

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská  
metalurgie

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Optimalizace výrobního procesu zápusťkového výkovku ojnice

Autor: **Bc. Martin Jurek**

Vedoucí práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin JUREK**  
Osobní číslo: **S14N0088P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**  
Název tématu: **Optimalizace výrobního procesu zápustkového výkovku ojnice**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedení analýzy stávajícího procesu výroby
2. Analýza tvaru stávajícího předkovku
3. Provedení simulace zápustkového kování s ohledem na současný výskyt kovářských vad (přeložky, rozměrová nepřesnost)
4. Návrh úpravy tvaru předkovku a vlastního tvaru dutiny zápustky
5. Provedení kontrolních simulací zápustkového kování s následnou korekcí tvaru předkovku a kovací dutiny
6. Celkové zhodnocení navržených variant a doporučení úpravy technologie kování
7. Závěr

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **50-60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

- Hašek, V. et al.: **Kování. I. vydání Praha, SNTL 1965**
- Čermák, J.; Šanovec, J.: **Přípravky a nástroje pro tváření kovů za tepla. Skripta ČVUT Praha, 1973**
- **ASM Handbook Volume 14A: Metalworking, Bulk Forming, March 2006, ASM**
- **www.deform.com**
- **Altan, T.: Cold and Hot Forging. Fundamentals and Application, ASM 2005**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Aleš Hejduk**

CPF

Datum zadání diplomové práce:

**21. září 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**20. května 2016**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž  
vedoucí katedry

V Plzni dne 22. září 2014

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Bc. Jurek	<b>Jméno</b> Martin	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulu)</b> Ing. Benešová, Ph.D.	<b>Jméno</b> Soňa	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optimalizace výrobního procesu zápusťového výkovku ojnice		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZDANÍ</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	----------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	84	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	63	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	7
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 5 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY a PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce je zaměřená na využití numerického modelování při simulaci procesu zápusťového kování ojnice. Úkolem bylo na základě výsledků simulace stávající výrobního procesu provést optimalizaci tvaru předkovku s cílem zabránit tvorbě přeložek, redukovat hmotnosti výkovku a snížení počtu úderů pro vykování. Ukázalo se, že jeden z návrhů předkovku uspořil materiál, výrazně snížil počet úderů a nedocházelo u něho k tvorbě přeložek na povrchu výkovku. Tyto výsledky mohou podstatným způsobem zmenšit výrobní náklady a prodloužit životnost zápusťky.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">Zápusťkové kování, numerické modelování, ojnice</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Jurek	Name Martin	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of degrees) Ing. Benešová, Ph.D.	Name Soňa	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Optimization of industrial process closed-die forging of forged connection rod.		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	84	<b>TEXT PART</b>	63	<b>GRAPHICAL PART</b>	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This thesis is aimed at usage of numerical modelling for process of simulation in closed-die forging of connection rod. The aim was: to make optimization of the preform shape on the basic of results of simulation of current industrial process to prevent creations of laps, to reduce weight of forgings and to lower the number of stroke for forging. It proved that one of the proposals of preform saved material, it lowered the number of strokes and the laps didn't make on forged surface. These results can decrease production costs and extend the shelf life.</p>
<b>KEY WORDS</b>	Closed-die forging, numerical modelling, connection rod.

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	9
1 Úvod .....	11
2 Kování .....	12
2.1 Plastická deformace .....	13
2.2 Tvářecí faktory a jejich význam .....	13
2.2.1 Stav napjatosti .....	14
2.2.2 Rychlost deformace .....	16
2.2.3 Teplota .....	17
2.2.4 Stupeň deformace .....	17
2.3 Volné kování .....	18
2.4 Zápustkové kování .....	18
3 Zápustky .....	19
3.1 Typy zápustek a jejich konstrukce .....	19
3.1.1 Bucharové zápustky .....	20
3.1.2 Jednodutinové zápustky .....	20
3.1.3 Postupová zápustka .....	21
3.2 Namáhání a životnost zápustek .....	22
3.3 Materiál zápustek .....	23
3.3.1 Oceli wolframové .....	24
3.3.2 Oceli uhlíkové .....	24
3.3.3 Oceli Chrommolybdenové .....	24
4 Výkovek .....	24
4.1 Dělicí rovina .....	24
4.2 Přídavky na obrábění a technologické přídavky .....	25
4.2.1 Přídavky na obrábění .....	25
4.2.2 Technologické přídavky .....	25
4.2.3 Úkosy bočních ploch výkovku .....	26
4.2.4 Nejmenší tloušťky stěny nebo dna výkovku .....	26
4.2.5 Zaoblení hran .....	27
4.3 Mezní úchytky .....	28
4.4 Vady výkovku .....	29

1.1.1	Nevyplnění tvaru .....	29
4.4.1	Přeložky.....	29
4.5	Průběh vláken .....	30
5	Numerické modelování .....	31
6	Experimentální část diplomové práce .....	33
6.1	Charakteristika ojnice .....	33
6.2	Provedení analýzy stávajícího procesu výroby .....	34
7	Analýza tvaru stávajícího předkovku .....	37
7.1	Návrh tvaru předkovku .....	37
7.2	Simulace stávajícího stavu výroby .....	39
7.3	Analýza tvaru předkovku stávajícího způsobu kování .....	44
8	Cesty optimalizace stávajícího postupu kování .....	47
8.1	Postup při návrhu optimálního tvaru předkovku .....	47
9	Provedení kontrolních simulací.....	51
9.1	Simulace varianty A .....	51
9.2	Simulace varianty B.....	53
9.3	Simulace varianty C.....	55
9.4	Simulace varianty D .....	59
9.5	Simulace varianty E.....	61
9.6	Simulace s uvažováním vedení tepla v obou dílech zápusťky.....	62
10	Celkové zhodnocení navržených variant.....	65
11	Ekonomicko-technologické zhodnocení .....	70
12	Závěr.....	72
13	Seznam literatury.....	74
	Grafická příloha.....	77
	Seznam příloh:.....	77



## Seznam použitých zkratk a symbolů

<b><math>T_t</math></b>	.....	Teplota tání kovu [K]
<b><math>\tau_{kr}</math></b>	.....	Kritické smykové napětí [MPa]
<b><math>\tau</math></b>	.....	Smykové napětí [MPa]
<b><math>\tau_8</math></b>	.....	Tangenciální oktaedrické napětí [MPa]
<b><math>\sigma_8</math></b>	.....	Normálové oktaedrické napětí [MPa]
<b><math>S_\sigma</math></b>	.....	Intenzita napětí [MPa]
<b><math>S_\varepsilon</math></b>	.....	Intenzita deformace
<b><math>\sigma</math></b>	.....	Hlavní normálové napětí [MPa]
<b><math>\varepsilon</math></b>	.....	Hlavní poměrná lineární deformace
<b><math>c</math></b>	.....	Rychlost deformace [ $s^{-1}$ ]
<b><math>\varphi</math></b>	.....	Logaritmická deformace
<b>FEM</b>	.....	Finite Element Method
<b>CAD</b>	.....	Computer Aided Design

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí své diplomové práce Ing. Soně Benešové, Ph.D. za poskytnutí odborného dohledu. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vladimíru Lüftnerovi, Zdeňku Langrovi a konzultantovi Aleši Hejdukovi za čas a cenné rady při tvorbě této práce.

Tato diplomová práce a provedené analýzy byly realizovány na základě řešení studentského projektu SGS-2016-036 „Analýza, vývoj a modifikace strojírenské technologie v oblasti objemového zpracování moderních materiálů, využívaných v oblasti energetických strojů, dopravních prostředků a souvisejících strojírenských aplikací“.

## 1 Úvod

V dnešní době je cílem vyrábět výrobky co možná nejjednodušším, nejefektivnějším způsobem a s nízkými náklady. Týká se to také výrobků vyráběných technologií kování. Technologie kování má na rozdíl od jiných technologií (např. lití) řadu výhod. Kováním se získají zcela jiné a lepší mechanické, technologické vlastnosti výchozího výrobku. Aby mohly být splněny požadované technologické a mechanické vlastnosti u mnohých výrobků, tak jejich jedinou možností výroby bývá kování. Typickým příkladem výrobku vyráběného technologií kování je ojnice. Na ojnice pro pístové kompresory jsou kladeny značné nároky na mechanické vlastnosti, z důvodu značného namáhání při provozu. Výrobek vyrobený kováním má mnohem vyšší mechanické vlastnosti než stejný výrobek vyrobený např. litím.

I když zkušenosti a znalosti ve výrobě součástí technologií kování pokročily v posledních desetiletích směrem k dokonalosti. Existují možnosti pro optimalizaci výrobního procesu. Proto je výhodné využití moderní výpočetní techniky pro simulování výrobního procesu. Jen tak je možné v některých případech odhalit slabá místa ve výrobním procesu. V současnosti je zcela běžné použití numerických modelovacích programů v automobilovém průmyslu, kde se využívají například ke zkoumání proudění vzduchu kolem karoserie vozidla. Pro simulaci tvářecích operací existuje celá řada numerických modelovacích programů například Deform<sup>TM</sup>-3D.

Tato diplomová práce je zaměřena na optimalizaci výrobního procesu zápusťkového výkovku ojnice ve společnosti CZECH PRECISION FORGE a.s. Práce bude cílena na využití numerického modelovacího programu Deform<sup>TM</sup>-3D. Úkolem simulačního softwaru bude simulovat stávající stav výroby ojnice. Výsledek simulace ukáže případné kovářské vady ve výkovku (rozměrové nepřesnosti, přeložky). Na základě dat získaných ze simulace se vytvoří návrhy úpravy tvaru předkovku, které také prověří Deform<sup>TM</sup>-3D. Jednotlivé návrhy se na závěr vzájemně porovnají a zhodnotí z hlediska tvorby kovářských vad, hmotnosti, počtu úderů nutných pro vykování atd.

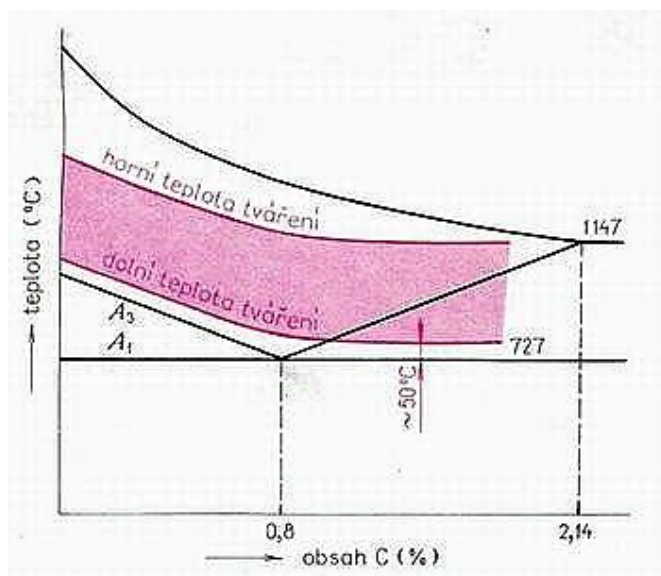
## 2 Kování

Kování se řadí mezi metody objemového tváření za tepla, kdy je materiál přemíst'ován ve třech směrech souřadnicového systému a to podle zákona nejmenšího odporu.

Tato diplomová práce je zaměřená na zápustkové kování, z toho důvodu budou popsány pouze pochody probíhající při tváření za tepla.

Během tváření se porušuje vnitřní uspořádání kovu, zvyšuje se množství poruch a hromadí se dislokace v zrně kovu. Aby se mohl materiál plasticky deformovat, musí se dislokace pohybovat materiálem. Jejich pohybu brání zvětšující se množství poruch a jiné dislokace. Proto je k překonání těchto překážek zapotřebí větší síly. Jinými slovy materiál postupně klade větší odpor proti dalšímu přetvoření, což se projeví nárůstem meze kluzu a meze pevnosti v tahu. Tomuto ději se říká zpevňování. Zároveň však dochází k poklesu tažnosti a plastických vlastností.

Tváření za tepla je vymezeno tzv. rekrytalizační teplotou. Pro tváření za tepla (u čistých kovů) se uvádí teploty nad rekrytalizační teplotou, tedy 0,35 až 0,45 Tt (teplota tání kovu v Kelvinech). Ale v praxi se tváření za tepla provádí nad teplotou 0,7 Tt. Při tváření za tepla (nad teplotou rekrytalizace) je deformační zpevňování materiálu potlačeno, pevnostní a plastické vlastnosti se výrazně nemění. Způsobeno je to tím, že během tváření za tepla dochází sice ke zpevňování, ale zároveň s ním probíhá odpevňovací proces (rekrytalizace), který se projevuje růstem nových nedeformovaných zrn kovu. S rostoucí teplotou a stupněm deformace roste i rychlost, s jakou se kov rekrytalizuje. Pokud je rychlost rekrytalizace větší než rychlost deformace kovu, je výsledná struktura tvořena zcela nedeformovanými zrny kovu.



Vhodně zvolená kovací teplota je důležitá z hlediska dosažení požadovaných vlastností tvářeného kovu. U uhlíkových ocelí se ideální teplota pro kování pohybuje v pásmu teplot, jejíž spodní hranice se nachází 50 °C nad křivkami A<sub>3</sub> a A<sub>1</sub>. Horní hranice pak leží 200 až 300 °C pod solidem. Optimální teploty pro kování jsou vyobrazeny na obrázku č. 1. Tato oblast odpovídá oblasti austenitu oceli, při které je nejlépe tvárná, z důvodu plošně centrované mřížky austenitu, v níž se nachází nejvíce skluzových systémů. [2], [3], [4], [5], [6], [7]

Obr. 1 Pásmo kovacích teplot. Zdroj [1]

## 2.1 Plastická deformace

Při tváření, včetně kování, musí v materiálu dojít k trvalé (plastické) deformaci bez porušení soudržnosti materiálu. Plastická deformace je v materiálu vytvořena působením vnějších sil. V případě kování je to působení zápuštěk na tvářený kov. K vytvoření plastické deformace je zapotřebí vyvození mezní hodnoty vnějších sil. Projevem plastické deformace je změna tvaru materiálu, mechanických a fyzikálních vlastností. Atomy kovu se při účincích vnějších sil vychylují ze svých rovnovážných poloh. Každá změna polohy atomů vyvolá změnu průběhu pole potenciálních energií v materiálu. To se projeví na vyvození napětového stavu uvnitř materiálu. Oproti elastické deformaci se vychýlené atomy při plastické deformaci do původního místa po odezdění vnější síly již nevrátí. Aby došlo k plastické deformaci, musí být materiál vystaven takovému napětí, jehož hodnota dosahuje meze kluzu daného materiálu. Nejčastějším mechanismem plastické deformace je skluz. Ke skluzu dojde působením smykového napětí. Toto napětí se označuje jako kritické smykové napětí ( $\tau_{kr}$ ). V reálném kovu je značné množství mřížkových poruch, hlavně dislokací. Princip mechanismu skluzu je založen na tom, že pokud rostoucí napětí v tvářeném materiálu překročí hodnotu kritického smykového napětí, dojde k posunu dislokací v dislokační rovině. Skluz dislokací se projeví posunem jedné části krystalu po druhé.

Zákonitostmi, jimiž se skluzový mechanismus řídí:

- Skluz nastává v rovinách, které jsou nejhustěji obsazené atomy.
- Směr skluzu je totožný se směrem nejvíce obsazenými atomy.
- Z možných skluzových rovin a směrů se uplatňuje ten, v kterém skluzové napětí dosahuje maximální hodnoty ( $\tau_{kr}$ ).
- Smykové napětí dosahuje maximální hodnoty v rovině skloněné pod úhlem  $45^\circ$  vůči působící vnější síle.[8], [5], [2]

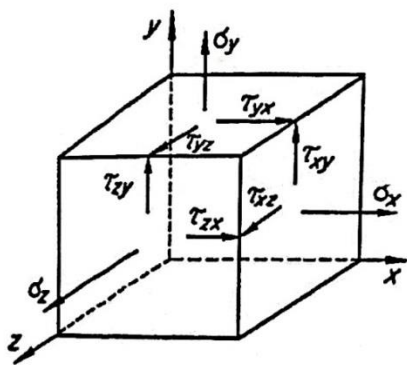
## 2.2 Tvářecí faktory a jejich význam

Chování materiálu při plastické deformaci závisí na fyzikálně-metalurgickém charakteru materiálu (oceli). Charakter ocelí je odvozen od chemického složení a strukturního stavu. Chemické složení jako základní materiálová charakteristika je rozlišovacím kritériem pro jednotlivé druhy ocelí. Z hlediska strukturního stavu je ocel určovaná podle počtu strukturních složek, dále podle velikosti, tvaru a orientace zrn. V neposlední řadě je určena zpracovaným stavem struktury oceli (struktura litá, protvářená). Během plastické deformace je potom chování materiálu určováno tzv. základními tvářecími faktory. Mezi tyto faktory patří: *stav napjatosti, stupeň deformace, rychlost deformace, teplota*. Dále chování materiálu při plastické deformaci ovlivňuje tření a mohou ji také ovlivňovat další faktory jako např. tzv. historie zatěžování nebo rozměrový faktor. [9]

## 2.2.1 Stav napjatosti

Působením vnějších sil se tvářený materiál dostává do určitého stavu napjatosti. Vnější síly lze rozdělit na dva druhy. Prvním druhem vnějších sil jsou síly, kterými působí tvářecí stroj na tvářený materiál. Druhý druh vnějších sil (třecí síla) vzniká ve styčné ploše mezi tvářeným materiálem a nástrojem. Třecí síla může vyvolat odpor v tvářené části a zvýšit tak potřebnou vnější sílu na přetvoření materiálu. V případě, že relativní pohyb tečení tvářeného materiálu odpovídá směru působící síly nástroje, působí třecí síla na snížení vynaložené síly potřebné k zaplnění dutiny. Třecí síla působící ve stykové ploše má tedy vliv na zaplnění dutiny zápustky.

Napjatost vzniká jako účinek vnitřních sil vztažených na jednotku plochy, které vznikly působením vnějších sil na tvářený materiál. Na obrázku č. 2 je znázorněn obecný stav napjatosti libovolného hmotného bodu tělesa, znázorněného v ortogonálních souřadnicích. Napjatost je určena třemi složkami normálových napětí ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ) a šesti složkami smykových napětí ( $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$ ). První index smykových napětí značí směr normály kolmý k dané rovině. Druhý index je pak směr působení napětí. Obecný stav napjatosti lze upravit na 6 složek použitím zákona sdružených smykových napětí. Pomocí tohoto zákona se smyková napětí zredukuje na tři složky ( $\tau_x$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_z$ ). V případě, že je souřadnicový systém vhodně natočen, je možné získat tzv. hlavní souřadnicový systém. V tomto systému jsou smyková napětí nulová. Napjatost je pak vyjádřena pouze tzv. hlavními normálovými napětími ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ). Na obrázku č. 3 je znázorněn tenzor napjatosti hmotného bodu, vyjádřený pouze hlavními napětími.

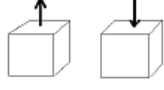
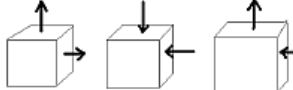
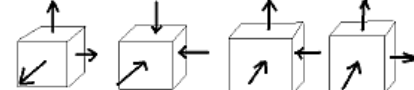


Obr. 2 Schéma obecného stavu napjatosti v obecném bodě. Zdroj [8]

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}$$


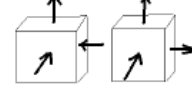
Obr. 3 Tenzor napjatosti. Zdroj [8]

Pro znázornění směru napětí a deformací, která jsou typická pro konkrétní technologické postupy, se stanovují tzv. mechanická schémata, která jsou tvořena schématy hlavních napětí a deformace. Schémata hlavních napětí se rozdělují podle počtu působících hlavních napětí na: *jednoosý stav napjatosti*, *rovinný stav napjatosti*, *prostorový stav napjatosti*. Z obrázku č. 4 je patrné, že hlavní napětí působí buďto tlakem (-) nebo tahem (+).

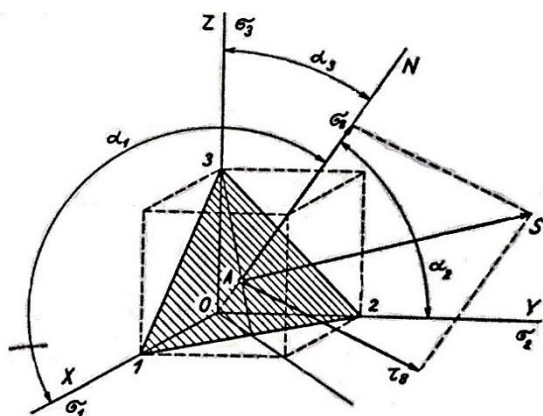
		
$(+,0,0)$ $(-,0,0)$	$(+,+,0)$ $(-,-,+)$ $(+,-,0)$	$(+,+,+)$ $(-,-,-)$ $(+,-,-)$ $(+,-,+)$
Jednoosý stav napjatosti	Rovinný stav napjatosti	Prostorový stav napjatosti

Obr. 4 Schémata hlavních napětí. Zdroj [2]

Celkově je možné vytvořit devět schémat napětí (viz obrázek č. 4). Úkolem schémat deformace je popisovat změny rozměrů, ke kterým dochází při různých tvářecích operacích. Celkem jsou možné tři varianty schémat deformace. Záporná hodnota deformace značí, že se rozměr zmenšuje a kladná hodnota vyjadřuje zvětšení rozměru. Spojením obou druhů schémat je možné dostat konkrétní představu o průběhu tvářecího procesu. [2], [5], [8], [10]

	
$(+,0,-)$	$(+,-,-)$ $(+,+,-)$
Rovinný stav deformace	Prostorový stav deformace

Obr. 5 Schémata deformace.  
Zdroj [2]



Obr. 6 Napětí na oktaedrické rovině.  
Zdroj [10]

Význam mechanických schémat v návaznosti na tvářitelnost souvisí s tzv. oktaedrickým napětím, které se vypočítá jako aritmetický průměr tří hlavních napětí. V případě, že oktaedrické napětí je tlakové, vykazuje materiál vyšší tvářitelnost (zatahuje trhliny, dutiny), jeli však tahové, můžeme očekávat rychlé vyčerpání plasticity a následné porušení celistvosti (trhliny). Z obrázku č. 6 je možné vidět, že toto napětí lze složit ze složek tangenciálního oktaedrického napětí ( $\tau_8$ ), normálového oktaedrického napětí ( $\sigma_8$ ). Celkový účinek všech složek napětí (hlavní normálové napětí a tangenciální napětí) působící v bodě tělesa, lze vyjádřit pomocí tzv. intenzity napětí (synonymem je tzv. efektivní napětí).

