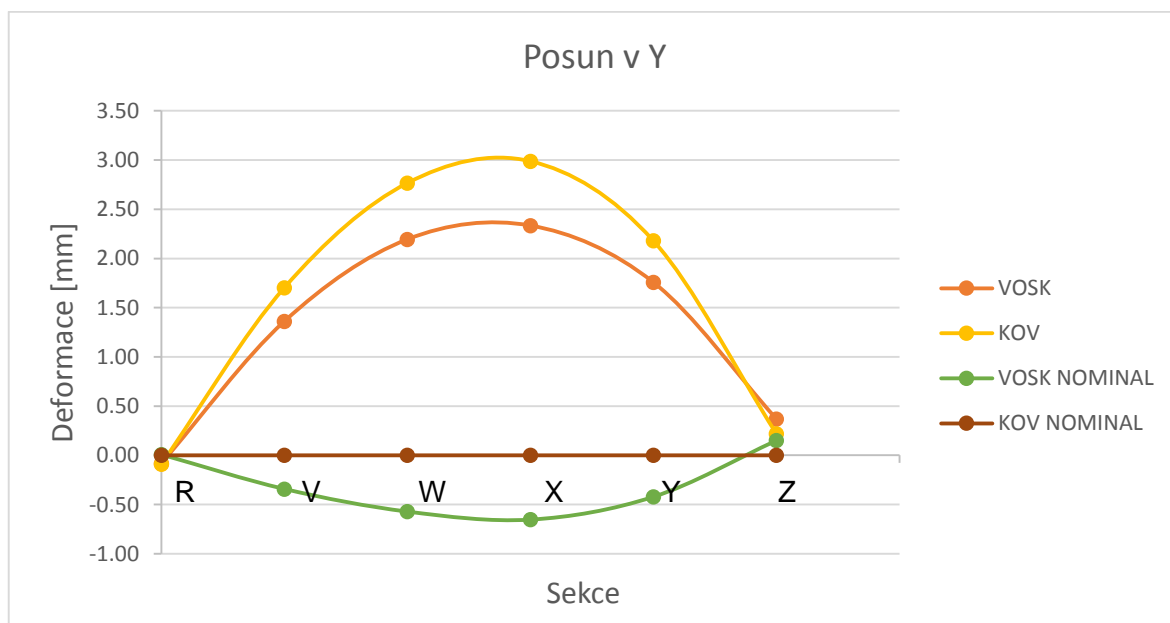
Graf 5 – Posun vosk-kov v X<sup>1</sup>

## Směr Y

Jedná se o směr kolmý k ose lopatky i k podložce. Deformace listu lopatky ve směru Y je poměrně velká, protože zde dochází k průhybu vlivem vlastní hmotnosti lopatky. K největšímu průhybu dochází ve středu listu lopatky, protože se jedná o místo nejvíce vzdálené od podpor (zámek, bandáž). Tento průhyb vzniká u voskových modelů, ale může vznikat i u odlitků. U voskových modelů se dá průhybu zabránit vhodným zacházením s nimi. Například zavěšením na zavěšovací přípravek místo jeho uložení na odkládací táč. Po úplném vychladnutí (24 hodin) se dají lopatky položit na odkládací táč, než přejdou na další operaci.

U odlitků lopatek, které mají dlouhou listovou část, může k průhybu dojít při lití, vlivem vlastní váhy taveniny. Průhybu se dá zabránit tím, že se skořepina při odlévání zavěsí do zavěšovacího přípravku. Má-li odlitek velkou hmotnost, skořepina má vysoký počet obalových vrstev a navíc je ještě použit tepelný zábal, jako v případě těchto odlitků, může dojít ke snížení pevnosti skořepiny vlivem dlouhodobého působení vysoké teploty na skořepinu.

Podle grafu 6 se posunu vosk-kov v průběhu sekcí mění. Největší je ve střední části listu lopatky, a to cca 0,6 mm. Nejmenší je v sekcích přímo u zámkové části a u bandáže lopatky. Zde dosahuje maximálně 0,1 mm. Z grafu je patrné, že se nominální rozměry se oproti těm naměřeným výrazně liší. Proto se musí list lopatky předdeformovat v chladicím přípravku do opačného směru.



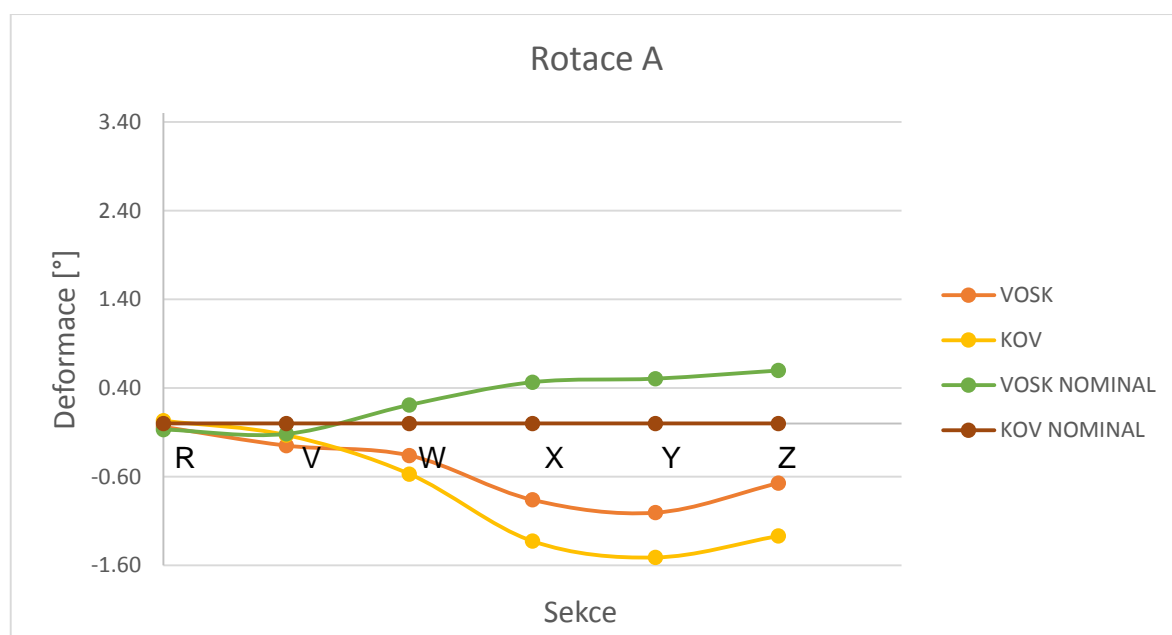
Graf 6 - Posun vosk-kov v Y<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hodnoty použité v grafu 6, 7 a 8 viz Příloha 1



## Směr A

Deformace ve směru A je rotace a změna oproti požadovaným hodnotám je udávána ve stupních. Deformace v tomto směru je sledována kvůli zachování správného toku plynu plynovou cestou. Správnost tohoto rozměru může mít vliv na celkovou účinnost turbíny, ve které je tato lopatka použita. U lopatek, kde je list lopatky velmi dlouhý a tenký oproti celkové délce lopatky, jako je tento případ, může docházet k poměrně velkým deformacím rotace. V případě těchto lopatek dochází k narovnávání profilu tj. deformace v záporném směru. K největší odchylce dochází ve středních a koncových sekcích listu lopatky. Posun vosk-kov je v sekcích poblíž bandáže větší než  $0,5^\circ$ .



Graf 7 – Posun vosk-kov v A <sup>1</sup>

### 4.1.2 Měření CTQ bodů

Měření CTQ bod probíhá pomocí 3D skeneru. Postup je takový, že se lopatka naskenuje na otočném stole, který je propojen se softwarem. Díky tomu se stůl otočí tolikrát, kolikrát je v měřicím softwaru nastaveno a také se posune vždy o stejnou kruhovou výseč, čímž zajistí rovnoměrné naskenování modelu. Následuje spojení těchto skenů v softwaru a vytvoření počítačového 3D modelu skenované lopatky. Tento 3D model je porovnán s CAD modelem vytvořeným designerem lopatky. Na naskenovaném modelu jsou změřeny CTQ body a porovnány s CTQ body na CAD modelu. Na základě odlišností oproti původnímu modelu se zjistí odchylka od požadovaných rozměrů.

### 4.1.3 Neplánované deformace

Neplánované deformace se týkají voskových modelů i odlitků. Určování příčin neplánovaných deformací odlitků je velmi náročné, protože závisí i na složitě ovlivnitelných faktorech jako jsou chemické složení materiálu a nedodržení licích podmínek. Proto se zaměřím na popsání neplánovaných deformací voskového modelu, které je snazší ovlivnit.

Teplota tání voskových směsí používaných pro technologii lití na vytavitelný model se pohybuje okolo 65°C a teplota, kdy tyto směsi ztrácí tvarovou stabilitu, se pohybuje okolo 30 °C. Proto je velmi důležité, jak se s modely zachází po odlisování. Modely jsou hned po odlisování mírně plastické, a proto bychom měli dbát na jejich ohleduplné vyjímání z formy. Občas se některý model kvůli nedostatečnému promazání dutiny formy mírně přilepí k povrchu formy nebo se obsluha lisu o minutu zdrží s vyjímáním a model se více smrští. Model jde po té obtížně vyjmout, a tak s ním obsluha páčí. I když je toto zacházení jemné, vosk je poměrně dost plastický a vnese se do něj deformace, která je neplánovaná, tzn. nedá se dopředu odhadnout, jakým směrem se tato deformace bude ubírat. Další neplánovaná deformace se může objevit při manipulaci s listovou částí lopatky místo zámkové, protože list lopatky je kvůli své tenkostěnnosti náchylnější na vnesení deformací. Další možností vzniku neplánované deformace je nedodržení skladovacích podmínek voskových modelů ( 24°C a vlhkost 60%). Nedodržení skladovacích podmínek, když se vyskytne, se týká spíše pár kusů modelů, a proto dojde k neplánovaným deformacím. V neposlední řadě je příčinou i samotné chování vosku při tuhnutí v závislosti na tvaru lopatky a tloušťce stěny. Kdyby neexistovaly ostatní vlivy, bylo by chování vosku při tuhnutí předvídatelné.

Příčin vzniku neplánovaných deformací může být celá řada, ale ty uvedené výše jsou nejpravděpodobnější.

## 5 Rozbor rozměrové stability lopatky 3. stupně

Stabilita rozměrů u odlitků vyráběných technologií lití na vytavitelný model je oproti ostatním technologiím lití poměrně vysoká. Avšak požadavky na přesnost odlitků vyráběných touto technologií jsou vyšší, než u ostatních technologií. A proto je třeba rozměrovou stabilitu zlepšovat.

Velikost rozptylu při výrobě odlitků metodou vytavitelného modelu je dána způsobem výroby, ve kterém je větší část výroby odlitku prováděna ručně. Tento postup s sebou samozřejmě nese vnášení nepřesností a menší míru opakovatelnosti. Vzhledem k charakteru výroby není možné výrobní proces příliš automatizovat, a proto je důležité se zaměřit na co nejpřesnější definici výrobních podmínek, která zajistí zpřesnění a normalizování výrobního postupu, tím se omezí vznik deformací a zvýší se rozměrová stabilita.

### 5.1 Lisování 1. set

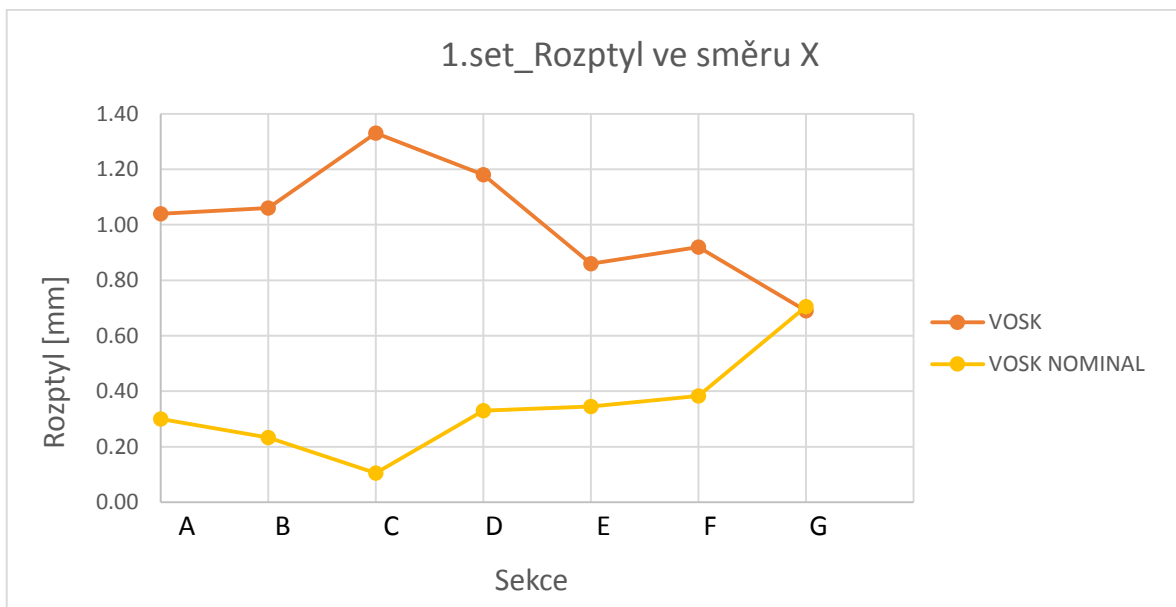
Jak je zmíněno v teoretické části této práce, první výrobní operací je lisování. To má na stabilitu rozměrů velký vliv, protože zvoleným lisovacím postupem ji můžeme výrazně ovlivnit. Pro mnou zkoumanou lopatku byl lisovací cyklus u 1. setu nastaven viz tabulka 3.

Tabulka 3 – Lisovací parametry lopatky 3. stupně (1. set)

LISOVACÍ PARAMETRY LOPATKY 3. STUPNĚ (1. set)	
Teplota vosku v zásobníku	72 ± 1°C
Teplota trysky	72 ± 1°C
Doba vstřikování	90 s
Svírací tlak	69 ± 5 bar (7 MPa)
Vstřikovací tlak	10,3 bar (1 MPa)
Lis	Leyden
Doba chlazení	2 min
Teplota chladicí lázně	8 - 10 °C

Výsledný rozptyl rozměrů při použití těchto parametrů je možné vidět na grafech 8, 9 a 10. V grafu je vždy zobrazen tolerovaný rozptyl rozměrů, definovaný podle nominálního rozměru voskového modelu a rozptyl rozměrů naměřený na voskových modelech použitých k výrobě odlitku.

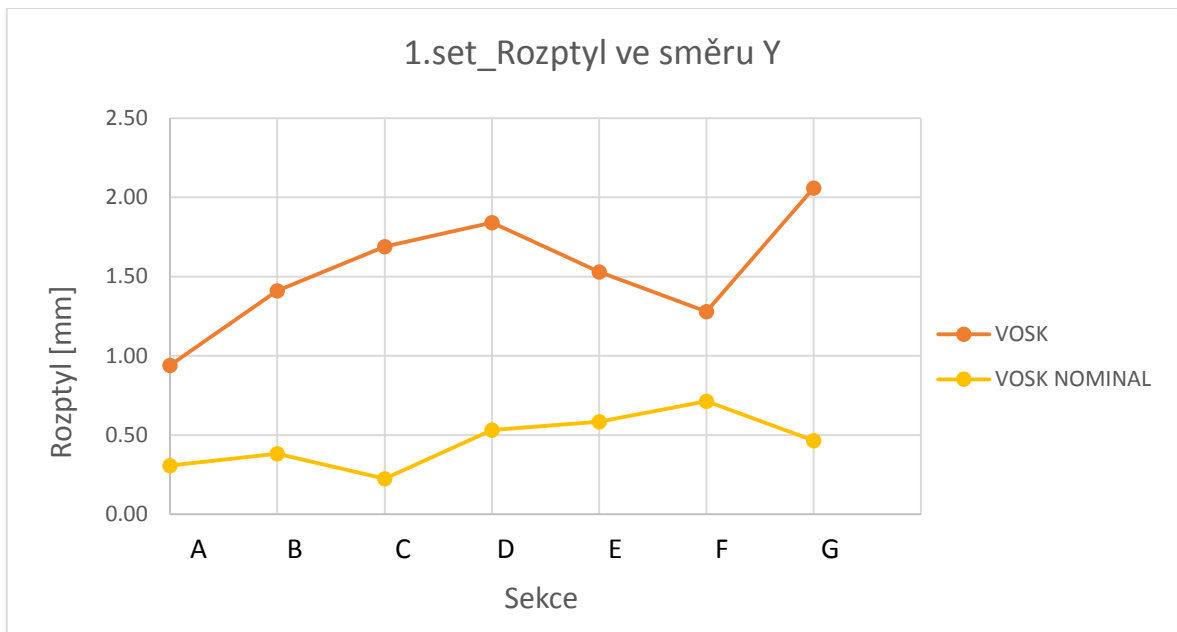
Rozptyl naměřených hodnot v šíři všech sekcí lopatky a ve všech směrech přesáhl tolerovaný rozptyl. Ve směru osy X se pohyboval od 0,7 mm do 1,35 mm oproti tolerovanému 0,3 mm – 0,7 mm. Jak si můžete prohlédnout na grafu 8, k největšímu rozptylu dochází ve střední části listu lopatky v sekcích C a D. Maxima dosáhl v sekci C, a to 1,3 mm, kde několikanásobně přesáhl povolený rozptyl. Ve směru osy Y se rozptyl rozměrů pohyboval mezi 0,9 mm a 2,1 mm. Největší byl naměřen v sekci G, a to 2,06 mm. To, že byl největší rozptyl ve směru osy Y naměřen v sekci G a ne v sekcích ve středu listu lopatky, je překvapující, protože se v podstatě jedná o rozptyl průhybu listu lopatky a k největšímu průhybu dochází ve střední části listu lopatky. Vysvětlením může být natočení bandáže vůči zámku lopatky. K největšímu rozptylu rotace A došlo také v sekci G. Tento jev je očekávatelný, protože se jedná o koncovou sekci listu lopatky s nejtenčí stěnou, kde byl naměřen i největší posun vosk-kov. Rozptyl rotací v této sekci byl roven 2,26°. Rozptyl rotací v takovéto šíři není pro sériovou výrobu vhodný, protože rotace listu lopatky má vliv na prostup plynu turbínou, a tím i na její účinnost.



