

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh optimálního tvaru žebra zápusťkového výkovku pomocí
numerické simulace

Autor:

Bc. Ondřej ZAJÍČEK

Vedoucí práce:

Ing. František TATÍČEK, Ph.D.

Zadání DP

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá základní metodikou tváření, se zaměřením na zápusťkové kování. V úvodní části práce je popsáno rozdělení tváření, základní charakteristika, kování v zápusťkách, návrh a vyhodnocení experimentu.

Praktická část práce se zabývá chováním materiálu v operacích zápusťkového kování při vyplňování části dutin v oblasti žeber. Byly navrženy tvary žeber, které jsou rozděleny dle geometrie do variant A až P.

Pro vlastní řešení byly vytvořeny jednotlivé varianty v simulačním SW FormFem. Práci s tímto SW popisuje kapitola 7.3. a Dále je řešen problém zaplnění zápusťky pro vybrané teploty a tvary polotovaru na měnících se okrajových podmínkách, získané výsledky byly následně vyhodnoceny v programu pracujícím s numerickými simulacemi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tváření, lisování, zápusťkové kování, numerická simulace

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the basic methodology of forming, focusing to die forging. In the first part describes the distribution of forming basic characteristics, forging dies, design and evaluation of experiments.

The practical part deals with the behavior of the material in a closed die forging operations during filling of cavities in the ribs. Were designed shapes of the ribs, which are divided according to the geometry of variants A to P.

For custom solutions were created different variants of simulation software FormFEM. Working with this software, see chapter 7.3 Furthermore, and solves the problem of filling the die for the selected temperature and shape of the billet to changing boundary conditions, the results obtained were evaluated in the program working with numerical simulations.

KEYWORDS

Forming, stamping, die forging, numerical simulation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze

Dne.....

Podpis

*Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování Ing. Františku tatičkovi Ph.D.
za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce.*

.....

podpis

1. Obsah

2.	Úvod.....	8
3.	Rozdělení technologie tváření	9
3.1.	Tváření objemové.....	10
3.2.	Tváření plošné.....	10
3.3.	Tváření za studena.....	11
3.4.	Tváření za tepla	11
3.4.1.	Rekrystalizace	11
3.5.	Srovnání	12
4.	Kování.....	13
4.1.	Kování volné	13
4.2.	Kování v zápustce	15
4.3.	Zápustky.....	16
5.	Návrh technologického postupu zápustkového kování	17
5.1.	Výkres výkovku	17
5.2.	Tvar polotovaru.....	18
5.3.	Návrh zápustky - výronková drážka	19
5.4.	Vady výkovků	20
5.5.	Zjišťování vad výkovků	22
6.	Tvářecí stroje	24
6.1.	Tvářecí stroje energetické	25
6.2.	Tvářecí stroje zdvihové	25
7.	Návrh experimentu	27
7.1.	Popis materiálu použitého v analýze (Al - jejich slitiny).....	27
7.1.1.	Využití hliníku	27
7.2.	Návrh žebra	30
7.3.	Popis simulačního softwaru	31

7.4.	Volba okrajových podmínek	31
7.4.1.	Konstantní podmínky.....	32
7.4.2.	Variabilní podmínky	32
7.4.3.	Výrobní zařízení volené pro výpočet experimentu.....	33
8.	Simulace procesu v SW FormFem	34
8.1.	Simulace výchozích podmínek SW	34
8.2.	Vyhodnocení experimentu	36
8.2.1.	Působení teploty na tvářený polotovar.....	37
8.2.2.	Působení sil na nástroje.....	39
8.2.3.	Zaplnění dutiny zápusky pro jednotlivé varianty	42
9.	Závěr	54
10.	Literatura.....	56
11.	Seznam obrázků	59
12.	Seznam tabulek	61
13.	Seznam grafů	61
14.	Příloha.....	61

2. Úvod

Tváření kovů je ve strojírenském průmyslu jednou z nejvíce požadovaných technologií, spočívající v uvedení tvářeného polotovaru do plastického stavu, ve kterém polotovar mění svůj stávající tvar, aniž by došlo k porušení jeho soudržnosti a změně objemu. Tato technologie je ve značné míře využívána využívána v automobilovém a leteckém průmyslu. V dnešní době je běžné simulovat tvářecí procesy pomocí softwaru, a to za podmínek, které vycházejí z potřeb zákazníka a možností strojního vybavení dané firmy. Simulace usnadňují přípravu celého procesu z hlediska časové náročnosti jednotlivých projektů, zrychlení návrhů při výrobě, ale zejména eliminují vady vzniklé během samotného tváření.

Tato diplomová práce se zabývá zápusťkovým kovááním hliníkových slitin na klikovém lisu. Je rozčleněna na část teoretickou a praktickou. Teoretická část se zabývá technologií tvářecích procesů, kovááním v zápusťkách, tvářecími stroji a návrhem experimentální části práce. Praktická část se věnuje chování materiálu v operacích zápusťkového kováání při vyplňování části dutin v oblasti žeber.

Cílem této diplomové práce je stanovení optimálního tvaru žebra pro zápusťkové kováání pomocí numerických simulací.

3. Rozdělení technologie tváření

Tvářením se rozumí taková technologie, která umožňuje zpracovávat čisté kovy, a nebo slitiny těchto kovů k dosažení požadovaného tvaru. Podstatou tvářecího procesu je využití vnější deformační práce a nástrojů k dosažení požadovaného tvaru, avšak jen za předpokladu, že daný materiál splňuje podmínku tvařitelnosti. Ta se řadí mezi technologické vlastnosti, které charakterizují vhodnost zpracovávaného materiálu k určitému druhu tváření. Tvařitelnost je tedy schopnost materiálu vytvořit požadovaný výrobek (polotovár) plastickou deformací za pomoci vloženého tepla, či za studena.

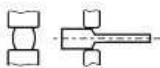


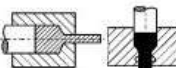



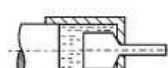
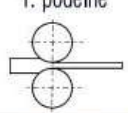
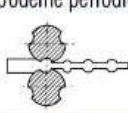
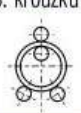
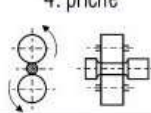
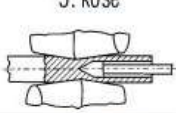

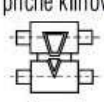
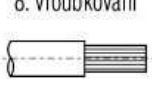
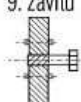





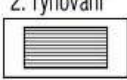

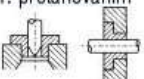
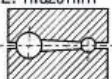

Technologie tváření je velice produktivní a perspektivní technologie zpracování kovů, díky které lze vyrábět součásti pro hromadnou výrobu. Jedná se o výrobu především složitých strojních součástí které by jinou technologií nešly vyrobit, nebo by byla výroba příliš nákladná. Dále to mohou být velké součásti, kde jiná technologie není možná. [01]

Rozdělení tváření

- Objemové tváření
- Plošné tváření
- Tváření za tepla
- Tváření za studena

Rozdělení tváření z hlediska jednotlivých technologií

- Kování
- Protlačování
- Válcování
- Těžení
- Kalibrování

kování	1. volné 	2. zápusťkové 	3. radiální 		
protlačování	1. dopředné 	2. zpětné 	3. sdužené 	4. stranové 	5. hydraulické 
válcování	1. podélné 	2. podélné periodické 	3. kroužků 	4. příčné 	5. kosé 
	6. příčné periodické 	7. příčné klínové 	8. vroubkování 	9. závitů 	10. zpevňovací 
	11. kovací 				
tažení	1. plných průřezů 	2. dutých průřezů 			
ražení	1. reliéfní 	2. rýhování 	3. značkování 		
kalibrování	1. protahováním 	2. hlazením 	3. rovinné 		

Obr. 1 Rozdělení způsobů tváření [01]

3.1. Tváření objemové

Tváření objemové využívá především polotovary válcových rozměrů. Požadovaného výrobku lze dosáhnout tváření výchozího polotovaru, přičemž během tváření se mění tvar v celém objemu, tedy všechny tři rozměry (výška, šířka, tloušťka). Částice materiálu se přemísťují v celém objemu, ale jeho velikost se nemění. [02]

3.2. Tváření plošné

Tváření plošné vychází zejména z polotovarů jako jsou plechy a pásy. Zde se požadovaného tvaru součásti dosáhne bez podstatné změny průřezu nebo tloušťky výchozího polotovaru. Tváření tedy probíhá pouze ve dvou směrech (výška, šířka) a třetí rozměr (tloušťka) zůstává takřka totožný s polotovarem před tváření. [02]

3.3. Tváření za studena

U tváření za studena ($T \leq 0,3 T_T$, kde T_T je teplota tání) dochází vlivem deformací, způsobených vnějšími silami ke zpevnění materiálu. Zrna materiálu se prodlužují ve směru hlavní deformace a vytváří tak, strukturu materiálu. Objem zrna se ale nijak nemění. Protože jsou potlačeny uzdravovací procesy (rekrytalizace a zotavení) dochází vlivem vyčerpávání příznivě orientovaných skluzových systémů a protínání dislokací, kvůli jejich zvýšenému počtu ke zpevnování kovu. Aby silně zpevněný materiál při dalším tváření nepraskal, je nutné ho žíhat. [03],[04],[05]

3.4. Tváření za tepla

Jestliže u tváření za studena nedošlo k překročení teplot zotavení a rekrytalizace, u tváření za tepla (cca nad $0,7 T_T$) je překročení těchto teplot nutností. Procesy tváření za tepla je výhodné automatizovat z důvodu, že tato metoda se používá převážně ve velkosériové a hromadné výrobě. Velikou výhodou těchto procesů bývá vysoká až velmi vysoká přesnost s malým množstvím odpadu cca 5-10%. Avšak nevýhodou jsou vysoké náklady na realizaci této technologie. [03], [04], [06], [07], [08]

3.4.1. Rekrytalizace

Rekrytalizace je proces způsobený ohřevem, během kterého jsou deformovaná zrna nahrazena nově vzniklými shluky, které tvoří jádro a rostou, dokud nedojde k úplnému odstranění původních zrn. Děj probíhá po ohřátí materiálu na rekrytalizační teplotu ($0,35$ až $0,4 T_T$). V materiálu dojde ke snížení pevnosti, ale ke zvýšení tažnosti. [03], [04], [05]

Stádium zotavení

Studium materiálů nám říká, že ohřevem polotovaru na určitou teplotu ($0,3 T_T$), se sníží vnitřní pnutí a vyrovnají se deformace krystalové mřížky. Atomy se snaží přejít do rovnovážného stavu, přičemž rozměry a tvar deformovaných zrn se nemění. Nastává tzv. zotavení. U zotavení dochází ke snížení deformační energie, což je zapříčiněno uvolněním dislokací a jejich vhodnějším uspořádáním. Mění se některé fyzikálně-

mechanické vlastnosti. V tomto zotaveném stavu se materiál blíží vlastnostem základního materiálu, nebo polotovaru před deformací. [03], [04], [05]

3.5. Srovnání

Tváření za studena

- Nepochází teplotní úprava
- Napětí v kluzných rovinách zůstává
- Materiál se zpevňuje
- Snižuje se tažnost a vrubová houževnatost a odolnost proti korozi

Tváření za tepla

- Nastává úplná rekrytalizace
- Tvářený kov nevykazuje žádné zpevnění
- Musí dojít k rekrytalizaci celého materiálu, aby nevznikly dvě různé struktury s deformovanými a rekrytalizovanými zrnky

4. Kování

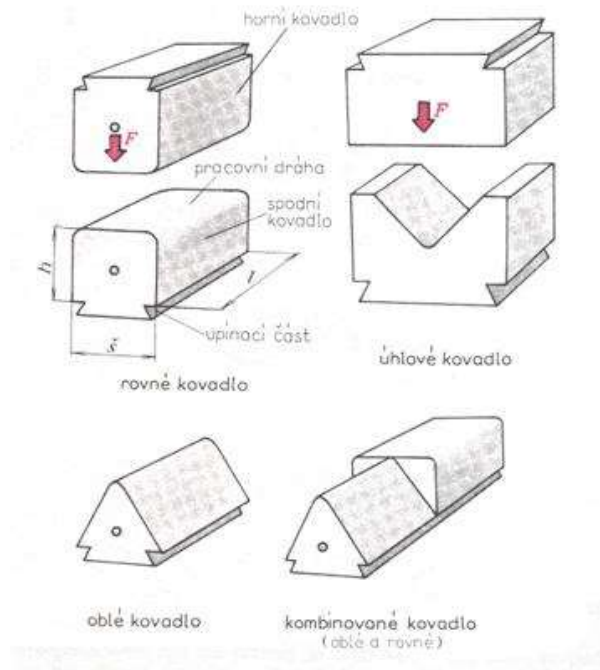
Kování se řadí mezi technologie beztržiskového zpracování materiálu, a dále především do objemového tváření zatepla, které se realizují buď rázem (buchar) nebo působící silou (lis). Kováním se dosahuje jak požadovaného tvaru a rozměru výkovku, tak i zlepšení jeho mechanických vlastností.

Kování se rozděluje podle použitých tvářecích strojů a nástrojů na kování volné a zápustkové. Volné kování můžeme dále rozdělit na ruční a strojní. Zápustkové kování dělíme na kování na kovací lisech a kování na bucharech. [07], [09], [10]

4.1. Kování volné

Volným kováním se dosahuje kombinací základních kovářských operací přibližného tvaru hotové součásti. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, volné kování lze rozdělit na ruční a strojní. Ruční kování se využívá především v kusové výrobě malých a středně velkých výkovků v rámci oprav, údržby, v zámečnictví a uměleckého kovářství. Strojním kováním se vyrábějí výkovky podstatně větší, těžko vyrobitelné jinou technologií, avšak tvarově jednoduché (např. velké hřídele).