*Intenzita napětí:*

$$S_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Kde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  jsou hlavních napětí [MPa].

Intenzita napětí má vliv na průběh tvárnosti materiálu, jelikož udává hodnotu deformačního odporu, kterou částice kladou při změně tvaru materiálu. Dále je nutné zavést tzv. intenzitu deformace. Charakterizuje velikost a průběh změny tvaru plasticky tvářeného materiálu ve zvoleném bodě tělesa.

*Intenzita deformace:*

$$S_{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (2)$$

Kde  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  jsou hlavní poměrné lineární deformace. [5], [2], [8], [10], [11]

### 2.2.2 Rychlost deformace

Během tváření se částice materiálu přemísťují a konají relativní pohyb.

*Rychlost deformace:*

$$c = \frac{d\epsilon}{dt} [\text{s}^{-1}] \quad (3)$$

Kde  $d\epsilon$  je elementární poměrná lineární deformace a  $dt$  je nekonečně malý časový úsek [s].

*Rychlost deformace při přechování:*

$$c = \frac{dh}{h} \frac{1}{dt} = \frac{v}{h} [\text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Kde  $v$  je rychlost nástroje [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] a  $h$  je okamžitá výška [m].

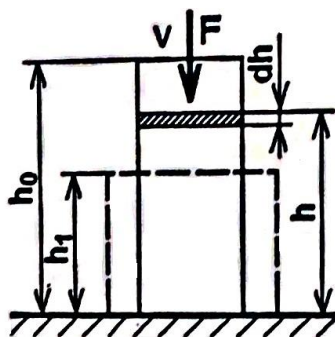


Vztah (4) vyjadřuje poměr rychlosti nástroje ( $v$ ) k okamžité výšce ( $h$ ). Rychlost deformace je hlavním faktorem zejména při tváření za tepla. Při tváření za tepla je rozhodující rekrystalizace, která je časově limitovaný proces. Při rekrystalizaci nejprve dochází k tvorbě rekrystalizačních zárodků, z kterých postupně rostou rekrystalizovaná zrna. Pro tvorbu zárodků je vždy nutný čas, tzv. inkubační čas. S rostoucí teplotou se inkubační doba zkracuje. Při vysoké rychlosti deformace rekrystalizace neprobíhá dokonale, z toho důvodu začíná převažovat během vlastní deformace zpevňovací účinek nad rekrystalizací. Důsledkem převažujícího zpevňovacího procesu je zvýšení deformačního odporu. K jeho překonání je zapotřebí vynaložit větší energii nebo sílu. S vyšší teplotou roste vliv rychlosti deformace. V programu Deform se při numerických simulacích zpevňovací charakteristiky každého materiálu definují deformačními charakteristikami, tzv. křivkami „flow stress“, které jsou v obecném případě vždy funkcí teploty a rychlosti deformace. [5], [8], [10]

### 2.2.3 Teplota

Teplota je určující faktor pro rozdělení tvářecích procesů na tváření za tepla a za studena. Teoretickou hranicí pro tváření za tepla je rekrystalizační teplota. Pro uhlíkové oceli v austenitické oblasti tvářecí teplota začíná nad teplotou  $A_{C3}$ . Více bylo k této problematice pojednáno v kapitole č. 2.

### 2.2.4 Stupeň deformace



Obr. 7 Logaritmičká deformace. Zdroj [8]

Stupeň deformace vyjadřujeme různými způsoby, a to jako absolutní, poměrnou lineární nebo logaritmičká (přirozená) deformace. Ve tváření má opodstatnění používání logaritmičké (přirozené).

Stupeň deformace si lze představit jako stlačení tělesa (viz obrázek č. 7) z výchozí výšky  $h_0$  na výšku  $h_1$ . Celková logaritmičká deformace se vypočítá tak, že se elementární změna výšky vypočítá pomocí integrálu s mezemi od  $h_0$  do  $h_1$ .

*Logaritmičká deformace:*

$$\varphi = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (5)$$

Kde  $h_1$  je konečná výška [m] a  $h_0$  počáteční výška [m].

Vztah (5) vyjadřuje konečnou deformaci (ve svislém směru), ke které dochází při technologických tvářecích pochodech. [10], [8]

## 2.3 Volné kování

Jedná se o druh kování za tepla, který se dělí podle způsobu provedení na:

- 1) *Ruční*
- 2) *Strojní*

Ruční kování se dnes aplikuje pouze na menší opravy součástí, v zámečnictví a při výrobě kovaných uměleckých výrobků. Polotovary se nejprve musí ohřát, buď v kovářské výhni, nebo peci a poté je umístěn na kovářskou kladinu. Ková se za pomoci ručních kovářských nástrojů.

Úkolem strojního volného kování (dále jen volné kování) je získat výkovek jednoduchého tvaru a to i značné hmotnosti. Pro výkovky kované volným kovářským je charakteristické, že dosahují lepších mechanických vlastností, než stejné výrobky vyrobené odléváním. Cílem volného kování je vedle získání požadovaného tvaru také odstranění nehomogenní lité struktury a dosažení jemnozrnné vysoce protvářené struktury. Při kování se používají univerzální kovací stroje, čímž se snižují náklady a umožňuje se vyrábět výkovky, jak pro malosériovou tak i velkosériovou produkci. Typickým příkladem velkosériové výroby jsou předkovky pro následné zápustkové kování.

Nevýhodou volného kování je, že se musí počítat s velkými rozměrovými přírůstky a výsledný povrch není hladký ani rovný. Mezi základní kovářské operace patří: *pěchování, prodlužování, sekání, ohýbání, osazování a děrování*. Polotovary pro oba způsoby provedení volného kování (ruční, strojní) je buď předvalek, nebo litý polotovar (ingot, resp. kontinuálně litý špalek). [5], [12], [4], [13], [14], [15]

## 2.4 Zápustkové kování

Je to druhý způsob kování, při kterém se polotovar (který byl před tím ohříván na požadovanou kovací teplotu) vloží do dutiny, kde se tváří. Tvar dutiny v nástroji odpovídá tvaru budoucího výkovku. Tento tvářecí nástroj s vytvořenou dutinou se nazývá zápustka a je rozdělena na dva díly (horní a dolní). Dutina je vytvořena na obou dílech zápustky. Při tváření se pohybují buď oba díly zápustky proti sobě (protiběžný buchar) nebo jen horní díl (buchar, lis). Ke tváření polotovaru dojde, když se díly zápustky k sobě vzájemně přibližují a to buď při rázu bucharu, přičemž polotovar je tak v dutině pěchován, nebo vtlačováním silou lisu. Z dříve uvedeného vyplývá, že pro zápustkové kování se používají jak buchary, tak i lisy. Při tváření materiál teče a postupně vyplňuje tvar dutiny. Vytvořený výkovek se vyznačuje větší přesností tvaru než u volného kování a vysokým stupněm prokovaní. Další výhodou zápustkového kování je, že průběh vláken ve výkovku kopíruje tvar dutiny zápustky. Naopak mezi nedostatky zápustkového kování patří omezené rozměry a hmotnost výkovku, které jsou limitovány manipulací s výkovkem a možnostmi kovacího zařízení. Zápustkové kování je zaměřeno na kování velkého množství součástí stejného tvaru.

Uplatnění nachází v dopravní technice (např. zalomené hřídele, ojnice, ozubená kola), při výrobě zemědělských nebo strojírenských strojů atd. Zápustkovým kovááním lze kovat součásti jak z oceli, tak i z jiných tvárných slitin, např. slitin hliníku, mědi.

Technologický postup zápustkového kováání je složen z následujících operací:

- Předkováání
- Kování
- Ostřížení výronku
- Dodatečné rovnání

[16], [6], [12], [4], [5], [15]

### 3 Zápustky

#### 3.1 Typy zápustek a jejich konstrukce

Zápustka je vyrobená buď jako zápustkový blok nebo jako zápustková vložka. Tvar dutiny zápustky odpovídá tvaru výchozího výkovku, ale je zvětšený o přídavek na smrštění kovu výkovku. Přídavek činí u ocelí se středním obsahem uhlíku 1 %, 1,5 % v případě legovaných ocelí a 1,5 až 2 % připadá pro austenitické oceli. Primární rozdělení zápustek je podle typu stroje. Zápustky se navrhují zvlášt' pro kováání na bucharech a na kovacíh lisech. Velikost stroje se volí podle vypočítané velikosti síly nebo energie (bucharu) potřebné k tváření. Při návrhu tvaru zápustky se vychází z tvaru výkovku. Konstrukce tvaru výkovku bude podrobně popsána v kapitole 3. Tvar výkovku také určuje, v jaké poloze se bude kovat. Při konstrukci zápustky se dále volí, zda kováání bude probíhat v jednodutinové zápustce nebo jestli bude proces rozdělen do více operací v postupové zápustce.

V kapitole 2.4 si bylo možné povšimnout z technologického postupu operace zápustkového kováání, že samotnému kováání předchází tzv. předkováání. Úkolem předkováání je přerozdělení materiálu, které probíhá jak v příčném, tak i podélném směru a připravuje polotovar tvarem pro tváření v zápustkách. Dále předkováání má významný vliv na zvýšení životnosti zápustek, jelikož tím klesá přetvárný odpor. [5], [17], [18], [19]

### 3.1.1 Bucharové zápustky

Kování na bucharech se vyznačuje vysokou dopadovou rychlostí beranu (až 9 m/s), kdy kov postupně vyplňuje dutinu zápustky. Kování se provádí na několik úderů. Počet úderů se určí podle velikosti výkovku a druhu stroje. Pokud je výkovek příliš členitý, nemůže být jedním úderem dosaženo úplného vyplnění dutiny. Zároveň rychlý přesun hmoty polotovaru může způsobit vznik trhlin ve struktuře tvářeného kovu. Žádoucí není ani zbytečně velký počet úderů, neboť zápustka je tak po delší dobu vystavena účinkům teplého tvářeného kovu a může dojít k jejímu extrémnímu tepelnému namáhání. Velký počet úderů je rovněž nežádoucí z hlediska využití energie a ekonomiky procesu výroby.

Předkování u bucharových zápustek je možné dvěma způsoby:

- a) *Volným kovááním*
- b) *Přípravými dutinami*

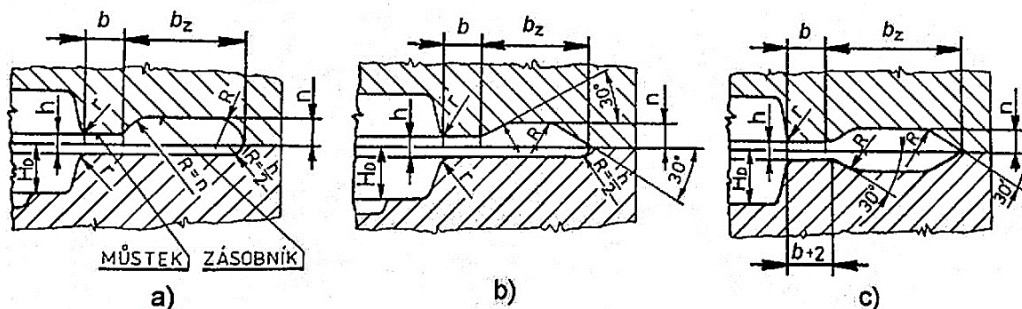
Předkování volným kovááním se provádí pro malosériovou výrobu výkovků jednoduchých rotačních tvarů. Dále pak u výkovků s nadměrnou velikostí a rozměry, které nemohou být kováány postupovým způsobem. Tvar kovadel pro volné kováání je buď rovný, nebo profilovaný. Předkování volným způsobem je typické pro jednodutinovou zápustku.

Při navrhování konstrukce bucharových zápustek se složité tvary jako žebra, či vysoké štíhlé části umísťují do horní části zápustky. Důvodem je, že v horní části zápustky dochází k lepšímu zaplňování dutiny než ve spodní části zápustky, protože v ní dochází k pomalejšímu chladnutí. Způsobeno to je kratší dobou styku horní zápustky s teplým tvářeným kovem, kdy díky pomalejšímu chladnutí je deformační odpor tvářeného materiálu nižší. [5], [17], [18], [19]

### 3.1.2 Jednodutinové zápustky

Jednodutinová zápustka má tvar výkovku, ale s uvažováním zvětšených rozměrů pro smrštění tvářeného kovu. Kolem obvodu zápustky je vytvořena výronková drážka, jejími hlavními částmi jsou můstek a zásobník. Přes můstek je vytlačován přebytečný materiál do zásobníku. Příliš velké odvedení materiálu do výronku způsobuje větší opotřebení dutiny zápustky. Proto se uvažuje zaplnění výronkové drážky ze 70 %. Zprvu je můstek zaplněn jen částečně. Postupně se v něm kov ochlazuje a omezuje tečení dalšího kovu do výronkové drážky. K vytlačení dalšího přebytečného materiálu do výronkové drážky, je zapotřebí vynaložení větší síly k překonání odporu méně plastického a chladnějšího kovu. Díky tomu jevu je možné, aby došlo tak k přednostnímu vyplnění zápustkové dutiny. V závěru kovací operace je překonán odpor kovu v můstku a dojde k zatečení zbylého přebytečného kovu do zásobníku výronkové drážky.

Výronková drážka se stanovuje podle normy ČSN 22 8308. Norma udává tři druhy výronkové drážky. Na obrázku č. 8 a), b) je vidět drážka pro výronek druhu I. Drážky tohoto druhu mají zásobník vytvořený v horním dílu zápustky. Druh II se vytváří pro zápustku, jejíž tvar dutiny je situován výhradně ve spodní části zápustky. Z toho důvodu je zásobník vytvořený ve spodní části zápustky (tento druh není v obrázku č. 8 vyobrazen). Poslední druh III (viz obrázek č. 8 c) se používá pro výkovky složitějšího tvaru s velkým objemem přebytečného materiálu. Z obrázku č. 8 c) je vidět, že výronková drážka má zásobník z obou stran dílu zápustky.

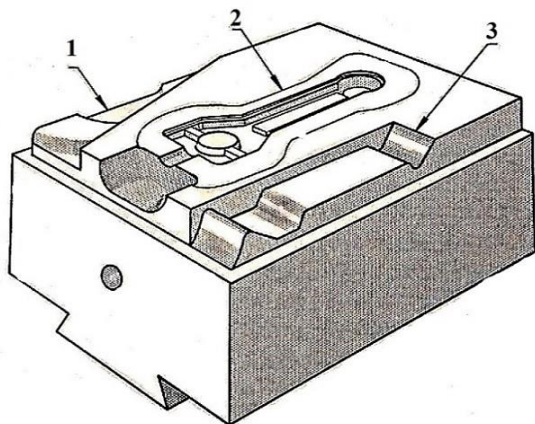


Obr. 8 Základní druhy výronkové drážky pro bucharové zápustky. Zdroj [20]

Výhodou kování v jednodutinové zápustce jsou nižší náklady na kovací nástroj než v případě postupové zápustky, ale na druhou stranu předkování volným kováním je značně časově náročné. Z toho důvodu je nutné provést před kováním v jednodutinové zápustce předeheřev předkovku, což zvyšuje energetickou náročnost procesu. [5], [17], [18], [19], [20], [21]

### 3.1.3 Postupová zápustka

Postupové kování je způsob zápustkového kování, při kterém je na jediné zápustce umístěno několik dutin pro několik za sebou jdoucích operací kování. U postupové zápustky se předkování odehrává v tzv. přípravných dutinách. Jsou to dutiny jednoduchých tvarů, v nichž



Obr. 9 Postupová zápustka (1- prodlužovací dutina, 2- dokončovací dutina, 3-ohýbací dutina). Zdroj [16]

se materiál přerozděluje do různých tvarů a průřezů. Mezi přípravné dutiny se řadí: *prodlužovací, rozdělovací, zužovací, ohýbací, tvarovací dutina*. Zde se tvar připravuje pro dokončovací dutinu. V *dokončovací dutině* má předkovek získat geometricky přesný konečný tvar. Vyznačuje se tím, že se v ní materiál už výrazně nepřemisťuje jako v přípravných dutinách. Na obrázku č. 9 je znázorněno postupové kování s jednotlivými přípravnými dutinami. Konstrukce dokončovací zápustky je téměř shodná s jednodutinovou zápustkou. Při navrhování tvaru postupové zápustky se nejprve navrhuje tvar přípravných dutin.

Ve srovnání s jednodutinovou zápustkou je kování v postupové zápustce provedeno vždy na jeden ohřev polotovaru. Kováním v postupové zápustce se získá požadovaný průběh vláken. Postupné rozdělení tvářecích operací způsobí, že dokončovací dutina se oproti jednodutinové zápustce méně opotřebovává. Tento druh zápustky je značně nákladnější na výrobu, a proto se hodí pro výkovky s velkou výrobní dávkou. [5], [17], [18], [19], [16], [21], [22]

### 3.2 Namáhání a životnost zápustek

Během kování je zápustka vystavena dvěma druhům namáhání. Prvním druhem, je tepelné namáhání. Materiál zápustky mění svůj objem při cyklických změnách teploty, ke kterým dochází mezi jednotlivými kovacími operacemi. Tento problém nastává při vkládání nového předkovku do dutiny. Střídání teplot (zchlazení a opětovné ohřátí zápustky od předkovku) může způsobit rozvoj tepelných trhlin a vést k únavovému lomu. Také opotřebením zápustek otěrem si lze spojovat s tepelným namáháním. Neboť do tepelných trhlinek v zápustce vzniklých při střídání teplot, může zatéct tvářený materiál, který pak napomáhá vydírání dutiny zápustky při tečení tvářeného materiálu. Tepelné namáhání zápustek lze snížit jejich předehřevem. Ten způsobí, že jsou v průběhu kování v povrchu vyrovnány teploty a nedojde tak k tvorbě tepelných trhlin. Zároveň předehřev snižuje rychlost přestupu tepla z výkovku do zápustky, čímž se zpomalí ochlazování výkovku. Kdyby tomu tak nebylo, povrch výkovku by vlivem rychlejšího zchlazení byl pevnější a odíral by při zaplňování dutiny zápustku. Předehřev zápustek před kování se provádí na teplotu 180-250 °C.

Druhý druh namáhání je mechanický. Při mechanickém namáhání dochází vlivem působení sil při kování (tlak lisu nebo energie úderu bucharu), k roztahování a stlačování zápustky. Mechanické namáhání se projeví otěrem zápustky v místech intenzivního tečení materiálu (zejména v místech přechodů průřezů zápustky a přechodu dutiny zápustky do výronku). Jedním z kritérií pro délku životnosti zápustky je její tvarová složitost. Se zvětšující se členitostí tvaru dutiny zápustky klesá její životnost. Na životnost zápustek má dále vliv: *tepelné zpracování zápustek, způsob tváření, druh a výkon kovacího stroje a také materiál zápustek.* [5], [17]

### 3.3 Materiál zápustek

Volba vhodného zápustkového materiálu se projeví na životnosti a ceně zápustky. Výběr zápustkového materiálu se řídí podle třech okruhů veličin:

- a) Veličiny, které souvisí se samotným procesem zápustkového kování. Do této skupiny se řadí: *Velikost a tvar zápustky* (v případě že tvar dutiny je hlubší a tvarově složitější, je dobré volit materiál zápustky houževnatější), *druh kovacího stroje* (buchary namáhají zápustku mechanickým namáháním, kdežto u lisu je namáhána spíše tepelným namáháním), *rychlost deformace*, *objem výroby* (u velké výrobní dávky je zapotřebí materiálu o vysoké pevnosti, s dobrou odolností proti opotřebení a únavě), *teplota zápustky*, *materiál výkovku* (pokud je materiál výkovku dobře tvárný, není potřeba volit materiál zápustek s vysokou pevností a odolností proti opotřebení).
- b) Veličiny související se zatížením zápustek: *Maximální zatížení a tlak zápustek*, *počet zatěžných cyklů* (pro které budou zápustky navrženy), *čas kontaktu mezi zápustkou a deformovaným materiálem*.
- c) Veličiny související s mechanickými a technologickými vlastnostmi zápustkového materiálu: *Pevnost* (vysoká pevnost podstatně zvyšuje odolnost proti otěru a plastické deformaci, zároveň s ní však klesá houževnatost). Vysoká pevnost také znamená větší tvorbu trhlinek, které mohou zapříčinit lom z únavy v zápustce. Vyšší pevnost zápustek se zpravidla volí u lisů, u mělkých a jednoduchých tvarů zápustkové dutiny), *pevnost za tepla* (požadavek vysoké odolnosti materiálu při zatěžování za vysokých teplot), *zakalitelnost*, *otěruvzdornost*, *tepelná roztažnost* (nízká), *tepelná vodivost* (požaduje se co nejmenší), *odolnost proti mechanické a tepelné únavě*, *obrobitelnost*.