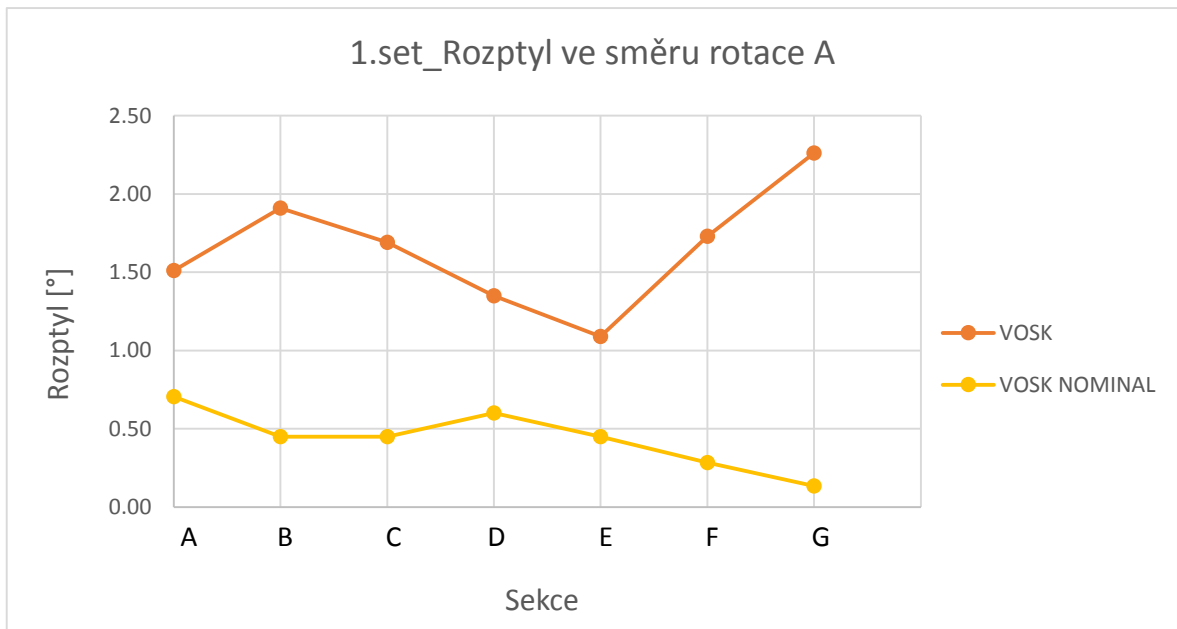
Graf 8 – Rozptyl hodnot ve směru osy X po lisování 1. setu<sup>2</sup>

Vysoké hodnoty rozptylu při lisování jsou nejspíš způsobeny parametry lisování. Vysoká teplota vosku v zásobníku je sice vhodná pro získání dokonale hladkého povrchu, a to i v nejtenčích a od vtoku nejvzdálenějších částech lopatky, ale také přispívá k nízké rozměrové stabilitě. V první řadě je to důsledkem velkého objemového smrštění, které je tím větší, čím vyšší je teplota při vstřikování. Další příčinou může být vyšší teplota voskového modelu při vyjímání z formy. V tomto případě by mohlo dojít k vnesení neplánované deformace nevhodnou manipulací při jeho vyjímání z formy a zakládání do reformeru.

<sup>2</sup> Hodnoty použité do grafu 8, 9 a 10 viz Příloha 2 a Příloha 4



Graf 9 – Rozptyl hodnot ve směru osy Y po lisování 1. setu<sup>2</sup>



Graf 10 – Rozptyl hodnot rotace A po lisování 1. setu<sup>2</sup>

Dalším nastavitelným parametrem je délka lisovacího cyklu, jehož součástí je dotlak. Při dotlaku se sníží vstřikovací tlak a dojde k „zhuštění“ voskového modelu, který se díky tomu méně smrští a nedochází ke vzniku propadlin a staženin. Informaci o délce dotlaku se nepodařilo zjistit, ale z celkové délky lisovacího cyklu se dá odvodit, že byla kratší. Při delším lisovacím cyklu je lopatka při vyjímání z formy studenější, a tím jsou její rozměry stabilnější. Výsledky naznačují, že příčinou nízké rozměrové stability by mohl být právě krátký lisovací cyklus (a dotlak).

Další vlivy, které ovlivňují rozměrovou stabilitu, jsou doba zachlazení a způsob ukládání modelů bezprostředně po odlisování (zchlazení). Doba zachlazení 2 min se po zkoumání

projevila jako dostačující pro uchování rozměrů, proto není třeba předpokládat, že rozptyl deformací pochází z nedostatečného zchlazení.

Voskové modely se u 1. setu ukládaly přímo po zchlazení na plato. I přesto, že zchlazení stabilizuje rozměry lopatek, u modelů dochází po zchlazení k takzvané relaxaci. Jádro voskového modelu během zchlazení zcela nevychladne a při vyjmutí modelu z chladicí lázně dojde k mírnému ohřátí modelu jak vlivem teploty okolního prostředí, tak vlivem teplého jádra. Opětovným zahřátím se projeví tendence modelů k návratu do původního rozměru. Posun směrem do původní polohy je sám o sobě minimální, ale vlivem ukládání na plato dochází k průhybu v listové části, a tím k vnesení neplánovaných deformací, které mají vliv na stabilitu rozměrů.

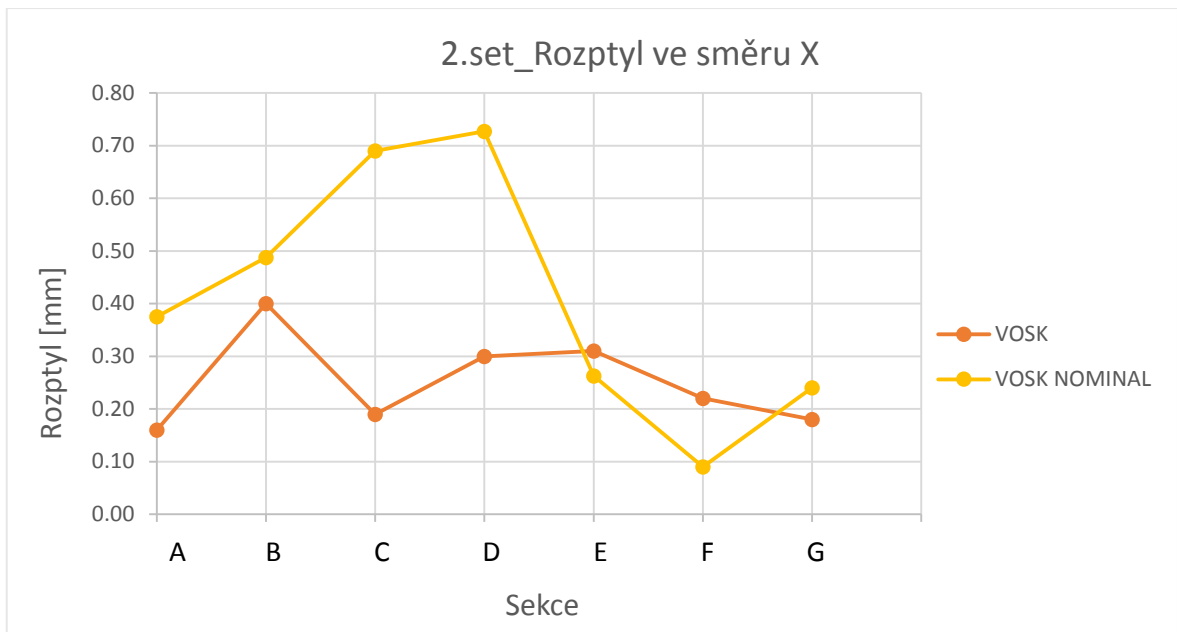
## 5.2 Lisování 2. set

Z důvodů uvedených výše byly parametry lisování a způsob zacházení s modely po odlisování při výrobě 2. setu upraveny. Nové lisovací parametry jsou uvedeny v tabulce 4. Tyto změny vedly k výraznému zlepšení stability rozměrů, jak si můžete prohlédnout v grafech 11, 12 a 13.

Tabulka 4 – Lisovací parametry lopatky 3. stupně (2. set)

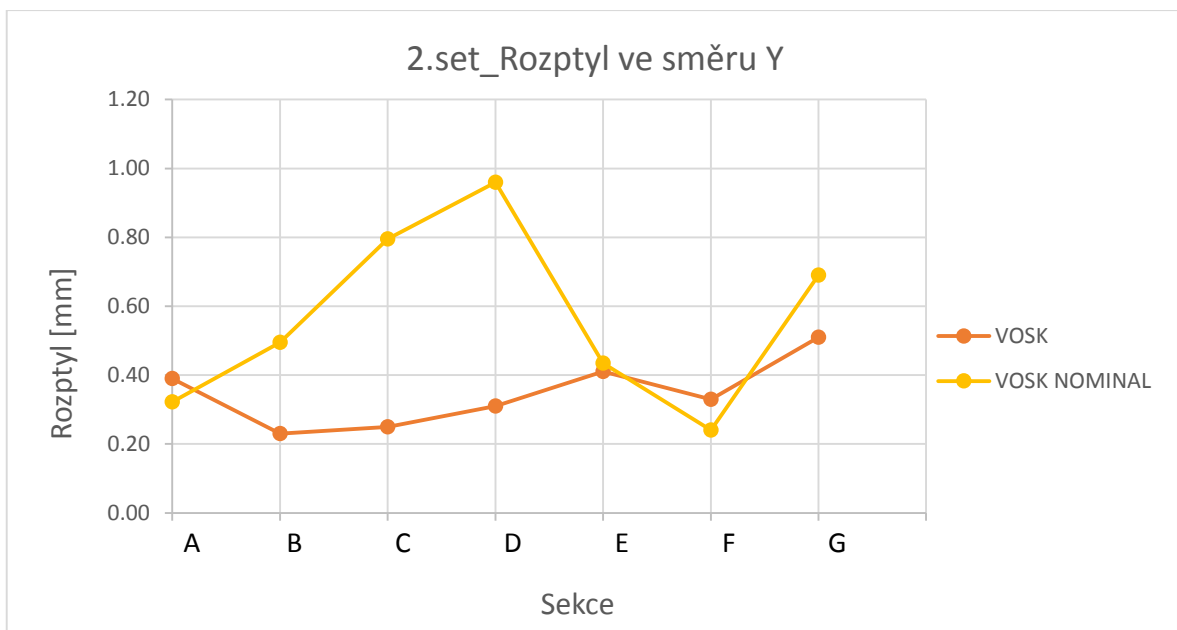
<b>LISOVACÍ PARAMETRY LOPATKY 3. STUPNĚ (2. set)</b>	
<b>Teplota vosku v zásobníku</b>	<b>68 ± 1°C</b>
<b>Teplota trysky</b>	<b>68 ± 1°C</b>
<b>Doba vstřikování</b>	<b>250 s</b>
<b>Svírací tlak</b>	<b>69 ± 5 bar (7 MPa)</b>
<b>Vstřikovací tlak</b>	<b>10,3 bar (1 MPa)</b>
<b>Lis</b>	<b>Leyden</b>
<b>Doba chlazení</b>	<b>3 min</b>
<b>Teplota chladicí lázně</b>	<b>8 - 10 °C</b>

Rozptylu naměřených hodnot se ve směru X pohyboval v rozmezí 0,1 a 0,72 mm. Oproti 1. setu došlo ke zmenšení rozptylu, v některých sekcích lopatky i o víc jak 1 mm. Navíc je rozptyl rozměrů v průběhu sekcí relativně rovnoměrný. K největšímu rozptylu hodnot došlo v sekcích B, D a E, a to 0,3 – 0,4 mm. Rozptyl hodnot o této velikosti byl pod plánovanými maximy, a proto je pro výrobu přípustný. K jedinému překročení došlo v sekcích E a F. Maxima byly překročeny o cca 0,1 mm, což je přípustný rozdíl, který se může dokončujícími operacemi zmenšit do tolerovaných hodnot.



Graf 11 – Rozptyl hodnot ve směru osy X po lisování 2. setu<sup>3</sup>

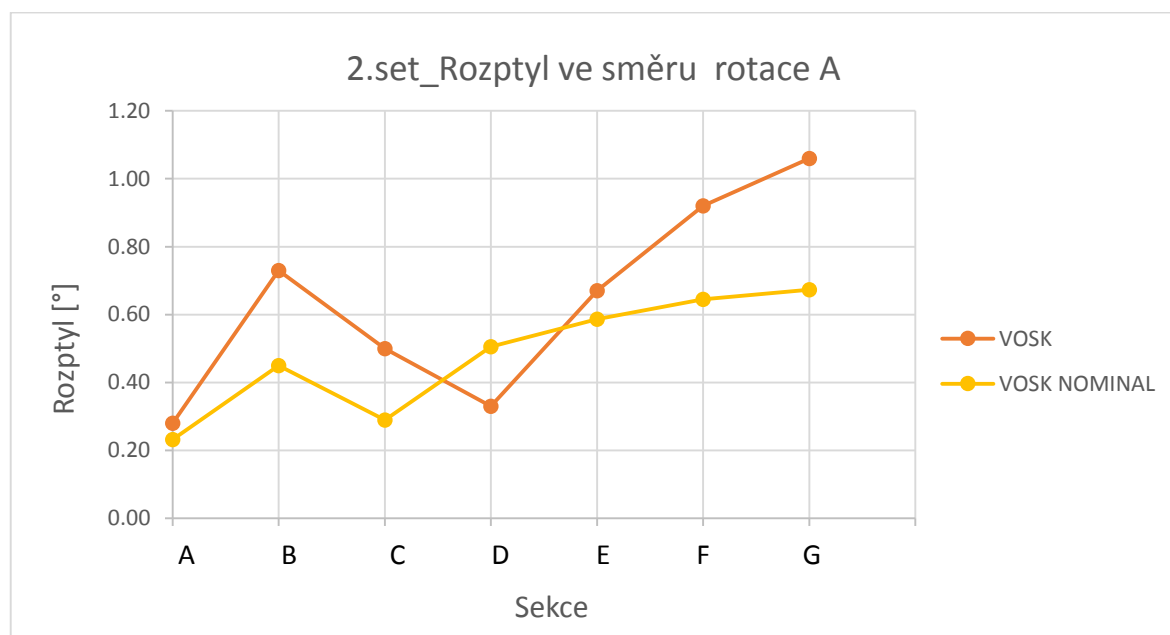
Ve směru osy Y byla velikost rozptylu v rozmezí 0,21 mm až 0,55 mm. Největší rozptyl byl naměřen v sekcích A, E a G, a to 0,4 – 0,55 mm. Stejně jako u 1. setu zde pravděpodobně došlo k natočení bandáže vůči zámkové části. Je možné, že k tomuto natočení dochází samotným tuhnutím vosku nebo nevhodnou manipulací s lopatkou při jejím vyjímání z formy. Stejně jako u rozptylu ve směru osy X nedošlo ani u rozptylu ve směru osy Y k výraznému překročení plánovaného maxima.



Graf 12 - Rozptyl hodnot ve směru osy Y po lisování 2. setu<sup>3</sup>

Změna parametrů se projevila i na rotaci A. Její rozptyl sice přesáhl dovolené tolerance až o 0,4°, ale oproti 1. setu se snížil i o 1°. Zajímavé je, že rozptyl rotací má tvarově podobný

průběh jako u 1. setu. K největšímu rozptylu dochází v sekcích B, F a G. Nelze s jistotou říct, z jakých důvodů jsou právě tyto oblasti náchylné k většímu rozptylu. Z pozorování pracovníků při vyjímání voskových modelů z formy v případě, že jde model hůře vyjmout, bylo zjištěno, že by mohl být rozptyl způsoben uchopováním lopatky za její listovou část. Pracovník je v tomto případě nucen uchopit lopatku za zámkovou část a silou ji vytahovat ven. Občas si pracovník pomůže právě i přidržením listové části lopatky, které se nejvíc projeví v sekcích B, F a G.



Graf 13 – Rozptyl hodnot rotace A po lisování 2. setu<sup>3</sup>

Vzhledem k výsledkům se nastavené parametry lisování jeví jako vhodně zvolené. Je pravděpodobné, že byly tyto odchylky způsobeny vyjímáním modelu z formy nebo při zakládání do reformeru, kdy jej pracovník uchopil z boku za list lopatky a ne pouze za zámkovou část. Stabilizace rozměrů by se dala připsat i zavěšování voskových modelů po odlisování na zavěšovací přípravek místo jejich položení na plato. Zavěšování voskových modelů se projevilo jako velmi účinné právě při rozptylu deformací ve směru osy Y.

### 5.3 Lisování 3. set

Při lisování 3. setu byly opět použity jiné lisovací parametry než při lisování 1. a 2. setu, protože došlo k výměně lisu na pracovišti.