U volného kování se využívá jednoduchých kovářských nástrojů a přípravků. Především se používají universální kovadla (horní a spodní), kde se výkovek polohuje. Kovadla jsou jednoduchých geometrických tvarů, jako např. kovadla rovinná, válcová, klínová, apod. Na Obr. 2 Tvary kovadel [07] jsou znázorněny tvary kovadel. Rybinovité části kovadel slouží k upevnění na bucharu nebo lisu. Díry v čelní stěně slouží pro manipulaci s nástrojem. Pracovní plochy kovadel jsou kaleny.



Obr. 2 Tvary kovadel [07]

Charakteristické znaky volného kování

- Jednodušší tvar než-li u odlitků, avšak s lepšími mechanickými vlastnostmi
- Výkovky o velké hmotnosti - 350 t
- Velké přídavky (okuje, obrábění)

Přídavek na obrábění

Volně kované výkovky se navrhují vždy v jednodušším tvaru, než jaký má mít výkovek. Tvarovanému zjednodušení se říká technologický přídavek. K technologickému přídavku se dále přidává přídavek na obrábění. Ten musí být tak velký, aby bylo zaručeno, že při dodržení předepsaných rozměrů po obrábění bude povrch výkovku bez jakýchkoliv vad. Vady mohou být původu materiálového (vměstky), anebo výrobně technologického (trhliny, přeložky). Kromě toho musí přídavek zaručovat dosažení neoduhličeného a neokysličeného povrchu po obrábění.

Na druhé straně je velikost přídavku omezena hospodárností výroby, to znamená nejmenší spotřebu materiálu a nejnižší výrobní náklady. [07], [09], [10]

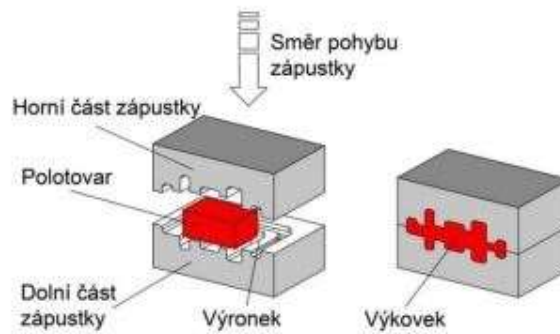
Volné kování si z hlediska pracnosti klade vysoké nároky na zručnost kováře, která je u této technologie velmi důležitá.

4.2. Kování v zápustce

Hlavní předností zápustkového kování je vysoká výkonnost a jednoduchá obsluha zápustky. Používá se zejména v sériové a hromadné výrobě kde je vyráběn velký počet tvarově stejných součástí. Výkovky mají omezené rozměry a hmotnost, které jsou dány rozměrem zápustky a silou tvářecího stroje. Výkovky se běžně vyrábějí do hmotnosti 50kg, v mimořádných případech až do hmotnosti 500kg. Pro zápustkové výkovky velkých hmotností je však snahou zvětšovat hmotnost a rozměry výkovku použitím sdruženého způsobu volného a zápustkového výkovku. Zápustkovým kovááním se dosahuje vysokého stupně prokování.

Zápustkovým kovááním se obecně rozumí tváření polotovaru, ohřátého na kovací teplotu, v dutině nástroje (zápustky) jejíž tvar je negativem tvaru výkovku. K přetvoření materiálu je třeba vynaložit přetvárnou práci, ke které je využita vnější energie v podobě rázů (buchar), a nebo vyvozené síly (lis). Polotovar vyplňuje tvar dutiny a vzniká zápustkový výkovek. Rozměry jsou však zvětšeny o hodnotu smrštění vychladlého výkovku a o materiál, který pro dokonalé zaplnění zápustky odchází do výronkové drážky umístěné po obvodu výkovku, viz Obr. 3. Výronek je po vyjmutí výkovku z dokovací dutiny zápustky vložen do ostříhovacího nástroje, kde je následně odstřižen.

Oproti volnému kování je dosaženo přesnějšího tvaru výkovku. V dnešní době se výkovek u zápustkového kování dá kalibrovat tak, že přesnost a jakost povrchu dosahují takové přesnosti, že se nemusejí již dále obrábět. V rámci procesu kování se tedy může jednat o kování přesné až velmi přesné, kde se u výkovku obrábějí pouze vybrané funkční plochy. [07], [09], [10]



Obr. 3 Schéma zápustkového kování [10]

4.3. Zápustky

Zápustky jsou nástroje pro kování přesných výkovek. Skládají se z horního a spodního dílu oddělených dělicí rovinou.

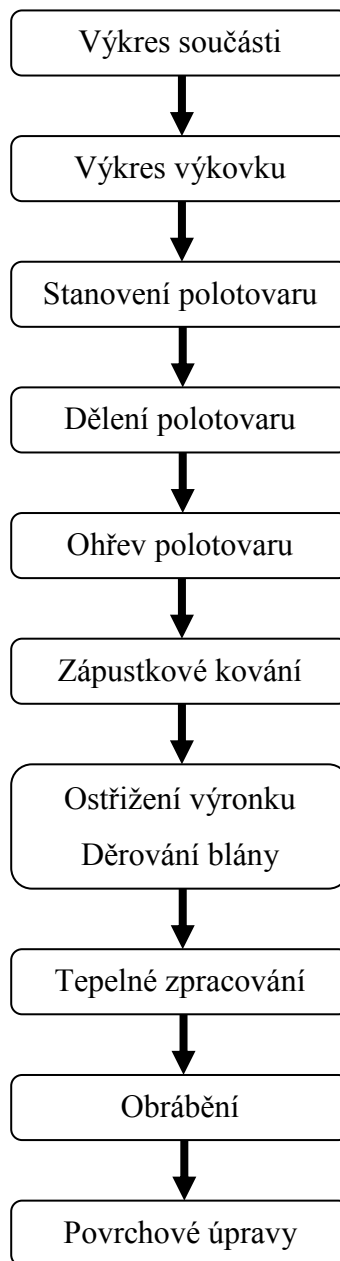
Dělení zápustek

- podle typu kovacího stroje
 - pro buchary - výkovky menší nebo pak vysoké hmotnosti, především podlouhlých tvarů, menších sérií
 - pro lisy - výkovky hmotností cca 2 ÷ 60kg a průřezů především rotačního charakteru, větší série
 - pro vodorovné kovací stroje
- podle dutiny zápustky
 - s otevřenou dutinou - s výronkovou drážkou
 - s uzavřenou dutinou - bez výronkové drážky (přesné kování)
- podle počtu dutin
 - jednorázové - jedno dutinové
 - postupové - více dutinové
 - násobné - pro více výkovek současně
- podle operace

○ předkovací	○ kalibrovací
○ tvarovací	○ ostříhovací
○ dokončovací	

[09], [11], [12]

5. Návrh technologického postupu zápustkového kování



Obr. 4 Postup zápustkového kování

5.1. Výkres výkovku

Při návrhu výsledného tvaru výkovku se vychází z výkresové dokumentace zadané součásti. Pro řádný návrh výkovku je třeba stanovit:

- přídavky na obrábění (v závislosti na stupni přesnosti výkovku)
- technologické přídavky

- zaoblení hran a přechodů (závislé na tvaru dutiny)
- úkosity (především v závislosti na použité tvářecím stroji a na materiálu výkovku)
- tloušťka blány, stěny a dna výkovku (závislá především na rozměru výkovku)
- úchytky rozměrů a tvarů (závislé na tvarové složitosti, tvarovém druhu a tvarové třídě, na stupni přesnosti výkovku)
- polohu dělicí roviny

Všechny tyto hodnoty jsou dostupné v tabulkách a normách (například ČSN 42 9030).
[16], [17], [18]

5.2. Tvar polotovaru

Pro stanovení rozměrů polotovaru je třeba nejprve určit jeho objem. Rozměry polotovaru jsou závislé na tom, zda se jedná o rotační výkovek, či výkovek podélného tvaru. K výpočtu objemu výkovku lze přistupovat třemi různými metodami.

Metoda analytická

Tato metoda se využívá na tvarově jednoduché výkovky, které je možné si rozdělit na základní geometrická tělesa. U těchto těles se pomocí elementárních vzorců počítají objemy a následně se sečtou. [18]

$$V_V = V_1 + V_2 + \dots + V_n [mm^3]$$

Metoda průřezového obrazce - ideální předkovek

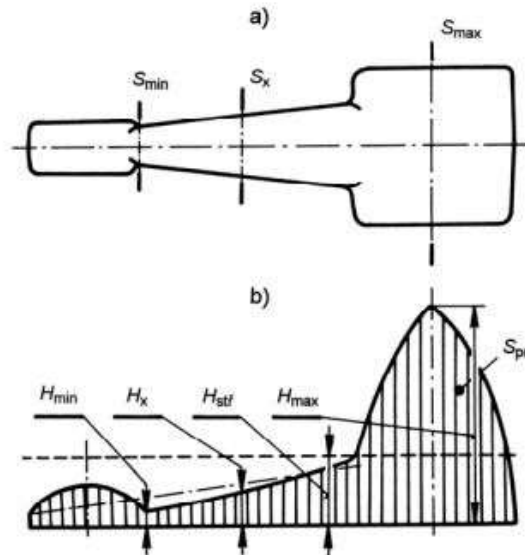
Tato metoda je využívána pro tvarově složité výkovky (Obr. 5). Způsob vyhodnocení objemu spočívá v tom, že se výkovek „rozřeže“ v místech, kde se mění tvar výkovku a výsledné plochy průřezů se násobí zvoleným měřítkem ploch m_s a dostaneme délky úseček h_n . [18]

$$h_x = S_x \cdot m_s [mm]$$

Úsečky h se nanášejí jako pořadnice na svislou osu pod jednotlivé průřezy a konce úseček se spojí. Výsledný obrazec je průřezový obrazec výkovku. Jelikož velikosti úseček h vyjadřují plochu v řezu, objem se spočítá zjištěním plochy pod křivkou. [18]

$$V_V = m_S \cdot S_{pr} [mm^3]$$

Kde $S_{pr} [mm^2]$ je plocha pod křivkou v průřezovém obrazci



Obr. 5 Konstrukce průřezového obrazce [18]

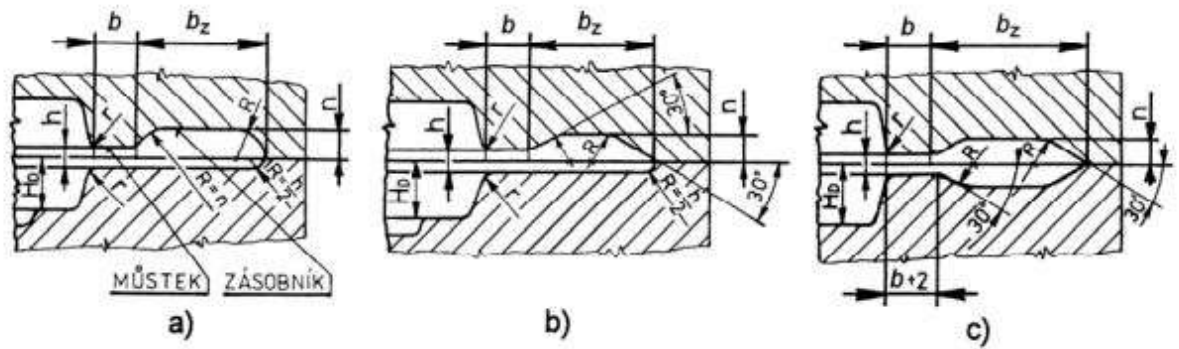
Metoda využívající grafický software

Nejběžněji využívaná metoda, kde se výkovek nakreslí v 3D programu a následně se vyhodnotí objem V a plocha S pomocí vložené funkce. [16], [18]

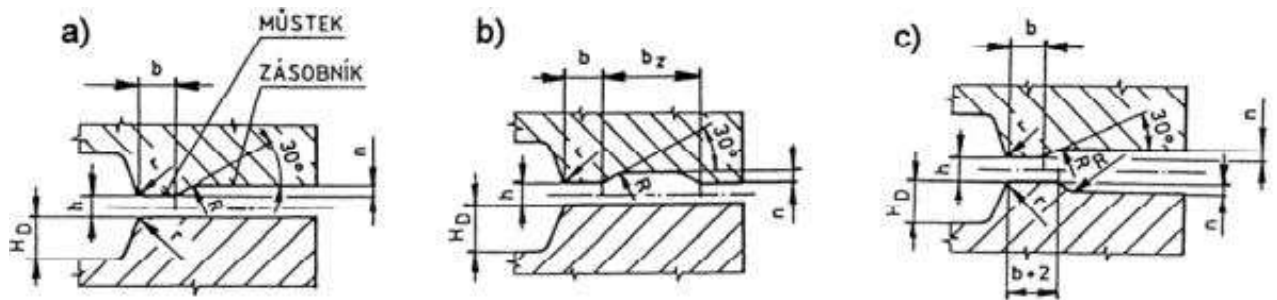
5.3. Návrh zápustky - výronková drážka

Výronková drážka je tvořena na celé ploše dokončovací dutiny zápustky v dělicí rovině. Výronkovou drážku tvoří dva hlavní segmenty: můstek a zásobník. Zúžením výronkové drážky, vzniká můstek, který plní funkci regulátoru tlaku. Můstek je dále využíván jako odpor proti vytečení materiálu do drážky. Jinými slovy můstek zastává úlohu, která napomáhá dokonalému zaplnění zápustky a díky svému zúženému profilu lze snadno odstříhnout.

Při kování na bucharech a třecích lisech se využívají výronkové drážky znázorněné na Obr. 6. Jestliže se výkovek zhotovuje na lise, používá se odlišný tvar výronkové drážky (Obr. 7). Rozdíl je především v tom, že díly zápustky nedosedají přímo na sebe. Tím se zabraňuje rázům, které by poškodily stroj. Norma ČSN 22 8306 definuje tvar a rozměry výronkové drážky pro lisy.