Pro výrobu zápustek se používá nástrojová ocel. Má dobrý poměr mezi pevností a houževnatostí. Tato ocel se dále dělí podle použitého kovacího stroje na oceli: pro bucharové zápustky, pro zápustky používané na kovacích lisech. Zápustkový materiál pro lisu by měl být s pevností okolo 1600 až 1800 MPa a vyšší tvrdostí a otěruvzdorností, protože u lisů je tvar dutiny zápustek většinou plošší s tenkými stěnami. Tento tvar způsobuje rychlejší chladnutí, čímž dochází k značnému opotřebení v přechodu do výronkové drážky. Pro tyto oceli jsou typické legovací prvky **Cr**, **Mo**, **V**, **W**. Naproti tomu materiál zápustek pro kování na bucharech se vyznačuje nižší pevností (1200 až 1400 MPa), ale vyšším požadavkem na houževnatost. Jedná se o chromniklové oceli, které mohou být s malým obsahem **V**, **Mo**. [5], [17], [15], [23]

### 3.3.1 Oceli wolframové

Obsah wolframu se pohybuje od 4 do 9 %. Se zvyšujícím se obsahem wolframu je vyšší možnost deformací při tepelném zpracování a roste odolnost proti poklesu pevnosti při zvýšených teplotách. Zároveň však obsah wolframu působí na snížení houževnatosti. U těchto ocelí mnohem častěji dochází k tvorbě tepelně únavových trhlinek. Důvodem jsou nižší plastické vlastnosti. Využití wolframových ocelí je spíše u zápustek pro lisování. Typickými představiteli wolframových ocelí je ocel s označením AISI H22. Jejím ekvivalentem je ocel DIN X30WCrV9-3, která vykazuje dobrou odolnost proti opotřebení za vyšších teplot u malých, ale složitých zápustek. [5], [17], [19], [24], [16]

### 3.3.2 Oceli uhlíkové

Oceli uhlíkové mají obsah uhlíku okolo 0,4 až 1 %. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku, klesá prokalitelnost. Tím také dochází k poklesu tvrdosti a otěruvzdornosti. Příkladem uhlíkových ocelí pro zápustky může být ocel 19 103, která se používá pro malé zápustky s mělkou dutinou. [19], [17], [25]

### 3.3.3 Oceli Chrommolybdenové

Chrommolybdenové oceli jsou charakteristické dobrou prokalitelností, odolností proti tvorbě trhlinek tepelné únavy a velkou citlivostí ke změně teplot. Nejběžnější ocel tohoto druhu je například ocel AISI H13 jejímž ekvivalentem je ocel DIN X40CrMoV5-1. Tato ocel se vyznačuje vysokou pevností za tepla, odolností proti otěru a proti tvorbě trhlinek tepelné únavy. Další typickou ocelí je AISI H11 (DIN X38CrMoV5-1). Používá se pro zápustky od velmi malých velikostí až po středně velké. [19], [17], [16], [24]

## 4 Výkovek

Při konstrukci výkovku se postupuje takto: nejprve se určuje dělicí rovina, poté se musí výkovek rozdělit podle složitosti tvaru. Dalším krokem je zvolení jednoho ze tří stupňů přesnosti. Následně je možné určit přídatky na obrábění a technologické přídatky. Posledním krokem je stanovení mezních úchylek. [20]

### 4.1 Dělicí rovina

Je to jeden ze základních konstrukčních prvků výkovku, který je nutné vhodně zvolit. Hlavním úkolem dělicí roviny je rozdělení zápustkového bloku či vložky na horní a spodní díl zápustky. Z toho důvodu je vhodné situovat dělicí rovinu do roviny souměrnosti výkovku. Další možností je její umístění do roviny dvou vzájemně kolmých rozměrů výkovku.



Výrobně jednodušší je přímá dělicí rovina, ale pokud to z konstrukčních důvodů není možné, provádí se tzv. lomená dělicí rovina. V některých případech je možné dělicí rovinu umístit i do průřezu výkovku jednoduššího tvaru. Toto umístění má pomoci snížit náklady a mnohdy zjednodušuje výrobu zápustek. Dalším úkolem dělicí roviny je ulehčit tečení materiálu. [15], [17], [22]

## 4.2 Přídavky na obrábění a technologické přídavky

I přes snahu vyrábět co nejpřesnější výkovky s dobrou jakostí povrchu, je stále potřeba při návrhu výkovku uvažovat přídavky. Jen tak je možné vykovat součásti požadovaných rozměrových přesností a jakosti povrchu. Stanovení přídavků pro kování se řídí normou ČSN 42 9030. Norma udává jak *přídavky na obrábění* tak tzv. *technologické přídavky*. Dále obsahuje pravidla pro tolerance rozměrů a tvarů zápustkových výkovků a jejich mezní úchyly. [20], [18], [26]

### 4.2.1 Přídavky na obrábění

Protože při kování za tepla vznikají povrchové vady (okuje, trhliny, oduhličená vrstva, přeložky, rozválcované bubliny) je nutné tyto vady odstranit. To je možné obrobením ploch. Jelikož obrábění je velmi časově i finančně náročná operace, volí se přídavky na obrábění pouze na funkčních plochách. Velikost přídavků se stanovuje podle velikosti *největšího rozměru hotového výrobku ve směru kolmém k rázu* (u součástí s kruhovým tvarem je to průměr, u nekruhových součástí se tento rozměr udává jako střední hodnota součtu největší délky a šířky součásti) a podle *největší výšky hotového výrobku*. Toto kritérium vychází ze stanovení stupně přesnosti provedení výkovku, které má tři úrovně (obvyklé, přesné a velmi přesné). Tabulky č. 28 až 30 v příloze ukazují stanovení přídavků na obrábění pro všechny tři úrovně přesnosti provedení. Stupeň přesnosti provedení vychází z určení složitosti tvaru. Hodnocení složitosti tvaru se řídí normou ČSN 42 9002. Norma určuje *tvarový druh, tvarovou třídu, tvarovou podskupinu a technologické hledisko* výkovku. Po jejich stanovení je možné určit příslušný stupeň přesnosti provedení výkovku. Stanovený přídavek pak náleží pro všechny plochy výkovku. [27], [5], [6], [12], [13], [28], [26]

### 4.2.2 Technologické přídavky

Technologické přídavky jsou přídavky upravující tvar výkovku tak, aby jej bylo možné vykovat. Mezi ně se řadí: *úkosy bočních ploch výkovku, nejmenší tloušťka stěny nebo dna výkovku, zaoblení hran*. [5], [26]

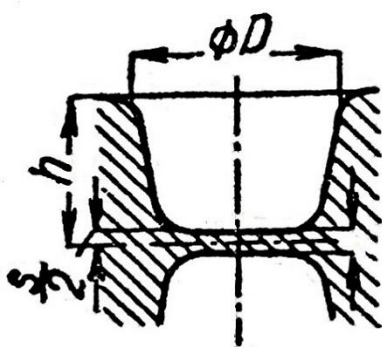
### 4.2.3 Úkosity bočních ploch výkovku

Z tabulky č. 1 je patrné, že úkosity se volí dle použitého kovacího stroje. Jiné hodnoty úhlů se volí pro úkosity na vnější a vnitřní straně výkovků. Úkolem úkosů je zlepšit vyndávání výkovku z dutiny zápustky a usnadnit v ní tečení kovu. Vnitřní úkosity se zpravidla volí větší než vnější, z důvodu lepšího vyjímání výkovku z dutiny, který se po zchladnutí kovu smrští. Menší úkosity se navrhují v případě, že lis je vybaven vyhazovačem (v případě bucharu bez vyhazovače je tomu naopak) nebo je použita dělená zápustka. Se zvyšující se hloubkou dutiny se volí nižší úkosity. [20], [29],[26]

Úkosity	vnější	Vnitřní
Zápustkové výkovky se běžně vyrábějí s úkosity	3 °	7 °
Vzhledem k rozdílné úrovni technologického zařízení výrobců výkovků se dovolují úkosity	—	—
Pro buchary a lisy bez vyhazovače	7 °	10 °
Lisy s vyhazovačem	2 ° až 3 °	3 ° až 5 °
Vodorovné kovací stroje	0 ° až 5 °	0 ° až 5 °

Tab. 1 Úkosity zápustkových výkovků (ČSN 42 9030) [20]

### 4.2.4 Nejmenší tloušťky stěny nebo dna výkovku



Obr. 10 Tloušťka blány k prostřížení [5]

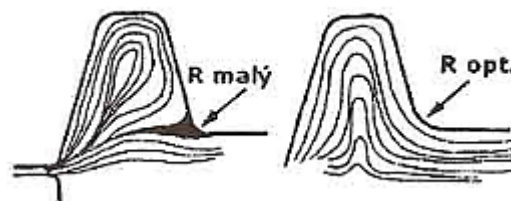
Tabulka č. 2 znázorňuje dva údaje. Prvním údajem, který se pomocí ní určuje, je nejmenší tloušťka dna, blány nebo výška disku výkovku. Na obrázku č. 10 je znázorněná předkovaná blána v díře, ta se po kování dodatečně odstříhne. Tato úprava se provádí, jelikož technologie zápustkového kování neumožňuje kovat průchozí otvory. Podle normy ČSN 9030 je možné vykovat otvory, které mají větší průměr než 10 mm. Dalším údajem, který lze z tabulky č. 2 určit je tloušťka stěny výkovků (orientovaná ve směru rázu). Oba údaje (rozměry) se vztahují k největšímu rozměru výkovku v kolmém směru. Hodnoty minimální tloušťky se volí s ohledem na požadovanou přesnost, materiál a složitostí tvaru výkovku. Se zmenšující se tloušťkou hrozí možnost, že v daném elementu dojde k rychlejšímu chladnutí. To se projeví zhoršením toku materiálu v daném místě a nutností zvýšení tvářecí síly. [20], [29], [26]

Největší rozměr výkovku ve směru kolmém k rázu [mm]		Největší výška výkovku $H$							
		přes 0	10	25	40	63	100	160	250
		do 10	25	40	63	100	160	250	400
		Největší tloušťka dna, blány, disku a stěny výkovku							
přes	do 40	4	5	6	7	9	—	—	—
40	63	5	5	6	7	9	11	—	—
63	100	5	6	7	9	11	13	15	—
100	160	6	7	9	11	13	15	17	20
160	250	8	9	11	13	15	17	20	25
250	400	10	13	15	17	20	25	30	35
400	630	—	—	20	25	30	35	40	50
630	1000	—	—	25	30	35	40	50	60

Tab. 2 Nejmenší tloušťka dna, blány, disku a stěny výkovku [20]

#### 4.2.5 Zaoblení hran

Poloměr zaoblení se volí (viz tabulka č. 3) v závislosti na poměru mezi výškou ( $h$ ) a šířkou výkovku ( $f$ ). Zaoblení hran snižuje možnost vrubového účinku v přechodech. Dalším úkolem zaoblení je umožnění lepšího toku materiálu při zaplňování dutiny. V obrázku č. 11 je znázorněn případ, kdy vlivem navržení příliš malého poloměru zaoblení došlo ke vzniku přeložky. [20], [29], [26]



Obr. 11 Příklad zaoblení hran.  
Zdroj [29]

Výška (hloubka) $h$		Poloměry zaoblení hran a přechodů při poměru $h/f$					
		do 2		přes 2 do 4		přes 4	
přes	do	$r$	$R$	$r$	$R$	$r$	$R$
<b>0</b>	<b>25</b>	2	6	2	8	3	10
<b>25</b>	<b>40</b>	3	8	3	10	4	12
<b>40</b>	<b>63</b>	4	10	4	12	5	20
<b>63</b>	<b>100</b>	5	12	6	20	8	25
<b>100</b>	<b>160</b>	8	20	8	25	16	40
<b>160</b>	<b>250</b>	12	30	16	45	25	65
<b>250</b>	<b>400</b>	20	50	25	75	40	100
<b>400</b>	<b>630</b>	30	80	40	120	65	150

**Tab. 3 Poloměry zaoblení hran  $r$  a přechodů  $R$  výkovku [20]**

### 4.3 Mezní úchytky

Přesnost rozměrů a tvar výkovku se v závislosti na několika činitelích odchyluje od jmenovitého rozměru nebo požadovaného tvaru výkovku. Proto byly zavedeny mezní úchytky rozměrů a tvaru. Tuto problematiku řeší norma ČSN 42 9030. Mezní úchytky rozměrů výkovku se určují podle stupně přesnosti výkovku (stupně přesnosti jsou odstupňovány od 3 do 7). Stanovuje se z největšího rozměru výkovku (střední hodnota součtu největší délky a šířky výkovku, v případě rotační součásti je to největší průměr výkovku) orientovaného ve směru kolmém k rázu a ve směru rázu. Vzorová tabulka mezních úchytek rozměrů pro jednotlivé stupně přesnosti je uvedena v příloze (viz tabulka č. 31). Pro rozměry (největší průměr nebo největší rozměr v kolmém směru na směr rázu) od 1000 do 1600 mm se provádí zvyšování mezních odchylek o 25 %. Od 1600 do 2500 mm je to navýšení o 50 %.

Největších nepřesností rozměrů se dosahuje *opotřebením* zápustky. K největšímu opotřebení dochází v místě, kde materiál nejintenzivněji teče. Takovými místy jsou zaoblení hran, přechody do žeber a výstupky. Míra opotřebení je také závislá na použitém *kovacím stroji, teplotě kování a kovaném materiálu*. Opotřebení je možné snížit mazáním zápustek. Dalším činitelem ovlivňující přesnost rozměrů je *teplota*. Při ohřevu tvářeného materiálu na kovací teplotu je nutné uvažovat, že materiál zvětší svůj objem. Naopak při jeho chladnutí se rozměry zmenší.

Proto je nutné uvažovat správné rozměry pro smrštění při konstrukci zápustek. Pokud je teplota oproti uvažované kovací teplotě zvýšená o 100 °C, bude výsledný rozměr po smrštění o 0,1 % menší než by měl být. [29], [20], [5], [26]

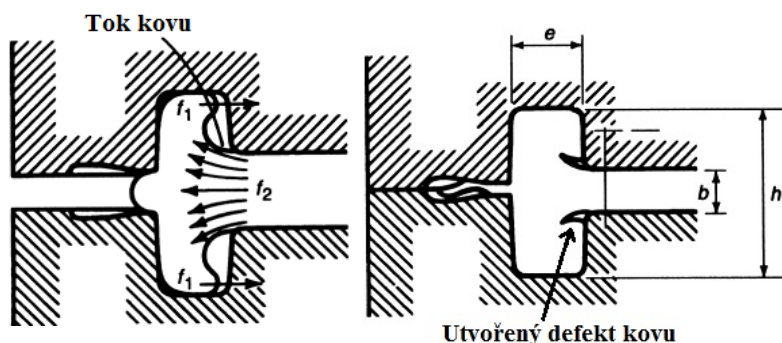
## 4.4 Vady výkovku

Vady, které se vyskytují na hotovém výkovku lze rozdělit podle doby jejího vzniku na *vady vzniklé před kováním* a *vady vzniklé během kování*. Vady jako *povrchové praskliny* nebo *šupiny*, *zakované okraje*, *vnitřní necelistvosti*, *spálení* jsou vady vzniklé ještě před samotným kovacím procesem. Většinou je na vině nesprávná jakost oceli, rychlý ohřev nebo nesprávně provedené očištění povrchu. Z hlediska této práce jsou tyto vady nedůležité. Důležitými vadami však jsou vady vznikající při samotném kování. Tyto vady se vyznačují většinou chybnými tvary, rozměry výkovku a jsou zapříčiněné tokem kovu v dutině zápustky. Řadí se mezi ně hlavně: *nevyplnění tvaru*, *přeložky*. [5], [30]

### 1.1.1 Nevyplnění tvaru

Důvodů proč kov nezaplňuje zcela dutinu zápustky, je hned několik. Jedním z nich může být nedostatečné množství kovu. Při nesprávně navrženém tvaru zápustky, tj. při nesprávně zvolených úkosech, poloměrech zaoblení apod. může dojít k tomu, že kov zaplňuje přednostně výronkovou drážku a zbylé množství kovu tak nestačí na vyplnění samotné dutiny. [5], [30], [33]

#### 4.4.1 Přeložky



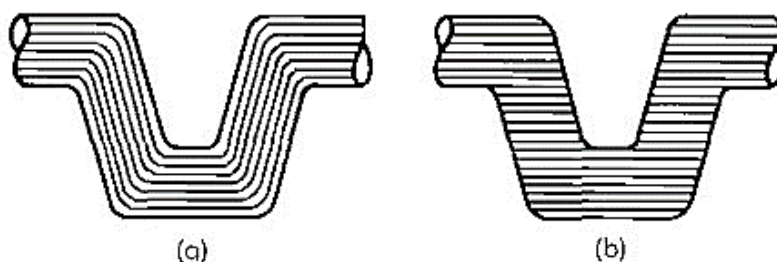
Obr. 12 Přeložka způsobená nevhodným poloměrem zaoblení. Zdroj [30]

Na obrázku č. 12 je vidět průběh vzniku přeložky. K přeložce dochází důsledkem nevhodného zaplňování dutiny tekoucím kovem. Kov teče podél zaoblené hrany, poté postupuje dál dutinou a zvedá se do výšky, kde zaplňuje horní část dutiny. Při malém poloměru zaoblení hrany vznikne odstup tekoucího kovu od stěny a následuje přeložení kovu. Při přeložení

nedojde však ke spojení povrchů kovu. Situace je o to horší, dojde-li k oxidaci povrchu a v překlopených plochách zůstanou oxidy. Přeložkám se dá předejít zvětšením zaoblení hran. [5], [30], [31]

## 4.5 Průběh vláken

Litá struktura výchozího polotovaru (ingotu nebo kontinuálně litého předlitku) je zatížena strukturními nehomogenitami (vměstky, segregacemi). Tyto chemické heterogenity se při tuhnutí vylučují kolem zrn oceli a vytvářejí tzv. obálky. Jakmile dojde k tváření oceli, zrna se protahují, a to ve směru největší deformace. Protážené obálky se potom jeví jako dlouhé řádky nebo vlákna.

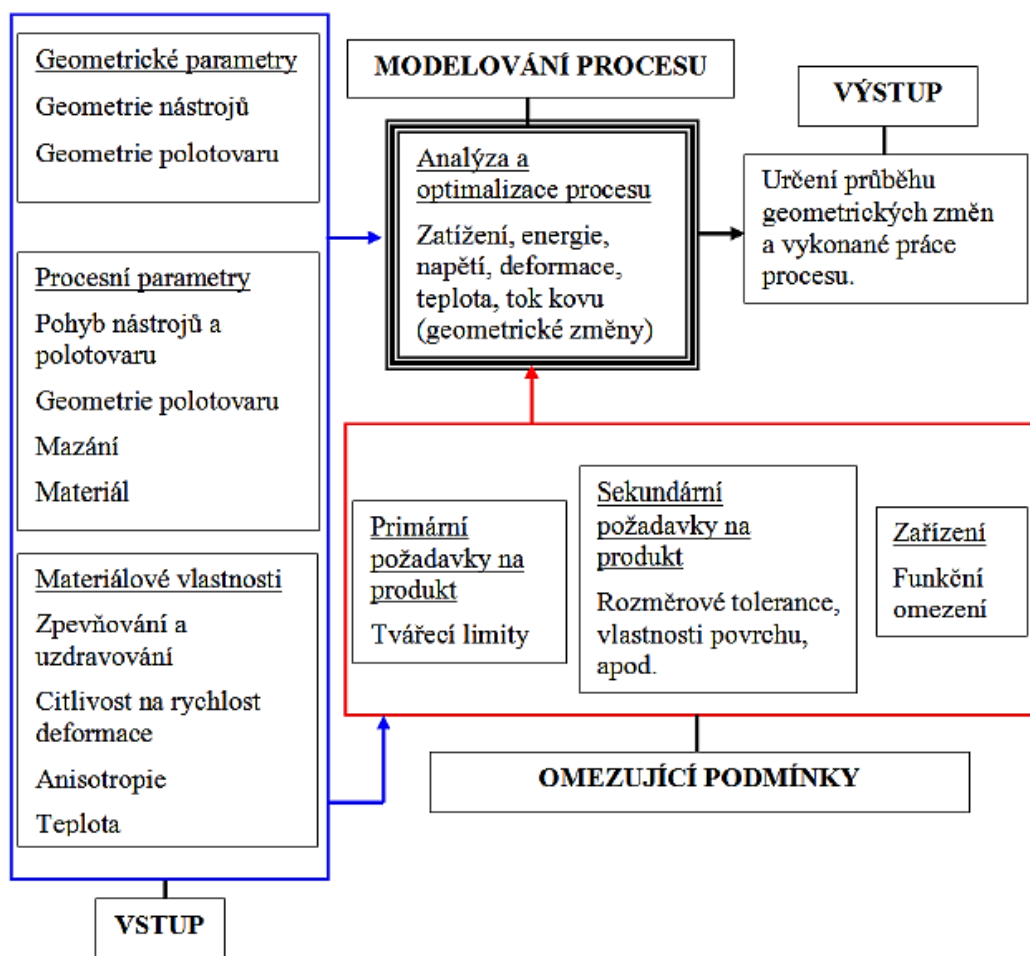


**Obr. 13 a) vlákna při tváření za tepla, b) vlákna při obrábění. Zdroj [32]**

Mezi obrázkem č. 13 a) který znázorňuje vláknitou strukturu po kování a obrázkem č. 13 b) (vláknitá struktura po obrábění) je patrný rozdíl. Obě součásti byly vyrobené ze stejného vstupního polotovaru ve formě válcované tyče. Válcováním oceli se vytvoří vláknitá struktura s orientací vláken v podélném směru. Kdyby byla tato součást vyrobená odlitím, nebyla by ve struktuře patrná žádná vlákna. Důvodem je, že odlitky nejsou deformovány a tak žádná vlákna ani vzniknout nemohou. Výchozího tvaru součásti bylo v případě obrázku č. 13 b) vytvořeno obrobením ploch. Z obrázku je možné vypožorovat, že směr některých vláken je kolmý k povrchu. V porovnání s obrázkem č. 13 a) průběh vláken při správném provedení kování odpovídá obrysu zápustkové dutiny. Směr vláken má významný vliv na některé mechanické vlastnosti. Při objemovém tváření jsou mechanické vlastnosti závislé na směru vláken a vyvolává tak anizotropní vlastnosti tělesa. Obecně lze říci, že vyšších hodnot tažnosti a vrubové houževnatosti se dosahuje, pokud jsou vlákna na zkušební vzorku orientovaná v podélném směru. Vyšší hodnoty mechanických vlastností ve směru vláken jsou dosaženy z toho důvodu, že kov vykazuje větší odolnost proti šíření trhlin ve směru kolmém na vlákna. Proto, aby mohla trhlina překonat překážky v podobě vláken výkovku při svém šíření, je zapotřebí jí dodat větší energii. Z výše uvedeného vyplývá, že mnohem méně energeticky náročným způsobem je šíření trhliny ve směru vláken. [5], [30], [33]

## 5 Numerické modelování

V současnosti je možné řešit tvářecí problémy modelováním procesu. Teoretické modelování je možné dvojími přístupy. První přístup je analytický. Ten je omezen na řešení velmi jednoduchých problémů. Druhým přístupem je numerické modelování za pomoci výpočetní techniky. Jedná se o levný a velmi efektivní způsob, kterým je možné zdokonalovat technologické procesy v praxi. Přesnost výsledku numerického modelování je odvozena od kvality vstupních dat. Tento způsob modelování se rozvinul až s objevem metody konečných prvků („Finite Element Method“ neboli FEM) v roce 1956. Princip numerického modelování spočívá právě na využití této metody, která rozděluje těleso na konečný počet prvků (elementů), a okrajové podmínky, nutné pro řešení diferenciální rovnice, definuje pro uzlové body každého elementu na základě předchozího výpočtu. Po vyřešení matematického modelu problému se výsledek modelování (simulace) objeví uživateli na obrazovce počítače. Cílem této práce je provést modelování procesu zápusťkového kování s použitím numerického modelovacího programu Deform<sup>TM</sup>-3D (dále jen Deform), provést optimalizaci stávajícího procesu a porovnat výsledky modelování s výsledkem reálného vyrobeného výrobku (stávajícího).