Jak je možné vidět v tabulce 5, v lisovacím procesu došlo ke zvýšení teploty vosku v zásobníku na 71°C, zkrácení lisovacího cyklu na 35 s a zvýšení svíracího a vstřikovacího tlaku. Změny opačným směrem oproti běžným teoriím mohly být provedeny díky moderní konstrukci vstřikovacího lisu MPi, kdy se vzhledem k nastavení vyššího svíracího a

<sup>3</sup> Hodnoty použité pro tvorbu grafů 11, 12, 13 viz Příloha 2 a Příloha 5



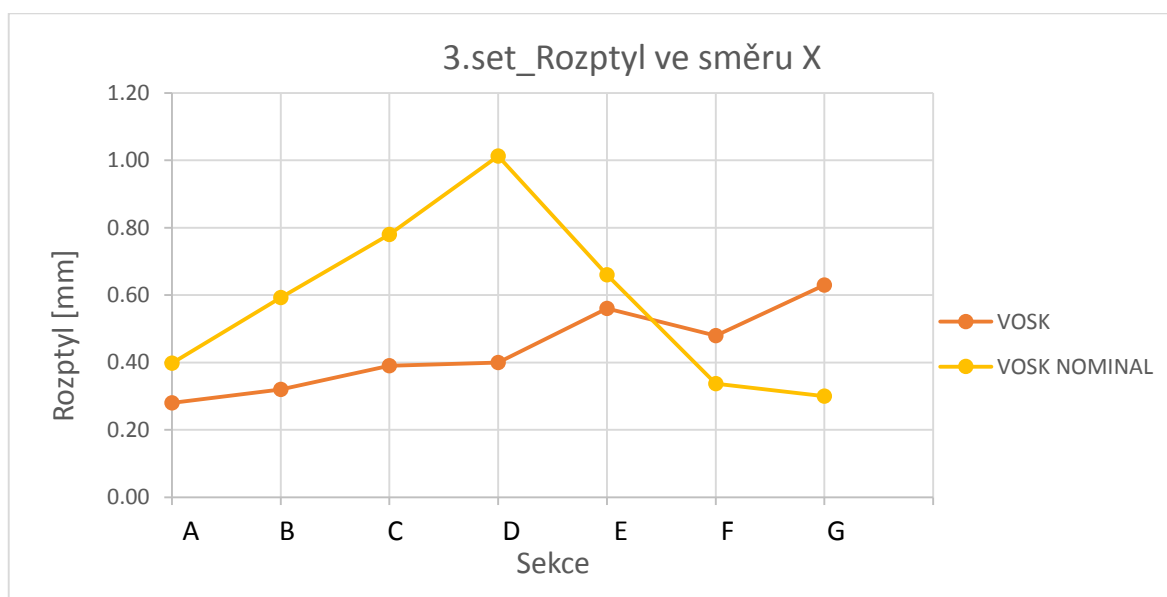
vstřikovacího tlaku a účinnému chlazení dutiny formy, mohl zkrátit lisovací cyklus.

Tabulka 5 - Lisovací parametry lopatky 3. stupně (3. set)

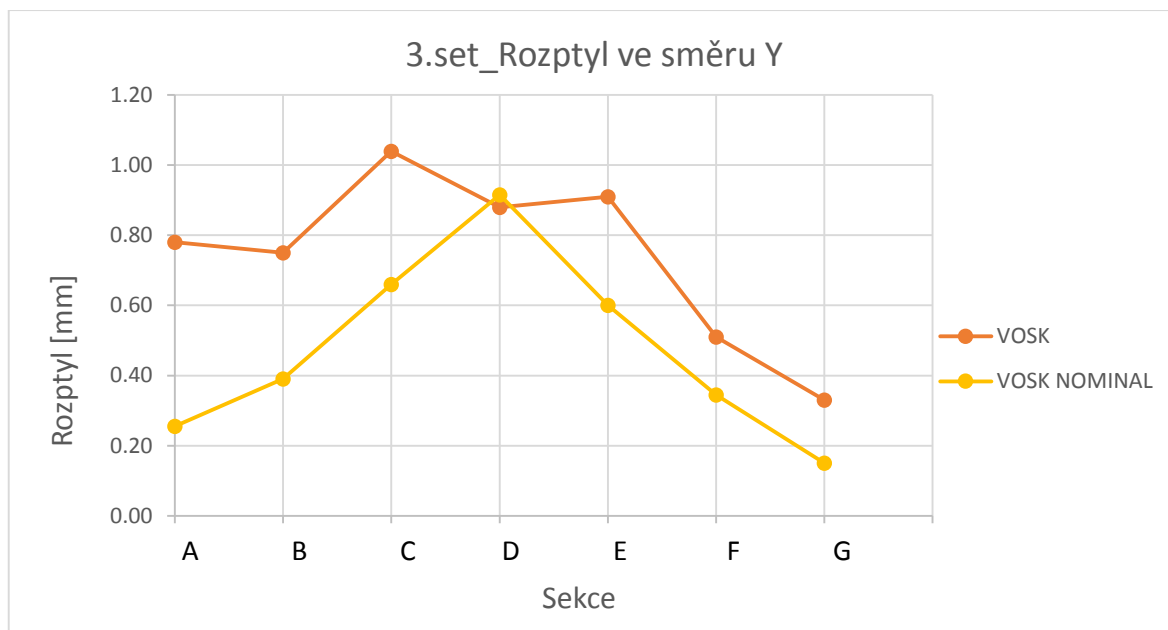
LISOVACÍ PARAMETRY LOPATKY 3. STUPNĚ (3. set)	
Teplota vosku v zásobníku	71 ± 3°C
Teplota trysky	69 ± 3°C
Doba vstřikování	35 s
Svírací tlak	80 ± 5 bar (8 MPa)
Vstřikovací tlak	29 bar (3 MPa)
Lis	MPI
Doba chlazení	2 min
Teplota chladicí lázně	8 - 10 °C

Přestože nastavené parametry měly vést k podobným výsledkům rozptylu, jako u 2. setu, došlo u 3. setu ke zvětšení rozptylu rozměrů. Zhoršení sice nebylo příliš drastické, ale je třeba lisovací parametry upravit pro dosažení lepšího výsledku.

Na grafu 14 je vidět průběh rozptylu rozměrů ve směru osy X. Rozptyl se směrem k bandáži lopatky zvětšuje, což svědčí i o ohnutí některých lopatek do strany ve směru osy X. Průběh rozptylu odpovídá teoretickým předpokladům, což by se dalo označit za pozitivní jev, protože je predikovatelný, a tím pádem ovlivnitelný správným výrobním postupem. K největšímu rozptylu došlo v sekcích F a G, které zároveň jako jediné překročili tolerovaný rozptyl rozměrů. V sekci G rozptyl dosáhl hodnoty 0,65 mm a povolenou hodnotu rozptylu překročil o její dvojnásobek. Vzhledem k tomu, že lisování je první operací, dá se očekávat, že se rozptyl bude v této sekci v průběhu výroby zvětšovat.



Graf 14 - Rozptyl hodnot ve směru osy X po lisování 3. setu<sup>4</sup>

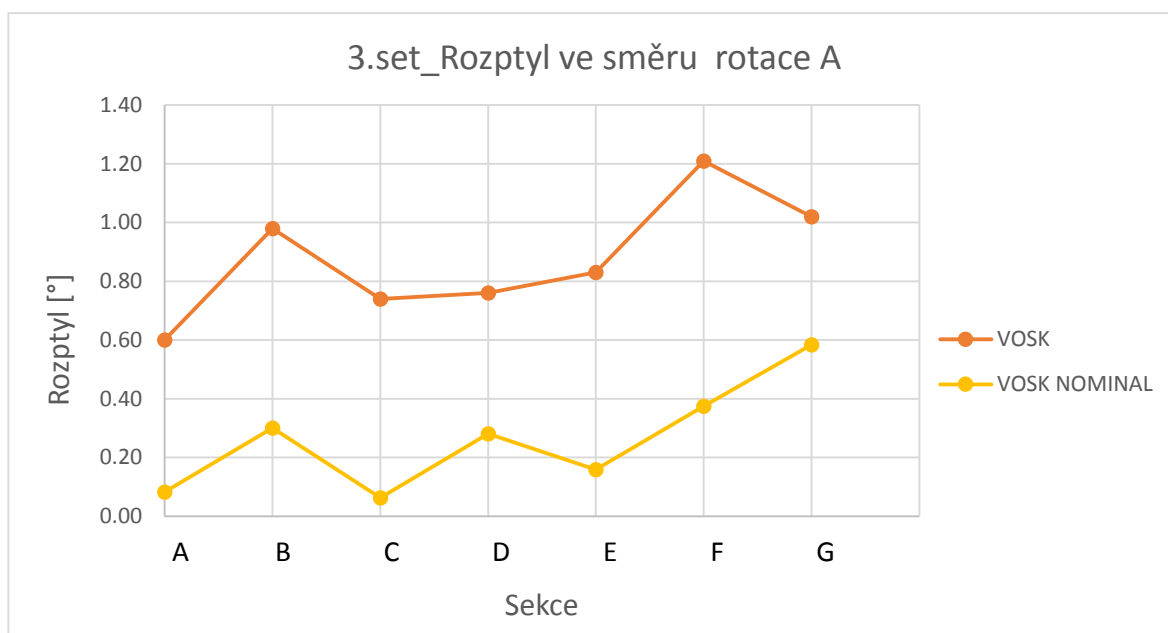


Graf 15 - Rozptyl hodnot ve směru osy Y po lisování 3. setu <sup>4</sup>

Rozptyl ve směru osy Y se pohybuje mezi 0,35 a 1,05 mm, a také se oproti 2. setu zvětšil. Dokonce výrazně přesahuje tolerovaný rozptyl. Vrcholů dosahuje v sekcích C a E. Možnou příčinou rozptylu hodnot právě v těchto sekcích je způsob uchycování voskového modelu do reformeru. Občasným jevem na voskových modelech je otlak čelistí reformeru na listové části lopatky. Čelisti reformeru upínají model právě v sekcích C a E. To, že rozptyl není v těchto sekcích naopak minimální je pravděpodobně dáno mírným posunutím modelu vůči dorazu reformeru a také teplotou vosku při zakládání do reformeru. Lopatky by měly být z formy vyjímány pokaždé ve stejném čase od dokončení lisovacího cyklu. Vzhledem k tomu, že výroba je manuální, není možné předpokládat, že čas vyjímání je opakovatelný. Proto je teplota voskového modelu při zakládání do reformeru jinak vysoká, a tím dochází k různé hloubce „promáčknutí“ na listu lopatky a vzniku rozptylu hodnot měřených v těchto sekcích.

Rozptyl hodnot rotace A je i u 3. setu menší než u setu 1., ale oproti 2. setu je průměrně o cca 0,2° větší. Stejně jako v u předchozích setů se rozptyl rotace nepodařilo udržet v tolerančním poli. Maxima rozptylu mají podle grafu 16 dva vrcholy, a to v sekcích B a F. Pravděpodobná příčina vzniku těchto maxim je nejspíš také ve způsobu upnutí voskového modelu do reformeru. Lopatka je uchycena čelistmi přibližně v sekcích A, C, E, G. Čelisti slouží k předdeformaci listu lopatky, tzn. že zde dochází k tvorbě větší rotace nebo se list vyrovnává, podle toho, jak je třeba. V sekcích B a F tato čelist není, proto má list lopatky prostor k tvarování podle své přirozenosti, a to je nejspíš příčinou zvýšení rozptylu hodnot rotace A zrovna v těchto sekcích.

<sup>4</sup> Hodnoty použité pro tvorbu grafu 14, 15, 16 viz Příloha 2 a Příloha 6



Graf 16 – Rozptyl hodnot rotace A po lisování 3. setu<sup>4</sup>

### 5.3.1 Shrnutí rozměrové stability operace lisování

Z průběhů a velikosti rozptylů změřených při výrobě všech setů lze jednoznačně stanovit, že parametry lisování a způsob zacházení s voskovými modely lopatek dávající nejstabilnější rozměry, jsou nejlépe nastaveny u 2. setu. Na druhou stranu průběhy rozptylu rozměrů při výrobě 3. setu nejvíce odpovídají teoretickým průběhům rozptylu. S ohledem na nejvyšší stabilitu rozměrů bych doporučila vrátit výrobu voskových modelů tohoto typu lopatky zpět na lis Leyden s parametry udanými v tabulce 4. V případě pokračování výroby voskových modelů na lisu MPi, by bylo vhodné vyzkoušet, jaká je stabilita rozměrů při změně některých parametrů. Především bych doporučila prodloužit dobu dotlaku, aby došlo k většímu zhutnění modelu, čímž se předchází většímu smrštění a vzniku některých vad voskového modelu, jako je např. tvorba propadlin, které by mohly mít vliv na rozměrovou stabilitu. Také by bylo vhodné snížit velikost chlazení dutiny formy, aby bylo možné nastavit delší výdrž, a tím také zvýšit rozměrovou stabilitu. Současná teplota chlazení je příliš nízká, a proto musí být nastaven krátký lisovací cyklus, který umožňuje vyndání lopatky před úplným smrštěním. Ponechá-li se lopatka při současném nastavení ve formě delší čas, je obtížné její vyjímání, v extrémním případě dojde k jejímu porušení. Navíc při upínání do čelistí reformu může dojít k jeho porušení.

Vzhledem k tvorbě vrcholů rozptylu v některých sekcích listu lopatky, které jsou vidět na grafech 15 a 16, by bylo vhodné upravit i konstrukci reformeru tak, aby nedocházelo ke vzniku „protlačenin“ a aby bylo možno rovnoměrně rotovat listem lopatky v celé délce listu lopatky. K rovnoměrnější rotaci by přispělo navýšení počtu čelistí tak, aby korespondovalo s měřenými sekcemi.

Průběhem rozptylů byla také potvrzena teorie o nastavení lisovacích parametrů. Snížení teploty vosku v zásobníku a prodloužení lisovacího cyklu (doba dotlaku a výdrže) vedly k výraznému zvýšení rozměrové stability až na hodnoty menší, než byla stanovená tolerance. Také se projevil výrazný vliv na stabilitu rozměrů ve způsobu zacházení s voskovým modelem po odlisování (zachlazení). Zavěšování voskových modelů na zavěšovací přípravek by mělo být nedílnou součástí výroby každé lopatky podobné konstrukce jako je mnou zkoumaný model.

## 5.4 Možné vlivy výrobních operací na rozměrovou stabilitu ocíděných lopatek 3. stupně

Měření rozměrů odlitků je v produkci prováděno až po cídění. Protože nejsou známy hodnoty z předchozích operací, bude v této kapitole popsán aspoň jejich předpokládaný vliv na rozměrovou stabilitu. Cídění odlitku je zároveň poslední výrobní operací, ve které je možné ovlivnit jeho výsledné rozměry a jejich rozptyl.

Operacemi, u kterých se předpokládá největší podíl na celkovém rozptylu, jsou hrotování a cídění.

**Hrotování**, nebo-li konečná úprava voskového modelu prováděná pomocí skalpelu, horkých nástrojů a opravného vosku, má zásadní vliv na kvalitu a rozměry voskových modelů. Míra ovlivnění rozměrů voskového modelu pracovníci závisí na kvalitě povrchu modelu po lisování. V případě, že má voskový model dokonale hladký povrch, bez „map“ vzniklých tečením vosku do formy, bez „pomerančové kůry“ vzniklé příliš silnou vrstvou silikonového spreje, popř. bez jiných povrchových vad, je operace hrotování záležitostí pár minut, kdy pracovníce akorát odstraní otřepy v dělicí rovině modelu. Získání voskového modelu takovéto kvality přímo z lisu je mnohdy velmi náročné, ve většině případů skoro nemožné. Jak je zmíněno v kapitole 5.3, častým jevem na listu lopatky je také „promáčknutí“ způsobené upínacími čelistmi reformeru. Tato povrchová vada je velmi obtížně odstranitelná. Jedná se o minusovou vadu, kterou je potřeba doplnit roztaveným opravným voskem a povrch zahladit tak, aby byl dodržen geometrický tvar listu lopatky. Již z naznačeného postupu opravy je jasné, že vytvoření vždy stejného tvaru není reálné. Stejně obtížné je zahlázení povrchu při výskytu „map“ z tečení vosku. Tato vada je také minusová a její hloubka nebývá větší než 0,5 mm. Právě její malá hloubka je největším problémem při opravách. Povrch voskového modelu je mírně mastný a opravný vosk na něm při zahlazování nedrží. Z těchto důvodů je třeba voskový model odmastit, povrch s vadou zdrsnit a až poté ho zatřít opravným voskem a vyhladit. Všechny takovéto opravy povrchu voskového modelu zaberou větší množství času, při kterém je s lopatkou manipulováno v prostředí se zvýšenou teplotou než je doporučená teplota pro skladování.

Už jen samotná manipulace s voskovým modelem pracovníci, která drží model v ruce (36,5 °C) může ovlivnit tvar listu lopatky. Také pracovní prostor s topným tělesem sloužícím pro roztavení opravného vosku a nahřátí pracovního nářadí, který současně „vytápí“ nejbližší okolí, nemá na rozměrovou stabilitu dobrý vliv. Přidáme-li k tomu nízkou opakovatelnost oprav, stává se z hrotování operace s potenciálně nejvyšším vlivem na rozměrovou nestabilitu ve výrobě odlitku metodou lití na vytavitelný model.

Další výrobní operace, kde potenciálně dochází v rozptylu rozměrů, je **sestava „stromečku“**. K rozptylu rozměrů může dojít už jen samotnou časovou prodlevou mezi lisováním a sestavou, protože voskový model má tendence samovolně měnit svůj tvar. Není jisté, jestli se jedná o tvarovou paměť nebo návrat do fyzikálně nejvýhodnější polohy. Rozbor této problematiky by byl vhodným tématem pro další zkoumání. Dalším faktorem ovlivňujícím rozměrovou stabilitu při sestavě stromečku by mohlo být vnesené teplo z topného tělesa a z plamene (plynová bombička s usměrněným plamenem) používaného na zahřátí spojů mezi vtokovou sestavou a modelem. Pracovníci se sice vyhýbají přímému kontaktu plamene s voskovým modelem lopatky, ale i tak jeho žár může mít vliv na tvar voskového modelu, především v místech, kde jsou modely na stromečku umístěny příliš blízko u sebe a manipulace s plamenem je obtížná.