Obr. 6 Typy výronkových drážek pro zápustky bucharů [16], [18]



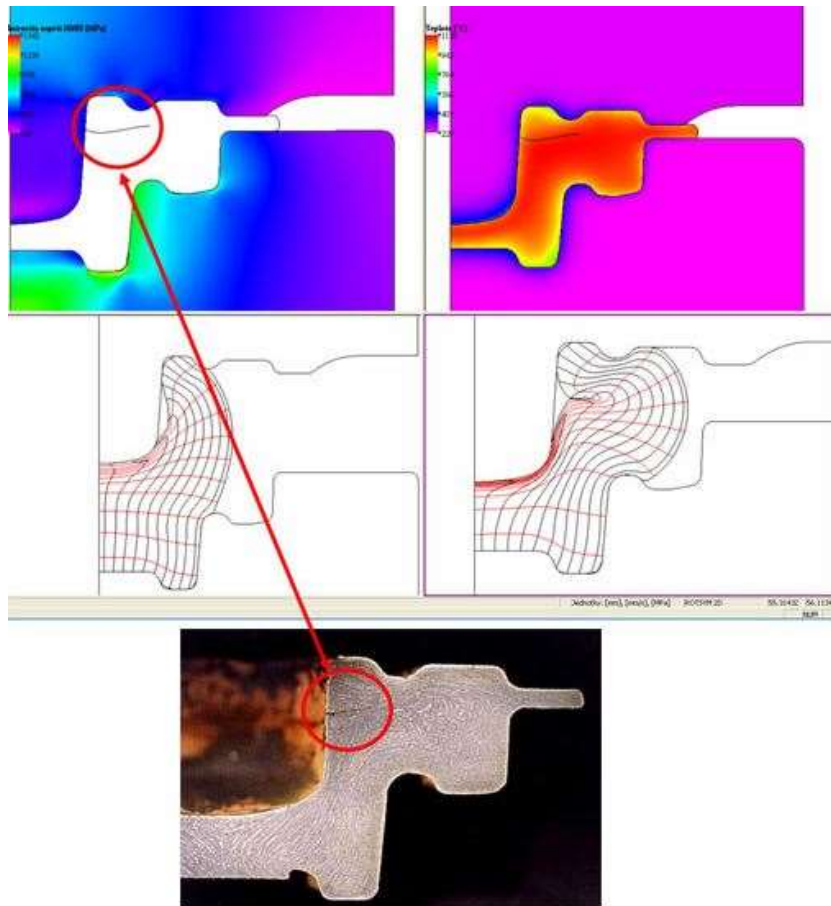
Obr. 7 Základní typy výronkových drážek pro zápustky lisů [16], [18]

5.4. Vady výkovků

Při kování v zápustce mohou vyvstat různé potíže s vadami, které nejsou pro tyto operace přípustné. Jedná se o tyto:

Přeložka

Jedná se o vadu, která vzniká nevhodně zvoleným tvarem zápustky nebo polotovaru. Tomuto problému lze předejít mezioperačním kováním - pěchováním, či zvolením vhodnějších teplot a materiálů.



Obr. 8 Simulace vzniku přeložky [19]

Zakované okuje

Tyto vady vznikají vlivem nedostatečného očištění okují před zápusťkovým kováním. Největším problémem je tato vada na výkocích, kovaných na lisech, kdy riziko zakování okují je největší. Pro odstranění okují se využívá předkovacích operací, jejíž účelem je nejen přiblížit se ideálnímu předkovku, ale slouží také k odstranění okují. [15]

Trhliny

Vliv na trhliny má především přehřátí materiálu, materiál s vysokým poměrem znečišťujících prvků (síra), přítomnost plynů v zápusťce, nebo vysoká rychlost kování. [15]

Podélné a příčné praskliny

Vznikají při rychlém ohřevu nebo chladnutí, při nízkých kovacíh teplotách, jestliže jsou vnitřní nebo povrchová napětí větší než pevnost materiálu. [15]

Nedokovaný výkovek

Vada charakterizující nedokonalé vyplnění zápustky. Objem materiálu může být příliš malý, a tak není schopen vyplnit dutinu zápustky. Příčinou nedokovaného výkovku může také být nevhodně navržená předkovací dutina, či vysoký odpor částí zápustky, které brání jeho vyplnění. [15]

Podélné a příčné trhliny

Vada zapříčiněná velmi rychlým ohřevem nebo chladnutím materiálu.

- Praskliny
- Přehřátí materiálu
- Spálení materiálu [15]

5.5. Zjišťování vad výkovků

Výkovek může vykazovat různé povrchové nebo vnitřní vady. Vady materiálů vznikají při výrobě nebo v dalších operacích (např. tepelné zpracování). Defekty ve vyráběných součástech ohrožují bezpečnost provozu a omezují životnost strojů a zařízení, protože zeslabují nosný průřez, vyvolávají vrubové účinky nebo způsobují netěsnost spojů.

Ke kontrole se používají defektoskopické metody, které umožňují provést zkoušku bez porušení výkovku. Destruktivní zkoušky nelze vždy použít.

Nedestruktivní metody umožňují nalezení vnitřních nebo skrytých vad. Ačkoliv je v dnešní době známo mnoho metod k vyhodnocení vad výrobků, je výhodné tyto metody kombinovat. Žádnou z metod nelze totiž zjistit všechny vady, které se v díle mohou vyskytovat. [15], [20]

Nejdůležitější a nejčastěji používané metody jsou:

Povrchové vady

- vizuální kontrola
- kapilární zkoušky
- zkouška magnetoinduktivní
- zkouška infračerveným zářením

Vnitřní vady

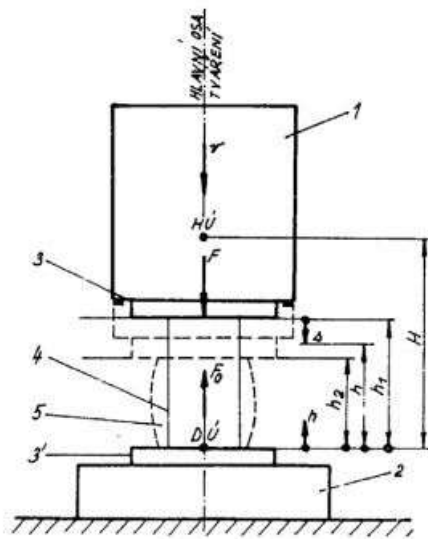
- zkouška prozářením
 - záření rtg.
 - záření gama
- zkouška ultrazvukem
- magnetická prášková metoda [15], [20]

6. Tvářecí stroje

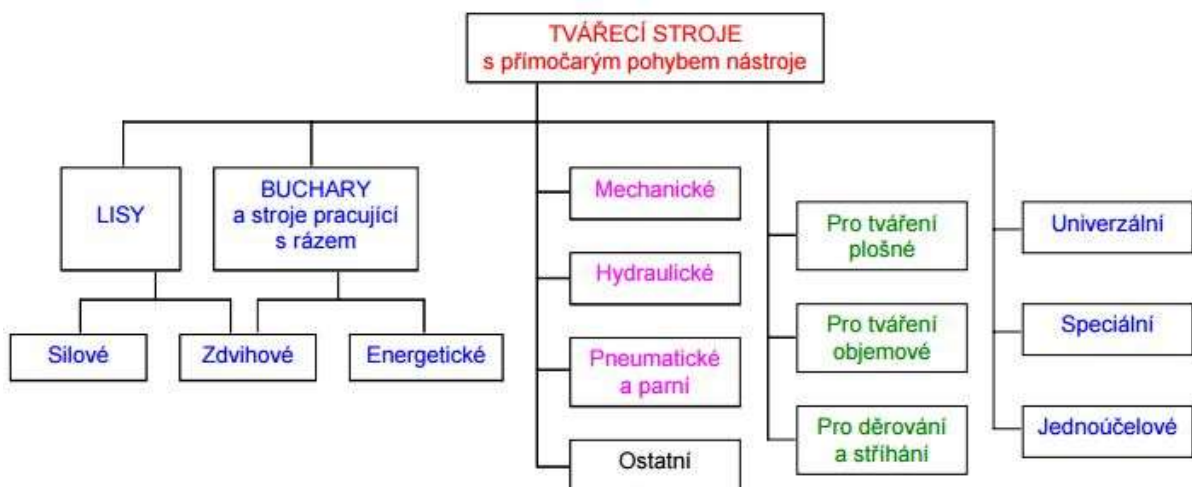
„Tvářecí stroj je dynamická soustava sloužící k realizaci úkonů technologického procesu, vedoucích k trvalému přetvoření materiálu“ [13]. Rozdělují se podle relativního pohybu nástroje k tvářenému materiálu do dvou základních skupin.

- Stroje s přímočarým pohybem nástroje
- Stroje s rotačním nebo obecným pohybem nástroje

Nejvíce rozšířené tvářecí stroje, jsou s přímočarým pohybem nástroje.



Obr. 9 Základní uspořádání tvářecího stroje s přímočarým pohybem nástroje [13]



Obr. 10 Základní rozdělení tvářecích strojů s přímočarým pohybem nástroje [13]

Při volbě tvářecího stroje je nejdůležitějším faktorem, k jakému stroji má firma přístup ve své kovárně. Typ stroje ovlivňuje jak tvar výkovku, tedy i dutiny zápustky (úkosy, poloměry zaoblení, polohu dělicí roviny, technologické přídatky) tak i volbu materiálu zápustky a její konstrukci (výronkovou drážku, vedení a upínání zápustky atd.). Zvolený stroj ovlivňuje i technologický postup výroby výkovku (ohřev materiálu, mechanizace, přesnost výroby, sériovost a další). [13], [14], [18]

Stroje pro zápustkové kování rozdělujeme na energetické a zdvihové. Z energetických strojů se jedná o buchary a příkladem stroje zdvihového je lis.

6.1. Tvářecí stroje energetické

Do skupiny tvářecích strojů energetických se řadí takové stroje, které přetvárnou práci získají pomocí přeměny kinetické energie. K přeměně kinetické energie dochází pomocí beranu konajícího svislý přímočarý pohyb proti tvářenému materiálu.

Rozeznáváme dva základní typy energetických bucharů. V prvním případě práci vykonává horní část stroje, tzv. beran. Stroj, kde práci vykonává i spodní beran stroje konající svislý pohyb směrem vzhůru, se nazývá buchar protiúderový.

Charakteristika bucharů

- Materiál se zpracovává rázy, které se přenáší do okolí
 - Nutno stroj odpružit
- Materiál se prokovává jen do určité hloubky
 - Hospodárně lze kovat jen středně velké výkovky, popř. předkovky
- Při úderu beranu odpadají okuje
 - Čistý povrch výkovku [13]

6.2. Tvářecí stroje zdvihové

U tvářecích strojů zdvihových, nebo-li lisů, dochází k přenosu energie pomocí mechanických systémů. Tyto systémy se dělí pomocí znaků jakou jsou konstrukční, kinematické, technologické, podle využití mechanismů, automatizace a dalších.

Základní rozdělení mechanických lisů z hlediska převodového systému

- Výstředníkové
- Klikové
- Kolenové
- Hřebenové
- Šroubové
- a další

Dále se dají mechanické lisy rozdělit pomocí:

- Jmenovité síly
- Tvaru stojanu
- Provozního rozsahu
- atd

Charakteristika mechanických lisů

- Síla působí klidným tlakem
- Prokove se celý průřez materiálu
 - I nejtěžší výkovky
- Práce je bezpečnější než na bucharu [13]

7. Návrh experimentu

Experimentální část této diplomové práce se zabývá sledováním zaplnění dutiny zápusky pro jednotlivé navržené tvary žeber v zápusce.

7.1. Popis materiálu použitého v analýze (Al - jejich slitiny)

Hliník je stříbrobílý, velmi lehký kov s velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Je vysoce používaný především ve formě slitin v leteckém a automobilovém průmyslu. Jako další vlastnost lze uvést dostatečnou pevnost ($R_m = 60 \text{ MPa}$) a výbornou tvárnost ($T_m = 660 \text{ °C}$). Dále se vyznačuje dobrou svařitelností a vysokou odolností vůči korozi. V přírodě se vyskytuje ve formě sloučenin. Nejznámější z nich je bauxit. [21], [22]

7.1.1. Využití hliníku

V průmyslu se hliník užívá nejčastěji ve formě slitin. Nejznámější z nich je slitina mědi a hořčíku označována názvem dural. Oproti čistému hliníku je dural až 5x pevnější v tahu a tvrdší při zachování nízké hmotnosti.

Hliník lze využít všude tam, kde není třeba vysoká pevnost, ale je třeba nízké hmotnosti (letecká technika, automobilový průmysl). Lze jej také využít tam, kde je zapotřebí tepelné a elektrické vodivosti.

- Strojírenství - odlitky, konstrukční součástky, profily
- Stavebnictví - fasádní profily
- Potravinářský průmysl - obalový materiál
- Elektrotechnika - kabely, dráty
- Letecký průmysl - využití slitin (pevnost x hmotnost)
- Automobilový průmysl - části motorů, konstrukce (kapoty) [21], [22]

Chemické složení materiálu využitého v simulacích - AA 2024:

Obsah Legur	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
%	0,25	0,25	4,35	0,6	1,5	0,05	0,125	0,075	0,025

Tab. 1 Chemické složení materiálu AA2024

Charakteristika materiálu AA 2024

Tato slitina je v soustavě EN a AA zařazena v sérii 2XXX. Slitiny této série jsou velmi rozšířené v leteckém průmyslu pro svou pevnost a lomovou houževnatost.

Soustava Al-Cu-Mg zahrnuje nejdůležitější letecké konstrukční materiály, tzv. duraly (2017, 2014, 2024). Všechny duraly obsahují pro zlepšení vlastností Mn a jako příměsi Fe a Si. Slitina 2024 má nejvyšší pevnost a vzhledem k dobré lomové houževnatosti je nejpoužívanějším materiálem v letectví. Slitina 2024 se používá na potahy, rámy, žebra, přepážky, výztuhy, aerodynamické kryty, výkovky, případně nýty.

Slitina	Stav	Mechanické vlastnosti			
		R _m MPa	R _{p0,2} MPa	t MPa	A %
2024	O	180	76	125	20
	T3	450	310	275	18
	T4	440	290	275	19

Tab. 2 Mechanické vlastnosti materiálu AA 2024

Elastické vlastnosti materiálu jsou definovány jako konstantní (78 GPa) pro teplotu 20°C a Poissonovým číslem 0,35.