Obr. 14 Blokový diagram-návrh a řízení procesu tváření kovů. Zdroj [34]

Metoda konečných prvků se řadí mezi metody variační a je založena na tom, že pro diferenciální rovnici se sestaví tzv. funkcionál. Pro tento funkcionál se hledá funkce, která jej minimalizuje. U variačních metod se jako funkce používá, tzv. pokusné řešení. Minimalizací se získá řešení diferenciálních rovnic.

Postup při tvorbě numerického modelu je popsán na obrázku č. 14. Schéma je rozděleno na tři oblasti. Do vstupních dat jsou zahrnuty všechny parametry související s geometrií nástroje a polotovaru, dále pak parametry tvářecího procesu a parametry materiálu polotovaru. Druhou oblastí schématu jsou omezující podmínky. Jsou to podmínky související se strojním vybavením pro řešení daného problému a technologické parametry procesu. Poslední oblastí před výstupními daty je tzv. modelování procesu. Zde je možné řídit a upravovat tvářecí proces pro dosažení požadovaných výsledků. [35], [34]

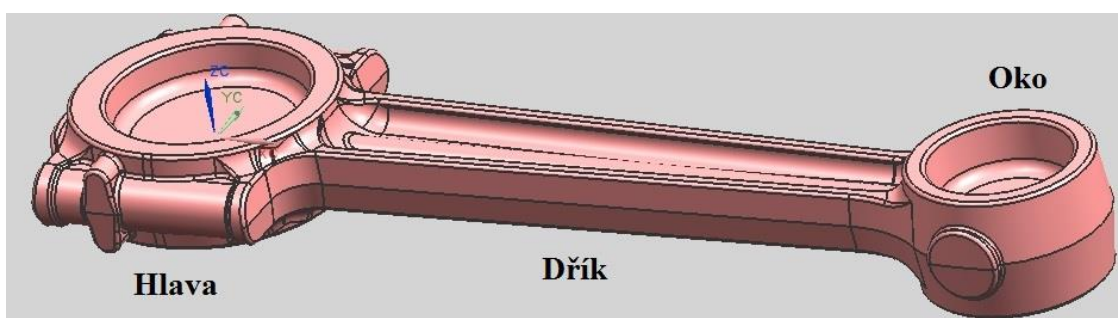


## 6 Experimentální část diplomové práce

Cílem experimentální části této diplomové práce bude analyzování procesu výroby ojnice ve společnosti CZECH PRECISION FORGE a.s. (dále jen CPF). Na základě poskytnutých dat procesu kování a nákresu předkovku, bude provedena simulace kování stávajícího procesu výroby ojnice s použitím numerického modelovacího programu Deform. Na základě výsledků simulace se provede analýza vzniklých kovářských vad (přeložky, rozměrová nepřesnost). Dále pak ze zjištěných dat simulace, bude vytvořeno několik možností úprav tvaru předkovku, které se prověří v simulaci procesu kování. V závěru experimentální části diplomové práce se vyhodnotí výsledky simulací s navrženými změnami tvaru předkovku.

### 6.1 Charakteristika ojnice

Hotový výkovek slouží jako ojnice pro pístový kompresor. Hlavním úkolem ojnice je převést rotační pohyb vyvozený přes klikový, zalomený hřídel na přímočarý vratný pohyb pístu kompresoru. Základní části ojnice určené pro kompresor jsou uvedeny v obrázku č. 15. Těmito částmi jsou: *Ojniční hlava* (dále jen hlava) pro spojení s čepem kliky, střední část ojnice je tvořena *dříkem* a poslední částí je *ojniční oko* (dále jen oko), které slouží pro spojení s čepem pístu. Hlava se vyrábí, buď jako celistvá (viz obrázek č. 15) nebo jako dělená. Délka ojnice se volí 4 až 6r (r je poloměr klikové, zalomené hřídele). Dřík může být vyroben s kruhovým, obdélníkovým profilem nebo profilem ve tvaru dvojitého T. Výroba ojnice probíhá buď záпустkovým kovááním, litím anebo slinutím práškové oceli. Ojnice je namáhaná osovou silou na tah, tlak a dále pak účinky setrvačných sil. Na obrázku č. 15 je znázorněn model hotové ojnice podle návrhu CPF. Délka této ojnice je 1131 mm a hmotnost je 79 kg (při měrné hmotnosti  $7850 \text{ kg/m}^3$ ). [36], [37], [38]



Obr. 15 Výsledný tvar výkovku tvořený hlavou, dříkem a okem.

## 6.2 Provedení analýzy stávajícího procesu výroby

Technologický postup výroby ojnice začíná nákupem polotovaru. Společnost CPF nakupuje polotovar pro tuto ojnici ve formě sochoru o rozměrech 200 x 200 mm a délce dle dohody s dodavatelem. CPF má pro výrobu tohoto typu ojnice dva dodavatele. Prvním a také častějším dodavatelem jsou Třinecké železárny, a.s. Ty mohou sochor dodat o délce 5 nebo 6 metrů. Druhým dodavatelem je holandská společnost Nedstaal B. V., která může dodávat násobky délek polotovaru dle požadavku zákazníka. Materiál polotovaru pro tyto ojnice je buďto DIN 34CrNiMo6 nebo DIN 42CrMo4.

Pro provedení simulací bude použita ocel DIN 42CrMo4 (ČSN 15 142), která je součástí knihovny materiálu Deformu. V tabulce č. 4 je uvedeno chemické složení této oceli. Ocel DIN 42CrMo4 se řadí mezi ocel k zušlechťování. Vhodná je pro výrobu velkých výkovků strojních nebo motorových součástí, které jsou značným způsobem namáhané. Polotovar je dodáván ve formě válcovaném za tepla a ve stavu tepelně nezpracovaném. Pokud je ocel ve stavu žíhaném na měkko, je možné ji obrábět. [40], [41]

Název prvku [%]	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo
	0,38 - 0,45	max. 0,40	0,60 - 0,90	max. 0,025	max. 0,035	0,90 - 1,20	0,13 - 0,30

**Tab. 4 Chemické složení oceli DIN 42CrMo4 [41]**

Podle potřeby se materiál v prvotní fázi výroby nařeže na požadovanou délku. Po nařezání je polotovar umístěn do pece, kde se ohřeje na teplotu 1200 °C. Pro ohřev polotovaru používá CPF nístějovou pec. V tabulce č. 5 je možné vidět parametry pece.

Označení:	Plynová nístějová pec P30601	
Rozměry nístěje [mm]:	Výška	1200
	Hloubka	3000
	Šířka	5800
Maximální teplota:	1300 °C	
Teplotní přesnost:	+/- 10 °C	
Tepelný výkon:	1930 kW	
Maximální vsázka:	20 tun	

**Tab. 5 Parametry nístějové pece [39]**

Po dosažení požadované kovací teploty je polotovár přemístěn na hydraulický lis s označením CKW 630. Parametry lisu jsou uvedeny v tabulce č. 6

<b>Označení:</b>	<b>Hydraulický lis CKW 630</b>	
Rozměry kovádky [mm]:	Výška	min. 500
	Hloubka	max. 500
	Šířka	max. 920
Maximální síla:	6,3 MN	
Max. zdvih od stolu k držáku horního kovádky:	1700 mm	
Min. zdvih od stolu k držáku horního kovádky:	1000 mm	

**Tab. 6 Parametry hydraulického lisu [39]**

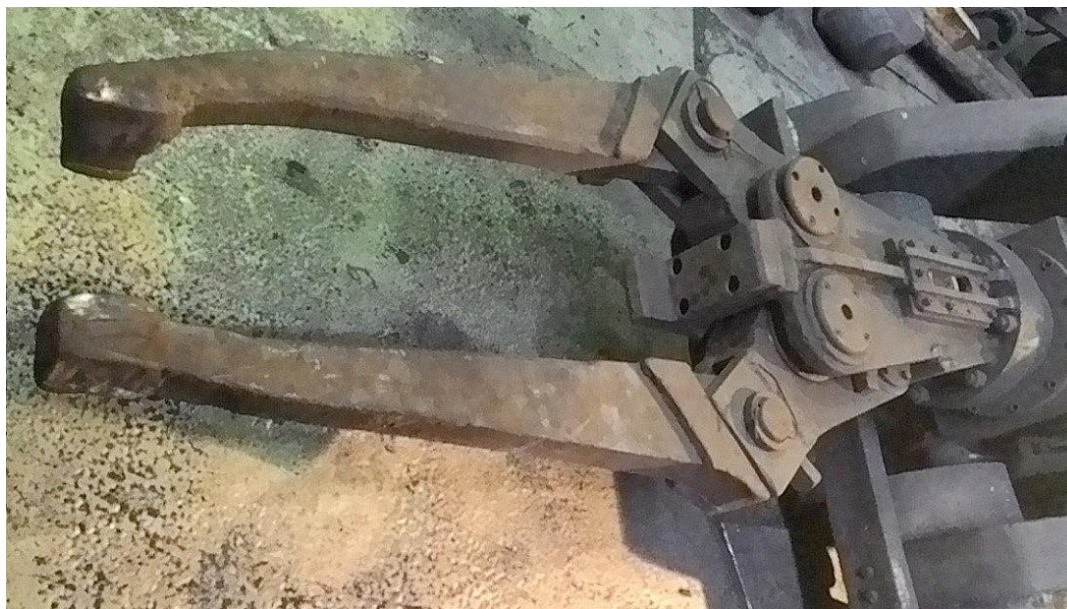
Na tomto lisu se provede volné kování pro vykování předkovku požadovaného tvaru. Vhodně navržený tvar předkovku má umožnit při následném kování v jednodutinové zápustce, dokonalé vyplnění tvaru dutiny zápustky. Návrh tvaru předkovku podle postupu CPF bude popsán v kapitole č. 7.1. Po skončení operací souvisejících s volným kováním, se nechá předkovek vychladnout. Na vychladlém předkovku se provádí kapilární zkouška, která má odhalit případné povrchové vady. Po ukončení zkoušky se povrch předkovku přebrousí a následuje náhřev na kovací teplotu 1200 °C. Pro ohřátí předkovku se používá karuselová pec, jejíž parametry uvádí tabulka č. 7.

<b>Označení:</b>	<b>Plynová karuselová pec P1859</b>	
Rozměry nástěje [mm]:	Průměr	3700
	Hloubka	1500
	Šířka	800
Maximální Teplota:	1300 °C	
Teplotní přesnost:	+/- 10 °C	
Tepelný výkon:	3000 kW	
Maximální vsázka:	21 tun	

**Tab. 7 Parametry karuselové pece [39]**

Předkovek ohřátý na kovací teplotu se za pomoci kovacího manipulátoru s maximální možnou nosností do 1000 kg přesune do jednodutinové zápustky. Na obrázku č. 16 jsou znázorněny čelisti manipulátoru pro manipulaci s předkovkem.

Tvar dutiny zápustky si CPF vyrábí sama. Přimo v areálu podniku má CPF pro tyto účely zřízené obráběcí centrum. Jednodutinová zápustka je vyrobená buď jako monoblok nebo jako vložka. Dodavateli pro monobloky jsou společnosti Somers Forge Ltd z Velké Británie nebo Vítkovice Heavy Machinery a.s. Vložky si CPF kove sama.



Obr. 16 Čelisti manipulátoru

Pro výrobu ojnice, byla použita vložka. Oproti monobloku je vložka menší funkční součást (s vytvořenou dutinou zápustky), která se upevní do bloku zápustky.

Z kvalitního zápustkového materiálu se vyrobí pouze vložka, nikoliv celý blok. Díky tomuto řešení se sníží spotřeba kvalitního zápustkového materiálu. [5]

CPF používá pro výrobu vložek ocel DIN 55NiCrMoV7 (ČSN 19 663). V tabulce č. 8 je uvedeno chemické složení této oceli. Jedná se o nástrojovou ocel s dobrou pevností za tepla a odolností proti náhlým změnám teploty. Tato ocel se přímo používá pro výrobu zápustek. Tvar dutiny zápustky lze vytvořit obráběním, pokud je ocel ve stavu žíhané na měkko. [42],[43]

Název prvku [%]	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	Ni max.	P max.	S max.
	0,50-0,60	0,65-0,95	0,10-0,40	1,00-1,20	0,07-0,12	0,45-0,55	1,50-1,80	0,03	0,03

Tab. 8 Chemické složení oceli DIN 56NiCrMoV7 [42]

CPF pro zápustkové kování ojnice používá protiběžný buchar Beche B35 jehož parametry jsou uvedeny v tabulce č. 9.

<b>Označení:</b>	<b>Protiběžný buchar <i>Beche B35</i></b>				
Rozměry zápustky [mm]:	Výška	max.	3700	min.	335
	Hloubka	max.	1500	min.	700
	Šířka	max.	800	min.	500
Energie úderu:	350 kJ				
Hmotnost horního beranu:	35 000 kg				
Hmotnost dolního beranu:	40 tun				

**Tab. 9 Parametry protiběžného bucharu [39]**

Po vykování požadovaného tvaru, se musí na hlavě a oku výkovku prostříhnout blána pro díru. Kolem vykování výkovku se vytvořil výronek, který je nutné odstříhnout. Obě operace se provádějí na tzv. okrajovacím lisu. Ten je pro tyto účely vybaven dvěma oddělenými nástroji. V tabulce č. 10 jsou uvedeny parametry okrajovacího lisu CKV 1500. Po prostřížení blány a okrojení výronku následuje tepelné zpracování výkovku.

<b>Označení:</b>	<b>Okrajovací lis <i>CKV 1500</i></b>
Maximální síla:	15 MN
Zdvih [mm]:	min. 900, max. 1900 (zdvih 1000)
Rozměry stolu [mm]:	1600 x 2200

**Tab. 10 Parametry okrajovacího lisu [39]**

Výrobní možnosti zápustkového kování v CPF jsou omezeny na hmotnost výkovku 900 kg. Podle interních podmínek CPF, musí být všechny výkovky prokovány s minimálním stupněm prokování 2,5.

## **7 Analýza tvaru stávajícího předkovku**

### **7.1 Návrh tvaru předkovku**

Při návrhu předkovku podle postupu CPF se nejprve virtuálním modelem hotového výkovku ojnice vedou pomyslné řezy. Model výkovku ojnice byl vytvořen v CAD programu a také se v tomto programu provedly pomyslné řezy výkovkem. Tyto řezy jsou koncipovány v místech největšího průřezu daných částí ojnice (hlava, dřík, oko). Celkem byly zvoleny čtyři řezy.

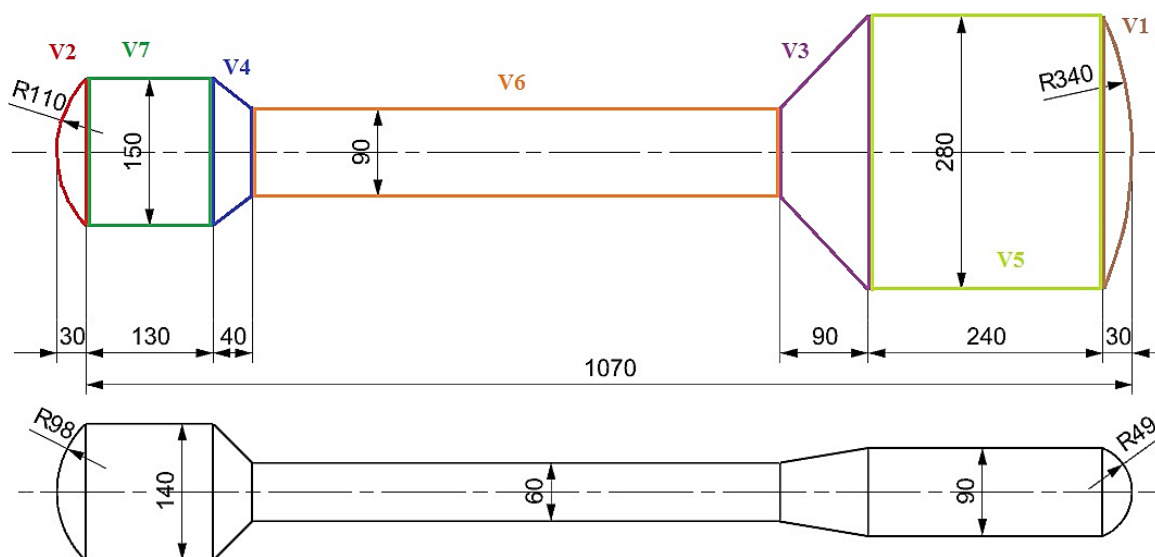
Po jednom řezu na hlavě, oku ojnice a dva řezy byly vedeny dříkem. Důvod proč jsou dříkem vedeny dva řezy, je ten, že toto provedení ojnice nemá dřík s konstantním průřezem.

Šířka dříku se směrem od hlavy k oku ojnice mírně zmenšuje. Druhým krokem návrhu tvaru předkovku bylo určení ploch v daných místech řezu. Následně se k jednotlivým plochám přičetla plocha výronkové drážky při zaplnění ze 70 %. Jelikož je výronková drážka vytvořená po celém obvodu ojnice, musí být plocha výronku přičtena dvakrát (výronková drážka je z obou stran vedeného řezu výkovkem).

Dalším krokem bylo stanovení výšky předkovku v hlavních částech ojnice. Nejvyšší částí výkovku ojnice je oko. Ze zkušeností CPF volí výšku oka předkovku stejnou, nebo o něco větší, než je výška vykovaného oka ojnice (výkovku). Dále je snahou volit výšku hlavy a dříku předkovku podle rozměrů obou částí již vykované ojnice. Čím je větší rozdíl mezi zvolenými výškami oka a dříku, tak tím se zvětšuje pracnost na vykování předkovku. Proto je vhodné volit výšky obou částí tak, aby jejich rozdíl byl co nejmenší.

Poté co byly stanoveny výšky hlavních částí ojnice, bylo možné z obsahů ploch v jednotlivých řezech výkovku, dopočítat šířku předkovku. Posledním krokem návrhu tvaru předkovku bylo stanovení délek jednotlivých částí. Tyto rozměry se opět stanovují podle zkušeností. Délky by měly přibližně odpovídat délkám hlavních částí ve výkovku ojnice (hlava, oko, dřík).

Tímto postupem v CPF vytvořili celkem tři možné varianty návrhu tvaru předkovku. U každé z těchto tří variant se volným kováním vykovaly dva zkušební předkovky. Tyto předkovky se následně kovaly v jednodutinové zápustce pro zjištění, která z navržených variant je nejvhodnější. Jako nejvhodnější byl vybrán ten návrh tvaru předkovku, u kterého byl vykovan požadovaný tvar výkovku bez nežádoucích kovářských vad (tvarových a rozměrových nepřesností, přeložek).



**Obr. 17** Náčrtes stávajícího tvaru předkovku

Tvar a rozměry předkovku podle stávajícího postupu výroby jsou uvedeny v obrázku č. 17. Tabulka č. 11 uvádí jednotlivé rozměry předkovku vztažené k dílčím objemům předkovku. Pro lepší představu jsou tyto dílčí objemy barevně označeny v obrázku č. 17.

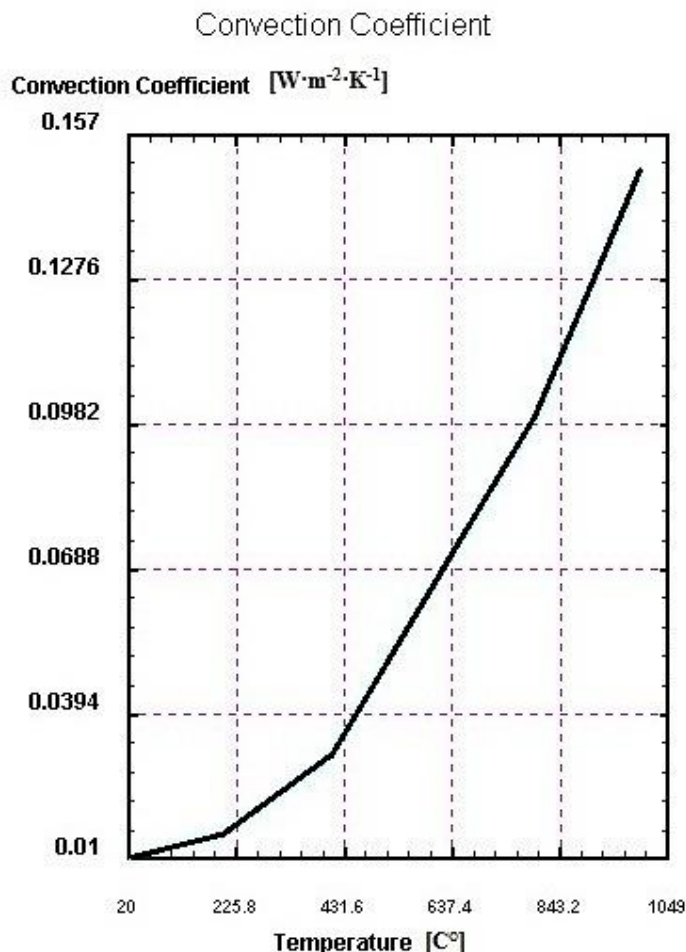
Objem	Délka (R <sub>1</sub> /R <sub>2</sub> ) [mm]	Tloušťka (S <sub>1</sub> /S <sub>2</sub> ) [mm]	Výška (S <sub>1</sub> /S <sub>2</sub> ) [mm]
V <sub>1</sub> -objem zakulacení hlavy	(R340/R49)	—	—
V <sub>2</sub> -objem zakulacení oka	(R110/R98)	—	—
V <sub>3</sub> -objem hranolu ze strany k hlavě	90	(280/90)	(90/60)
V <sub>4</sub> -objem hranolu ze strany k oku	40	(150/90)	(140/60)
V <sub>5</sub> -objem hlavy	240	280	90
V <sub>6</sub> -objem dřívku	540	90	60
V <sub>7</sub> -objem oka	130	150	140

**Tab. 11** Rozměry jednotlivých částí předkovku dle návrhu CPF

## 7.2 Simulace stávajícího stavu výroby

Podle návrhu tvaru předkovku (viz obrázek č. 17) byl vytvořen CAD model. Předkovek měl hmotnost 115,5 kg (při uvádění hmotností předkovků v této práci, byla uvažována měrná hmotnost 7850 kg/m<sup>3</sup>, kterou používá CPF). Prvním krokem simulace procesu kování stávajícího stavu výroby bylo provedení simulace procesu ochlazování. K tomuto ochlazování dochází během vyjmutí předkovku z pece a přenesení do jednodutinové zápustky. Podle CPF tato operace trvá do 2 minut. Proto byla pro účely simulace zvolena doba trvání ochlazování 120 sekund. Pro přenos předkovku z pece do zápustky se využívá kovářského manipulátoru, který drží předkovek v čelisti.