Následující výrobní operace, jako je tvorba keramického obalu, vytavení vosku v autoklávu a příprava skořepiny před litím, jsou považovány z hlediska vnášení rozměrové nestability za stabilní. Naopak se usuzuje, že tvorbou keramické skořepiny dojde ke „konzervaci“ rozměrů. Možný vliv skořepiny na rozměrovou stabilitu bude popsán v kapitole 6.

Při **lití** dochází ke vzniku dalšího rozptylu deformací. Nestabilita rozměrů může být důsledkem ustavení skořepiny při lití, lící teploty, zacházení se skořepinou v nejbližším čase po odlití, ale i návrhem vtokové sestavy. Samotným vlivem vlastní hmotnosti taveniny, smrštění a působení pnutí může také dojít v odlitku ke změně jeho tvaru. Avšak jejich vliv se projevuje i na kvalitě povrchu odlitku. Povrchové vady (opravitelné) se odstraňují při cídění, které je prováděno ručně, a tím také může dojít k dalšímu zvětšení rozptylu měřených hodnot.

Výrobní operace prováděné po odlití způsobí zvětšení rozptylu pouze v případě, že jsou prováděny jinak, než udává stanovený postup. Při **odstranění skořepiny** dojde ke zvětšení rozptylu rozměrů pouze v případě, že pracovník udeří kladivem místo do vtokové soustavy přímo do odlitku, čímž dojde k jeho deformaci. Je možné také diskutovat o použití „vytloukání“ na tenkostěnné odlitky, kterými mnou zkoumané lopatky jsou. Vhodnou alternativou by bylo požití vibračního kladiva nebo jiného šetrnějšího zařízení, které bývá poměrně nákladné. Při **odřezávání odlitků** od vtokové soustavy a **broušení vtoků** by mohlo způsobit změnu rozměrů odlitku pouze teplo vnesené do odlitku, které by způsobilo

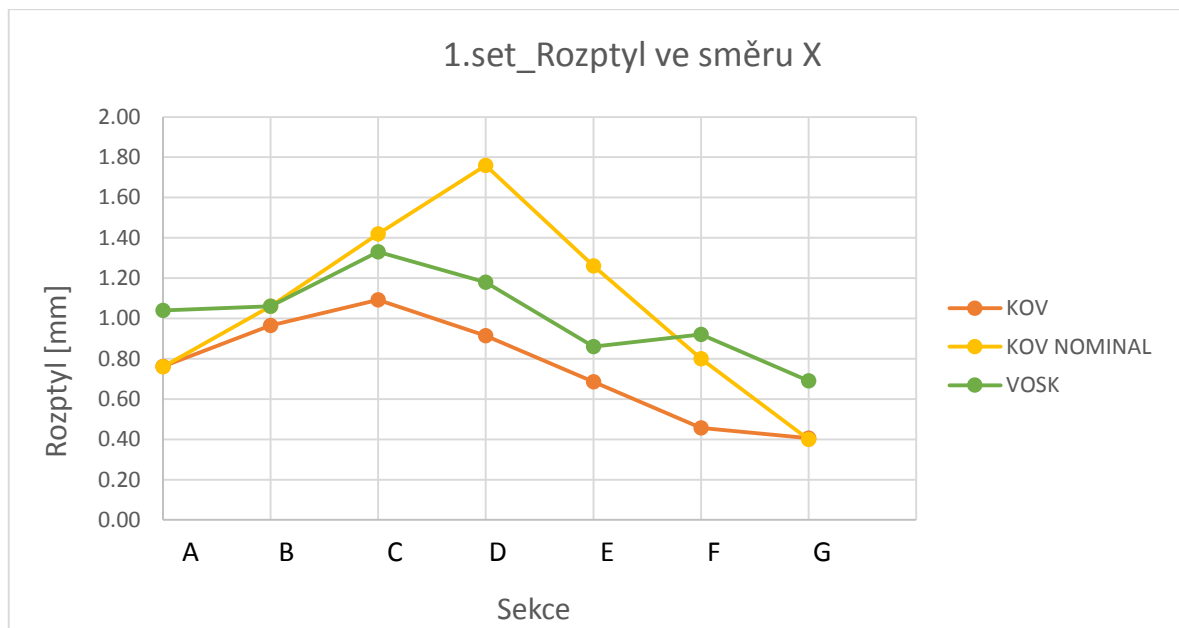
vznik vnitřního pnutí v odlitku. Při **tryskání** odlitků se zvětší rozptyl rozměrů pouze v případě delšího působení proudu abraziva na jedno místo listu lopatky. Je-li tryskání prováděno rovnoměrně, ke změně tvaru odlitku by dojít nemělo.

Další problematickou výrobní operací pro udržení stability rozměrů je **cídění**. Při něm dochází k poměrně velkým úběrům materiálu na celé ploše odlitku. Velikost úběru není možno v běžném procesu měřit, proto je velmi důležité mít zaškolené cídiče se zkušenostmi, kteří dokážou velikost úběru odhadnout. Z popisu procesu je jasné, že opakovatelnost je zde poměrně nízká. Na druhou stranu je cídění operací, která může vylepšit výsledné rozměry odlitku přiblížením se k nominálnímu rozměru, a tím zmenšit velikost rozptylu měřených hodnot.

## 5.5 Srovnání rozměrové stability ve směru osy X všech setů po cídění

### 5.5.1 1. set

Rozptyl rozměrů voskových modelů po lisování se u 1. setu pohyboval mezi hodnotami 0,7 a 1,35 mm. Při měření lopatek po ocídění se rozptyl hodnot výrazně zlepšil, a to až do té míry, že se jeho hodnoty přesunuly do tolerančního pole rozptylu.



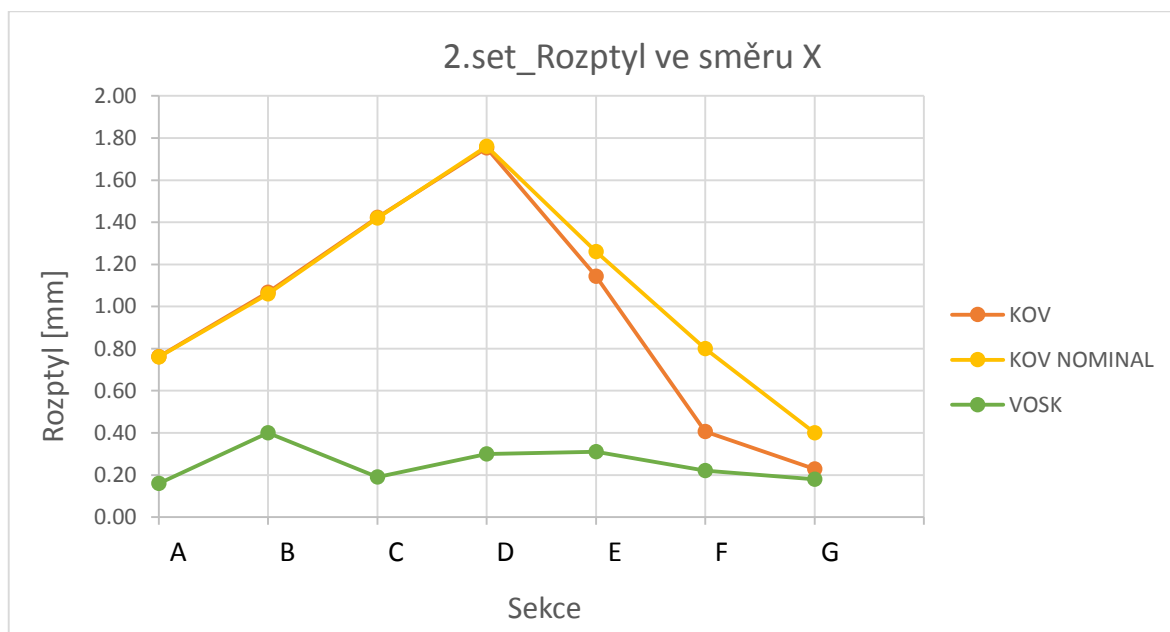
Graf 17 - Rozptyl hodnot ve směru osy X po cídění 1. setu<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Hodnoty užité pro tvorbu grafů 17, 20, 23 viz Příloha 3 a Příloha 4

Největší rozptyl hodnot byl naměřen v sekci C, kde dosáhl velikosti 1,1 mm. Průběh rozptylu byl v délce všech sekcí oproti tolerovanému rozptylu poměrně rovnoměrný. Také je z průběhů rozptylu rozměrů voskových modelů a odlitků patrná jejich vzájemná podobnost. To svědčí o přesnosti technologie lití na vytavitelný model. Z průběhu se dá také usuzovat, že úběr materiálu při cídění byl rovnoměrný. Velikost úběru se z grafu nedá určit, protože u odlitku dochází k cca 3 % objemovému smrštění oproti voskovému modelu.

### 5.5.2 2. set

Voskové modely měly při lisování 2. setu vysokou rozměrovou stabilitu. Rozptyl hodnot se pohyboval mezi 0,15 a 0,4 mm. Ze zkušenosti s předchozím setem by se dalo usuzovat, že lopatky budou mít po odlití maximální rozptyl 0,6 mm, to se však neprokázalo. Rozptyl rozměrů odlitku se po cídění zvýšil v sekcích A – D na maximální tolerované hodnoty. U ostatních sekcí byl rozptyl rozměrů jen o pár desetín menší, než je maximální tolerovaný rozptyl. K největšímu zhoršení došlo ve střední sekci D, kdy se rozptyl zvětšil z 0,3 mm na 1,75 mm. Při porovnání výsledků 1. a 2. setu se ukazuje, že na rozměrovou stabilitu mají zásadní vliv operace následující po lisování. Rozptyl rozměrů se u obou setů blíží tolerovanému maximu bez ohledu na to, zda byl původní rozptyl rozměrů voskových modelů malý a v tolerovaných mezích nebo byl větší než tolerované maximum. Dá se předpokládat, že největší vliv na výsledný rozptyl má operace cídění.

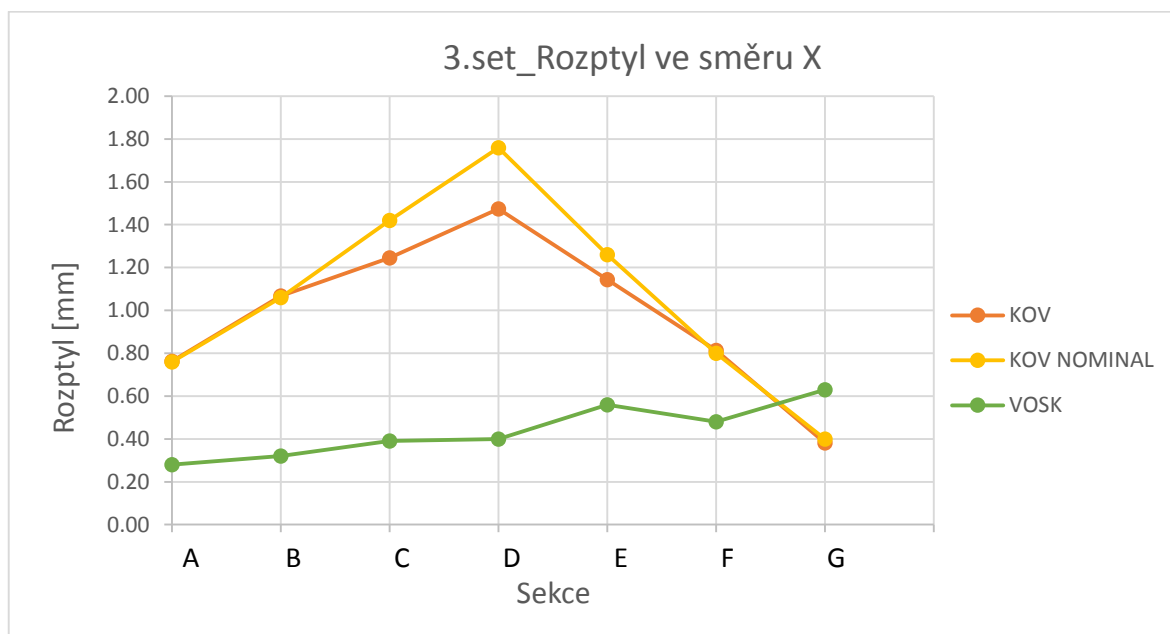


Graf 18 - Rozptyl hodnot ve směru osy X po cídění 2. setu<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Hodnoty použité pro tvorbu grafů 18, 21, 24 viz Příloha 3 a Příloha 5

### 5.5.3 3. set

U 3. setu došlo k podobnému zvětšení rozptylu jako u 2. setu. Tím se potvrdil zásadní vliv operací následujících po lisování na rozměrovou stabilitu při výrobě lopatky 3. stupně. V sekci G došlo ke zmenšení rozptylu rozměrů u odlitků oproti voskovému modelu o 0,2 mm. V ostatních sekcích listu lopatky došlo ke zhoršení rozměrové stability. Ve středních sekcích lopatky dokonce o 1,1 mm.



Graf 19 - Rozptyl hodnot ve směru osy X po cídění 3. setu<sup>7</sup>

### 5.5.4 Shrnutí rozměrové stability odlitku ve směru osy X

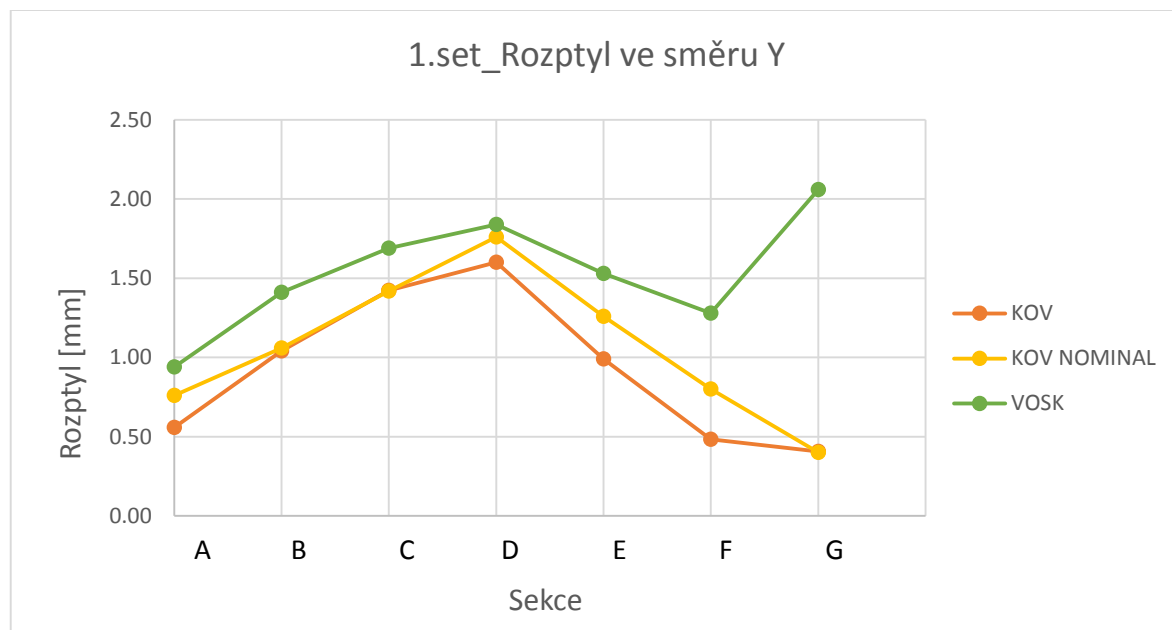
Rozměrová stabilita ve směru osy X se u 1. setu cíděním zvýšila. Naopak u 2. a 3. setu je nižší, než u voskových modelů. Ve všech sekcích se však pohybuje pod maximální povolenou hodnotou rozptylu. U 2. a 3. setu došlo k největšímu zvětšení rozptylu ve střední sekci listu lopatky. Z výsledků rozptylu voskových modelů a cíděných odlitků lopatek je patrné, že největší vliv na rozměrovou stabilitu odlitků lopatky 3. stupně ve směru osy X mají operace následující po lisování. S největší pravděpodobností má zásadní vliv na stabilitu rozměrů lití a cídění. Cídění může rozměrovou stabilitu zvýšit, ale i snížit. Rozptyl rozměrů voskových modelů nemá na výsledný rozptyl rozměrů ve směru osy X žádný vliv. Toto tvrzení je omezeno pouze výsledky měření. Je možné, že do výsledného rozptylu vstupují i jiné vlivy, jako např. časová náročnost procesu a výsledná velikost nákladů.