Na Obr. 11 je patrný model rovnice popisující plastické vlastnosti chování materiálu zohledňující teploty, velikosti deformace a rychlosti deformace odpovídá plastickým vlastnostem uvedeným na Obr. 11. Plastické vlastnosti materiálu AA 2024. Termomechanické vlastnosti jsou zjednodušeny na konstantní a uvedeny na Obr. 12. Tento model je platný pro rychlosti deformace 0-200s⁻¹, velikosti deformace 0,01-1 a pro rozsah teplot 250-500°C.

Model materiálu | 2D-pohled | 3D-pohled |

Model deformačního odporu materiálu

$$\sigma_f = A e^{m_1 T} T^{m_2} \varepsilon^{m_3} e^{m_4 \varepsilon} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} e^{m_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{m_6} \dot{\varepsilon}^{m_8 T}$$

Regresní koeficienty

A = 667.98713

m₁ = -0.00485 m₅ = 0

m₂ = -0.03347 m₇ = 0

m₃ = 0.08079 m₈ = 0

m₄ = -0.00228 m₉ = 0

Rozsah platnosti

pro teploty

T_{min} = 250 T_{max} = 550

pro přetvoření

ε_{min} = 0.01 ε_{max} = 1

pro rychlosti přetvoření

ε̇_{min} = 0 ε̇_{max} = 200

Počátek stacionárního stavu

není explicitně předepsán

při přetvoření ε_{ss} = 0.01

Obr. 11 Plastické vlastnosti materiálu AA 2024

Termomechanické vlastnosti

Dalšími parametry vyplývajícími ze základního nastavení programu byly měrné teplo s konstantní hodnotou $903 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, hustota odpovídající hodnotě $2720 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tepelná vodivost $218 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a teplotní roztažnost uvedenou na Obr. 12

Měrné teplo | Hustota | Tepelná vodivost | Roztažnost |

Referenční teplota 0

konstantní 2.31e-005

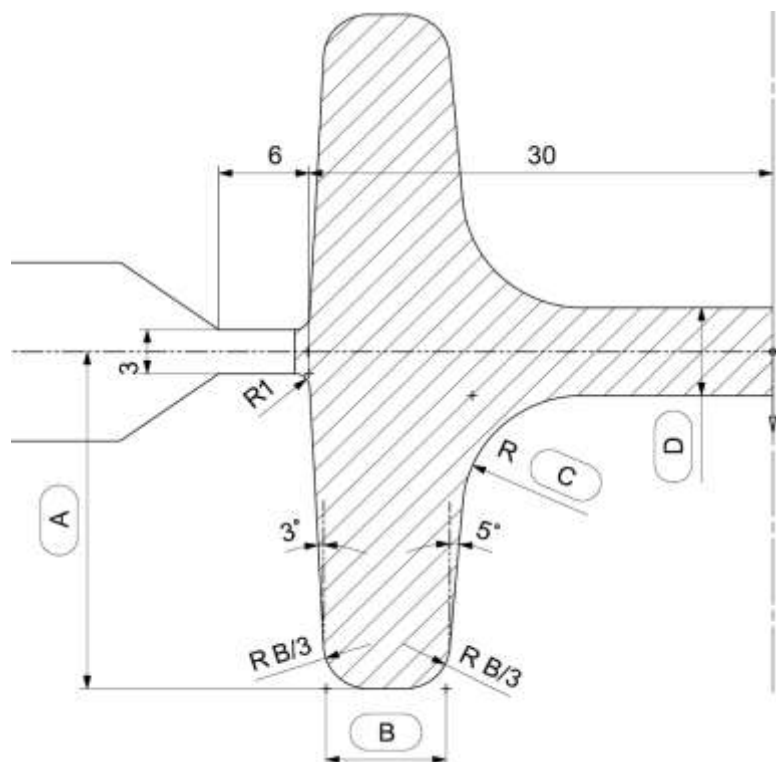
pro teplotu 25

teplotní závislost

Obr. 12 Tepelná roztažnost

7.2. Návrh žebra

Základní návrh tvaru a rozměrových variant žeber byly poskytnuty firmou Strojmetal Aluminium Forging s.r.o. v Kamenici. Žebra byla jako možné kombinace konstrukčních návrhů, které mají charakterizovat možnosti při jejich vyplňování.



Obr. 13 Obecný tvar žebra

Na Obr. 13 je zobrazena obecně tvarovaná geometrie žebra. Lze předpokládat, že rozměry ovlivňující zaplnění dutiny zápustky jsou především výška žeber, šířka žeber a poloměry zaoblení.

Pro tento obecný model bylo stanoveno 16 možných variant uvedených v Tab. 4.

	rozmezí	
	od	do
A	10	50
B	4	12
C	3	12
D	4	12

Tab. 3 Rozsah hodnot

A	B	C	D	
30	10	6	8	A
25	8	6	8	B
20	6	6	8	C
15	6	6	8	D
30	10	10	8	E
25	8	10	8	F
20	6	10	8	G
15	6	10	8	H
30	10	6	5	I
25	8	6	5	J
20	6	6	5	K
15	6	6	5	L
30	10	10	5	M
25	8	10	5	N
20	6	10	5	O
15	6	10	5	P

Tab. 4 Rozměry jednotlivých variant

7.3. Popis simulačního softwaru

Pro tuto diplomovou práci byl zvolen simulační program FormFem, ve kterém probíhají veškeré simulace a korekce všech řešení. V programu FormFem lze jak simulovat jednotlivé konstrukční varianty, tak lze měnit i potřebné okrajové podmínky. Tyto podmínky budou dále popsány v kapitole 7.4.

7.4. Volba okrajových podmínek

Jako okrajové byly stanoveny:

Konstantní podmínky

- materiál
- mazání

Proměnné podmínky

- teplota materiálu
- velikost polotovaru

7.4.1. Konstantní podmínky

Materiál

Pro experiment byl volen typ materiálu AA 2420, kterému byla věnována kapitola 7.1.

Mazání

Tření je nedílnou součástí veškerých tvářecích operací. U kování v zápustkách má veliký vliv na tečení materiálu v dutině zápustky a tak se i tato operace snaží optimalizovat, do takové formy, aby bylo možné vyrábět co nejkvalitnější produkty.

Pro výpočet všech simulací v programu FormFem bylo voleno mazání pro Al slitiny. Jedná se o mazivo „grafit + voda pro Al“ s konstantním faktorem 0,5, Tato podmínka je pro jednoduchost konstantní, je použito modelu adhezního tření. Databáze podmínek umožňuje snadnou modifikaci podmínky.

7.4.2. Variabilní podmínky

Teplota

Tato hodnota se vztahuje na pracovní teplotu polotovaru, tedy teplotu, za které je materiál tvářen. Pro slitiny hliníku jsou kovací teploty cca 500°C. S ohledem na průběh operace kování byly navrženy 3 teploty, a sice 400, 500 a 600°C.

Teplota tváření nemá přímo vliv na zaplnění zápustky a proto bude pomocí simulací zjištěno, jak teplota ovlivňuje přetvárný odpor tvářeného materiálu daného dílu.

Velikost polotovaru

Velikost a tvar polotovaru má zásadní vliv na vyplnění celé zápustky. Tato podmínka byla stanovena na základě výpočtu objemu polotovaru pro zaplnění dutiny zápustky. Z důvodu velkého množství variant, u kterých by bylo nutné uvažovat vždy jiný rozměr základního polotovaru bylo navrženo, aby velikosti všech polotovarů byly

sjednoceny. Dojde tak ke zjednodušení všech výpočtu a u vybraných tvarů polotovaru bude sledován způsob zaplňování dutiny zápustky.

Tvar polotovaru je podlouhlý, obdélníkového nebo kruhového průřezu. Je zde tedy usilováno o přiblížení se možnostem tvarů polotovaru a o analyzování jejich vlivu v co největším počtu variant pomocí výsledků ze simulací.

- Podlouhlý polotovar kruhového průřezu

Jako první rozměr byl vybrán rozměr polotovaru o průměru 46 mm. Dále byl stanoven průměr polotovaru 60mm. Tento polotovar znamená v některých konstrukčních variantách větší objem, než je objem dutiny, aby se předešlo případnému nezaplnění a ve výpočtech byly patrné tvářecí síly a deformace působící jak na materiál, tak na nástroje.

- Podlouhlý polotovar obdélníkového průřezu

Polotovary jsou voleny tak, aby se některé varianty přiblížily navrženým variantám kruhových průřezu. Pro tyto účely byly vybrány polotovary s rozměry průřezu 40x50, 40x60, 40x70, 40x85 a 58x59mm.

	R23	R30	1	2	3	4	5
Rozměr [mm]	46	60	40x50	40x60	40x70	40x85	58x59

Tab. 5 Stanovení rozměrů polotovaru

7.4.3. Výrobní zařízení volené pro výpočet experimentu

Jako kovací lis byl zvolen typ LZK 4000. Jedná se o klikový lis pro zápustkové kování s tvářecí silou 40 000kN.

Stroj je definován těmito parametry:

- Jmenovitá tvářecí síla: 40 000kN
- Počet zdvihů max.: 60 zdvihů/min
- Zdvih beranu: 380 mm
- Průchod: 1580 mm
- Pracovní plocha stolu: 1520x1580 mm
- Pracovní plocha beranu: 1470x1400 mm
- Výška lisu nad podlahou: 8105 mm
- Šířka lisu: 4720 mm
- Hloubka lisu: 4640 mm
- Hmotnost lisu: 250 tun

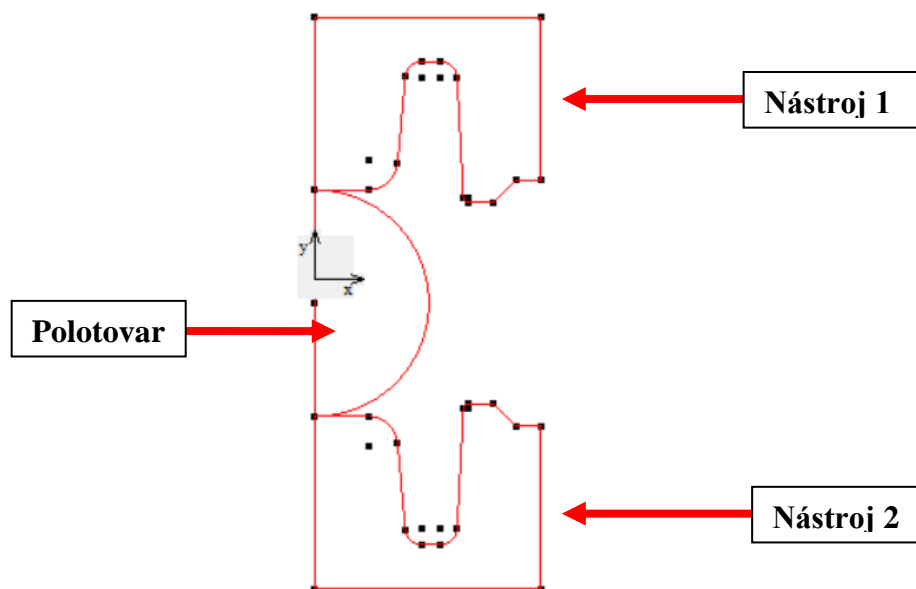
8. Simulace procesu v SW FormFem

Pro potřeby této diplomové práce byl zvolen jako simulační SW program FormFem, ve kterém budou probíhat veškeré simulace. Licence k tomuto programu vlastní fakulta strojní. Z tohoto důvodu se všechny výpočty řešily v prostorách školy.

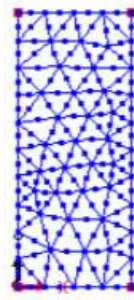
8.1. Simulace výchozích podmínek SW

V této kapitole bude řešena výchozí simulace pro jednotlivé varianty (A-P). Pro všechny varianty je prvotní nastavení totožné.

Jako první je nutné definovat geometrii pro každý objekt. Objekt je možné vytvářet pomocí jednoduchého kreslicího modulu nebo využití importu z formátu dxf, který byl vytvořen v jiném CAD systému. Pro každý objekt je třeba přiřadit vlastnosti, mezi které patří typ objektu (polotovar nebo nástroj), konečněprvková síť, teplota a použitý materiálový model. Vzhledem k charakteru SW budou úlohy řešeny formou řezů.



Obr. 14 Nastavení programu FormFem - geometrie



Obr. 15 Konečněprvková síť

Dalším krokem je nastavení materiálu polotovaru (v našem případě byl zvolen materiál AA 2024 z norem AISI, který má alternativu v materiálu AlCu4,4Mg1,5Ti německých norem DIN, viz. kapitola 7.1), a nástrojů (ocel) podle knihovny SW.

Po stanovení materiálu je třeba definovat, o jaký druh výkovku se bude jednat (rotační, nebo podélný). Dohodou s firmou Strojmetal byl stanoven podlouhlý výkovek, a tedy rovinná deformace.

Hodnota počáteční teploty polotovaru byla definována na 400, 500 a 600°C a počáteční teplota pro nástroje 100°C. Teplota nástrojů je důležitá z hlediska teplotního pole výkovku. Říká i o intenzitě ochlazování polotovaru vlivem kontaktu s nástrojem.

Po přípravě objektů je možné přistoupit k vytvoření sestavy. Nejprve je třeba všechny objekty mající vliv na proces tváření vložit do sestavy, provést jejich umístění vůči sobě a zajistit jejich kontakt.

Dále je třeba definovat podmínky procesu, mezi které patří kinematika pohybu nástroje, kontaktní podmínky a podmínky přestupu tepla.

V dalším kroku je volen směr deformace. Jelikož se jedná o kování v zápustce na klikovém lise s pohybem v Y souřadnici, volí se směr Y i pro deformaci polotovaru. Po zadání směru deformace je třeba stanovit tvářecí stroj dle SW katalogu. Jelikož se firma Strojmetal zabývá kovááním na lisech, byl z nabídky nástrojů zvolen klikový lis LZK 4000.