Rozměr styčné plochy čelistí je 20 x 100 mm (šířka x délka). Při ochlazování předkovku během manipulace bylo nutné uvažovat součinitel přestupu tepla pro rozhraní vzduch-těleso. Na obrázku č. 18 je znázorněn graf funkční závislosti součinitele přestupu tepla pro rozhraní vzduch-těleso.



**Obr. 18 Funkční závislost součinitele přestupu tepla pro rozhraní vzduch-těleso [44]**

Ochlazování bylo nastaveno v „Pre-processoru“ Deformu. Jedná se o základní prostředí pro nastavování parametrů simulace. Při nastavování procesu ochlazování se postupovalo následovně. V první řadě bylo zapotřebí vytvořit geometrii předkovku, která se vytvořila v CAD programu. Z CAD programu se předkovek načetl do Deformu, jako CAD model ve formátu STL. V případě, že je tvářený předmět (stejně jako tato ojnice) osově symetrický, je pro zjednodušení výpočtu simulace výhodné načíst model předkovku jen jako jeho polovinu. Zkrátí se tak doba a pracnost výpočtu simulace. V dalším kroku bylo nutné vygenerovat síť předkovku. Pro vygenerování sítě se muselo zadat tzv. „size ratio“, což je podíl mezi nejmenším a největším elementem sítě. Obvykle se „size ratio“ volí 3. Dále bylo nutné zadat nejmenší velikost elementu sítě. Minimální velikost elementu se zvolila 2 mm.



Po vygenerování sítě dosahoval počet elementů hodnoty 207 528. V následujícím kroku se načetla z knihovny materiálu ocel DIN 42CrMo4 (ocel předkovku). Oceli se zadala teplota předkovku (1200 °C). Tato teplota odpovídá teplotě předkovku během ohřívání v peci. Po tomto kroku se vytvořila geometrie horního a dolního dílu čelisti manipulátoru. Rozměry obou dílů čelisti jsou 20 x 100 x 130 mm (šířka x délka x výška). U obou dílů čelisti manipulátoru se uvažovala teplota 20 °C (teplota okolí). Potom se musely oba díly čelisti manipulátoru dát do vzájemné polohy s předkovkem, aby se vytvořily vzájemné vazby mezi nimi. Uvažovalo se, že čelist sevře předkovek v polovině délky dřívku.

V místě styku obou dílů čelisti s předkovkem byl součinitel tření nastaven na hodnotu 1000 pro simulaci pevného uchopení. Následným krokem bylo nastavení okrajových podmínek předkovku. V okrajových podmínkách se musela určit rovina symetrie předkovku a vybrat povrch předkovku pro, který má platit součinitel přestupu tepla na rozhraní vzduch-těleso [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]. Tento součinitel se v Deformu zadal jako funkční závislost teploty (viz obrázek č. 18). Dále bylo nutné nastavit délku trvání procesu ochlazování. Ta byla uvažovaná 120 sekund. Posledním důležitým parametrem, který bylo nutné nastavit, byla velikost kroku „step inkrement“. Tento parametr představoval při procesu ochlazování přírůstek času na jeden výpočetní krok. Jeho hodnota byla nastavena na 0,5 sekund na každý krok. Poté byla vygenerována databáze. Tato databáze byla výchozí pro další část simulace, kterou bylo nastavení samotného procesu kování. Podrobné nastavení procesu ochlazování je uvedeno v tabulce č. 12. Překlad anglických pojmů je uveden v tabulkách č. 32, 33 (viz příloha).

	Main: mode	Deformation, Heat transfer
	Step increment: Solution step definition	Time
	Step increment: Step increment control	0,5 sec / step
	Stop: Process duration	120 sec
<b>Workpiece</b>	Object type	Plastic
	Temperature	1200 °C
	Material	42CrMo4 (20-1200 °C)
	Number of elements	207528
	Size ratio	3
	Min. element size	2
	Boundary conditions: Temperature	Function
	Properties: Target volume	Active in FEM + meshing
	Properties	Enable thermal expansion
	Properties: Volume	$7,10211 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$
Properties: Reference temperature	1200 °C	
<b>Top die</b>	Object type	Rigid
	Geometry	130 x 20 x 100 [mm]
	Temperature	20 °C
<b>Bottom die</b>	Object type	Rigid
	Geometry	130 x 20 x 100 [mm]
	Temperature	20 °C
<b>Inter object</b>	Friction	1000 [-] (Shear)
	Heat transfer coefficient	$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ (Free resting)

**Tab. 12 Nastavení procesu ochlazování stávající stavu výroby ojnice**

Proces kování se nastavoval v „Multiple operation“ (dále jen MO). MO je simulační prostředí, v němž je možné jednotlivé operace (např. úder) sestavit jako řadu po sobě jdoucích operací. První nastavovanou operací při simulaci kování byl první úder. Ten se nastavil v tzv. modulu „forming express“. Modul „forming express“ představuje vždy jeden úder bucharu.

Po každém úderu následovala vždy operace „dwell“ (výdrž), nastavená v modulu „heat transfer express“. Jedná se o operaci ochlazování kovaného předkovku při spočínutí na dolní zápustce mezi jednotlivými údermi, při které zápustka vyjede do horní úvrati. V tomto sledu se poskládají obě operace („forming express“, „heat transfer express“) za sebou. Celkem se nastavilo 20 úderů („forming express“) a 19 výdrží („heat transfer express“).

<b>Úder</b>	Geometry type	Whole part
	Process type	Hot forming
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Workpiece temperature	607-1140 °C
	Workpiece object type	Plastic
	Workpiece mesh	206 256 / size ratio 3/ min. element size 2
	Workpiece material	42CrMo4 (20-1200 °C)
	Top die temperature	150°C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)
	Top die energy	$3,43 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$
	Top die efficiency	0,3 (pro úder 1 až 3) potom 0,7
	Counter blow hammer	Zaškrtnuto
	Top die mass	$37 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Bottom die temperature	150°C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)
	Bottom die mass	$42,116 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Friction coefficient	0,3 [-] (Shear)
	Heat transfer coefficient	$11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Step increment control	0,1 mm/step
Distance between object	1mm	
<b>Výdrž</b>	Geometry type	Whole part
	Heating type	Dwell on die
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Heat transfer coefficient	$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Heating time	1,5 sec

**Tab. 13 Parametry nastavení procesu kování v MO**

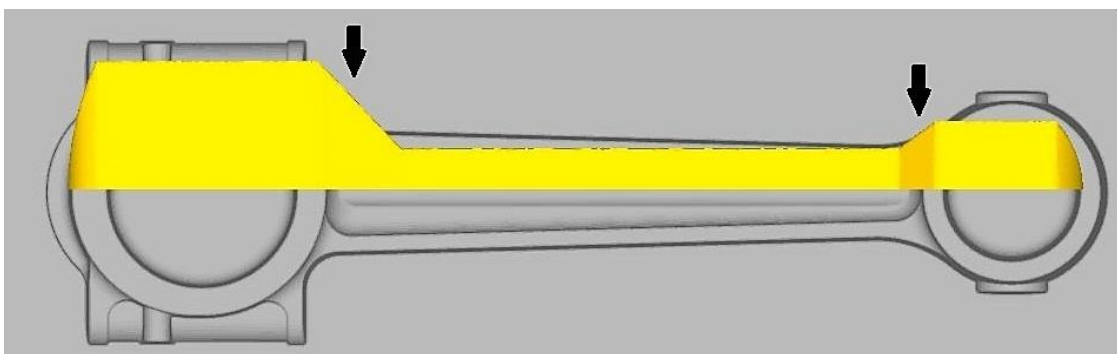
Při nastavení první operace („forming express“) bylo nutné načíst geometrii předkovku z „Pre-procesoru“, která odpovídala kroku výpočtu s dobou ochlazování 120 sekund. Spolu s geometrií se načítla i síť předkovku, která se nastavila již při ochlazování. Opět bylo nutné v MO nastavit rovinu symetrie. Následně se načítla geometrie horního a dolního dílu zápusky. CAD modely obou dílů zápusky byly převzaty z CPF. Bylo nutné je pouze převést na formát STL. Tento formát umožňuje v Deformu načíst 3D CAD objekty.

Teplota zápustek byla v prvním úderu nastavená na 150 °C, pro druhý úder pak na 200 °C a od třetího úderu měly zápustky stálou teplotu 250 °C. Toto nastavení mělo zjednodušeně popisovat vedení tepla mezi zápustkou a předkovkem, při kterém se uvažuje teplota obou dílů zápustky konstantní. V tomto zjednodušeném případě přestupu tepla dojde díky zadanému součiniteli přestupu tepla pouze k ochlazení předkovku, ne však k ohřátí zápustky od předkovku. Zjednodušení bylo zvoleno z důvodu úspory výpočetního času simulace procesu kování. Simulace s uvažováním přestupu tepla mezi předkovkem a zápustkou bude provedena z důvodů náročnosti na výpočetní čas pouze pro variantu předkovku, která se bude jevit z hlediska optimalizace jako nejvýhodnější (viz kapitola č. 9.6). Hodnota součinitele přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] je jiná pro modul „forming express“ (úder) a jiná pro „heat transfer express“ (výdrž). Během úderu je jeho hodnota nastavena na  $11 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ , ale během výdrže kdy se uvažuje volné spočinutí předkovku v dolním dílu zápustky, je jeho hodnota uvažovaná  $1 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ . Tato hodnota součinitele přestupu tepla je v nabídce Deformu jako standartní nastavení.

Dále bylo nutné nastavit parametry bucharu. Hodnoty jako energie bucharu, účinnost bucharu, hmotnosti soustavy beranu a zápustky a rychlosti taktu bucharu byly dodány CPF. Energie bucharu byla nastavena na  $3,43 \cdot 10^8 N \cdot mm$ . Jakmile dojde k vyčerpání energie bucharu při úderu, simulace přejde na další krok (výdrž). Účinnost bucharu byla nastavena pro první tři údery jen na 30 %, potom pro ostatní kroky se zvýšila na 70 %. Také se museli nastavit hmotnosti pro horní a dolní část soustav beranu a zápustky, které jsou při kování v pohybu. Horní část soustavy beranu a zápustky je tvořena hmotností horního beranu 35 000 kg, hmotností horního dílu zápustky 2 000 kg. V hmotnosti horního dílu zápustky je zahrnuta hmotnost bloku a vložky. Hmotnost dolní části soustavy je v Deformu nastavena na 42 116 kg. Hmotnost dolní části soustavy je tvořena 40 000 kg dolního beranu, 2 000 kg má dolní díl zápustky a 116 kg je hmotnost předkovku. Výdrž mezi jednotlivými údery trvala 1,5 sekundy a odpovídala kovacímu taktu bucharu 40 úderů za minutu. Posledním důležitým krokem nastavení procesu kování, bylo nastavení koncové kovací polohy („Distance between object“). Do této polohy má horní zápustka dojet tak, aby mezi oběma zápustkami byla mezera 1 mm. Podrobnosti v nastavení procesu kování jsou uvedeny v tabulce č. 13.

### 7.3 Analýza tvaru předkovku stávajícího způsobu kování

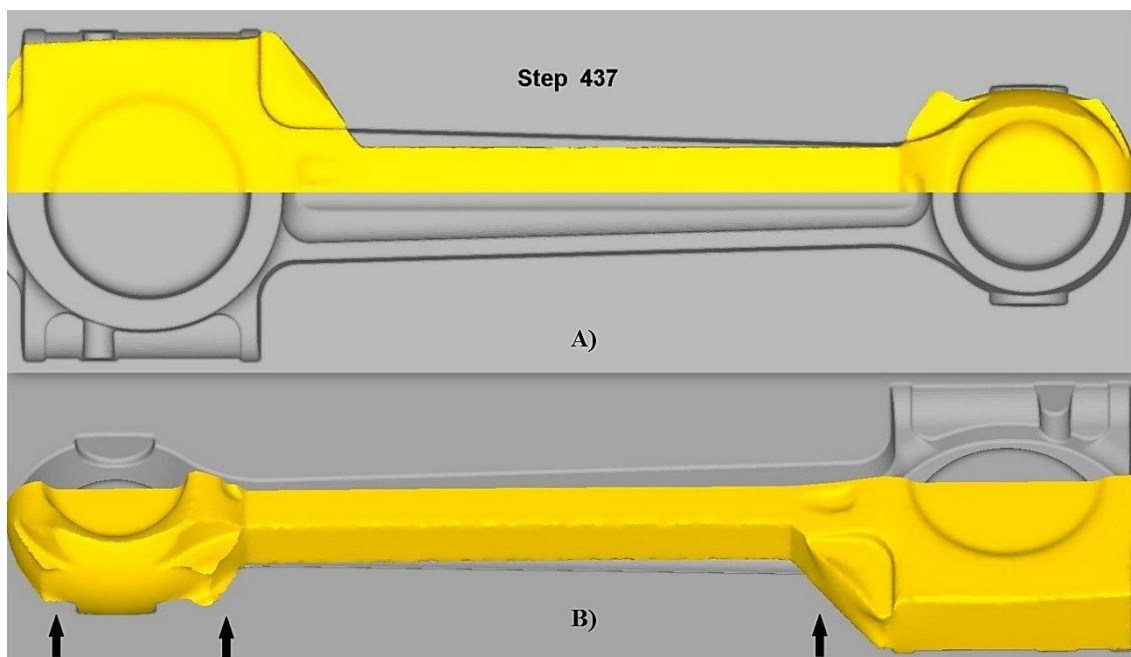
Navržený tvar předkovku se nezdál být vhodný. Celková délka předkovku byla dostatečná, ale dřík byl příliš krátký. Při vložení předkovku do dutiny zápustky, přečníval materiál předkovku přes okraj dutiny, jak v místě zkosení hranolu směrem od hlavy, tak i směrem od oka. Obrázek č. 19 znázorňuje umístění předkovku v zápustkové dutině (pohled shora na dutinu zápustky). Dále je možné na obrázku č. 19 vidět místa, v kterých materiál předkovku přesahuje přes okraj dutiny zápustky. Tato místa jsou označena černými šipkami.



**Obr. 19 Umístění předkovku v dutině**

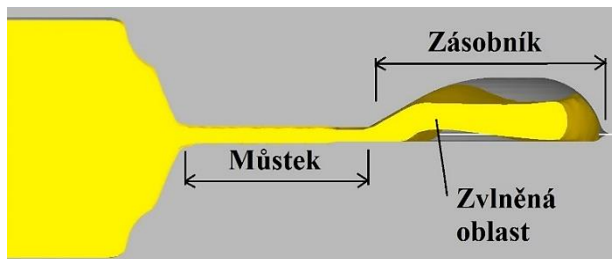
Tento přečnivající materiál se hned při prvním úderu bucharu začal odřezávat (nejprve v oblasti oka) o hranu dutiny zápustky. Při druhém úderu docházelo k odřezávání i přečnivající části na straně hlavy. Tuto situaci vystihuje obrázek č. 20. Černé šipky v obrázku č. 20 značí místa odřezávání přesahujícího materiálu. U Obrázku č. 20 A) je směr pohledu na zápustku shora a obrázek č. 20 B) znázorňuje prostorový pohled na zápustku.

První úder bucharu, při kterých docházelo k odřezávání materiálu, způsobovaly pro Deform velmi složité propočty. Díky tomu se čas na vypočítání simulace značně prodloužil. Dalším nepříznivým důsledkem nevhodného tvaru předkovku bylo zvýšení počtu úderů. Buchar v takovém to případě musí vynaložit velké množství energie na to, aby byly přečnivající části předkovku odřezány. V důsledku odřezávání se dá také očekávat velké namáhání a opotřebení zápustky.



**Obr. 20 Odřezávaná část předkovku: A) pohled shora, B) prostorový pohled**

Do osmého úderu docházelo k tváření pouze hlavy a oka. Od osmého úderu docházelo k tváření dřívku a kov začal již zatékat do výronkové drážky. Celá součást byla vykována za 17. úderů. Proces kování s takto navrženým tvarem předkovku se jevil značně nerovnoměrný, neboť téměř polovina všech úderů byla spotřebována na vykování hlavy a oka. Jak už bylo zmíněno dříve, zvýšený počet úderů byl způsoben odřezáváním okrajů přečnávajícího materiálu předkovku. Až po osmém úderu se začal kovat i samotný dřív. Mezitím velké množství materiálu z hlavy a oka předkovku přeteklo do výronkové drážky. Z výše uvedeného lze tedy konstatovat, že ani zaplňování výronkové drážky neprobíhá rovnoměrně.

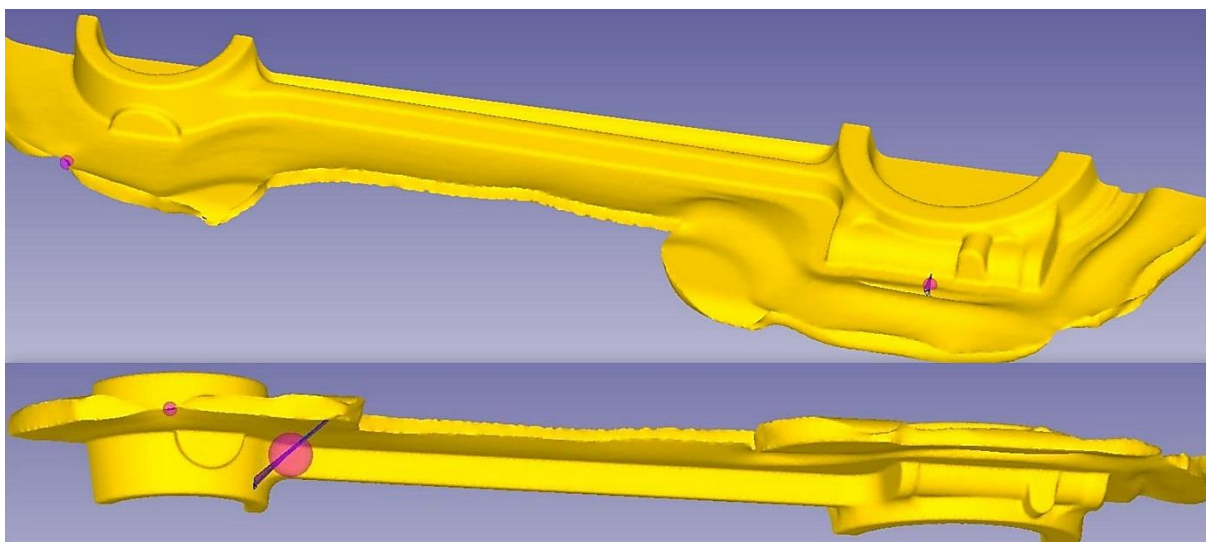


**Obr. 21** Zaplnění výronkové drážky

Při 16. úderu byla výronková drážka již plná. Hrozilo tak riziko, že by mohl přebytečný materiál během dalšího úderu protéci mezi oběma díly zápustky. Obrázek č. 21 ilustruje příčný řez zápustkou při posledním 17. úderu, při kterém přebytečný materiál narazil na konec zásobníku výronkové drážky. Materiál neměl možnost dále se přemísťovat, a proto se v zásobníku začal vlnit. V obrázku č. 17 je označena zmíněná zvlněná oblast.

#### Přeložky:

Hned při prvním úderu se vytvořila přeložka na okraji hlavy předkovku a v místě přechodu mezi okem a dřívkem. Obě přeložky se však postupně přesunuly do výronku. V obrázku č. 22 je znázorněn výkovek s přeložkami při posledním úderu. Deform přeložky značí jako fialové oblasti.



**Obr. 22** Přeložky ve výkovku

## 8 Cesty optimalizace stávajícího postupu kování

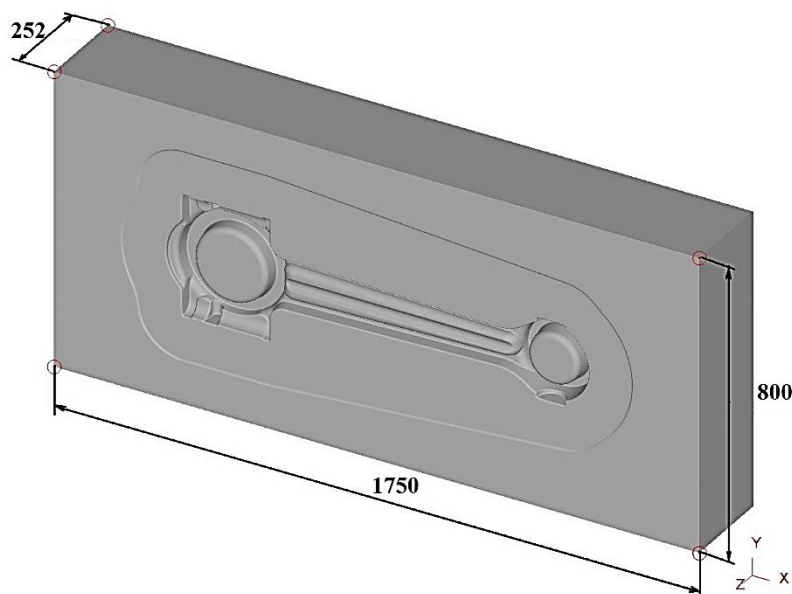
Optimalizace postupu kování se bude na základě předchozí simulace ubírat dvěma směry:

- a) *Navržení optimálního tvaru předkovku s cílem snížit jeho hmotnost a upravit tvar, aby lépe vyhovoval tvaru dutiny zápustky.*
- b) *Navržení optimálního postupu kování se zřetelem na pokles teploty a nehomogenitu teplotního pole ve vztahu k rychlosti kování a manipulace s předkovkem.*

Při optimalizaci postupu kování je také možné jít cestou úpravy tvaru dutiny zápustky. Simulace stávajícího stavu výroby neodhalila žádné nedostatky ve tvaru dutiny zápustky. Z toho důvodu se optimalizace bude věnovat pouze úpravě tvaru předkovku.