<sup>7</sup> Hodnoty použité pro tvorbu grafů 29, 22, 25 viz Příloha 3 a Příloha 6



## 5.6 Srovnání rozměrové stability ve směru osy Y všech setů po cídění

### 5.6.1 1. set

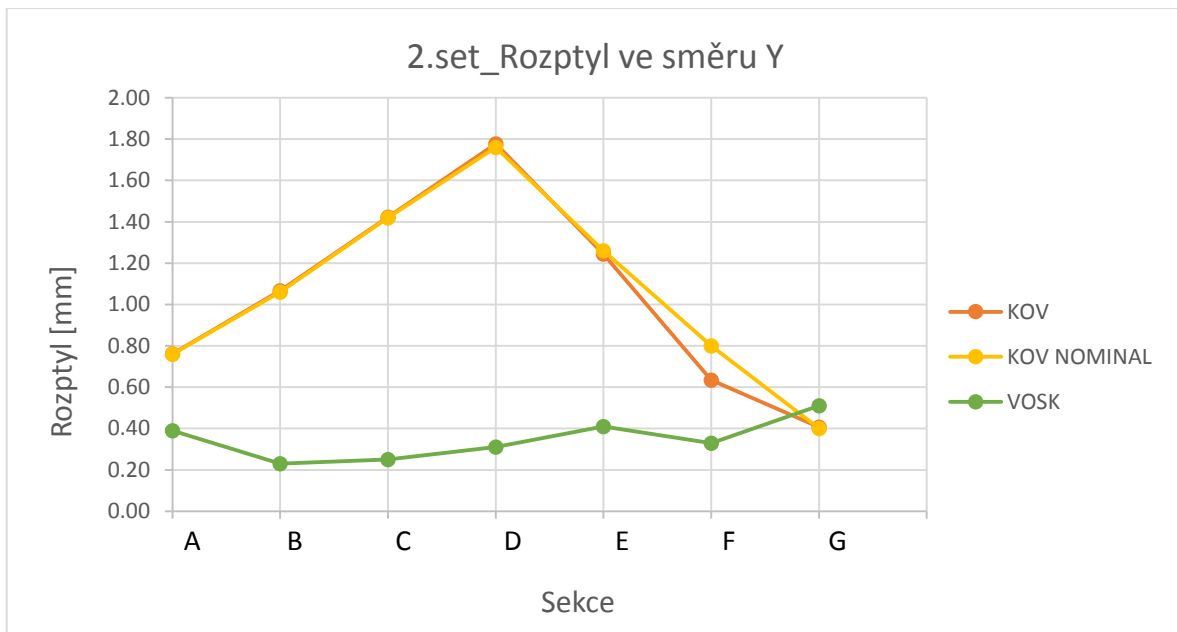


Graf 20 - Rozptyl hodnot ve směru osy Y po cídění 1. setu<sup>5</sup>

U průběhu rozptylu voskových modelů a odlitků ve směru osy Y je opět vidět podobnost jako u průběhu rozptylu rozměrů při výrobě 1. setu ve směru osy X. Přestože se u voskových modelů pohyboval rozptyl rozměrů mezi 1 a 2 mm, což bylo mimo tolerovaný rozptyl, výsledný rozptyl naměřený na odlitcích se dostal do tolerovaného rozptylu a zmenšil se na 0,5 – 1,6 mm.

### 5.6.2 2. set

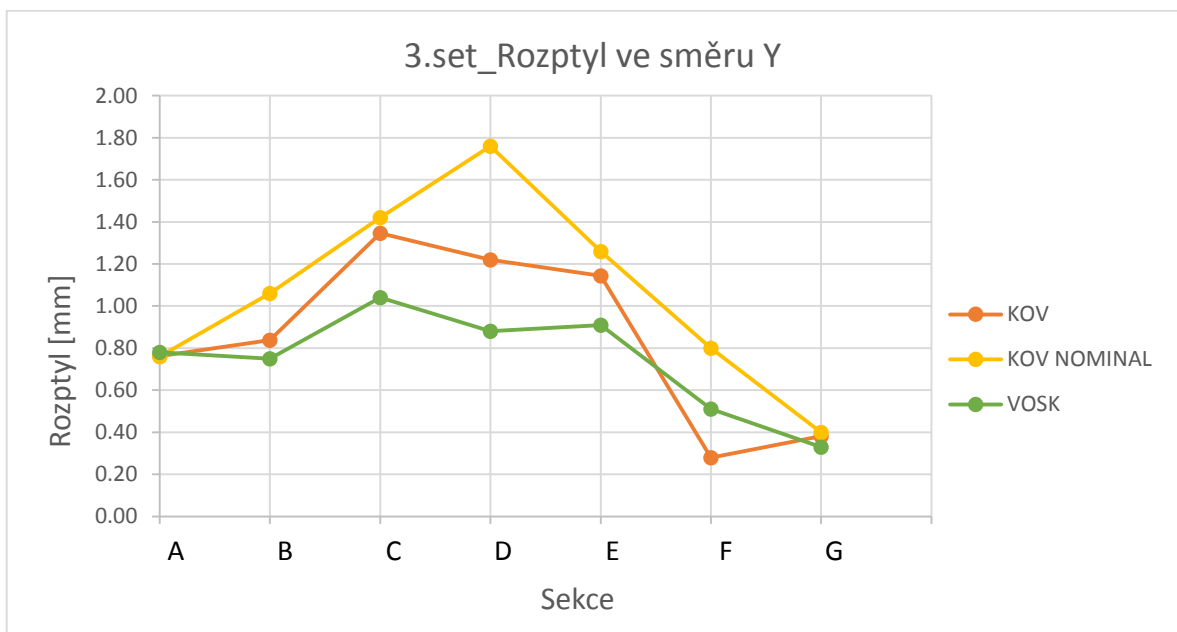
Průběh rozptylu 2. setu kopíruje předpokládaný průběh rozptylu v tomto směru. Původně malý rozptyl rozměrů voskových modelů se v průběhu výroby zvětšil až na maximální možné hodnoty. V sekci A a D dokonce překročil tolerovaný rozptyl rozměrů. K nejmarkantnějšímu zvětšení rozptylu rozměrů došlo v sekci D, kdy se rozptyl zvětšil z hodnoty 0,35 mm na 1,8 mm.



Graf 21 - Rozptyl hodnot ve směru osy Y po cídění 2. setu<sup>6</sup>

### 5.6.3 3. set

U 3. setu došlo k mírné změně v průběhu rozptylu oproti předešlým setům. Rozptyl rozměrů odlišků kopíruje tvar rozptylu voskových modelů. Ve středních sekcích, tj. C, D a E, se zvýšil rozptyl hodnot o cca 0,3 mm. Zvětšení rozptylu v těchto sekcích není tak velké jako u 2. setu, kde se zvětšil rozptyl o 1,5 mm. Rozptyl hodnot je opět v tolerovaných mezích.



Graf 22 - Rozptyl hodnot ve směru osy Y po cídění 3. setu<sup>7</sup>

## 5.6.4 Shrnutí rozměrové stability odlitku ve směru osy Y

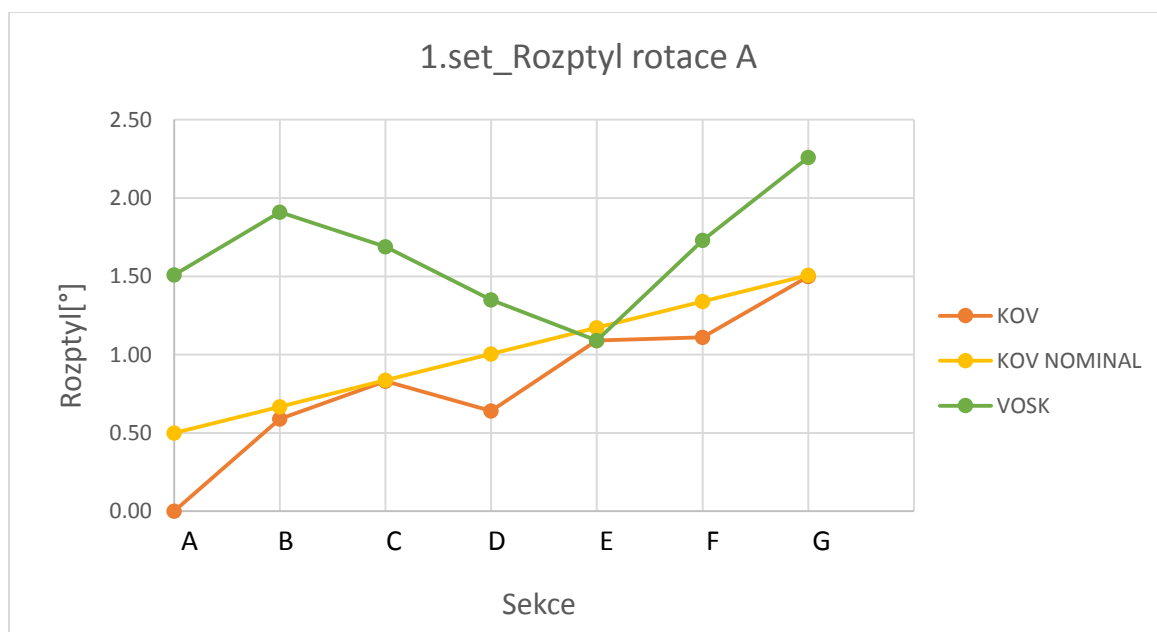
Rozměrová stabilita ocíděných odlitků je u 1. setu vyšší než u voskových modelů, u 2. a 3. setu je naopak nižší. U všech setů se rozptyl rozměrů ve směru osy Y pohyboval pod hranicí maximálního povoleného rozptylu. Nejmenší rozptyl rozměrů byl naměřen u 3. setu. Příčiny zvětšení nebo zmenšení rozptylu ve směru osy Y jsou stejné jako příčiny ve směru osy X.

U 1. a 3. setu kopíroval průběh rozptylu rozměrů ocíděných lopatek průběh rozptylu rozměrů voskových modelů.

## 5.7 Srovnání rozměrové stability rotace A všech setů po cídění

### 5.7.1 1. set

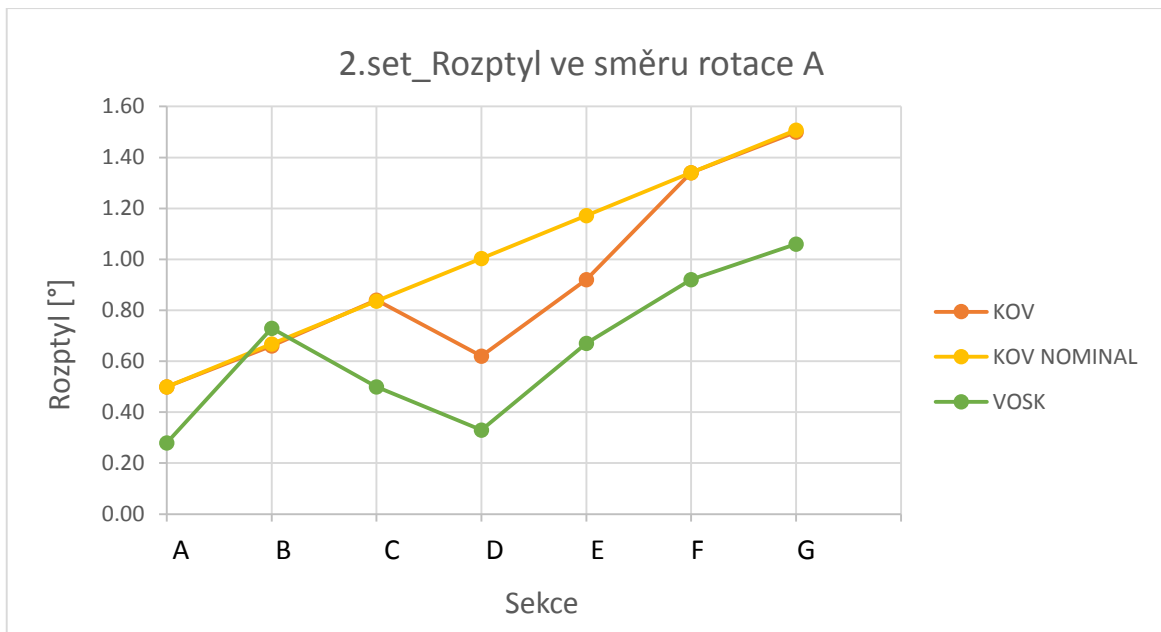
Z průběhu grafu 24 je patrné, že se rozptyl rotace po délce listu směrem k jejímu konci zvětšuje. K největšímu rozptylu tedy dochází v sekci G. Průběh rozptylu rotace ocíděných lopatek přibližně kopíruje předpokládaný rozptyl. Rozptyl rotace ocíděných lopatek se oproti voskovým modelům zmenšil z původních  $2,25^\circ$ , které přesahovali tolerovaný rozptyl i o  $1^\circ$ , na rozptyl v mezích tolerance. To, že průběh rozptylu není plynulý, je nejspíš dáno cíděním, při kterém je velmi obtížné vytvořit povrch s rovnoměrným zakřivením.



Graf 23 – Rozptyl rotace A po cídění 1. setu<sup>5</sup>

### 5.7.2 2. set

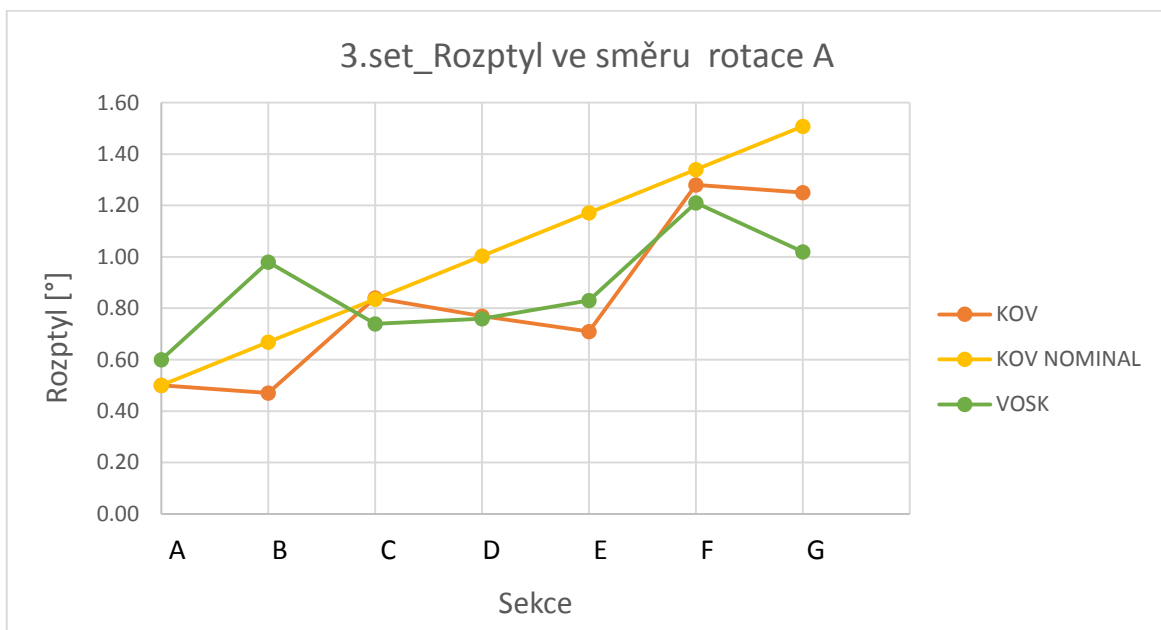
Z průběhu rozptylu rotace A, kde rozptyl rozměrů naměřený na odlitcích kopíruje rozptyl rozměrů naměřených na voskových modelech, se zdá, že odlitek byl cíděn pouze v sekcích B a G. Rozptyl odlitků se oproti rozptylu voskových modelů zvýšil o cca 0,2 mm. Pouze v sekci B došlo ke zmenšení rozptylu.



Graf 24 - Rozptyl rotace A po cídění 2. setu<sup>6</sup>

### 5.7.3 3. set

I u 3. setu se zdá, že rozptyl rotace odlitků mírně kopíruje rozptyl rotace voskových modelů. Také zde stejně jako u 2. setu došlo ke zmenšení rozptylu oproti voskovým modelům u sekce B. Ke zlepšení došlo také v sekci E. Průběh rozptylu v délce listu lopatky stejně jako u předchozích setů přibližně kopíruje předpokládaný rozptyl.



Graf 25 - Rozptyl rotace A po cídění 3. setu<sup>7</sup>

### 5.7.4 Shrnutí rozměrové stability odlitku rotace A

Oproti rozptylu rozměrů ocíděných lopatek ve směru osy X a Y se u rotace A projevila větší tendence ke kopírování průběhu rozptylu rotace voskových modelů. Stejně jako u rozptylu

rozměrů je zde vidět přiblížení se předpokládanému rozptylu. Těžko se dá stanovit, jestli je to vlivem správného určení posunu vosk-kov nebo vlivem cídění na správných místech odlitku. Mírná nerovnoměrnost v průběhu rozptylu může být způsobena obtížností dosáhnout rovnoměrného zakřivení cíděním.

Profil listu lopatky má zásadní vliv na účinnost vzduchové turbíny. Z tohoto důvodu je potřeba, aby si lopatky byly co nejpodobnější. Důležitá je nejen rotace listu lopatky, ale i jeho posunutí v osách X a Y.

## 5.8 Zhodnocení rozměrové stability

Rozměrová stabilita voskových modelů je velmi závislá na lisovacích parametrech a způsobu ukládání voskových modelů po odlisování. Zvýšení rozměrové stability voskových modelů však nemá velký vliv na výsledný rozptyl rozměrů měřený u cíděných lopatek. Je možné, že v případě hodnocení spotřeby zdrojů (Nh, materiál) při cídění, by se projevil vliv vyšší rozměrové stability voskových modelů nižší spotřebou zdrojů u 2. a 3. setu oproti 1. setu.

Nejvyšší výsledné rozměrové stability ve všech směrech dosahuje 3. set. Rozptyl ve směru osy X a Y se v některých sekcích pohybuje mezi 0,4 – 0,6 mm pod maximálním povoleným rozptylem. Rozptyl rotace A je v některých setech 0,2 – 0,5° pod maximálním povoleným rozptylem.

Z výsledku je patrné, že zásadní vliv na rozměrovou stabilitu mají operace následující po lisování. Protože není jasné, která z operací mezi lisováním a cíděním má zásadní vliv na zvětšení rozptylu rozměrů, bylo na několika kusech provedeno měření po několika výrobních operacích. Operace byly vybrány na základě potenciálního vlivu na rozměrovou stabilitu. Vyhodnocení tohoto měření je v kapitole 7.