Pro numerickou simulaci byly nastaveny tyto konkrétní parametry:

- Jmenovitá tvářecí síla - 40 000kN
- Počet zdvihů - 55 zdvihů/min
- Zdvih beranu - 380 mm
- Směr pohybu v osy - Y
- Zbývající parametry nelze v daném SW zadat

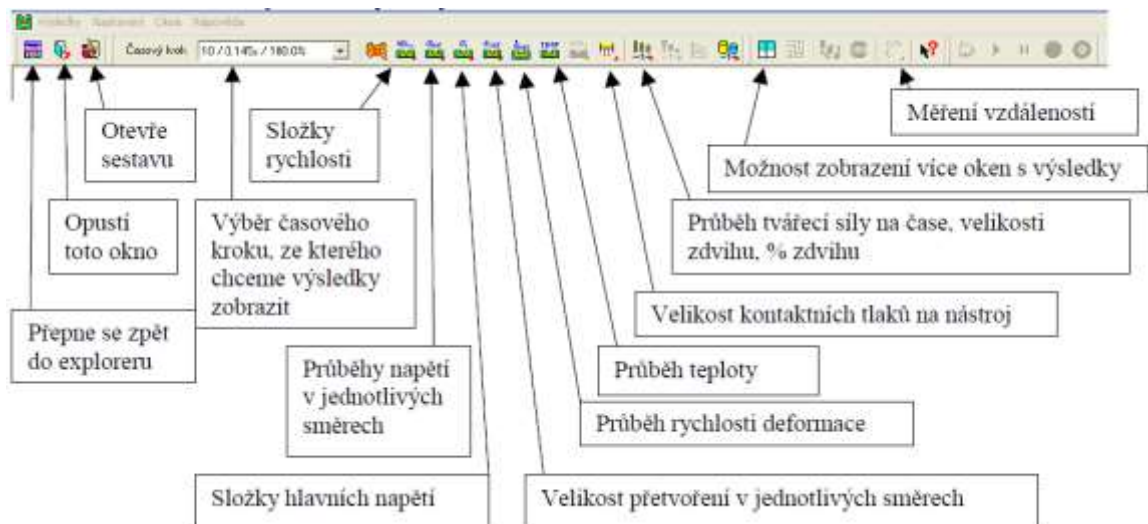
Zvolené kontaktní podmínky pro tuto úlohu jsou voleny pomocí maziva uvedeného v kapitole 7.4.1. Jedná se o adhezní nebo-li třecí faktor s konstantní hodnotou 0,5, která není závislá na čase nebo teplotě.

V předposlední fázi stanovení výchozích podmínek je zadáván přestup tepla který je zadáván jako závislý na teplotě s konstantní emisivitou 0,8. Teplota média (vzduchu v kovárně) činí 20°C. Všechny tyto podmínky musí být aplikovány na příslušné objekty či hrany příslušných objektů.

Dále je třeba definovat polohovou událost, která představuje vzájemnou polohu horní a dolní zápustky na konci operace. Tato podmínka byla stanovena na velikost 3mm, a to podle obecného modelu Obr. 13 Obecný tvar žebra.

8.2. Vyhodnocení experimentu

Díky SW FormFem je možné procházet a posuzovat jednotlivé varianty s rozdílnými parametry. Počet vypočtených variant se rovná 240 úlohám, kde mezi proměnné patří teplota (400, 500 a 600°C), velikost a druh polotovaru. Na základě výše popsaného byly vytvořeny různé kombinace úloh z hlediska tvaru žebra, velikosti a tvaru polotovaru a z hlediska teploty.



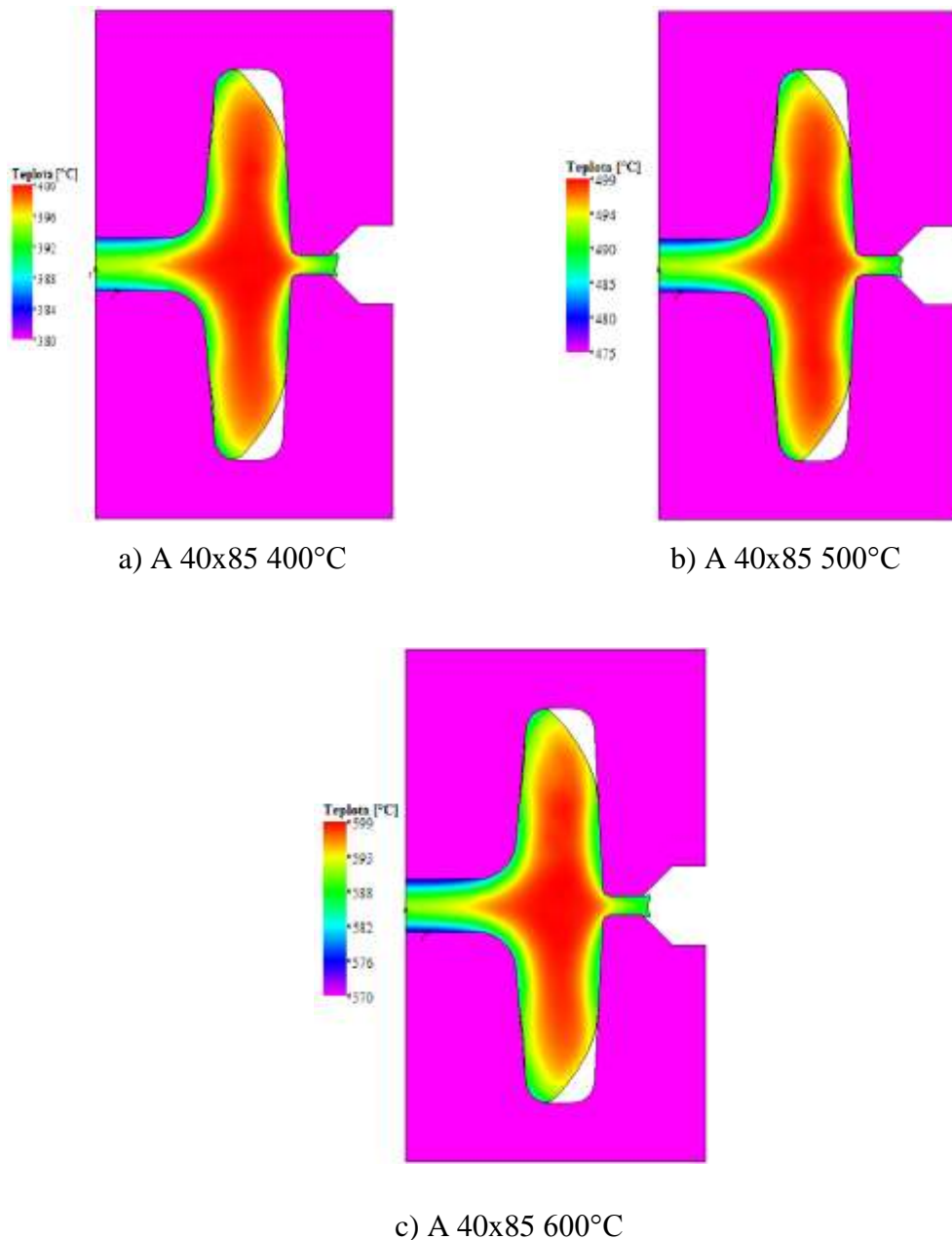
Obr. 16 Zobrazení výsledků v SW FormFem

Ve vyhodnocování experimentu této diplomové práce budou sledovány a vyhodnocovány následující parametry:

průběh teploty, velikost kontaktních tlaků na nástroj, složky hlavních napětí, tvářecí síly na čase, zaplnění dutiny zápusky

8.2.1. Působení teploty na tvářený polotovar

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách této diplomové práce, teplota nemá zásadní vliv na zaplnění zápusky, ale především na přetvárný odpor materiálu, rychlost deformace. Z tohoto důvodu se tato kapitola bude zabývat převážně hodnocením působení nástroje na daný polotovar.

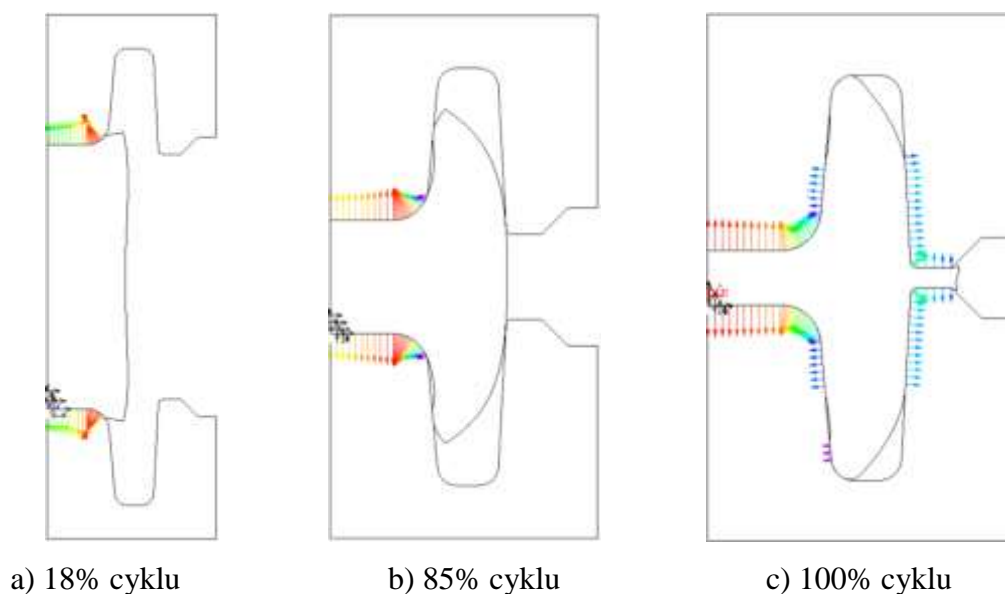


Obr. 17 Porovnání zaplnění dutiny zápustky s ohledem na teploty

Z Obr. 17 Porovnání zaplnění dutiny zápustky s ohledem na teploty na kterém je vyobrazena zápustka A s polotovarem 40x85mm je patrné, že tvrzení o vlivu teploty na zaplnění dutiny zápustky je pravdivé. Je zřejmé, že ať by se teplota změnila jakkoliv, na hodnotu zaplnění by to vliv nemělo. Z tohoto důvodu se dále experimentální část bude zabývat pouze střední teplotou, tedy teplotou 500°C.

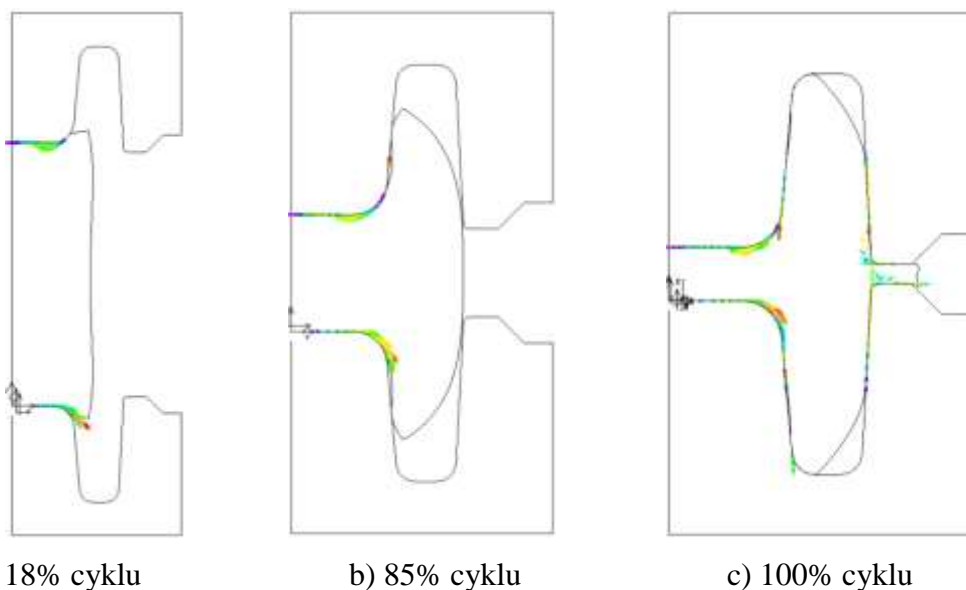
8.2.2. Působení sil na nástroje

Na Obr. 18 je již vyobrazen vliv působení teplot na materiál z hlediska kontaktních tlaků působících na nástroje. Šipky představují smysl působení sil oproti nástroji a tím i místa s největší zátěží. K největšímu zatěžování dochází v patě žeber. Právě v těchto místech bude nejvíce docházet k opotřebení.



Obr. 18 Kontaktní tlaky působící ve směru pohybu nástroje

Obr. 19 sděluje, že může dojít k postupnému vybočení nástrojů mimo osu rotace. Horní nástroj je náchylný na vybočení směrem k ose symetrie vlivem pěchování polotovaru, kdežto spodní nástroj je vychylován směrem k výronkové drážce.