### 8.1 Postup při návrhu optimálního tvaru předkovku

Pro stanovení optimálního tvaru předkovku se zvolila metoda, která je v porovnání s tradičním způsobem navrhování tvaru předkovku podle CPF v mnohém nová a využívá jednoduchého způsobu výpočtu objemů jednotlivých částí pomocí CAD softwaru.



Obr. 23 Model dolního dílu zápustky

Při stanovování objemu předkovku, se nejprve vypočetly objemy celých dílů zápustky (horní a dolní), ale bez vytvořené dutiny. Na obrázku č. 23 je znázorněn dolní díl zápustky. Poté se zjistily objemy obou dílů zápustky s dutinou. Tyto hodnoty se zjistily za pomoci CAD softwaru. Nakonec se obě hodnoty (objem celé zápustky a objem zápustky s dutinou) od sebe odečetly a získaly se objemy dutin obou dílů zápustky. Touto metodou se také vypočetly objemy dutin zápustky bez výronkové srážky a s výronkovou drážkou. V dalším kroku se sečetly objemy dutin obou dílů zápustky dohromady. Celkový objem dutiny výkovku s výronkovou drážkou činí  $20\,831\,342\text{ mm}^3$  a objem dutiny výkovku bez výronkové drážky je  $10\,659\,960\text{ mm}^3$ . Lze tedy říci, že výronková drážka je na dimenzovaná přibližně na jednu tak velký objem materiálu.

Poté se přešlo k výpočtu objemů jednotlivých částí výkovku (oka, hlavy, dříku). Oběma díly zápustky (horní a dolní) se vedly dva příčné řezy. Řez, který byl veden na straně od hlavy, měl vzdálenost od kraje zápustky 604 mm. Druhý řez byl situován ze strany k oku a byl vzdálen od stěny kraje zápustky ve vzdálenosti 505 mm. Tyto řezy byly zvoleny tak, aby oddělily jednotlivé části výkovku od sebe. V tabulce č. 14 jsou uvedeny objemy jednotlivých částí výkovků pro horní i dolní díl zápustky. Při jejich výpočtu se postupovalo obdobným postupem jako při výpočtu objemu celkové dutiny zápustky. Odečetly se od sebe plné objemy zápustky jednotlivých částí, které měly délku odpovídající vzdálenosti od řezu a objemy zápustky zjištěnými z CAD softwaru (již s vytvořenou dutinou). Vypočítané objemy v tabulce č. 14 se vztahují k výkovku bez výronkové drážky.

<b>Horní zápustka</b>	
Objem hlavy:	$2\,460\,580\text{ mm}^3$
Objem oka:	$1\,250\,098\text{ mm}^3$
Objem dříku:	$1\,405\,787\text{ mm}^3$
<b>Dolní zápustka</b>	
Objem hlavy:	$2\,657\,689\text{ mm}^3$
Objem oka:	$1\,322\,804\text{ mm}^3$
Objem dříku:	$1\,562\,998\text{ mm}^3$

**Tab. 14** Hodnoty jednotlivých částí výkovku pro horní a dolní díl zápustky

Dalším krokem bylo určit poměr, který by vyjadřoval zaplnění výronkové drážky. Pro tento účel byla použita klasická trojčlenka. Nejprve bylo potřeba vypočítat celkový objem výronkové drážky a to odečtením celkového objemu výkovku s výronkovou drážkou od celkového objemu výkovku bez výronkové drážky. Z vypočteného celkového objemu výronkové drážky ( $10\,171\,382\text{ mm}^3$ ), se následně určil objem připadající na zaplnění 50 % výronkové drážky ( $5\,085\,691\text{ mm}^3$ ). K získání poměru pro zaplnění výronkové drážky z 50% bylo nutné podělit hodnotu objemu výkovku s výronkem při zaplnění z 50 % ( $15\,745\,651\text{ mm}^3$ ) s hodnotou objemu výkovku ( $10\,659\,960\text{ mm}^3$ ). Získaný poměr má hodnotu 1,5. Následně se sečetly objemy jednotlivých částí výkovku pro oba díly zápustky (viz. tabulka č. 14) a tyto objemy se násobily poměrem 1,5. V tabulce č. 15 jsou uvedené nové objemy jednotlivých částí předkovku s uvažováním zaplnění výronkové drážky na 50% (násobené poměrem 1,5).



Celkový objem hlavy:	7 677 404 mm <sup>3</sup>
Celkový objem oka:	3 859 355 mm <sup>3</sup>
Celkový objem dřívku:	4 453 180 mm <sup>3</sup>

**Tab. 15 Hodnoty objemů jednotlivých částí výkovku s přídavkem 50% na zaplnění výronkové drážky**

Celkový objem po sečtení všech částí výkovku z tabulky č. 15 činí 15 989 940 mm<sup>3</sup> a odpovídá hmotnosti 126,3 kg.

Dále bylo nutné vypočítat objemy pro jednotlivé části výkovku. Všechny rozměry použité při výpočtu objemů jednotlivých částí předkovku jsou pro přehlednost uvedené v tabulce č. 16. Výšky a šířky pro hlavu, oko a dřívku byly určeny z největších rozměrů (ve směrech vzájemně na sebe kolmých) v řezech procházejících těmito částmi výkovku.

Objem	Délka / (R <sub>1</sub> / R <sub>2</sub> ) [mm]	Tloušťka / (S <sub>1</sub> / S <sub>2</sub> ) [mm]	Výška / (S <sub>1</sub> / S <sub>2</sub> ) [mm]
V <sub>1</sub> -objem zakulacení hlavy	25 / (R340 / R68)	—	—
V <sub>2</sub> -objem zakulacení oka	72 / (R84 / R66)	—	—
V <sub>3</sub> -objem hranolu ze strany k hlavě	80	(321 / 127)	(106 / 64)
V <sub>4</sub> -objem hranolu ze strany k oku	60	(132 / 127)	(207 / 64)
V <sub>5</sub> -objem hlavy	157	321	106
V <sub>6</sub> -objem dřívku	630	127	64
V <sub>7</sub> -objem oka	58	132	207

**Tab. 16 Rozměry jednotlivých částí předkovku**

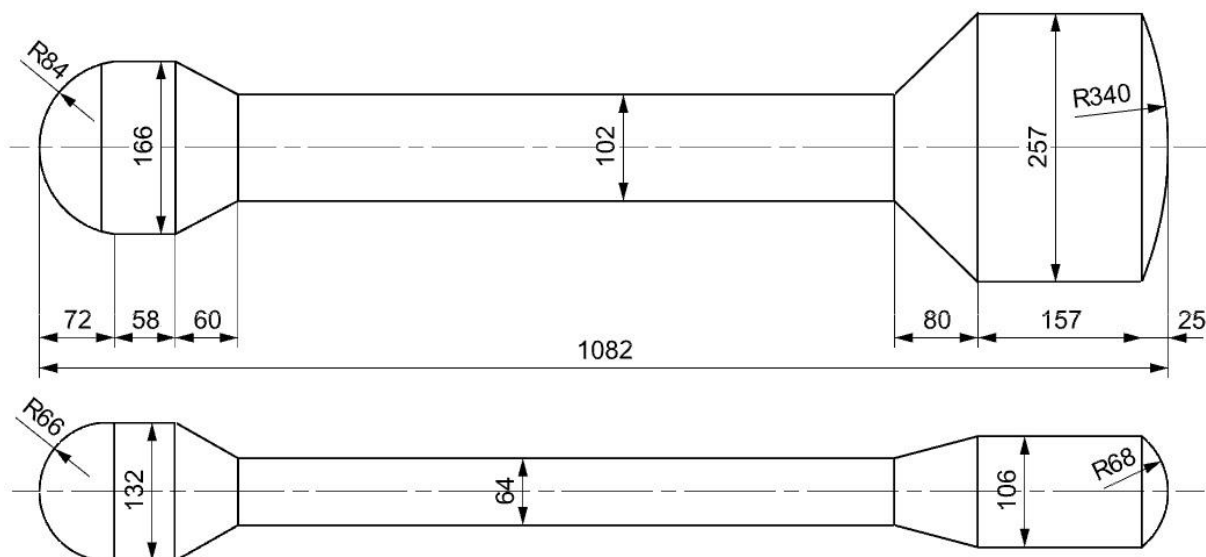
Rádus R340 v zakulacení hlavy byl stanoven podle předchozích zkušeností CPF. Zakulacení konců předkovku, vzniká při přechování výšky polotovaru na výšku oka a hlavy předkovku. Objemy V<sub>1</sub> a V<sub>2</sub> byly odměřeny z CAD softwaru. Vypočítaný celkový objem předkovku činil 16 632 911 mm<sup>3</sup> a jeho hmotnost byla 131,4 kg. Tento objem byl větší, než uvažovaný objem výkovku při zaplnění výronku z 50 % (126 kg). Ke vzniklé odchylce došlo přičtením objemů V<sub>1</sub> a V<sub>2</sub> (objemy zakulacení hlavy a oka).

Při virtuálním vkládání modelu předkovku do zápustky, bylo v prostředí Deformu zjištěno, že příčné rozměry předkovku jsou příliš velké. Proto bylo učiněno rozhodnutí o jejich redukcii. V tabulce č. 17 jsou uvedeny nové příčné rozměry předkovku.

	Původní hodnota [mm]	Nová hodnota [mm]
Dřík	127	102
Hlava	321	257
Oko	207	166

**Tab. 17** Změněné příčné rozměry předkovku

Celkový objem s novými rozměry se změnil na  $0,0131434486 \text{ m}^3$ , což odpovídá přesně 103,2 kg. Tvar a rozměry předkovku jsou uvedeny v obrázku č. 24.



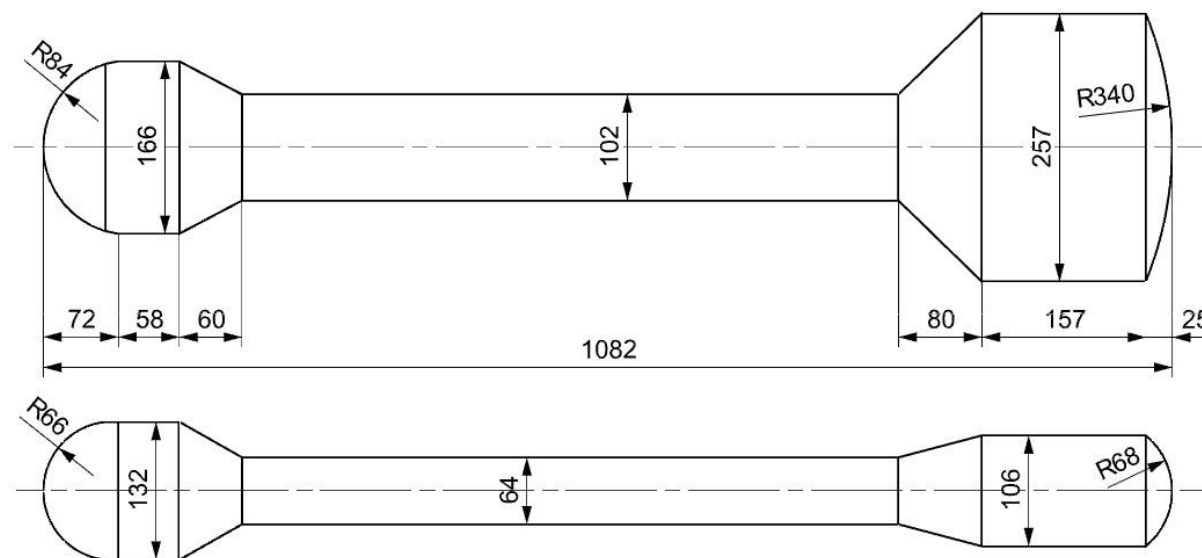
**Obr. 24** Nákres návrhu optimálního tvaru předkovku

## 9 Provedení kontrolních simulací

### 9.1 Simulace varianty A

Výše uvedené tabulky č. 16, 17 vyjadřují navržené rozměry první varianty tvaru předkovku. Všechny navržené rozměry jsou také vyobrazené v obrázku č. 25. Ve srovnání s návrhem tvaru předkovku dle CPF, je předkovek podle prvního návrhu kratší o 17 mm.

Naopak délka dřívku byla zvolena o 90 mm delší. Dále je na první pohled vidět (viz obrázek č. 17), že hlava předkovku podle návrhu CPF je protáhlejší. Hmotnost předkovku podle varianty A byla 103,2 kg.



Obr. 25 Náčrtes předkovku podle varianty A

Prvním krokem bylo simulování procesu ochlazování navrženého předkovku po dobu 2 minut. Proces ochlazování se nastavil stejně jako u stávajícího stavu výroby ojnice v „Pre-processoru“ (viz kapitola 7.2). Po načtení geometrie navrženého předkovku (polovina celého předkovku), bylo nutné vytvořit síť daného objektu. „Size ratio“ bylo nastaveno stejně jako u simulace stávajícího stavu výroby na 3 a minimální velikost elementů byla 2 mm. Vytvořená síť obsahovala 196 140 elementů. Materiál předkovku zůstal stejný (DIN 42CrMo4). Ochlazování bylo nastaveno stejně jako v případě simulace stávajícího výrobního procesu (viz kapitola 7.2).

V MO se spolu s geometrií načetla i síť předkovku po 2 minutách ochlazování. Energie bucharu se ponechala na stejné hodnotě jako u stávajícího stavu výroby ( $3,43 \cdot 10^8$  N·mm).

Stejně tak se ponechala i účinnost v jednotlivých úderech (účinnost 0,3 pro první tři údery, poté v každých dalších úderech 0,7). Hmotnost dolní soustavy beranu a zápustky byla 42 104 kg. Součinitel přestupu tepla byl  $11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a třecí součinitel 0,3. Prodleva mezi jednotlivými údery zůstala 1,5 sekundy. Koncová dokovací vzdálenost mezi oběma díly zápustky („Distance between object“) byla přednastavena na 1 mm. Podrobné nastavení simulace kování je uvedeno v tabulce č. 18.

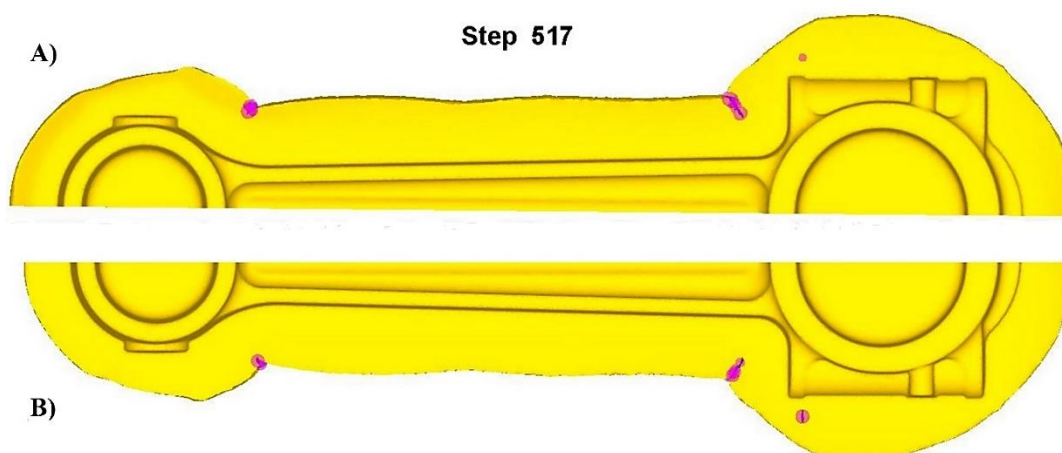
<b>Úder</b>	Geometry type	Whole part	
	Process type	Hot forming	
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only	
	Workpiece temperature	1200 °C	
	Workpiece object type	Plastic	
	Workpiece mesh	196 140 / size ratio 3/ min. element size 2	
	Workpiece material	42CrMo4 (20-1200°C)	
	Top die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)	
	Top die energy	$3,43\cdot 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}$	
	Top die efficiency	0,3 (pro úder 1 až 3) potom 0,7	
	Counter blow hammer	Zaškrtnuto	
	Top die mass	$37 \text{ N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{mm}^{-1}$	
	Bottom die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)	
	Bottom die mass	$42,104 \text{ N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{mm}^{-1}$	
	Friction coefficient	0,3 [-] (Shear)	
	Heat transfer coefficient	$11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	
	Step increment control	0,1 mm/step	
	Distance between object	1 mm	
	<b>Výdrž</b>	Geometry type	Whole part
		Heating type	Dwell on die
Temperature calculation		Calculate temperature in workpiece only	
Heat transfer coefficient		$1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	
Heating time		1,5 sec	

**Tab. 18 Nastavení procesu kování**

### Přeložky:

Přeložky se začínaly dělat od 9 úderu. Vytvářely se v místech přechodu mezi hlavou a dříkem nebo mezi okem a dříkem. Jak je vidět z obrázku č. 26 pořízeného z „Post-procesoru“, přeložky při posledním 13 úderu nakonec dotekly do výronkové drážky. Celý výkovek byl vykován za 13 úderů. Obrázek č. 26 znázorňuje přeložky ve výkovku A) při pohled zdola, B) při pohled shora.

Výronková drážka byla během kování rovnoměrně vyplňována a v žádném místě nedošlo k úplnému zaplnění zásobníku výronkové drážky, jako tomu bylo u simulace stávajícího stavu výroby.



Obr. 26 Přeložky výkovku dle varianty A: A) pohled zdola, B) pohled shora

## 9.2 Simulace varianty B

Cílem této simulace bylo ověřit chování materiálu při pomalejším taktu úderů. Takt úderu se snížil ze 40 úderů za minutu na hodnotu 30 úderů za minutu. Pro účely simulace byl použit předkovek z varianty A. Nastavení simulace ochlazování a kování bylo stejné jako v případě simulování varianty A. Jediným rozdílem bylo přenastavit v MO prodlevu mezi jednotlivými údery na 2 sekundy. Jelikož se u této simulace vycházelo z tvaru předkovku varianty A, zůstala hmotnost předkovku 103,2 kg. Nastavení simulace procesu kování u této varianty uvádí tabulka č. 19.

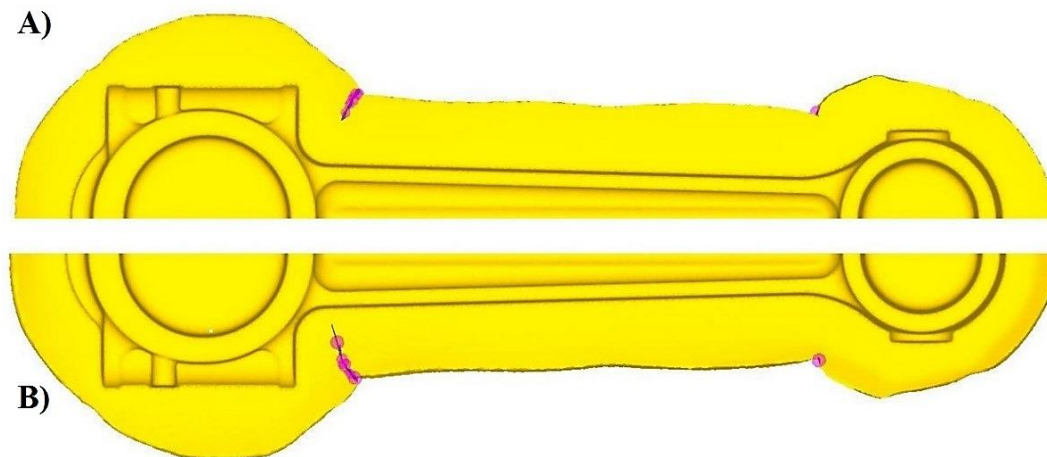
<b>Úder</b>	Geometry type	Whole part
	Process type	Hot forming
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Workpiece temperature	1200 °C
	Workpiece object type	Plastic
	Workpiece mesh	196 508 / size ratio 3/ min. element size 1,99999
	Workpiece material	42CrMo4 (20-1200°C)
	Top die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)
	Top die energy	$3,43 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$
	Top die efficiency	0,3 (pro úder 1 až 3) potom 0,7
	Counter blow hammer	Zaškrtnuto
	Top die mass	$37 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Bottom die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)
	Bottom die mass	$42,104 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Friction coefficient	0,3 [-] (Shear)
	Heat transfer coefficient	$11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Step increment control	0,1 mm/step
	Distance between object	1 mm
<b>Výdrž</b>	Geometry type	Whole part
	Heating type	Dwell on die
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Heat transfer coefficient	$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Heating time	2 sec

**Tab. 19** Nastavení procesu kování

**Přelozky:**

V 7 úderu se vytvořila přelozka v místě přechodu mezi hlavou a dříkem. Tato přelozka se postupně při kování posouvala směrem do výronku. Obrázek č. 27 A) ukazuje výkovek s přelozkami při pohledu zdola, B) při pohledu shora.

Obrázek č. 27 je pořízený při posledním 13 úderu. Přeložka byla při tomto úderu již celá ve výronkové drážce. Během kování se ještě vytvořila přeložka, která byla již od počátku ve výronkové drážce. Celý výkovek byl vykovan za 13 úderů.



**Obr. 27 Přeložky ve variantě se sníženou rychlostí úderů:  
A) pohled zdola, B) pohled shora**

Z výsledků simulace vyplývá, že rychlost taktu úderů neměla na výsledek simulace žádný vliv. Nebyla potvrzena domněnka, že s menším taktém úderů poroste počet úderů nutných pro vykování výkovku. Počet úderů byl stejný jako v předchozí simulaci, v které byl rychlejší takt úderů (40 úderů/minutu). Také se nepotvrdilo, že pomalejší takt úderů má vliv na vznik přeložek, neboť přeložky vznikly v totožných místech, jako u varianty s rychlostí taktu 40 úderů/minutu.

### 9.3 Simulace varianty C

V této variantě se vycházelo opět z návrhu tvaru předkovku varianty A, ale byla pozměněna šířka dříku předkovku. Změna šířky dříku byla provedena po domluvě s CPF. Důvodem zmenšení šířky dříku, bylo odtékání přílišného objemu přebytečného materiálu do výronkové drážky. Zvolená hodnota byla odvozena z plochy dříku předkovku stávajícího stavu výroby (dle návrhu CPF). Tento příčný průřez se jevil dostačující pro zaplnění tvaru dutiny zápustky v místě dříku. Z této plochy se dopočítala šířka dříku, přičemž výška dříku předkovku zůstala zachována na hodnotě z varianty A (64 mm). Šířka se oproti variantě A zúžila ze 102 mm na hodnotu 84 mm.