## 5.9 Vliv cídění odlitků

Při cídění odlitku je nejdůležitější cídění v oblasti RPS bodů. Cíděním na těchto bodech se dá výrazně ovlivnit naměřený rozměr lopatky. To je dáno tím, že rozměry jsou hodnoceny pouze prostřednictvím CTQ bodů. Na rozměry a jejich stabilitu může mít cídění RPS bodů z hlediska prodejce pozitivní i negativní vliv. Úběrem správného množství materiálu cíděním na správném místě můžeme dosáhnout posunutí rozměrů do tolerančního pole. V případě velkého úběru vznikne neshodný kus, který již není možno nijak opravit.

Co se týče posunu ve směru osy X vlivem cídění, je zásadní cídění na náběžné hraně. U většiny lopatek se na ní totiž vyskytují RPS body. Je-li na náběžné hraně přebytek materiálu a ocídí se, dojde k posunu lopatky a její rozměry se mohou dostat do správných hodnot. Ocídí-li se náběžná hrana příliš, opět vznikne neshodný kus. Tento popis je velmi

zjednodušený, je-li lopatka zdeformovaná nebo je ocídění nerovnoměrné, také může dojít k výrobě neshodného kusu. Množství odebraného materiálu závisí na šikvosti cídiče, ale také na návrhu a kvalitě odlitku. V případě odtokové hrany se v dělicí rovině může objevit přesazení. To vzniká již při lisování modelu, je-li špatně navržena nebo sestavena forma. Neopraví-li toto přesazení dělnice při hrotování, objeví se i na odlitku a cídič při jeho odstranění ovlivní rozměry lopatky a sníží rozměrovou stabilitu.

I na rotaci A a posun Y má cídění velký vliv. Nevhodným broušením plochy listu lopatky může dojít ke zmenšení průhybu koryta nebo hřbetu, a tím se zároveň změní rozměry ve směru osy Y.

Při cídění měřených kusů nejspíš došlo k oběma projevům cídění, a to k pozitivnímu i k negativnímu. U 1. setu se cíděním pravděpodobně zlepšily výsledné rozměry odlitku, a tím došlo i k zmenšení rozptylu. U 2. a 3. setu se rozptyl rozměrů vlivem cídění zvýšil natolik, až se dostal na hraniční hodnoty.

## 6 Keramický obal

Obecně se keramická skořepina z hlediska rozměrové stability považuje za stabilizující faktor. Předpokládá se, že tvorbou keramického obalu se zafixují rozměry voskových modelů a až do odlití se nemění. Pro potvrzení tohoto předpokladu byl navržen následující experiment.

### 6.1 Experiment pro zjištění rozměrů dutiny skořepiny

Aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění rozměrů dutiny keramické formy během experimentu, nebyl použit pro odlití kov, který se při tuhnutí deformuje, ale Dentacryl. Dentacryl je metylmetakrylátová pryskyřice, která při smíchání práškové a kapalné složky ve správném poměru tuhne samovolně na vzduchu. Výsledkem je tvrdá, křehká a průsvitná mírně nažloutlá hmota. Velikost smrštění Dentacrylu byla zjištěna odlitím pokusného vzorku ve tvaru válečku. Velikost smrštění byla 4 %.

Experiment pro zjištění rozměrů dutiny musel být proveden dvakrát, protože se první pokus nezdařil vlivem špatně navrženého postupu.

#### Postup 1. pokusu:

- **Smíchání Dentacrylu ve správném poměru** – při pokusu bylo použito větší množství kapalné složky než je doporučený poměr, protože hustota tekutého dentacrylu byla příliš vysoká. Vzhledem k tenkým stěnám odtokové hrany lopatky by mohlo dojít při použití běžného poměru k nezatečení.
- **Odlití** – tekutý Dentacryl se vлил do dutiny formy. Po odlití se forma položila na vibrační stůl, aby se odstranilo co největší množství zachyceného vzduchu.
- **Vytlučení** - po ztuhnutí se otloukla skořepina pomocí kladiva.
- **Loužení** - Odstranění zbytků skořepiny v louhovací lázni (roztok hydroxidu sodného).

První pokus se nezdařil, protože při umístění dentacrylové lopatky do louhovací lázně došlo k jejímu změknutí a deformaci. Rozměry lopatky nebyly měřeny na 3D skeneru, protože deformace listu lopatky byla zřejmá již při vizuální kontrole. Z těchto důvodů se pokus opakoval.

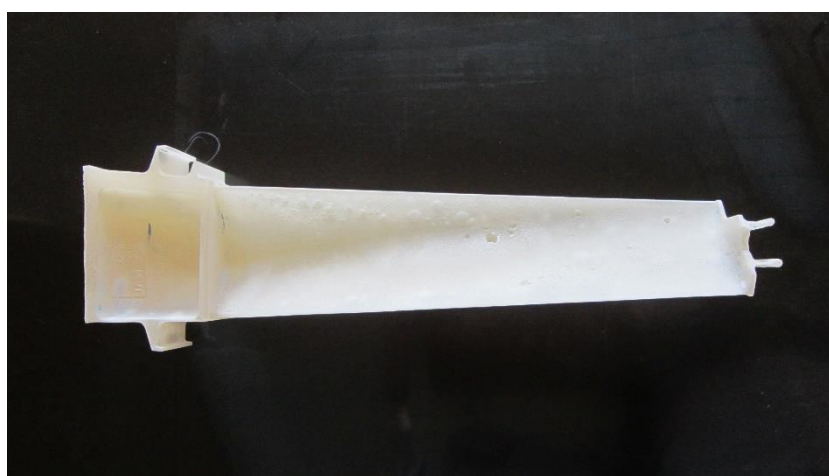


Obrázek 9 – Dentacrylová lopatka 1. pokus

Postup 2. pokus:

- **Smíchání Dentacrylu ve správném poměru**
- **Odlití**
- **Vytlučení**
- **Tryskání**

Dentacrylová lopatka vyrobená se změněným postupem byla po vizuální kontrole bez zjevných vad. Tím se potvrdilo, že postup pro odstranění zbytků keramiky byl zvolen správně. Místo předchozího louhování bylo použito tryskání. Při prvním pokusu nebylo tryskání zvoleno kvůli obavě z ovlivnění rozměrů vlivem abraze. Abrazivní účinnost tryskacího zařízení je dost vysoká, proto byla zvětšena vzdálenost trysky od dentacrylové lopatky a pracovníci byly informováni o nutnosti dbát zvýšené opatrnosti při tryskání.



Obrázek 10 – Dentacrylová lopatka 2. pokus

---

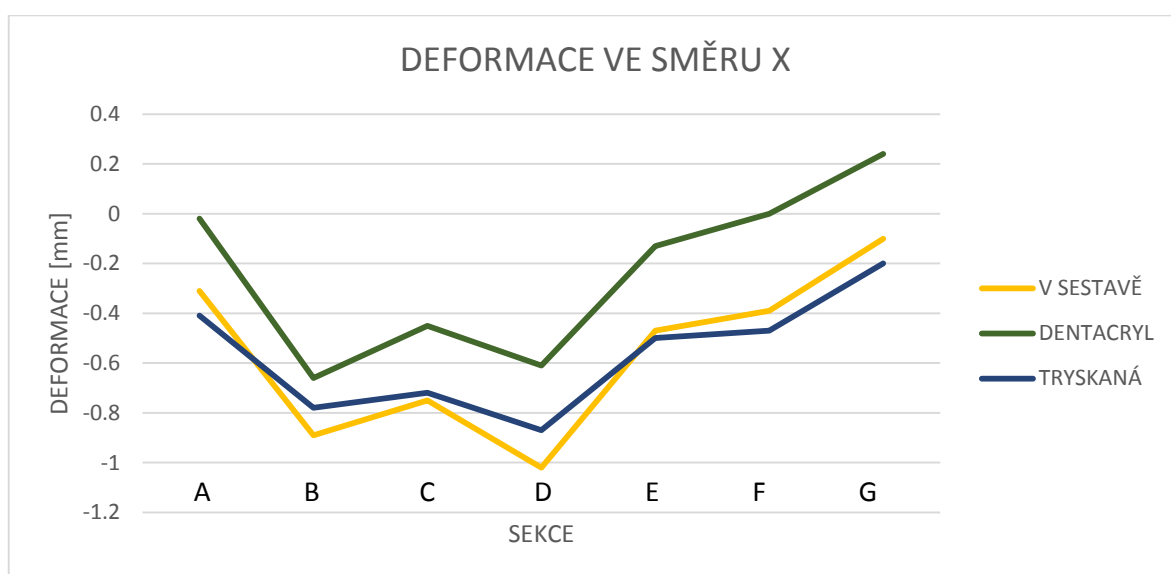
<sup>8</sup> Hodnoty pro tvorbu grafů 26, 27 a 28 viz Příloha 7



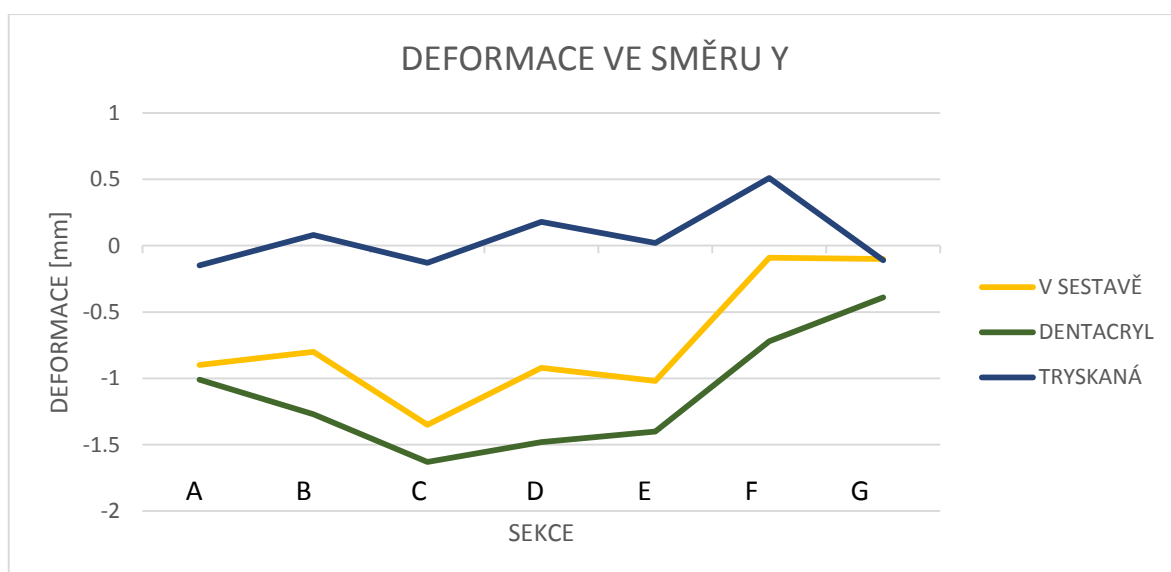
### 6.1.1 Výsledek experimentu

Dentacrylová lopatka z druhého pokusu byla měřena 3D skenerem. I přes použití vibračního stolu zůstaly v lopatce vzduchové bubliny, dobře viditelné na obrázku 9. Na měření rozměrů nemají díry na povrchu listu lopatky vliv, protože vyhodnocovací software ATOS dokáže dopočítat chybějící plochu, a tím díry zaplnit. Tato schopnost je omezena velikostí děr. Na náběžné a odtokové hraně se bubliny neobjevily, proto nehrozí riziko ovlivnění výsledků špatným naměřením rozměrů.

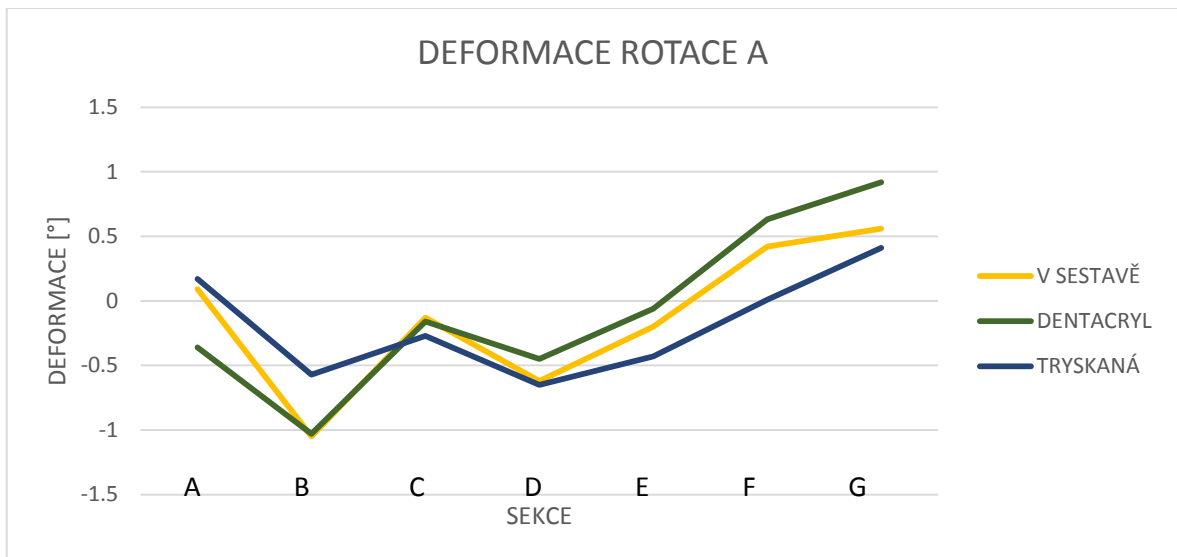
Pro určení správnosti měření byly naměřené deformace na dentacrylové lopatce porovnávány s deformacemi voskového modelu v sestavě a s deformacemi odlitku po tryskání. Rozptyl hodnot nelze porovnávat, protože byla z dentacrylu odlita pouze 1 lopatka.



Graf 26 – Porovnání deformací ve směru X pro vyhodnocení rozměrů dutiny formy<sup>8</sup>



Graf 27 - Porovnání deformací ve směru Y pro vyhodnocení rozměrů dutiny formy<sup>8</sup>



Graf 28 - Porovnání deformací rotace A pro vyhodnocení rozměrů dutiny formy<sup>8</sup>

Z výsledků měření zobrazených na grafech 26, 27 a 28 jsou patrné rozdíly mezi deformacemi voskového modelu v sestavě, tryskané lopatky a dentacrylové lopatky. Sestava lopatek je operace přímo předcházející operaci tvorba skořepiny a tryskání lopatky je první operace po odlití, ve které je možné správně měřit deformace odlitku. Porovnání výsledků naměřených na dentacrylové lopatce s výsledky po tryskání nemá dostatečnou vypovídací schopnost, protože při tuhnutí taveniny dochází k deformaci kovu. Porovnáme-li pouze deformace změřené na voskovém modelu v sestavě a deformace naměřené na dentacrylové lopatce, měly by být podle teorie zachování rozměrů stejné. Z grafů je však patrné, že stejné nejsou, ale jsou si velmi podobné. Ve směru osy X je průběh deformace lopatky v sestavě vůči lopatce v dentacrylu posunutý cca o 0,5 mm. To, že je průběh podobný, ale deformace dentacrylové lopatky ve směru osy X je menší, naznačuje, že lopatka má stejný tvar, akorát je oproti původnímu voskovému modelu menší. To je vzhledem k 4 % smrštění dentacrylu možné. Ve směru osy Y si průběhy deformace dentacrylové lopatky a lopatky v sestavě tolik podobné nejsou. Především v sekcích B, D a F jsou změny viditelné. Průběhy deformace rotace A jsou si velmi podobné, v sekcích B a C jsou dokonce úplně shodné. Z porovnání průběhu deformací po tryskání s průběhem deformací lopatky z dentacrylu je patrné, že ve směru X se deformace po tryskání zvětšila, ve směru Y zmenšila a deformace rotace A se v koncové části zvětšila a u zámkové části zmenšila.

Na základě výsledku měření 1 lopatky se nedá jednoznačně tvrdit, že deformace vznikají při tvorbě obalu. Je dost možné, že vznikly špatně zvolenou metodikou experimentu (velkým smrštěním dentacrylu a postupem odstranění zbytků skořepiny). Alternativním postupem, který by mohl podat vypovídající výsledky, by bylo změření dutiny skořepiny dotykovým 3D skenerem, popřípadě naskenování částí skořepiny 3D skenerem a jejich následné sestavení ve vyhodnocovacím softwaru.

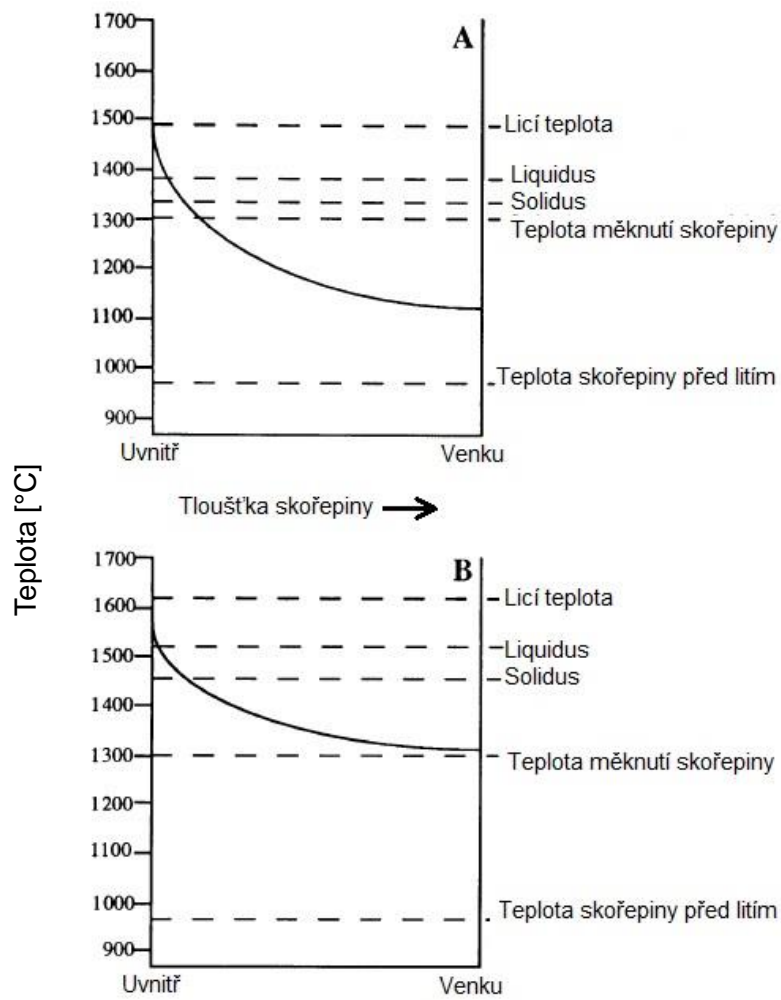
## 6.2 Chování keramické skořepiny při lití

Diskutovat se dá také o chování keramické skořepiny při lití. Oxidická keramika používaná při lití ve slévárně přesného lití Prague Casting Services a. s. je na bázi oxidu křemičitého, jehož teplota tání je 1550 °C. Licí teplota Inconelu 738 LC je 1440 °C, proto je na místě se ptát, jestli nemůže dojít ke snížení pevnosti skořepiny během lití.