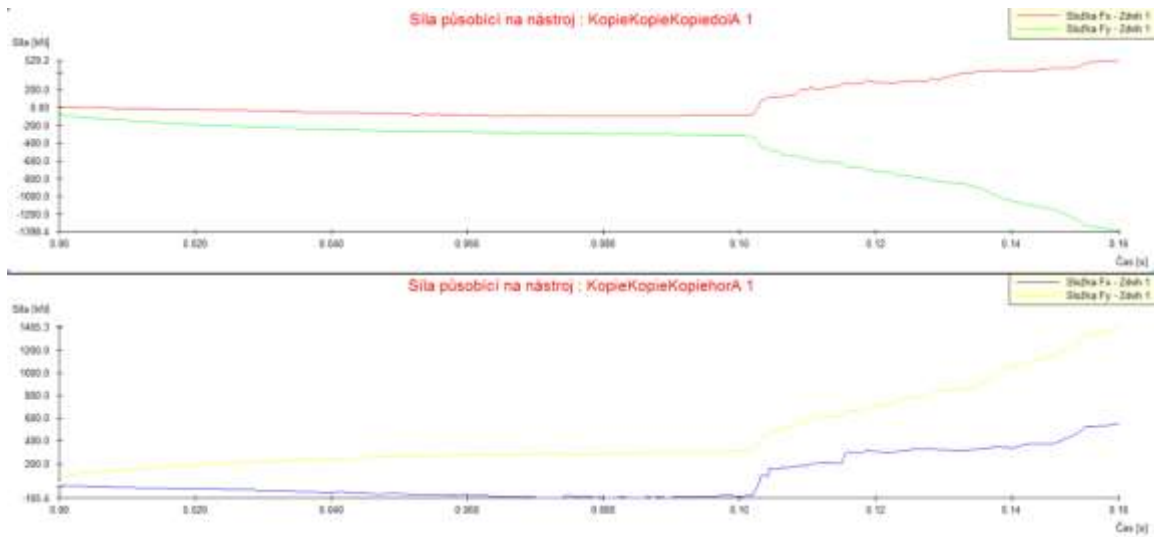


Obr. 19 Kontaktní tlaky s tendencí na vybočení nástroje

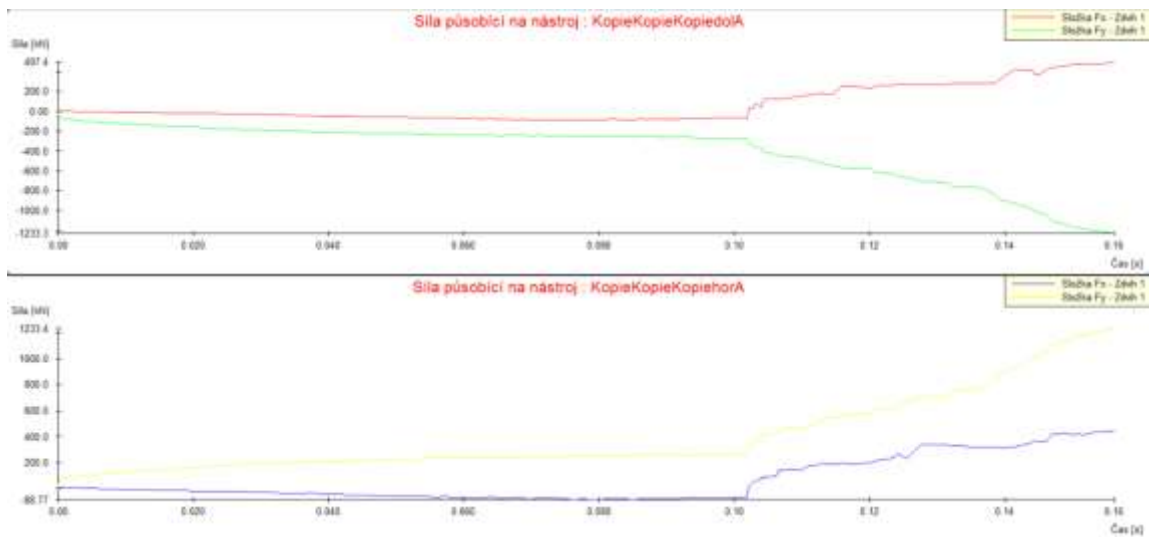
Na toto působení má opět vliv teplota. Z následující tabulky si lze ověřit, že čím vyšší teplota je k tváření použita, tím menší jsou i normálová napětí působící na nástroje. Pomocí tohoto zjištění by bylo možné prodloužit životnost nástrojů, protože se předejde zbytečným otěrům a následným mechanickým poškozením nástrojů, či zhoršení kvality výsledného výkovku. Průběhy působících sil na nástroje v průběhu tváření je uveden v následujících grafech.

Teplota [°C]	400	500	600
Max. normálové napětí [MPa]	856	741	641

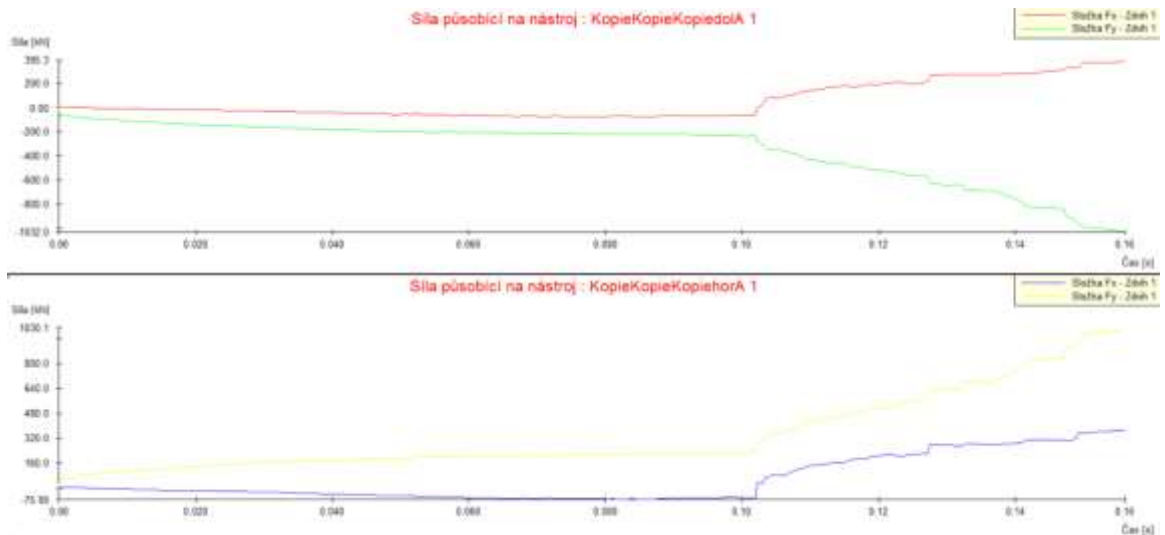
Tab. 6 Vliv teploty na normálová napětí



Graf 1 Průběh působení sil na nástroj v závislosti na čase (400°C)



Graf 2 Průběh působení sil na nástroj v závislosti na čase (500°C)



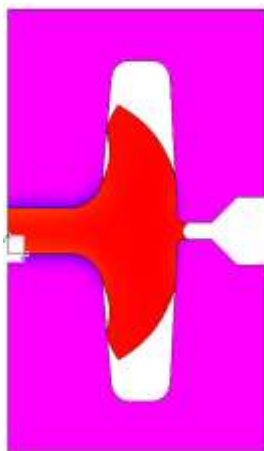
Graf 3 Průběh působení sil na nástroje v závislosti na čase (600°C)

8.2.3. Zaplnění dutiny zápustky pro jednotlivé varianty

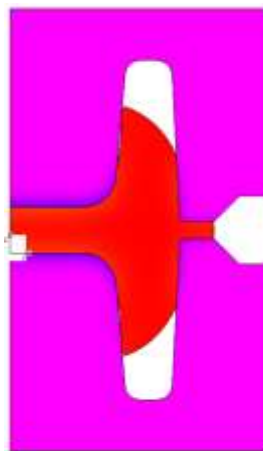
Vzhledem k velkému množství vypočítaných variant simulací bylo rozhodnuto řešit vyhodnocování variant z hlediska zaplnění dutiny zápustky. V tomto vyhodnocení bude vidět výčet všech situací, ke kterým se díky výpočtům dospělo.

1) Polotovar 40x60

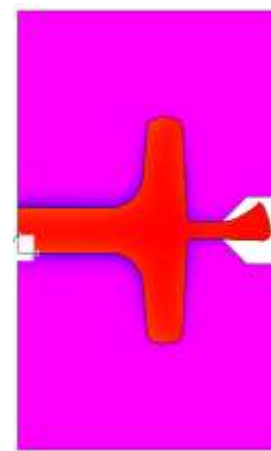
Pro demonstraci všech možností, které byly při výpočtu dosaženy, se volil právě polotovar s rozměry 40x60mm. V tomto polotovaru jsou patrné všechny možnosti, konečných tvarů zaplnění dutiny zápustky reprezentující obrázky 20-35.



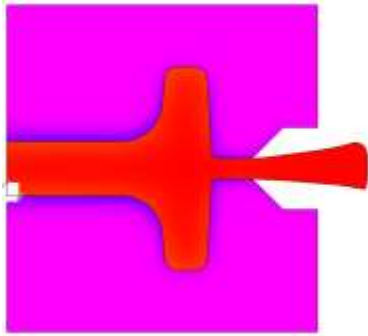
Obr. 20 Zápustka tvaru A



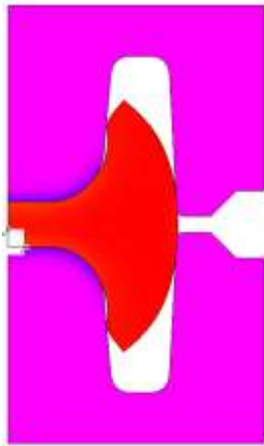
Obr. 21 Zápustka tvaru B



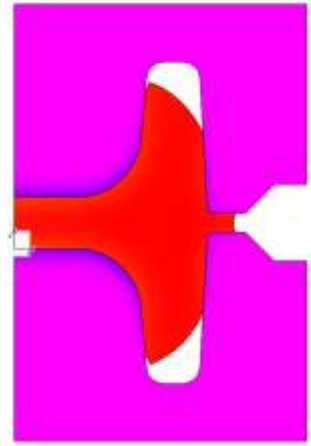
Obr. 22 Zápustka tvaru C



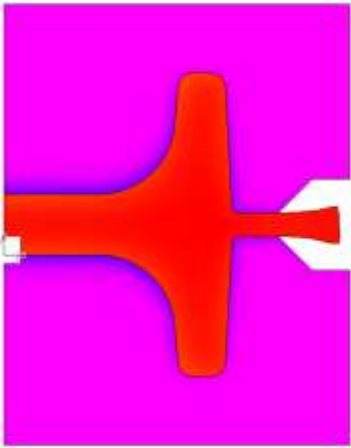
Obr. 23 Zápustka tvaru D



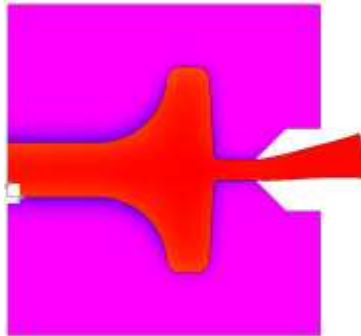
Obr. 24 Zápustka tvaru E



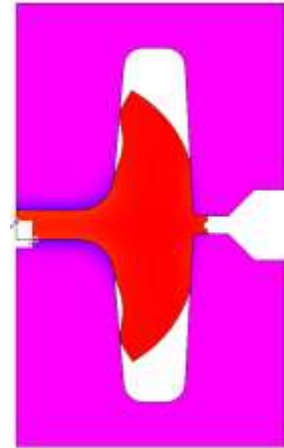
Obr. 25 Zápustka tvaru F



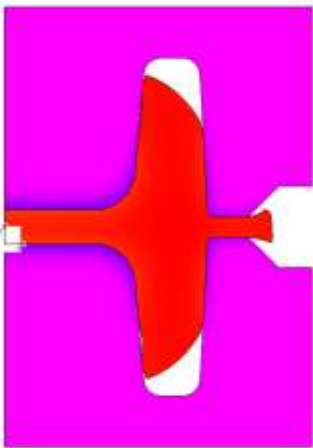
Obr. 26 Zápustka tvaru G



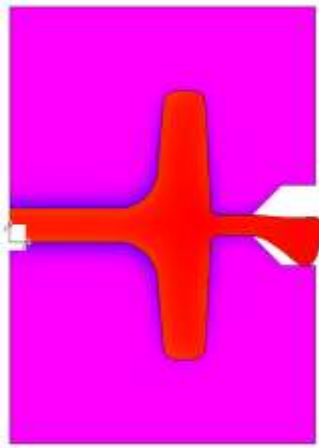
Obr. 27 Zápustka tvaru H



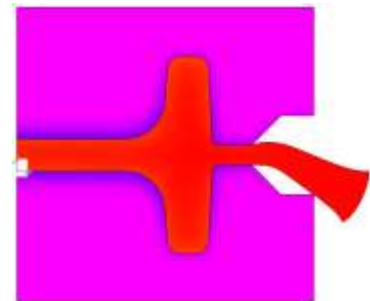
Obr. 28 Zápustka tvaru I



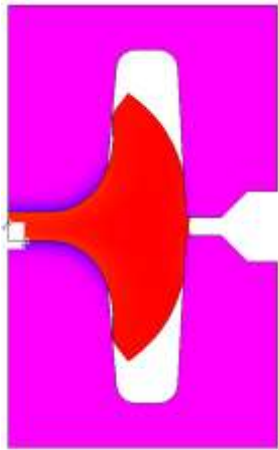
Obr. 29 Zápustka tvaru J



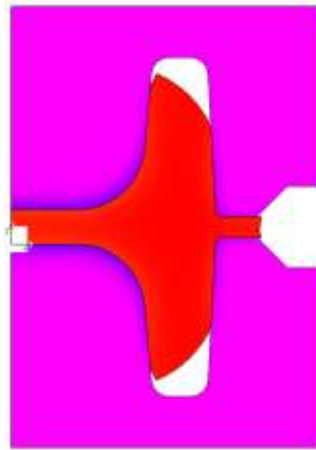
Obr. 30 Zápustka tvaru K



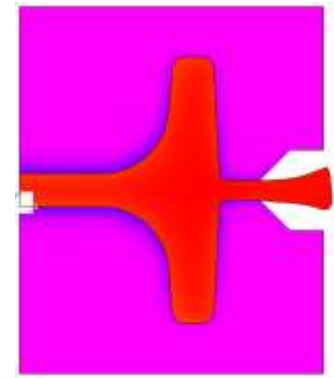
Obr. 31 Zápustka tvaru L



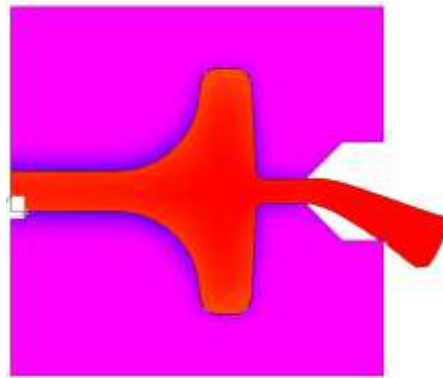
Obr. 32 Zápustka tvaru M



Obr. 33 Zápustka tvaru N



Obr. 34 Zápustka tvaru O



Obr. 35 Zápustka tvaru P

1. Nedostatek materiálu

Tento rozměr polotovaru neumožnil zaplnění dutiny zápustky. Uvedený rozměr polotovaru se týká varianty A, B, E, F, I, J, M a N. V některých z těchto variant však tvar polotovaru umožnil vniknutí malého množství materiálu do oblasti můstku výronkové drážky.