Při simulaci této varianty se uvažovalo ochlazování předkovku po dobu 2 minut z teploty 1200 °C. Postup nastavení procesu ochlazování byl obdobný jako u simulace stávajícího stavu výroby. Jediné změněné údaje souvisely s jinou zadávanou geometrií předkovku. Celkový počet elementů se změnil na 189 492. Také se musel přepočítat objem předkovku. Nový objem činil 12 322 407 mm<sup>3</sup>. Hmotnost tohoto předkovku byla 96,7 kg. Samotné nastavení procesu kování probíhalo opět v MO.

Z vygenerované databáze procesu ochlazování se načetla geometrie předkovku, která odpovídala ochlazování po 2 minutách. Tabulka č. 20 uvádí podrobnosti nastavení simulace kování v MO. Nastavení parametrů simulace bylo téměř stejné, jako při řešení simulace varianty A. Odlišnosti opět souvisely se změnou geometrii předkovku. Načtená síť předkovku obsahovala 187 984 elementů. S novou geometrií se změnila i hmotnost dolní soustavy beranu a zápustky na hodnotu 42 097 kg. Počet úderů byl nastaven na 40 úderů za minutu, čemuž odpovídá prodleva mezi jednotlivými údery 1,5 sekundy.



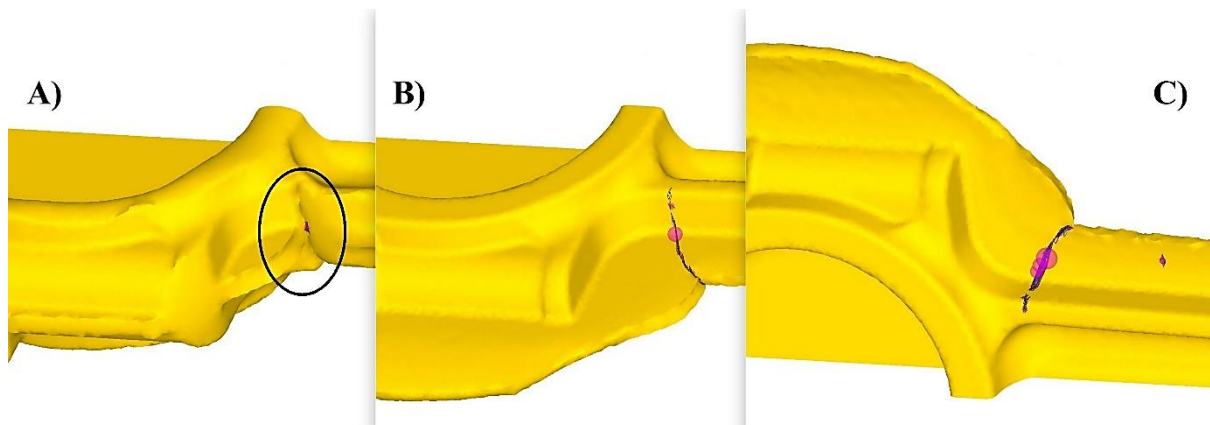
<b>Úder</b>	Geometry type	Whole part
	Process type	Hot forming
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Workpiece temperature	581~1087 °C
	Workpiece object type	Plastic
	Workpiece mesh	187 984 / size ratio 3/min. element size 2
	Workpiece material	42CrMo4 (20-1200°C)
	Top die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder) 250 °C (3 úder)
	Top die energy	$3,43 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$
	Top die efficiency	0,3 (pro úder 1 až 3) potom 0,7
	Counter blow hammer	Zaškrtnuto
	Top die mass	$37 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Bottom die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)
	Bottom die mass	$42,097 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Friction coefficient	0,3 [-] (Shear)
	Heat transfer coefficient	$11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Step increment control	1 mm/step
Distance between object	1mm	
<b>Výdrž</b>	Geometry type	Whole part
	Heating type	Dwell on die
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Heat transfer coefficient	$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Heating time	1,5 sec

**Tab. 20 Nastavení procesu kování**

**Přelozky:**

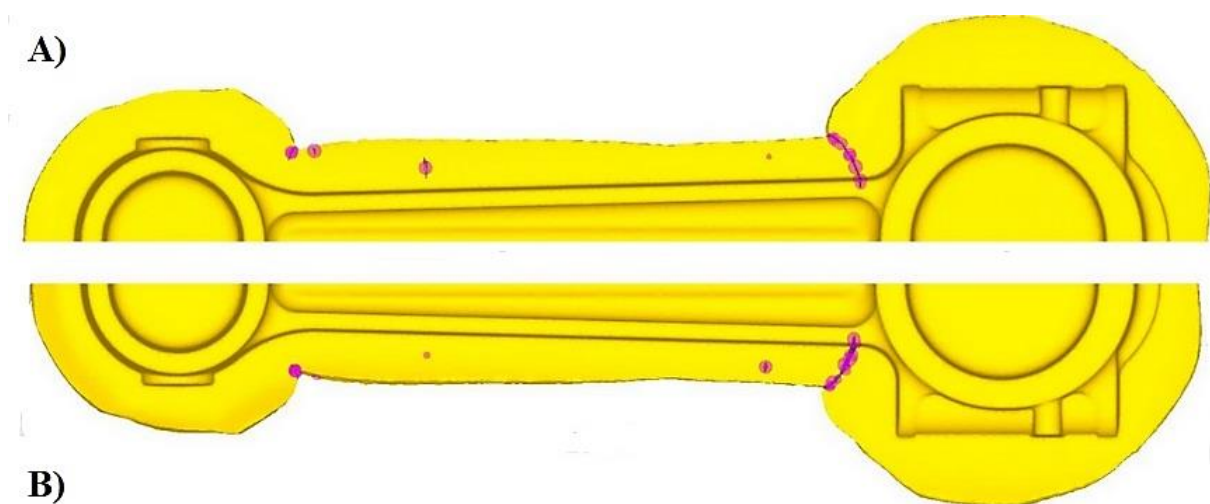
Přelozky se začaly dělat od 9. úderu. Nejprve se vytvořila malá přelozka v blízkosti dříku na spodní straně výkovku. Tato přelozka se ale nacházela již ve výronkové drážce. Problémovým místem byl přechod mezi dříkem a hlavou. Při kování docházelo k odtékání přebytečného materiálu jak z dříku, tak i z hlavy.

Právě v 9. úderu se oba toky materiálu v místě přechodu střetly a vznikly zde přeložky. Ty zasahovaly již na povrch výkovku. V průběhu kování se přeložky od z tohoto místa roztáhly až do výronkové drážky. Na obrázku č. 28 A) je vidět zakroužkovaná oblast, ve které docházelo při 9. úderu k iniciaci přeložek v místě přechodu mezi dříkem a hlavou předkovku. Obrázek č. 28 B) a C) ukazuje stejné místo s výskytem přeložek (z obou stran), ale při posledním 14. úderu.



**Obr. 28 Přeložky v místě přechodu mezi hlavou a dříkem: A) místo iniciace přeložek, B) přeložky při posledním úderu, C) stejné místo s přeložkami, ale z druhé strany výkovku**

Během kování vznikla ještě jedna přeložka, která se však vyskytovala celou dobu ve výronkové drážce. Na obrázku č. 29 jsou vidět všechny přeložky vzniklé v průběhu kování. Obrázek č. 29 A) výkovek při pohledu zdola a B) při pohledu shora. Celý výkovek byl vykován za 14. úderů.

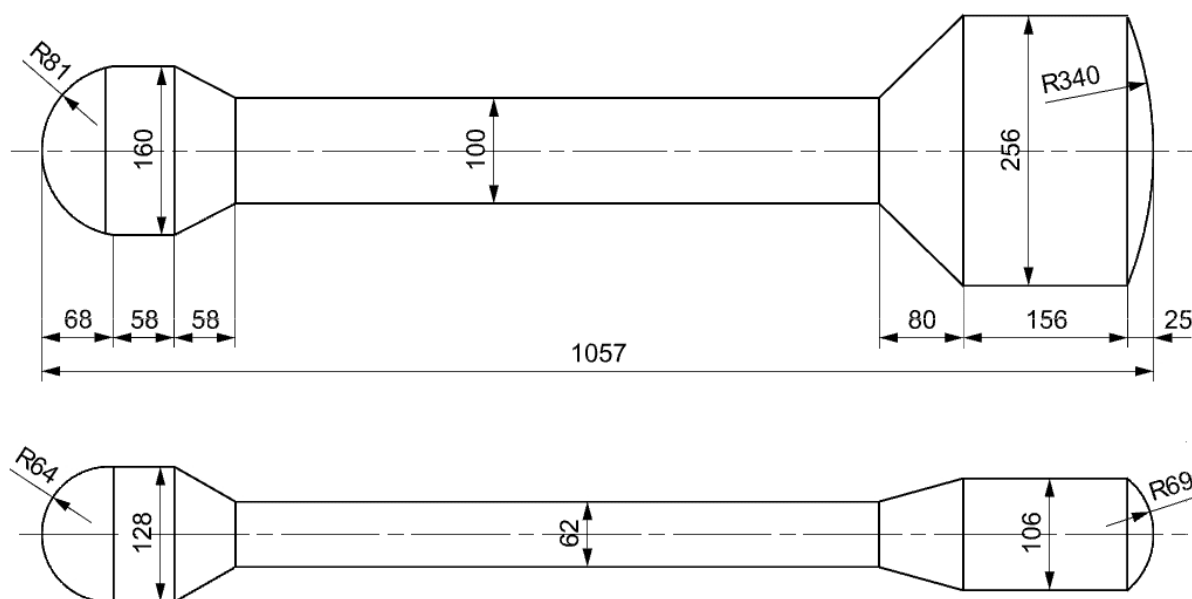


**Obr. 29 Přeložky ve variantě C: A) pohled zdola, B) pohled shora**

Předkovek varianty C s užším dříkem nelze pokládat za vhodný. U této varianty docházelo k značnému výskytu přeložek a to i v místech samotného výkovku.

## 9.4 Simulace varianty D

U této varianty předkovku byly téměř veškeré rozměry pozměněny. Obrázek č. 30 ukazuje náčrtek předkovku s jednotlivými změněnými rozměry. Oproti variantě A, došlo k mírnému zkrácení celkové délky předkovku z 1082 mm na 1057 mm. Obecně lze říci, že kromě rozměrů hlavy se všechny rozměry výrazně zmenšily. Dřík byl kratší o 18 mm než ve variantě A. Všechny tyto změny způsobily, že hmotnost klesla na 97,4 kg, což představuje ve srovnání s variantou A další úsporu materiálu cca o 6 kg. V obrázku č. 30 jsou uvedeny všechny nově zvolené rozměry předkovku.



Obr. 30 Náčrtek předkovku dle varianty D

Při simulaci tohoto návrhu byl proces ochlazování nastaven opět na 2 minuty. Změny provedené v nastavení simulace procesu ochlazování byly následující. Celkový počet elementů předkovku se změnil na 196 504. Navržením nové geometrie se objem jedné poloviny předkovku změnil na  $6,20643 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$ . Zbylé parametry procesu ochlazování byly nastaveny obdobně jako u simulace varianty A.

V simulaci procesu kování se potom předkovek načelil po 2 minutách ochlazování. Počet elementů sítě předkovku byl 188 124. Načtený předkovek vážil 97,4 kg, proto bylo nutné změnit hmotnost dolní soustavy beranu a zápustky na hodnotu 42 098 kg. Prodleva mezi jednotlivými údery byla již přednastavená z předchozích simulací na hodnotu 1,5 sekundy. Ostatní parametry nastavení procesu kování jsou shodné s předchozími variantami předkovku. Podrobnosti nastavení kování v MO jsou uvedeny v tabulce č. 21.

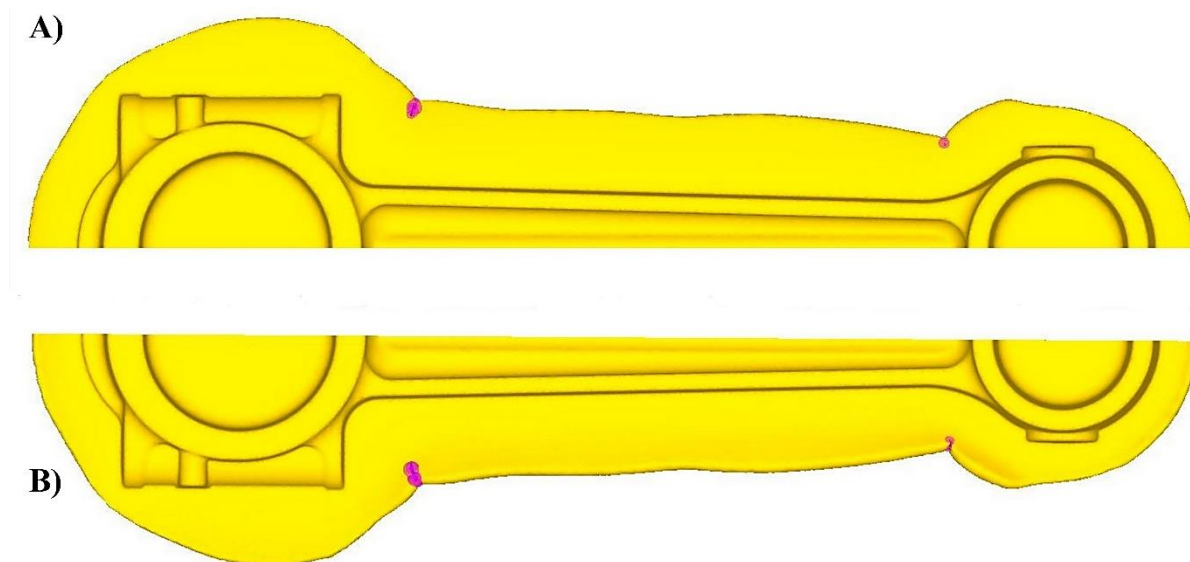
<b>Úder</b>	Geometry type	Symmetry
	Process type	Hot forming
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Workpiece temperature	653~1132 °C
	Workpiece object type	Plastic
	Workpiece mesh	18 8124 / size ratio 3/ min. element size 2
	Workpiece material	42CrMo4 (20-1200 °C)
	Top die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)
	Top die energy	$3,43 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$
	Top die efficiency	0,3 (pro úder 1 až 3) potom 0,7
	Counter blow hammer	Zaškrtnuto
	Top die mass	$37 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Bottom die temperature	150 °C (1 úder), 200 °C (2 úder), 250 °C (3 úder)
	Bottom die mass	$42,098 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Friction coefficient	0,3 [-] (Shear)
	Heat transfer coefficient	$11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Step increment control	1 mm/step	
Distance between object	1 mm	
<b>Výdrž</b>	Geometry type	Whole part
	Heating type	Dwell on die
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Heat transfer coefficient	$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Heating time	1,5 sec

**Tab. 21 Nastavení procesu kování**

**Přeložky:**

Jak je z obrázku č. 31 dobře patrné, všechny vzniklé přeložky se po vykování nalézaly ve výronkové drážce. Obrázek č. 31 A) znázorňuje přeložky na spodní straně výkovku, B) přeložky na horní straně výkovku. Přeložky se začaly vytvářet od 4. úderu.

Během kování docházelo k rovnoměrnému zaplňování výronkové drážky. Celý výkovek byl vykován za 9. úderů.



Obr. 31 Přeložky ve výkovku dle druhého návrhu tvaru předkovku:  
A) pohled zdola, B) pohled shora

## 9.5 Simulace varianty E

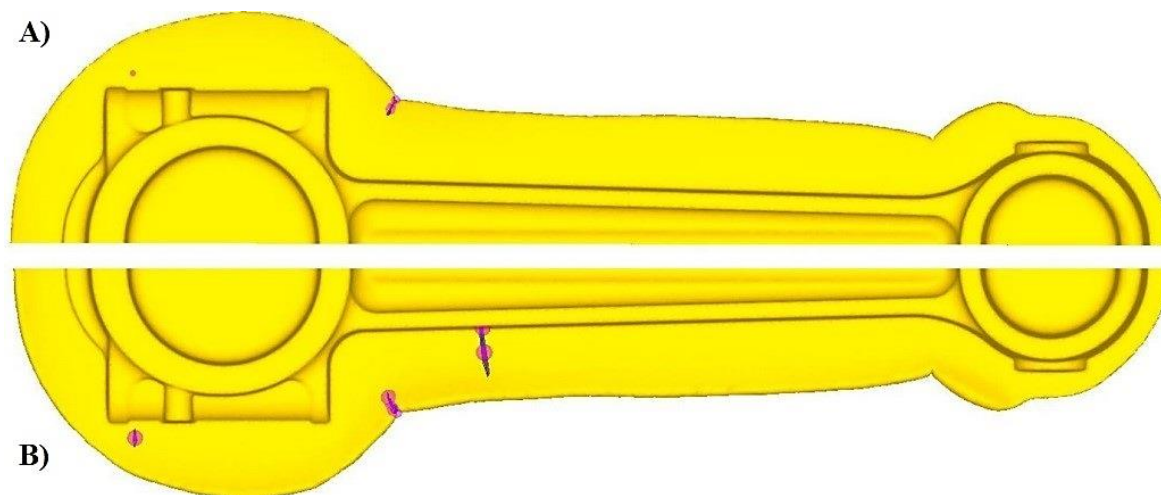
V této simulaci bylo zkoumáno, jak se projeví kratší doba ochlazování předkovku, na proces kování. Pro provedení této varianty byl použit předkovek z předcházející varianty D. Tento tvar předkovku byl vybrán, jelikož měl ze všech doposud provedených návrhů tvaru předkovku nejlepší výstupní parametry. Těmito parametry se myslí: *Nejmenší hmotnost předkovku, bez vzniku nežádoucích přeložek na povrchu výkovku. Také se ušetřil počet úderů nutných na vykování.*

Nastavení procesu ochlazování a procesu kování viz kapitola 9.4. Jediným rozdílem bylo nastavení ochlazování na 1 minutu a následné načtení geometrie předkovku v MO s příslušnou dobou ochlazování. Teplota předkovku načteného po 1 minutě ochlazování se pohybovala v rozmezí teplot od 740 až po 1188 °C. Počet elementů byl 187 364. Hmotnost předkovku byla stejně jako u předchozí varianty D 97,4 kg.

### Přeložky:

Obrázek č. 32 znázorňuje výkovek při posledním 7. úderu. Obrázek 32 A) ukazuje rozmístění přeložek ve výkovku při pohledu zdola, B) při pohledu shora. Simulace kování ukázala, že při druhém úderu se vytvořila přeložka na povrchu dřívku. U této přeložky došlo během kování k jejímu roztažení až do výronkové drážky. **Část této přeložky však zůstala i během kování na povrchu dřívku.**

Při čtvrtém úderu se vytvořila přeložka v místě přechodu mezi dříkem a hlavou. Tato přeložka také během kování odtekla do výronkové drážky. Do výronkové drážky odtekla i přeložka, která se utvořila během 5 úderu na povrchu hlavy výkovku. Celý výkovek byl vykován za 7 úderů.



**Obr. 32 Přeložky ve variantě s kratší dobou ochlazování:  
A) pohled zdola, B) pohled shora**

## 9.6 Simulace s uvažováním vedení tepla v obou dílech zápustky

V této simulaci bylo cílem nasimulovat vedení tepla z ohřátého předkovku do obou dílů zápustky, které měly počáteční teplotu 150 °C. Pro účely simulace byl použit předkovek dle varianty D. Předkovek z této varianty měl ze všech provedených variant nejlepší výstupní parametry (*nejmenší hmotnost, nejnižší počet úderů, žádné kovářské vady na povrchu výkovku*). Předkovek byl stejně jako u varianty D ochlazován na vzduchu po dobu 2 minut. Parametry simulace procesu ochlazování byli totožné jako u varianty D.

Proces vlastního kování byl opět nastavován v MO. V prvním kroku nastavení simulace se nejprve načetla geometrie předkovku po 2 minutovém ochlazování. Načtený předkovek byl opět tvořen jen jednou polovinou z důvodu usnadnění výpočtu výpočetní technice. Načtený předkovek měl síť tvořenou 196 504 elementy. Kovaným materiálem byla opět ocel DIN 42CrMo4. V okrajových podmínkách bylo nutné vyznačit všechny plochy předkovku vyjma roviny symetrie předkovku. Tyto plochy byly určeny pro výměnu tepla s okolím. Načtený předkovek měl z „Pre-processoru“ přednastavený součinitel přestupu tepla pro rozhraní vzduch-těleso (viz obrázek č. 18). Poté se do MO načetly poloviny obou dílů zápustky. Počet elementů obou dílů zápustky byl nastaven na 60 000. „Size ratio“ bylo stejně jako v případě předkovku varianty D nastaveno na hodnotu 3.

Teplota zápustek byla pro první úder nastavena na hodnotu 150 °C. Materiál pro zápustky byl zvolen AISI H13 (DIN X40CrMoV5-1). Jedná se o běžnou zápustkovou ocel.

Ocel AISI H13 byla použita, protože je nejvhodnějším a nejbližším ekvivalentem za ocel DIN 55NiCrMoV7 (ocel na zápustku používaná CPF), která v knihovně Deformu není. V tabulce č. 22 je uvedené chemické složení této oceli.