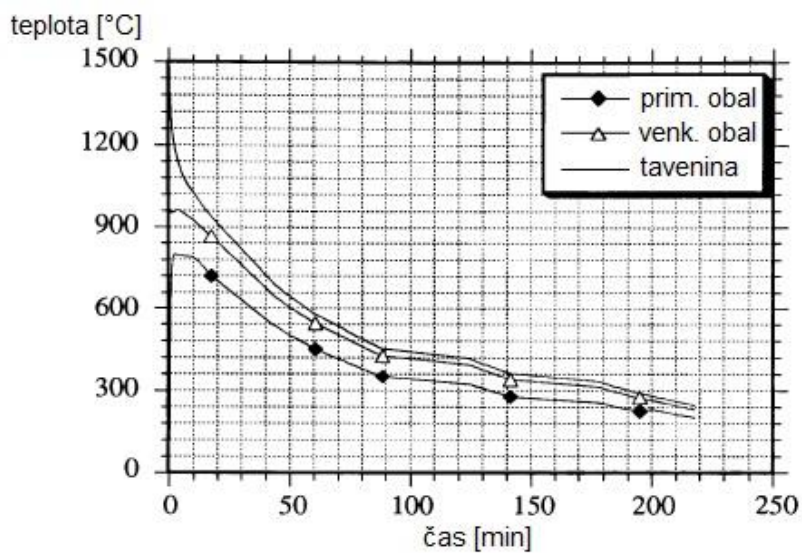
Podle výzkumů chování skořepiny při lití je nejdůležitější tloušťka skořepiny, její výpal a tloušťka stěny (objem) odlitku. Vzhledem k tomu, že je keramika žárupevný materiál, nedochází u ní k vysokému poklesu pevnosti vlivem licích teplot, ale i tak se pevnost skořepiny mění v tloušťce stěny a souvisí s prostupem tepla. Teplota, při které dochází za dlouhodobého působení k měknutí skořepiny, je cca 1200 - 1300 °C. Skořepina s větší tloušťkou stěny je pevnější, a proto lépe odolává působení zvýšených teplot. Bohužel nelze vyřešit měknutí skořepiny zvýšením počtu obalových vrstev, protože vlivem příliš pevné skořepiny dochází ke vzniku vad odlitku. Z těchto důvodů je třeba volit střední cestu mezi tloušťkou skořepiny a její pevností. Pro mírné snížení pevnosti skořepiny a zvýšení její prodyšnosti se používá BT tmel. [15] [1]

Na obrázku 11 je vidět předpokládaný průběh prostupu tepla skořepinou v závislosti na tloušťce stěny odlitku při licí teplotě kolem 1500 °C. Odléváme-li tenkostěnný odlitek, prohřeje se na nebezpečnou teplotu pouze vnitřní strana skořepiny. Je-li odlitek silnostěnný, dojde k prohřátí skořepiny na teplotu měknutí v celé její tloušťce. Změkne-li skořepina, může dojít k její deformaci vlivem vlastní váhy taveniny a tím ke vzniku deformací, které vedou k nestabilitě výrobního procesu. [15]

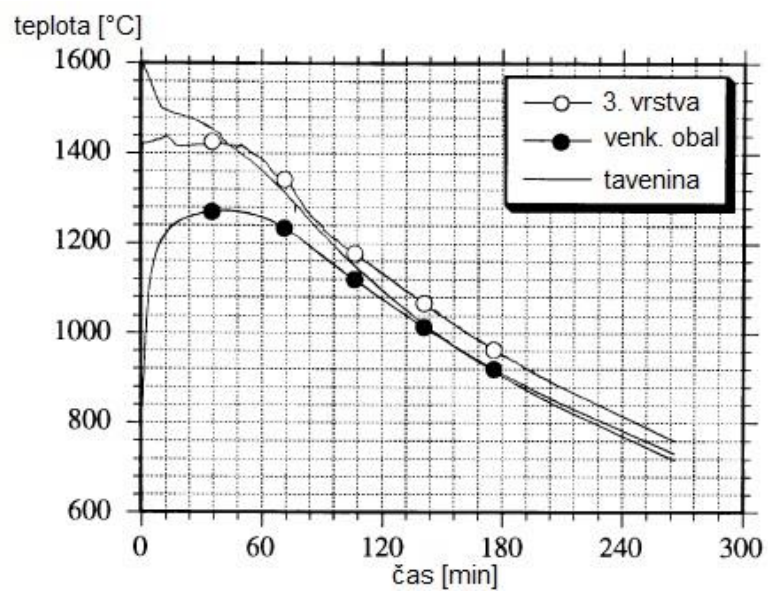
Skutečnou výši teplot skořepiny při lití v závislosti na čase, naměřenou pomocí termočlánků v primárním obalu a venkovní části obalu, můžete vidět na obrázcích 12 a 13. U 5 kg odlitku (obrázek 12) je teplota primárního obalu při licí teplotě 1580 °C cca 980 °C a tuto teplotu si udrží po dobu necelých 10 min, a poté začne výrazně klesat. Maximální teplota venkovní části obalu nepřesáhne 800 °C. Skořepina použitá pro 5 kg odlitek měla 7 vrstev. Teploty ve skořepině nepřekračují teplotu, kdy dochází k jejímu měknutí, a proto nemůže dojít k deformaci odlitku vlivem měknutí skořepiny při lití. U 60 kg odlitku (obrázek 13) je teplota vnitřní části obalu (ve 3. vrstvě) při licí teplotě 1580 °C cca 1420 °C. Tuto teplotu si vnitřní obal udrží po dobu přibližně 50 min. Venkovní část obalu dosáhne maximálně teploty 1273 °C, kterou si udrží po dobu cca 40 min. Tloušťka skořepiny použité u 60 kg odlitku je 16 vrstev. U křemičitých keramik dochází k tečení materiálu při teplotách nad 1200 °C. Vzhledem k tomu, že skořepina je nad touto teplotou po dobu 80 min, lze předpokládat, že zde dochází k pohybu stěny skořepiny. Náchylnost k tečení skořepiny při lití odlitků o vyšších hmotnostech je podpořena užitím tepelného zábalu skořepiny. [15]



Obrázek 11 – Předpokládaný prostup tepla skořepinou [15]



Obrázek 12 – Průběh teploty ve skořepině (7 vrstev) při lití 5 kg odlitku [15]



Obrázek 13 – Průběh teploty ve skořepině (16 vrstev) při lití 60 kg odlitku [15]

## 7 Definice rozptylu výroby

Pro každý výrobní podnik je důležitá stabilita výrobního procesu. V případě slévárny je třeba produkovat rozměrově stabilní odlitky, aby vznikaly co nejmenší náklady. Z těchto důvodů je třeba analyzovat výrobní proces z hlediska rozptylu rozměrů a definovat nejproblematictější operace. Známe-li operace s největším vlivem na stabilitu rozměrů, můžeme se zaměřit na zlepšování pracovního postupu v těchto operacích a jejich kontrolu. Aby byly výsledky o stabilitě jednotlivých operací vypovídající, bylo měření provedeno na stejných kusech po provedení zásadních výrobních operací.

Měření bylo provedeno po operacích:

- Lisování (1)
- Hrotování (2)
- Sestava (3)
- Tryskání (4)
- Cídění (5)

Kvůli správné definici rozměrové stability byl navrhnout postup měření tak, aby probíhal na známých kusech postupujících výrobním procesem. Pokud by se použily hodnoty již naměřené na výrobních kusech, bylo by problematické správně určit podíl na rozptylu u jednotlivých operací. Důvodem je, že se měření rozměrů ve výrobním provozu provádí pouze na 10 % odlisovaných voskových modelů a následně až na ocíděných odlitcích. Ocíděné odlitky se měří všechny.

Vzhledem ke kapacitním možnostem podniku a nákladnosti experimentu bylo toto měření provedeno pouze na 12 kusech modelů, tj. 3 „stromečcích“, z toho byly odlity pouze 4 lopatky. Pro názornost je toto množství dostačující. Při výrobě dalších kusů by bylo vhodné v měření aspoň na části produkce pokračovat, aby se získal větší statistický soubor, a tím se průběh zpřesnil.

Výrobní operace, po kterých bylo měření prováděno, byly vybrány na základě jejich potenciálního vlivu na stabilitu rozměrů, jejich zdůvodnění je uvedeno v kapitole 5. Zásadní pro průběh experimentu bylo, aby se s lopatkami zacházelo stejně jako v běžném výrobním procesu. V případě, že by se pracovníci snažili o pečlivější zpracování, mohlo by dojít ke zkreslení výsledků.

Při výrobě lopatek metodou lití na vytavitelný model se jedná o částečně ruční výrobu, proto se dá předpokládat, že se rozptyl rozměrů ke konci procesu výrazně zvětšuje. Výsledky měření tento předpoklad potvrdily. Rozptyl rozměrů se ve směru osy X a Y zvětšuje a rozptyl rotace A se naopak v průběhu celého výrobního procesu zmenšuje.

Průběh rozptylu je vidět na grafu 29, který byl sestaven zprůměrováním rozptylů všech sekcí pro každou operaci a směr deformace. Pro názornost byly hodnoty vystředěny.

Rozptyl rozměrů ve směru X a Y se v operacích pracujících s voskovými modely příliš nezvětšuje. U lisovaných lopatek dosahuje ve směru osy X hodnoty 0,2 mm. Hrotováním se rozptyl zvětšil o 0,04 mm na 0,24 mm a po sestavě byl naměřen rozptyl rozměrů voskových modelů 0,26 mm. Zvětšování rozptylu při práci s voskovými modely ve směru osy Y je také minimální. Po lisování je rozptyl rozměrů roven 0,44 mm hrotováním se zvětšil na 0,46 mm a po sestavě se nezvětšil. U rotace A byl rozptyl rozměrů po lisování a hrotování stejný,  $0,56^\circ$ , po sestavení se dokonce zúžil na  $0,48^\circ$ . Z výsledků by se výrobní proces ve fázi práce s voskovými modely dal označit za stabilní.

Výrazná změna se objevila u měření po tryskání odlitku. Zde se rozptyl rozměrů ve směru osy X rozšířil z původních 0,26 mm na 0,6 mm a ve směru osy Y z 0,46 mm na 1,1 mm a u rotace A opět došlo k zúžení, a to z  $0,48^\circ$  na  $0,36^\circ$ .

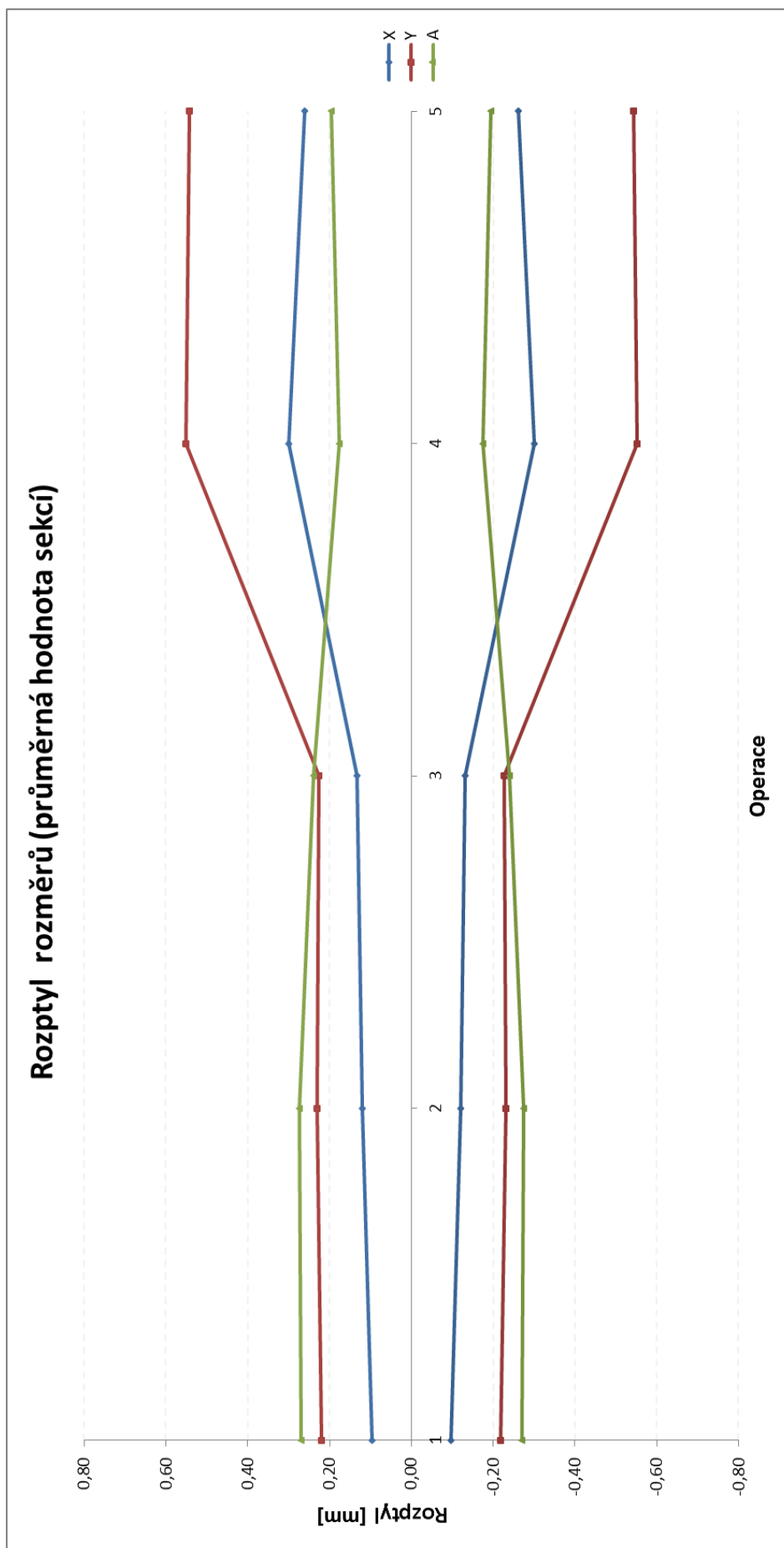
Po cídění došlo u rozptylu ve směru osy X a Y k mírnému zlepšení. Ve směru X se rozptyl zúžil z 0,6 mm na 0,52 mm a ve směru osy Y z 1,1 mm na 1,09 mm. Naopak u rotace A došlo ke zvětšení rozptylu z  $0,35^\circ$  na  $0,39^\circ$ .

Z výsledků je jasně patrné, že operace pracující s voskovými modely nezpůsobují rozměrovou nestabilitu. Stejně tak operace pracující s odlitky nemají na rozměrovou stabilitu zásadní vliv. Problematická je tedy fáze přeměny voskového modelu na odlitek. Proto by se měl další výzkum zaměřit právě na tuto oblast výroby. Nejpravděpodobnější je vznik skokové změny v rozptylu rozměrů při lití, kdy dochází při tuhnutí kovu k rozměrovým změnám. Možností je i nevhodné zacházení se skořepinou při lití nebo těsně po něm. Vzhledem k tomu, že keramické skořepiny užívané pro lití tohoto typu lopatky se balí do zábalu ze skelné vaty, může u nich dojít vlivem dlouhodobého působení teploty nad  $1200^\circ\text{C}$  a vlastní váhy taveniny ke snížení pevnosti skořepiny. Jedním z opatření, které firma Prague Casting Services a.s. použila, aby předešla rozměrové nestabilitě v této fázi výroby, bylo zavěšování skořepiny těsně před litím do zavěšovacího přípravku. U lopatek odlévaných pro tento experiment bylo zavěšení jen částečné, protože zavěšovací přípravek nebyl dostatečně vysoký, aby skořepina zůstala při lití zavěšena ve vzduchu. Přestože byla skořepina přidržována, mohlo dojít při experimentu k ovlivnění rozměrů tímto způsobem.

Stabilizovat operaci lití je velmi obtížné a vyžaduje důsledné dodržování navrženého postupu lití.