2. Zaplněná dutina zápustky, není příliš mnoho materiálu ve výronku

V této variantě došlo k úplnému zaplnění dutiny zápustky a ve výronku není příliš mnoho vytlačeného materiálu. Do této skupiny patří varianty C, G, K a O. Je to dáno především tím, že velikost dutiny je menší, než jak je to u variant v bodě 1.

3. Zaplněná dutina zápustky, příliš mnoho materiálu ve výronku

V této skupině jsou varianty s nejmenší velikostí dutiny řešených tvarů žeber. Dutina zápustky je zcela zaplněna. Je to dáno tím, že tento rozměr polotovaru je pro

dané zápustky příliš velký z hlediska objemu. Tuto skupinu reprezentují varianty D, H, L a P. U těchto variant navíc obvykle materiál vytéká do výronku již v počátečních fázích pracovního zdvihu.

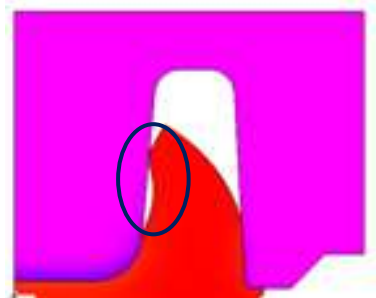
4. Nezaplněná dutina zápustky, příliš mnoho materiálu ve výronku

Jako další možností může být nezaplnění dutiny zápustky, avšak materiál příliš brzy vytéká do výronku. U těchto variant je patrně dostatečné množství materiálu, ale k nezaplnění dojde právě z důvodu předčasného vniku materiálu do prostoru výronku. Do této skupiny pro tento rozměr polotovaru lze zařadit varianty A, B, F, I a N.

U těchto variant je možné si povšimnout, že začalo zatékání materiálu do výronku, ale z důvodu velikosti žebra, není výsledek tak patrný.

5. Vyšší riziko vzniku vad - přeložky

Během průběhu simulací bylo zaznamenáno, že by mohlo dojít ke vzniku přeložek u některých modelových variant. Toto podezření vzešlo u úloh, které mají podobný ráz jako úloha I. Na obrázku Obr. 36 Detail varianty I je vidět detail varianty I s materiálem, který by při dalším tváření mohl mít sklon k vytváření přeložek.



Obr. 36 Detail varianty I

2) Polotovaru R23

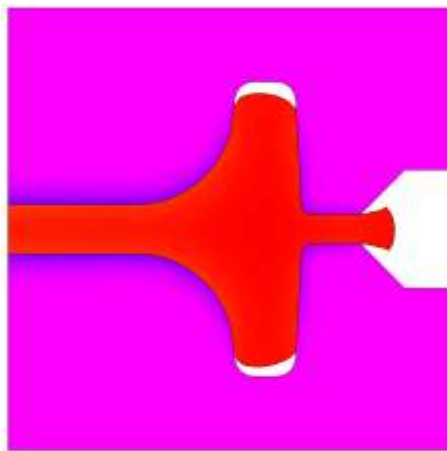
1. Nedostatek materiálu

S nedostatkem materiálu se u polotovaru R23mm můžeme setkat u téměř všech variant. K zaplnění zápustky nedošlo jak u rozměrově větších tvarů žeber, tak i u žeber menších rozměrů.

2. Zaplňená dutina zápustky, není příliš mnoho materiálu ve výrobku

V bodě 1 bylo řečeno, že se všechny varianty počítané s poloměrem polotovaru R23mm potýkají s nedostatkem materiálu. Ani u jedné varianty tedy nedošlo k úplnému zaplnění zápustky.

Z těchto všech variant jich bylo pouze několik, kdy k úplnému zaplnění chybělo pouze malé množství materiálu. Jako příklad by bylo možné uvést varianty D, H, L, P. Ovšem aby došlo k úplnému zaplnění zápustky u těchto čtyř variant, musel by objem polotovaru být o několik milimetrů větší.



Obr. 37 Zápustka tvaru P polotovaru R23

Jelikož se všechny varianty roztřídily do bodů 1 a 2, body 3-5 nelze vyhodnotit.

3) Polotovar R30

1. Nedostatek materiálu

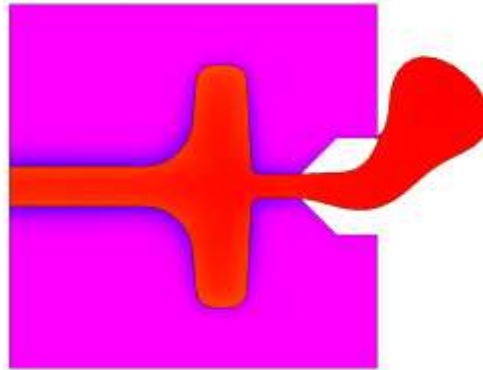
Objem materiálu v polotovar s poloměrem kruhového průřezu 30mm není dostačující pro varianty A, B, E a I.

2. Zaplňená dutina zápustky, není příliš mnoho materiálu ve výrobku

K této variantě zaplnění zápustky nedošlo. Výsledky simulací ukazují pouze varianty, kde došlo k zaplnění zápustky, ale materiálu ve výrobku je příliš.

3. Zaplňená dutina zápusťky, příliš mnoho materiálu ve výronku

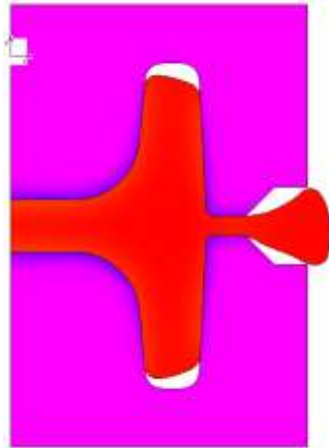
Jak již bylo řečeno v bodě 2, tak při simulování s polotovarem o poloměru 30mm bylo vypočteno několik variant, které dutinu zápusťky vyplnily dokonale, ale materiálu vytékajícího do výronkové drážky je příliš. Jedná se především o tvary žeber menších rozměrů (D, G, H, L, O, P). U těchto variant bych doporučil propočítat simulace s menším rozměrem polotovaru.



Obr. 38 Zápusťka tvaru L polotovaru R30

4. Nezaplňená dutina zápusťky, příliš mnoho materiálu ve výronku

Tento polotovar se nejvíce potýká právě s touto možností zaplnění. Vzhledem k tomu, že se nepoužívají žádné předkovací operace, jako je např. pěchování, kove se polotovar na jeden zdvih. To znamená že pokud materiál vniká do výronku ještě před zaplněním zápusťky, nejsme potom schopni zápusťku zaplnit. Polotovar, který měl dostatečný objem pro vyplnění dutiny ztrácí část ze svého objemu právě na materiál, který do výronku vniká a nastává tak varianta, kdy zápusťka není napěchována a ve výronkové drážce je příliš mnoho materiálu. Jako příklad je uvedena zápusťka pro model F na Obr. 39 Zápusťka tvaru F polotovaru R30.



Obr. 39 Zápustka tvaru F polotovaru R30

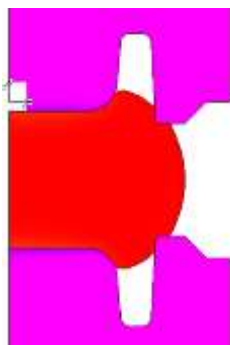
Tomuto druhu zaplnění odpovídají varianty C, F, J, K, M a N

5. Vyšší riziko vzniku vad - přeložky

Pro polotovar o průměru 30mm se neprojevila možnost vzniku přeložek či jiných vad.

Výpočet simulující model C nelze z tohoto hlediska vyhodnotit, jelikož výpočet neproběhl do konce. Při výpočtu došlo ke kolizi konečněprvkové sítě. Pro vlastní dopočítání varianty by bylo třeba zkoušet měnit parametry ovlivňující výpočet (především podmínky velikosti průniku elementů objektů vůči sobě, konvergenční kritérium a kritérium časového kroku), či přistoupit k editaci konečněprvkové sítě. Prvními navrženými opravnými kroky se výpočet nepodařilo přesto dopočítat. Změna konečněprvkové sítě by však mohla vykazovat rozdílné výsledky proti ostatním variantám, proto se tato varianta dále nevyhodnocovala. Z Obr. 40 Detail C R30 - 61% je možné usuzovat, že vzhledem k velikosti dutiny zápustky a velikosti polotovaru by došlo k zaplnění dutiny materiálem. Nelze však určit, jaké množství materiálu by vyplnilo výronkovou drážku.

Výpočet se podařilo dopočítat pouze do 61% celkového požadovaného pohybu nástroje, a z obrázku je zřejmé, že materiál aniž by zaplnil dutinu žebra, začíná vytékat ven z výronkové drážky.



Obr. 40 Detail C R30 - 61%

4) Polotovar 40x50

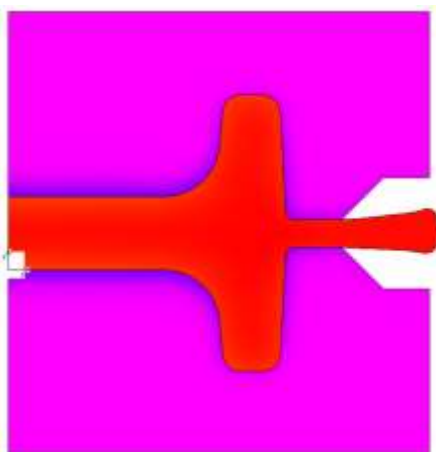
1. Nedostatek materiálu

Protože polotovar o rozměrech 40x50mm je objemově menší než varianta s polotovarem R30mm, nastalo opět mnoho situací, kdy materiálu k zaplnění zápusky nebylo mnoho a došlo tedy k tomu, že dutina zápusky zůstala nezaplňena.

Do této skupiny se řadí varianty A, B, C, E, F, G, I, J, K, M, N.

2. Zaplňená dutina zápusky, není příliš mnoho materiálu ve výrobku

Tato varianta nastala u zápusťek nejmenších rozměrů. Jelikož je polotovar 40x50mm objemově větší než polotovar s poloměrem R23mm došlo tak zaplnění zápusťek i u variant, kde právě zmíněný polotovar R23 v vyplnění nestačil (D, H, P, L). Jako porovnání obou variant slouží Obr. 41.



Obr. 41 Zápusťka tvaru D 40x50mm

3. Zaplňená dutina zápustky, příliš mnoho materiálu ve výrobku

Vzhledem k malému objemu polotovaru se tato možnost neobjevila

4. Nezaplňená dutina, příliš mnoho materiálu ve výrobku

Vzhledem k malému objemu polotovaru se tato možnost neobjevila

5. Vyšší riziko vzniku vad - přeložky

Pro polotovar o rozměrech 40x50mm se neprojevila možnost vzniku přeložek či jiných vad.

5) Polotovar 40x70

1. Nedostatek materiálu

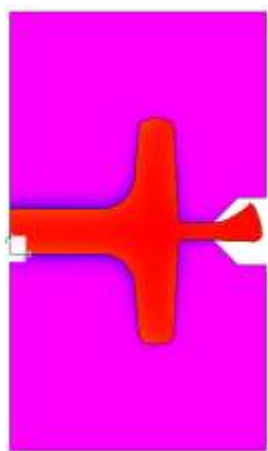
S nedostatkem materiálu se můžeme setkat u variant A, B, E, F, I, J, M, N. Opět se z toho důvodu, že objem materiálu byl nedostatečný vůči velikosti žeber.

2. Zaplňená dutina zápustky, není příliš mnoho materiálu ve výrobku

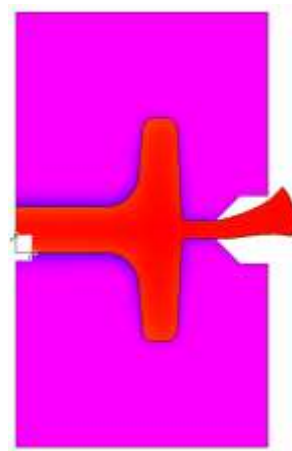
Tento druh polotovaru nemá žádný výsledek odpovídající tomuto tvrzení.

3. Zaplňená dutina zápustky, příliš mnoho materiálu ve výrobku

Protože se polotovar postupně zvětšuje, dochází k zaplnění zápustky a příliš mnoho materiálu vytéká do výrobku v čím dál více variantách (C, D, G, H, K, L, O, P). Můžeme si tohoto procesu všimnout na Obr. 42.



a) Zápustka tvaru C 40x60



b) Zápustka tvaru C 40x70

Obr. 42 Porovnání variant C pro dva různé polotovary

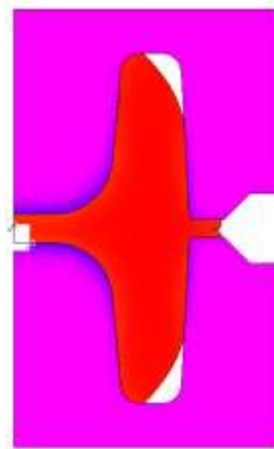
4. Nezaplňená dutina, příliš mnoho materiálu ve výrobku

Vzhledem k malému objemu polotovaru se tato možnost neobjevila

6) Polotovar 40x85

1. Nedostatek materiálu

Nedostatkem materiálu se opět prokazují dutiny, které patří ve výčtu modelů k těm největším. Jedná se o tyto A, B, E, I, M.



Obr. 43 Zápustka tvaru M 40x85

Z obrázku Obr. 43 je patrné, že materiál nezaplnil celou dutinu zápustky, ale už pomalu vniká do prostoru výrobku. Jedná se tedy o hraniční vzorek vyhodnocení. Pokud by měl polotovar větší objem zápustka by se buď mohla vyplnit a zbytek materiálu by šel do výrobku, nebo by se opět nezaplnil a ve výrobkové části by bylo nadbytek materiálu. Výčet variant, které mají podobný průběh: A, B, E, I, M,

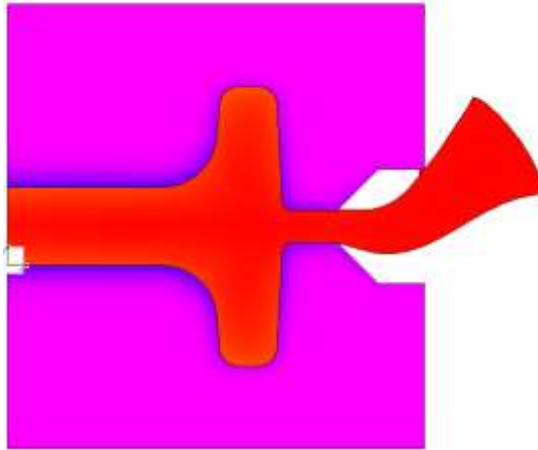
V dalších variantách se setkáme pouze s jedním vyhodnocením, které odpovídá zaplněné zápustce, kde ve výrobkové drážce je příliš mnoho materiálu. (3).

2. Zaplňená dutina zápustky, není příliš mnoho materiálu ve výrobku

K této variantě zaplnění zápustky nedošlo. Výsledky simulací ukazují pouze varianty, kde došlo k zaplnění zápustky, ale materiálu ve výrobku je příliš.

3. Zaplňená dutina zápustky, příliš mnoho materiálu ve výrobku

Polotovar s rozměry 40x85mm je natolik objemově velký, že většina námi počítaných variant skončila tak, že se sice zaplnila zápustka, ale výronek je opravdu velký a dochází tak k velkému množství nevyužitého materiálu, tedy plýtvání.



Obr. 44 Zápustka tvaru D 40x85

4. Nezaplňená dutina, příliš mnoho materiálu ve výrobku

Vzhledem k malému objemu polotovaru se tato možnost neobjevila

7) Polotovaru 58x59

1. Nedostatek materiálu

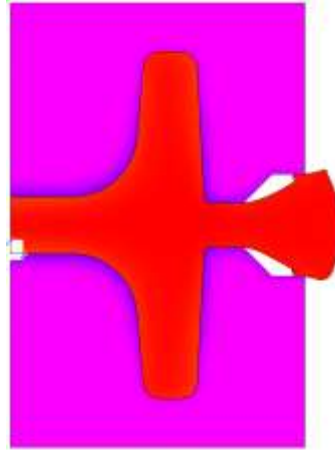
U žádné z vypočtených simulací nedošlo při dokončení cyklu k nedostatku materiálu.

2. Zaplňená dutina zápustky, není příliš mnoho materiálu ve výrobku

Simulace neprokázaly přítomnost tohoto druhu zaplnění dutiny zápustky pro polotovar o rozměrech 58x59mm.

3. Zaplňená dutina zápustky, příliš mnoho materiálu ve výrobku

Pro všechny spočítané varianty (A-P) nastala právě tato možnost zaplnění dutiny zápustky.



Obr. 45 Zápustka tvaru N 58x59

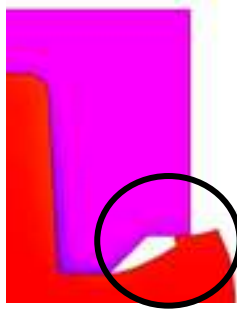
Na Obr. 45 je názorně vidět přebytek materiálu zateklého do výronkové drážky.

4. Nezaplňená dutina, příliš mnoho materiálu ve výronku

Vzhledem k malému objemu polotovaru se tato možnost neobjevila

5. Vyšší riziko vzniku vad - přeložky

Také je možné všimnout si, jak je materiál deformován (detail na Obr. 46) v oblasti výronku. Tímto procesem může dojít k značnému opotřebení nástrojů.



Obr. 46 Detail zdeformovaného materiálu ve výronku

9. Závěr

Diplomová práce pojednává o problematice zápustkového kování a je rozdělena do dvou základních částí, teoretické a praktické.

V teoretické část práce se popisuje rozdělení technologie tváření a faktory, které tuto technologii ovlivňují. Dále je rozdělení tvářecích strojů, které jsou používány nejčastěji, materiálů používaných pro výrobu výkovků se zaměřením především na slitiny hliníku, konkrétně na slitinu AA 2420.

V praktické části bylo navrženo sedm různých tvarů polotovarů. Jednalo se o polotovary podlouhlého tvaru kruhového, nebo obdélníkového průřezu. Dále je popsána geometrie navržených žeber s celkovým počtem 16, pro které byly stanoveny podmínky nastavení úloh. Tyto varianty byly vypočteny a následně vyhodnoceny.

Do procesu zápustkového kování kromě velikosti a tvaru polotovaru vstupují parametry jako druh použitého materiálu, použití mazadla a třecí faktor. Nedostatky, které se projevily při zaplňování dutiny zápustky, se týkaly přebytku materiálu, nedostatku materiálu či zatékání materiálu polotovaru do výronku před úplným zaplněním zápustky. Bylo prokázáno, že teplota nemá přímý vliv na zaplnitelnost dutiny zápustky, ale je spojena se silami a přetvárným odporem.

Vzhledem k tomu, že s narůstající výškou a úzkým profilem žebra (viz. Varianty A, B, E, I, M) vzrůstá pravděpodobnost špatně vyplněné zápustky, lze doporučit, aby se polotovar před samotným zápustkovým kovááním pěchoval. Naopak tvar zápustky, vyznačující se malou výškou žebra (viz. D, H, O, P), pěchovat není třeba.

Výsledky této práce pomohou firmě Strojmetal při konstrukci výkovků zjistit, jaké velikosti žeber v závislosti na tvaru polotovaru je možné ještě zaplnit. Dále pak je možné sledovat chování materiálu při zaplňování dutiny nástroje při simulaci rozličných podmínek, zahrnujících druh použitého polotovaru a materiálu, ze kterého je vyroben. V dalších simulacích by bylo snadné rozšířit tyto varianty o jiný druh použitého maziva, a tím o jiný třecí faktor. Dále by bylo možné optimalizovat použitý druh výrobního stroje dle typu výrobního zařízení dané firmy.

S ohledem na výsledky práce bych doporučoval pokračovat v práci v oblasti dalších tvarů polotovarů, měnit podmínky simulace z hlediska tření a řešit možné předkovací operace polotovaru. Dále by bylo možné sledovat průběh sil, působících jak na tvářený polotovar, tak i na samotnou zápustku.

S ohledem na rychlost a rozličnost variant představuje simulační SW FormFem v oblasti zápustkového kování nezbytnou pomoc při hledání optimálních tvarů žeber a polotovarů.

10. Literatura

- [01] Rozdělení způsobů tváření. Strojnická příručka [online]. 2004, (část 13, díl 3), 4 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: http://www.dashofer.cz/download/pdf/stp/13_tvareni.pdf?wa=W
- [02] Tváření [online]. , 33 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/T/T06.pdf>
- [03] Polotovary vyráběné tvářením za tepla [online]. , 2 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslo/Tvareni_za_tepla.pdf
- [04] FABÍK, Richard. Tváření kovů [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2016-07-18]. Dostupné z: <https://http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>
- [05] Základní termodynamické pojmy [online]. , 7 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/pojmy2.pdf>
- [06] GRÁF, Radomír. Zápustkové kování pastorku [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37429.
Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Marek Štroner, Ph.D.
- [07] Technologie objemového tváření: Kování [online]. In: . [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm
- [08] Tváření za tepla [online]. In: . s. 10 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: <http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep12.pdf>
- [09] BC. VAŠKO, Michal. Technologie zápustkového kování hřídele [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28522. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Miroslav Šlais.
- [10] LEIDORF, Michal. Zápustkové kování náboje kola [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16847. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Marek Štroner, Ph.D.

[11] Tváření: Zápustky, rozdělení, úpravy [online]. Brno, 2012, (VY_32_INOVACE_20-07) [cit. 2016-07-20].

Dostupné z:
http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_20-07.pdf

[12] RYBKA, Herbert. Kování [online]. 2014, 46 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z:
<http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/PRA/Kovani-UT.pdf>

[13] Doc. Ing. MAŇAS, Stanislav CSC. Výrobní stroje a zařízení: Tvářecí stroje [online]. Praha, 2007, s. 87 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z:
http://media1.vesele.info/files/media1:50f871732e1a2.pdf.upl/VSZ_-_Tvareci_stroje.pdf

[14] Doc. Ing. NOVOTNÝ, Karel, CSc. Výrobní stroje a zařízení: Tvářecí stroje [online]. Brno, 2002, s. 122 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z:
http://media1.vesele.info/files/media1:50f871732e1a2.pdf.upl/VSZ_-_Tvareci_stroje.pdf

[15] Bc. PLUSKAL, Martin. Výroba nosiče tvářením [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4992. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Miloslav Kopřiva.

[16] Bc. BRADÁČ, Tomáš. Zápustkové kování ozubeného kola [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27738. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Marek Štroner, Ph.D.

[17] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. Třetí doplněné vydání. Albra, 2006.

[18] Prof. Ing. ČADA, Radek CSc, Ing. MACHÁLEK, Jakub a Ing. Frodllová, Barbora. Týmová cvičení předmětu technologie tváření a slévání [online]. Ostrava, 2012, 136 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2718-6.pdf>

- [19] ITA: technology and software [online]. Partman, 2007 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: <http://www.ita-tech.cz/cs/produkty-a-sluzby/pocitacove-simulace-mkp/objemove-tvareni>
- [20] Zkoušky bez porušení materiálu [online]. , 13 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: http://www.ssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_ultrazvukem.pdf
- [21] Hliník a jeho slitiny [online]. , 22 [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&sqi=2&ved=0ahUKEwiWzb60sbzOAhWLvxQKHRhsDeAQFgghMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.kmt.tul.cz%2Fedu%2Fpodklady_kmt_bakalari%2FNOM2%2FHLINIK_a_jeho_slitiny_podklady.ppt&usg=AFQjCNEGp-6R2WODvfd6PMUb4gr-PWF9fA&sig2=ltO7ppil32wqbTk3sJpmqQ&bvm=bv.129422649,d.bGs&cad=rja
- [22] Hliník a jeho slitiny [online]. [cit. 2016-07-20]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/o-hliniku>

11. Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení způsobů tváření [01]	10
Obr. 2 Tvary kovadel [07]	14
Obr. 3 Schéma zápusťkového kování [10]	16
Obr. 4 Postup zápusťkového kování	17
Obr. 5 Konstrukce průřezového obrazce [18]	19
Obr. 6 Typy výronkových drážek pro zápusťky bucharů [16], [18]	20
Obr. 7 Základní typy výronkových drážek pro zápusťky lisů [16], [18]	20
Obr. 8 Simulace vzniku přeložky [19]	21
Obr. 9 Základní uspořádání tvářecího stroje s přímočarým pohybem nástroje [13]	24
Obr. 10 Základní rozdělení tvářecích strojů s přímočarým pohybem nástroje [13]	24
Obr. 11 Plastické vlastnosti materiálu AA 2024	29
Obr. 12 Tepelná roztažnost	29
Obr. 13 Obecný tvar žebra	30
Obr. 14 Nastavení programu FormFem - geometrie	34
Obr. 15 Konečněprvková síť	35
Obr. 16 Zobrazení výsledků v SW FormFem	37
Obr. 17 Porovnání zaplnění dutiny zápusťky s ohledem na teploty	38
Obr. 18 Kontaktní tlaky působící ve směru pohybu nástroje	39
Obr. 19 Kontaktní tlaky s tendencí na vybočení nástroje	40
Obr. 20 Zápusťka tvaru A	42
Obr. 21 Zápusťka tvaru	42
B Obr. 22 Zápusťka tvaru C	42
Obr. 23 Zápusťka tvaru D	43
Obr. 24 Zápusťka tvaru E	43
Obr. 25 Zápusťka tvaru F	43
Obr. 26 Zápusťka tvaru G	43
Obr. 27 Zápusťka tvaru H	43
Obr. 28 Zápusťka tvaru I	43
Obr. 29 Zápusťka tvaru J	43
Obr. 30 Zápusťka tvaru K	43
Obr. 31 Zápusťka tvaru L	43

Obr. 32 Zápustka tvaru M	44
Obr. 33 Zápustka tvaru N	44
Obr. 34 Zápustka tvaru O	44
Obr. 35 Zápustka tvaru P	44
Obr. 36 Detail varianty I	45
Obr. 37 Zápustka tvaru P polotovaru R23	46
Obr. 38 Zápustka tvaru L polotovaru R30	47
Obr. 39 Zápustka tvaru F polotovaru R30	48
Obr. 40 Detail C R30 - 61%	49
Obr. 41 Zápustka tvaru D 40x50mm	49
Obr. 42 Porovnání variant C pro dva různé polotovary	50
Obr. 43 Zápustka tvaru M 40x85	51
Obr. 44 Zápustka tvaru D 40x85	52
Obr. 45 Zápustka tvaru N 58x59	53
Obr. 46 Detail zdeformovaného materiálu ve výrobku	53

12. Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení materiálu AA2024.....	28
Tab. 2 Mechanické vlastnosti materiálu AA 2024	28
Tab. 3 Rozsah hodnot	30
Tab. 4 Rozměry jednotlivých variant	31
Tab. 5 Stanovení rozměrů polotovaru.....	33
Tab. 6 Vliv teploty na normálová napětí	40

13. Seznam grafů

Graf 1 Průběh působení sil na nástroje v závislosti na čase (400°C)	41
Graf 2 Průběh působení sil na nástroje v závislosti na čase (500°C)	41
Graf 3 Průběh působení sil na nástroje v závislosti na čase (600°C)	42

14. Příloha

Vypočtené simulace, i se všemi výsledky, jsou uloženy na přiloženém DVD.