---

<sup>9</sup> Hodnoty použité do grafu 29 viz Příloha 8



Graf 29 – Rozptyl rozměrů v průběhu výrobního procesu<sup>9</sup>



## 8 Závěr

Cílem této práce bylo zanalyzovat výrobní proces lopatky 3. stupně s ohledem na rozměrovou stabilitu. Jako operace s možným vlivem na rozměrovou stabilitu byly určeny lisování, hrotování, sestava „stromečku“, výroba keramické skořepiny, tryskání a cídění. Operace výroba keramické skořepiny nebyla zahrnuta do průběhu rozptylu ve výrobním procesu, ale byla hodnocena samostatně. Průběh deformace ve směru X a průběh rotace A byly, u dentacrylové lopatky zhotovené pro zjištění rozměrů dutiny skořepiny, podobné deformaci voskového modelu v sestavě. Ve směru osy Y byla deformace větší a průběhu deformace voskového modelu v sestavě se příliš nepodobala. Vzhledem k tomu, že toto měření proběhlo pouze na 1 kusu, nelze s jistotou tvrdit, že jsou rozdíly v průběhu deformace způsobeny tvorbou skořepiny. Je možné, že byl tento rozdíl způsoben nevhodným postupem experimentu, zvoleným pro změření rozměrů dutiny skořepiny.

Po zhodnocení rozměrové stability tří setů na základě hodnot naměřených v produkci bylo patrné, že zásadní vliv na rozměrovou stabilitu mají operace následující po lisování, především cídění. Přestože u každého setu byly použity jiné lisovací parametry a některé z nich vedly k vysoké rozměrové stabilitě voskových modelů, na výsledcích z měření po ocídění odlitku se toto zlepšení rozměrové stability neprojevovalo. Protože se měření v produkci provádí na 10 % odlisovaných voskových modelů a následně až na 100 % ocíděných odlitků, nebylo jasné, která z výrobních operací má zásadní vliv na zvýšení konečného rozptylu rozměrů. Aby se operace s nejvyšším vlivem našla, bylo na 12 kusech modelů provedeno měření po lisování, hrotování a sestavě „stromečku“. Z nich byly odlity 4 lopatky změřené po tryskání a cídění. Z měření byl pro názornost vytvořen graf 29, ze kterého je jasně patrné, že k největšímu nárůstu rozptylu rozměrů dochází mezi operacemi sestava „stromečku“ a tryskání. Příčina této skokové změny v rozptylu rozměrů se nedá bez dalšího zkoumání určit s jistotou, ale dá se předpokládat, že je to důsledek lití. Při tuhnutí taveniny dochází k objemovým změnám, mohou se tvořit pnutí v odlitku a také může dojít vlivem dlouhodobého působení vysoké teploty taveniny (cca 1200°C/60 min) ke snížení pevnosti skořepiny. Zkoumání vlivu lití a okolností s ním souvisejících nebylo zahrnuto v návrhu měření, a proto není zkoumáno v této diplomové práci.

Zásada pro zvýšení rozměrové stability voskových modelů je co nejvíc ztuhnit model při lisování, aby došlo k co nejmenším objemovým změnám při tuhnutí a chladnutí a zabránilo se vzniku propadlin. K tomu je třeba používat nižší teploty vosku při vstřikovávání a nastavit delší čas dotlaku. Dalším důležitým prvkem s vlivem na rozměrovou stabilitu modelů je způsob jejich ukládání po odlisování. Ve firmě Prague Casting Services a. s. modely zavěšují do zavěšovacího přípravku místo ukládání na plato, což se podle výsledků rozptylu rozměrů 2. setu projevilo jako velmi přínosné. Dále je třeba zmínit manipulaci s voskovými

modely, kdy je potřeba, aby s nimi pracovníci zacházeli nanejvýš opatrně (nebraly je hrubě a neuchopovali je v listové části) nejen při vyjímání z formy, ale i při jejich zakládání a vyjímání z chladicího přípravku. Manipulace v dalších operacích, jako je hrotování a sestava „stromečku“, se v měření neprojevila jako zásadní. Rozptyl rozměrů se při nich zvětšil v řádech setin milimetru. Stejně tak při manipulaci s odlitky při cídění, kde došlo dokonce ke zmenšení rozptylu rozměrů oproti předchozí operaci, ale opět jen v řádech setin milimetru.

U odlitků je z hlediska rozměrové stability důležitá až operace cídění, která může rozměrovou stabilitu zvýšit i snížit. Nejzásadnější je cídění na RPS bodech, které výrazně ovlivní měřené rozměry.

Závěrem bych ráda dodala, že rozměrová stabilita není výsledkem pouze navržení správného výrobního postupu, ale také jeho dodržování. Proto je nesmírně důležité, aby pracovníci výrobní postupy při výrobě odlitků dodržovali a zároveň dbali na co nejmenší ovlivnění rozměrů vlivem manipulace nebo nepozornosti.

## 9 Použitá literatura

- [1] BEELEY, Peter R a R. F. SMART. *Investment Casting*. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.
- [2] DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., HOUŠŤ, M., PAVELKA, M.. *Výroba přesných odlitků*. SNTL Praha, 1976
- [3] HAVEL M., *Problematika výroby voskových modelů s ohledem na deformace*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Aleš HERMAN.
- [4] BRATHOVÁ, M., *Analýza chladnutí voskového modelu* Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Petr ZIKMUND.
- [5] BUREŠ, Jiří. Hustota pevných látek. , Jiří Bureš. *ConVERTER* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>
- [6] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model*. In: [online]. [cit. 2015-02-25]. Praha, ČVUT v Praze. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>
- [7] HERMAN, Aleš, ČESAL, Marek. *Temperature stability of the process of production of wax patterns for investment casting technology model*.
- [8] Aluminum Oxide, *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Properties*. *Accuratus* [online]. [cit. 2015-06-12]. Dostupné z: <http://accuratus.com/alumox.html><http://accuratus.com/alumox.html>
- [9] CRAIG, R.G., J.D. EICK a F.A. PEYTON. *Properties of Natural Waxes Used in Dentistry*. Michigan University of Michigan, 1965, s. 9. Dostupné z: [http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/67894/10.1177\\_00220345650440063301.pdf?sequence=2](http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/67894/10.1177_00220345650440063301.pdf?sequence=2)
- [10] WARSON, Henry a C FINCH. *Applications of synthetic resin latices*. New York: Wiley, 2001, 3 v. (xxix, 1667 p.). ISBN 04719546243-. [2015-03-22] Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=lbaRRUs3fo4C&pg=PA1580&lpg=PA1580&dq=Synthetic+waxes+are+long-chain&source=bl&ots=OYS6oqNLxx&sig=Vwgcir4242Ro7Hc6YXwh0OvJOGI&hl=cs&sa=X&ei=oiYPVZa9GI7qaNC6gMAF&ved=0CCsQ6AEwBA#v=onepage&q=Synthetic%20waxes%20are%20long-chain&f=false>

- [11] KOBĚRSKÝ F., *Optimalizace výroby voskových modelů- voskové směsi a jejich zkoušení*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Milan HORÁČEK. [2015-03-23] Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29871](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29871)
- [12] HORÁČEK, M., HANCOCK, P., BOND, D., MORSON, D., TALANDA, I., JEDOVNICKÝ, J.. *Testování voskových směsí ovlivňující jejich další rozvoj-výběr nejvhodnějších kombinací vosků pro slévárnu*. Brno 2012. Sborník přednášek.
- [13] Technical papers. REMET. *REMET* [online]. 1998 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:  
<http://www.remet.com/uk/technicalpaper/technical-paper-45-the-effect-of-fillers-on-the-physical-properties-of-investment-casting-waxes/>
- [14] Casting Wax: Pattern, Runner and System Wax. *REMET* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.remet.com/range/pattern-runner-wax/>
- [15] JONES, Samantha. *Improved Sol Based Ceramic Moulds for Use in Investment Casting*. Birmingham, 1993. Dostupné z: <http://etheses.bham.ac.uk/788/>. Dizertační práce. University of Birmingham.
- [16] MILKA, J., Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ilona LÁZNIČKOVÁ. [2015-04-11] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39703](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39703)
- [17] REED, Roger C. *The superalloys: fundamentals and applications*. New York: Cambridge University Press, 2006, xiv, 372 p. ISBN 05-218-5904-2
- [18] *Vysokopevné a vysokolegované oceli, superslitiny*. Praha, 10 s. [2015-04-12] Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01\\_pm\\_vyskopevne\\_a\\_vysokolegovane\\_oceli\\_a\\_slitiny\\_ni\\_a\\_co.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf)
- [19] DONACHIE, Matthew J a Stephen James DONACHIE. *Superalloys: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2002, x, 439 s. ISBN 08-717-0749-7.
- [20] FARAG, Mahmoud M. *Materials and process selection for engineering design*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008, xix, 432 p. ISBN 14-200-6308-1 [2015-04-27] Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=EorLBQAAQBAJ&pg=PA381&lpg=PA381&dq=mar+m302+chemical+composition&source=bl&ots=5j5lf-2k8d&sig=2uPtovNfhCzUVOPVQuMxk4WhsM&hl=cs&sa=X&ei=PsMqVaPoGs\\_cau6mgcgD&ved=0CDUQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=EorLBQAAQBAJ&pg=PA381&lpg=PA381&dq=mar+m302+chemical+composition&source=bl&ots=5j5lf-2k8d&sig=2uPtovNfhCzUVOPVQuMxk4WhsM&hl=cs&sa=X&ei=PsMqVaPoGs_cau6mgcgD&ved=0CDUQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false)
- [21] Základní dělení metod kapilární zkoušky. *Ndt* [online]. 2009 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz/?mnu=13,0>

- [22] ŠNAJDÁREK L., *Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT brno. [2015-04-28] Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6001](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6001)
- [23] ROZSÍVAL, J., *Využití reverzního inženýrství pro výpočty aerodynamiky automobile*. Brno, 2008. Diplomová práce, VUT Brno. Vedoucí práce Petr PORTEŠ. [2015-04-28] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5601](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5601)
- [24] *Metals handbook*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989, 17 v. ISBN 08717000771.



Příloha 2 – Předem definovaný rozptyl lisování všech setů

SEKCE A										SEKCE B									
	X			Y			A				X			Y			A		
	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3		lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3
<b>Rozp</b>	0,30	0,38	0,40	0,31	0,32	0,26	0,71	0,23	0,08	<b>Rozp</b>	0,23	0,49	0,59	0,38	0,50	0,39	0,45	0,45	0,30
SEKCE C										SEKCE D									
	X			Y			A				X			Y			A		
	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3		lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3
<b>Rozp</b>	0,11	0,69	0,78	0,23	0,80	0,66	0,45	0,29	0,06	<b>Rozp</b>	0,33	0,73	1,01	0,53	0,96	0,92	0,60	0,51	0,28
SEKCE E										SEKCE F									
	X			Y			A				X			Y			A		
	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3		lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3
<b>Rozp</b>	0,35	0,26	0,66	0,59	0,44	0,60	0,45	0,59	0,16	<b>Rozp</b>	0,38	0,09	0,34	0,71	0,24	0,35	0,29	0,65	0,38
SEKCE G										KR A HR									
	X			Y			A				KR			HR					
	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3		lisování 1	lisování 2	lisování 3	lisování 1	lisování 2	lisování 3			
<b>Rozp</b>	0,71	0,24	0,30	0,47	0,69	0,15	0,14	0,67	0,58	<b>Rozp</b>	0,52	0,28	0,38	0,52	0,25	0,29			

Příloha 3 – Předem definovaný rozptyl cídění všech setů

SEKCE A				SEKCE B			
	X	Y	Z		X	Y	Z
	cídění				cídění		
<b>Rozptyl</b>	0,76	0,76	0,50	<b>Rozptyl</b>	1,06	1,06	0,67
SEKCE C				SEKCE D			
	X	Y	Z		X	Y	Z
	cídění				cídění		
<b>Rozptyl</b>	1,42	1,42	0,84	<b>Rozptyl</b>	1,76	1,76	1,00
SEKCE E				SEKCE F			
	X	Y	Z		X	Y	Z
	cídění				cídění		
<b>Rozptyl</b>	1,26	1,26	1,17	<b>Rozptyl</b>	0,80	0,80	1,34
SEKCE G				KR A HR			
	X	Y	Z		KR	HR	
	cídění				cídění		
<b>Rozptyl</b>	0,40	0,40	1,51	<b>Rozptyl</b>	0,76	0,76	



Příloha 4 – Rozptyl rozměrů 1. set

SEKCE A							SEKCE E						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
<b>Rozptyl</b>	1,04	0,76	0,94	0,56	1,51	0,50	<b>Rozptyl</b>	0,86	0,69	1,53	0,99	1,09	1,09
SEKCE B							SEKCE F						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
<b>Rozptyl</b>	1,06	0,97	1,41	1,04	1,91	0,59	<b>Rozptyl</b>	0,92	0,46	1,28	0,48	1,73	1,11
SEKCE C							SEKCE G						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
<b>Rozptyl</b>	1,33	1,09	1,69	1,42	1,69	0,83	<b>Rozptyl</b>	0,69	0,41	2,06	0,41	2,26	1,50
SEKCE D							KR a HR						
	X		Y		A			KR		HR			
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění		
<b>Rozptyl</b>	1,18	0,91	1,84	1,60	1,35	0,64	<b>Rozptyl</b>	1,89	0,99	1,56	0,18		

Příloha 5 - Rozptyl rozměrů 2. set

SEKCE A							SEKCE E						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
Rozptyl	0,16	0,76	0,39	0,76	0,28	0,50	Rozptyl	0,31	1,14	0,41	1,24	0,67	0,92
SEKCE B							SEKCE F						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
Rozptyl	0,40	1,07	0,23	1,07	0,73	0,66	Rozptyl	0,22	0,41	0,33	0,64	0,92	1,34
SEKCE C							SEKCE G						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
Rozptyl	0,19	1,42	0,25	1,42	0,50	0,84	Rozptyl	0,18	0,23	0,51	0,41	1,06	1,50
SEKCE D							KR a HR						
	X		Y		A			KR		HR			
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění		
Rozptyl	0,30	1,75	0,31	1,78	0,33	0,62	Rozptyl	0,33	0,18	0,77	1,32		

Příloha 6 - Rozptyl rozměrů 3. set

SEKCE A							SEKCE E						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
<b>Rozptyl</b>	0,28	0,76	0,78	0,76	0,60	0,50	<b>Rozptyl</b>	0,56	1,14	0,91	1,14	0,83	0,71
SEKCE B							SEKCE F						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
<b>Rozptyl</b>	0,32	1,07	0,75	0,84	0,98	0,47	<b>Rozptyl</b>	0,48	0,81	0,51	0,28	1,21	1,28
SEKCE C							SEKCE G						
	X		Y		A			X		Y		A	
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění
<b>Rozptyl</b>	0,39	1,24	1,04	1,35	0,74	0,84	<b>Rozptyl</b>	0,63	0,38	0,33	0,38	1,02	1,25
SEKCE D							KR a HR						
	X		Y		A			KR		HR			
	lisování	cídění	lisování	cídění	lisování	cídění		lisování	cídění	lisování	cídění		
<b>Rozptyl</b>	0,40	1,47	0,88	1,22	0,76	0,77	<b>Rozptyl</b>	1,01	0,15	1,62	1,40		

Příloha 7 – Deformace ve skořepině

	Sekce A			Sekce B			Sekce C			Sekce D			Sekce E			Sekce F			Sekce G			HR	KR
	X	Y	A	X	Y	A	X	Y	A	X	Y	A	X	Y	A	X	Y	A	X	Y	A	Lz	Lz
VOSK_320_S	-0,31	-0,9	0,09	-0,89	-0,8	-1,05	-0,75	-1,35	-0,13	-1,02	-0,92	-0,62	-0,47	-1,02	-0,2	-0,39	-0,09	0,42	-0,1	-0,1	0,56	-0,3	-1,33
DENT	-0,02	-1,01	-0,36	-0,66	-1,27	-1,03	-0,45	-1,63	-0,16	-0,61	-1,48	-0,45	-0,13	-1,4	-0,06	0	-0,72	0,63	0,24	-0,39	0,92	1,76	-1,37
KOV	-0,41	-0,15	0,17	-0,78	0,08	-0,57	-0,72	-0,13	-0,27	-0,87	0,18	-0,65	-0,5	0,02	-0,43	-0,47	0,51	0,01	-0,2	-0,11	0,41	-0,23	-0,4

Příloha 8 – Rozptyl rozměrů v průběhu výroby

SEKCE A															
	X					Y					A				
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění
Rozptyl	0,055	0,07	0,055	0,27	0,19	0,65	0,66	0,7	1,06	1,05	0,19	0,26	0,13	0,24	0,08
SEKCE B															
	X					Y					A				
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění
Rozptyl	0,19	0,21	0,26	0,61	0,56	0,52	0,56	0,55	1,34	1,33	0,52	0,5	0,65	0,27	0,33
SEKCE C															
	X					Y					A				
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění
Rozptyl	0,25	0,31	0,31	0,8	0,72	0,64	0,65	0,66	1,5	1,48	0,57	0,49	0,6	0,33	0,37
SEKCE D															
	X					Y					A				
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění
Rozptyl	0,22	0,26	0,22	0,81	0,75	0,5	0,47	0,45	1,47	1,45	0,62	0,48	0,31	0,1	0,19
SEKCE E															
	X					Y					A				
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění
Rozptyl	0,18	0,27	0,37	0,77	0,64	0,4	0,46	0,44	1,29	1,28	0,54	0,61	0,46	0,32	0,48
SEKCE F															
	X					Y					A				
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění
Rozptyl	0,22	0,27	0,32	0,64	0,58	0,16	0,19	0,19	0,82	0,8	0,67	0,8	0,69	0,65	0,72

SEKCE G															
	X					Y					A				
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění
Rozptyl	0,24	0,25	0,31	0,3	0,21	0,19	0,24	0,19	0,24	0,22	0,67	0,7	0,52	0,55	0,56
HR a KR															
	HR					KR									
	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění	lisování	hrotování	sestava	tryskání	cídění					
Rozptyl	0,29	0,29	0,4	0,28	0,28	0,54	0,53	0,77	0,88	0,91					