Název prvku [%]	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	P max.	S max.
	0,37-0,43	0,30-0,50	0,90-1,20	4,80-5,50	0,90-1,10	1,20-1,50	0,03	0,03

**Tab. 22 Chemické složení oceli AISI H13 [45]**

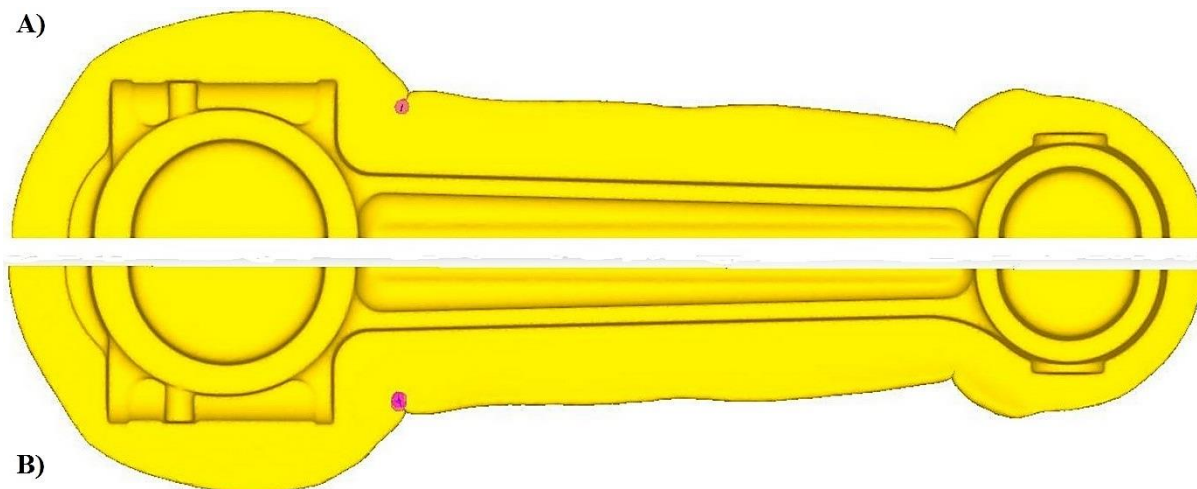
Ocel AISI H13 je chrom-molybdenovou ocel, jejímž ekvivalentem podle ČSN je ocel 19 554. Tato ocel se vyznačuje dobrou odolností proti otěru a vzniku trhlinek za horka. Pevnost oceli je zaručená i za vyšších teplot. Naopak mezi její nevýhody patří její malá odolnost proti náhlým změnám teploty. [45]

V okrajových podmínkách bylo nutné určit rovinu symetrie pro oba díly zápustky. Také se musely označit všechny plochy obou dílů zápustky (kromě rovin symetrie) a to pro výměnu tepla s okolím. Hmotnost dolní soustavy beranu a zápustky se nastavila na 42 098 kg. Vzdálenost mezi horní a dolní zápustkou byla nastavena na vzdálenost 1 mm. Nastavilo se počítání teploty jak pro předkovek, tak i pro oba díly zápustky („Calculate temperature in workpiece and dies”). Podrobné nastavení simulace procesu kování je uvedeno v tabulce č. 23.

<b>Úder</b>	Geometry type	Symmetry
	Process type	Hot forming
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece and dies
	Workpiece temperature	653~1132 °C
	Workpiece object type	Plastic
	Workpiece mesh	196 504 / size ratio 3/ min. element size 2
	Workpiece material	42CrMo4 (20-1200 °C)
	Top/Bottom die temperature	150 °C
	Number of elements (top die/bottom die)	60 000
	Material (top die/bottom die)	AISI H13
	Top die energy	$3,43 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$
	Top die efficiency	0,3 (pro úder 1 až 3) potom 0,7
	Counter blow hammer	Zaškrtnuto
	Top die mass	$37 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Bottom die mass	$42,098 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$
	Friction coefficient	Shear 0,3
	Heat transfer coefficient	$11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Step increment control	1 mm/step	
Distance between object	1 mm	
<b>Výdrž</b>	Geometry type	Whole part
	Heating type	Dwell on die
	Temperature calculation	Calculate temperature in workpiece only
	Heat transfer coefficient	$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	Heating time	1,5 sec

**Tab. 23 Nastavení procesu kování**



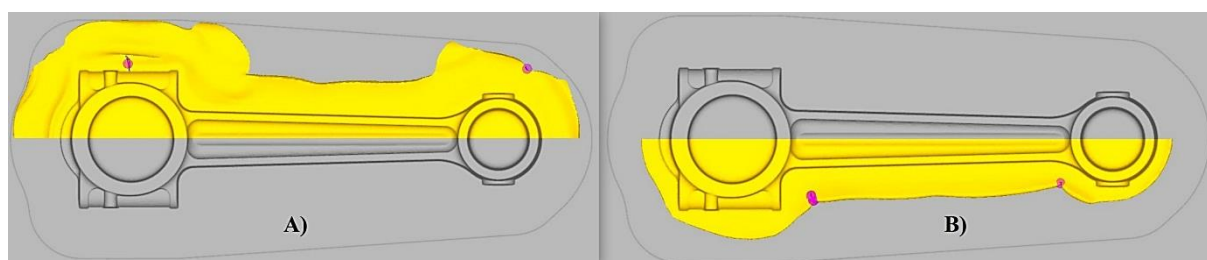


Obr. 33 Přeložky ve výkovku s vedením tepla: A) pohled zdola, B) pohled shora

#### Přeložky:

Z obrázku je patrné, že se přeložka vytvářela v místech přechodu mezi dříkem a hlavou ojnice. Obrázek č. 33 znázorňuje poslední úder, při kterém přeložka odtekla do výronkové drážky. Obrázek č. 33 A) ukazuje přeložky při pohledu zdola, B) při pohledu shora. Celý výkovek byl vykovan za 8 úderů.

## 10 Celkové zhodnocení navržených variant



Obr. 34 A) výkovek dle stávajícího stavu, B) výkovek dle varianty D

Na obrázku č. 34 je znázorněno srovnání mezi A) výkovkem dle stávajícího stavu výroby a B) výkovkem dle varianty D. U obou výkovků se přeložky (fialové oblasti) po vykovaní nacházely ve výronkové drážce. V obou případech tedy přeložky nepředstavovaly riziko pro kvalitu povrchu výkovku. Jelikož objem materiálu navržený pro hlavu předkovku byl nadhodnocen. Díky tomu zbytečně velký objem přebytečného materiálu odešel do výronkové drážky. V důsledku toho byla výronková drážka v okolí hlavy výkovku zcela zaplněna. U varianty D byl objem materiálu hlavy předkovku značně zredukován.

Na výskyt přeložek na povrchu výkovku měla vliv také doba ochlazování před vlastním kovááním (během přesunu z pece do jednodutinové zápustky). U varianty D a E byl tvar předkovku a ostatní parametry simulace stejné.

Jediným rozdílem obou simulací byla rozdílná doba ochlazování. U varianty E byla doba ochlazování jen 1 minutu, naopak varianta D měla 2 minuty. Právě u varianty s kratší dobou ochlazování docházelo k tvorbě přeložky i na povrchu výkovku. Simulace ukazuje, že doba ochlazování při přesunu předkovku z pece k zápustce má vliv, na tvorbu přeložek.

Původní návrh předkovku (dle CPF) má hmotnost 115,5 kg. Při simulování varianty A byla hmotnost zredukována na 103,2 kg. Úspora materiálu tedy činila cca 12 kg. Předkovek varianty D má hmotnost 97,4 kg. Což představuje úsporu materiálu až 18 kg. Při simulaci varianty C (s užším dříkem), která vycházela z varianty A nebylo redukcí šířky dříku dosaženo vykování výkovku bez kovářských vad. Zmenšení objemu materiálu v místech dříku mělo za následek, že v místě přechodu mezi hlavou a dříkem se tvořily přeložky, které zasahovaly až na povrch výkovku. V simulaci varianty C byla hmotnost zredukována až na 96,7 kg, což představuje úsporu téměř 19 kg. Navržený tvar předkovku ve variantě C nebyl vhodný z důvodu výskytu přeložek ve výkovku. **Z hlediska redukce hmotnosti se tedy jako nejvhodnější jevila varianta D.**

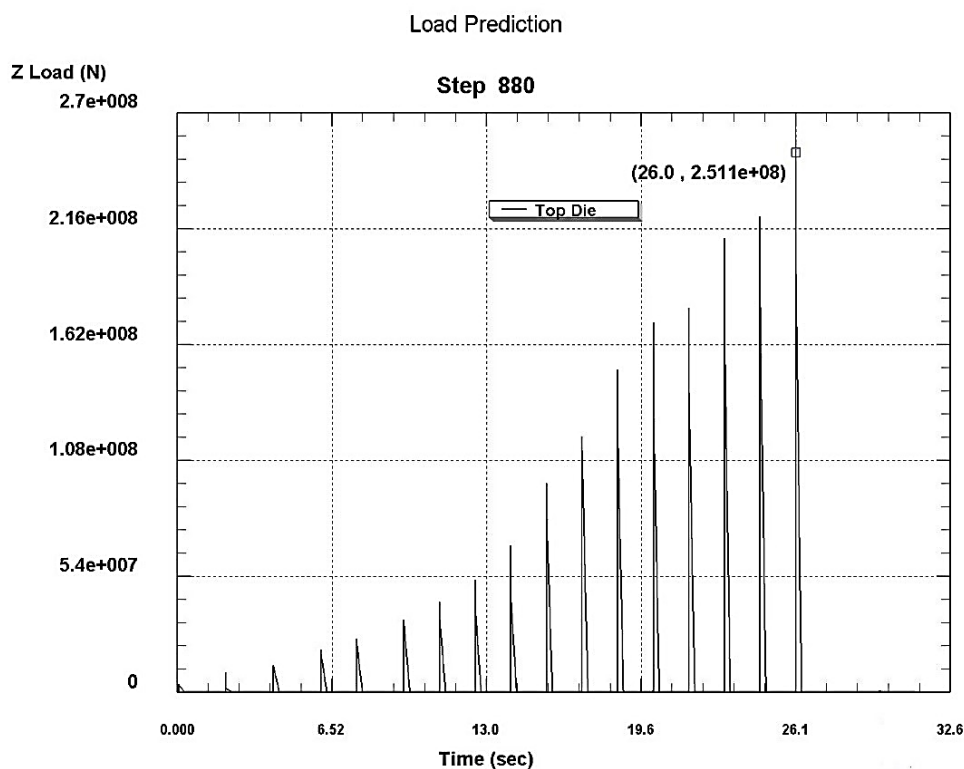
Dalším cílem optimalizace bylo snížit počet úderů potřebných na vykování výkovku. S rostoucím počtem úderů se zvyšují náklady na výrobu. Menší počet úderů přináší úsporu ve vynaložené energii na vykování. Také s nižším počtem úderů se zvyšuje životnost zápustek. Při simulování stávajícího stavu výroby bylo zapotřebí 17 úderů na vykonání ojnice. Zvýšený počet úderů byl způsoben nevhodným tvarem hlavy a oka předkovku. Při vložení tohoto předkovku (návrh CPF) do dutiny zápustky přečníval materiál v místech přechodu hlavy nebo oka s dříkem (viz obrázek č. 19) přes okraj dutiny zápustky. Přečnívající materiál se při kováání opíral o hranu dutiny zápustky, a místo tváření materiálu docházelo k jeho odřezávání. Jak již bylo zmíněno dříve, k odřezání přesahujícího materiálu bylo zapotřebí mnohem více energie. Pro snížení počtu úderů bylo nutné upravit tvar předkovku tak, aby lépe odpovídal tvaru dutiny zápustky. V případě varianty D bylo zapotřebí 9 úderů pro úplné dokování výkovku. **Variantou s nejmenším počtem úderů je právě varianta D.** Další předností této varianty, je tedy i úspora počtu úderů nutných na vykování ojnice. Úspora úderů činila u varianty D celkem 8 úderů.

**Dále bylo zjištěno, že rychlost úderů neměla téměř žádný vliv na průběh kováání.** Varianty A a B se od sebe lišily pouze rychlostí taktu úderů bucharu. V případě varianty A byl takt úderů nastaven na 40 úderů/minutu a u varianty B na hodnotu 30 úderů/minutu. U obou variant byl výkovek vykován za shodný počet úderů a přeložky se vyskytovaly také ve stejných místech (mimo povrch předkovku).



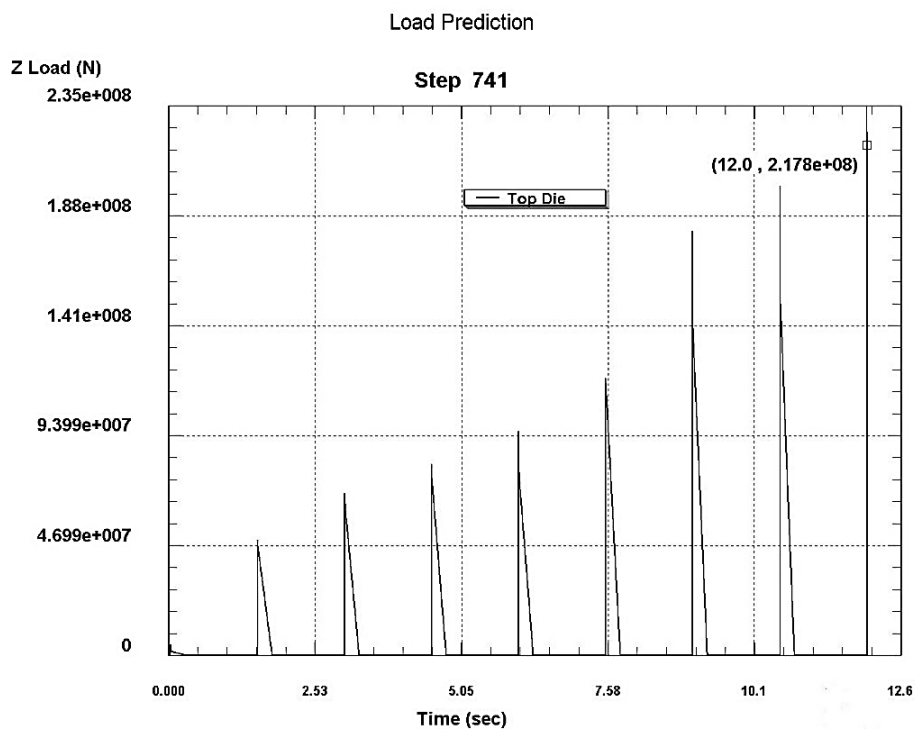
Obr. 35 Vykovaný předkovek podle varianty D

Společnost CPF umožnila vykovat jeden zkušební předkovek podle varianty D. Účelem jeho výroby bylo změření kovacího času, který je výchozí pro stanovení nákladu na kování předkovku (viz kapitola 11). Polotovár byl ohřátý na teplotu 1200 °C v plynové nístějové peci P30601 a kován na hydraulickém kovacím lisu CKW 630. Celý proces kování předkovku trval 15 minut. Na obrázku č. 35 je znázorněn již dokovaný předkovek podle varianty D.

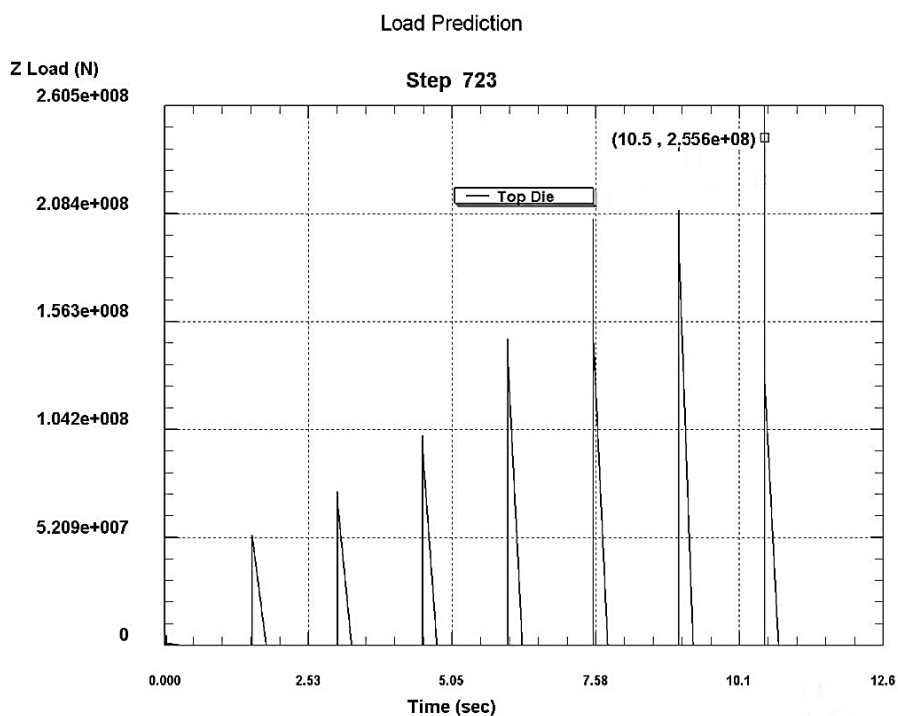


Obr. 36 Graf zatěžování horního kovádlu (výkovek dle stávajícího návrhu tvaru)

Obrázky č. 36 až 38 znázorňují graf zatížení horní zápusťky v závislosti na kovacím čase. Proces kování výkovku podle návrhu CPF (viz obrázek č. 36) trval 26 sekund a horní zápusťka byla při posledním 17 úderu zatížena  $2,511 \cdot 10^8$  N. Za 12 sekund se vykovala ojnice podle varianty D (viz obrázek č. 37). Při posledním 9. úderu bylo zatížení horní zápusťky na hodnotě  $2,178 \cdot 10^8$  N.

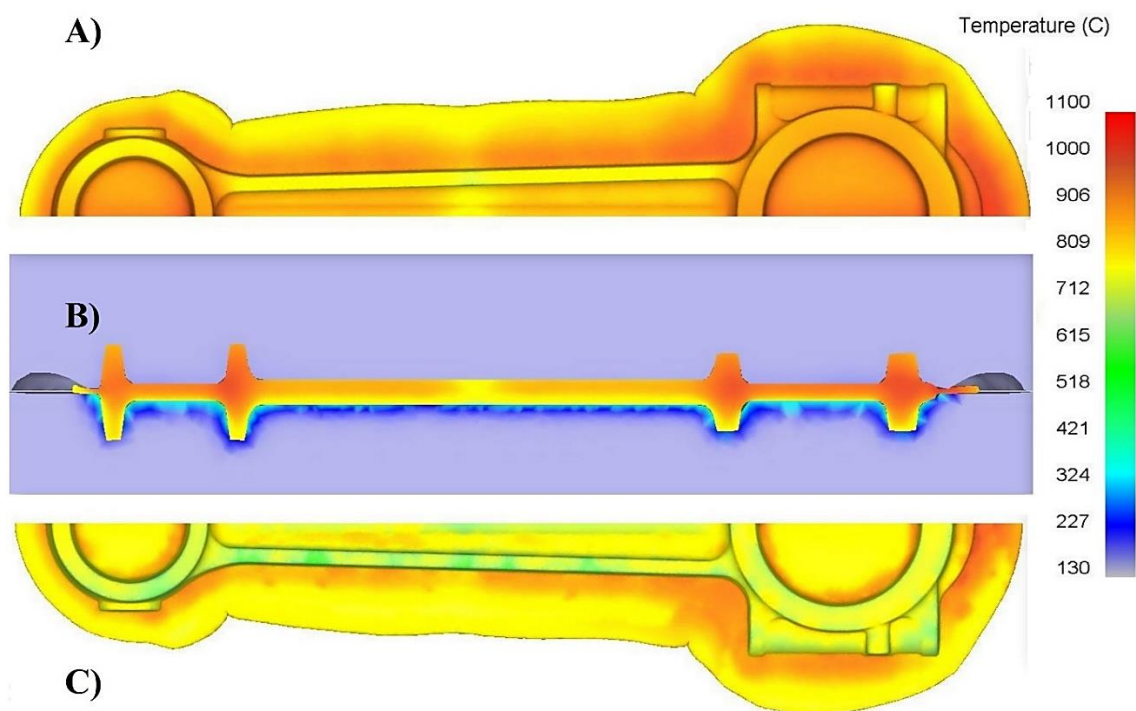


Obr. 37 Graf zatěžování horního kovadla (výkovek dle varianty D)



Obr. 38 Graf zatěžování horního kovadla (simulace s uvažováním vedení tepla v obou dílech zápustky)

Na obrázku č. 38 je znázorněno zatížení horního dílu zápustky během kování výkovku (varianta s uvažováním vedení tepla v obou dílech zápustky). V této simulaci byl nastaven přestup tepla mezi předkovkem a zápustkou. Simulace ukázala, že přestup tepla se neprojevil na změně počtu úderů nutných pro vykování. Výkovek byl vykován 8. úderem. Největšího zatížení horního dílu zápustky bylo dosaženo při  $2,556 \cdot 10^8$  N. Z grafu lze určit, že celý výkovek bude vykován za 10,5 sekundy.



**Obr. 39 Grafické znázornění rozložení teploty při posledním 8 úderu:**  
A) pohled shora, B) pohled zepředu, C) pohled zdola

Na obrázku č. 39 je znázorněno rozložení teploty v simulaci, která měla přiblížit reálný stav při kování. V této simulaci bylo nastaveno vedení tepla mezi předkovkem a oběma díly zápustky (viz kapitola č. 9.6). Obrázek č. 39 A) ukazuje pohled na horní část výkovku, kde se teplota povrchu výkovku pohybovala mezi 800 až 950 °C. Teplejší oblasti jsou zejména v místech, kde přechází výkovek do výronkové drážky nebo v místech přechodu mezi blánou a hlavou nebo okem výkovku. V těchto poloměrech zaoblení byl materiál při úderu značně deformován, proto se materiál v těchto částech ohříval. Na obrázku č. 39 B) je znázorněn podélný řez vedený výkovkem a zápustkou. Obrázek č. 39 C) ukazuje rozložení teploty na spodní straně výkovku. Na první pohled je zřejmé, že teploty jsou zde nižší než v případě obrázku č. 39 A). To bylo způsobeno tím, že během kování docházelo k mnohem intenzivnějšímu odvedení tepla z předkovku do dolního dílu zápustky. Jinak je tomu u horního dílu zápustky, který setrval ve vzájemném styku s předkovkem (výkovkem) jen na zlomek sekundy a to při úderu. Podle obrázků č. 39 B) a C) byla povrchová vrstva spodní části výkovku ochlazená na teplotu cca 800 °C, což představuje dolní hranici dokovací teploty. Zbylý materiál uvnitř výkovku měl po dokování teplotu okolo 850 °C.

Ze shrnutých výsledků v této kapitole vyplývá, že **nejvhodnějším tvarem předkovku je předkovek podle návrhu varianty D**. Tvar předkovku nezpůsobil během kování tvorbu přeložek. Také díky vhodně zvoleným rozměrům měl předkovek u této varianty nejmenší hmotnost a zároveň bylo zapotřebí nejmenšího počtu úderů nutných pro vykování.

## 11 Ekonomicko-technologické zhodnocení

Pro ekonomicko-technologické zhodnocení procesu kování bylo vybráno porovnání celkových nákladů na kování předkovku podle stávajícího procesu výroby ve společnosti CPF a celkových nákladů na kování předkovku dle varianty D. Ekonomicko-technologické zhodnocení se stanovuje na základě tří položek nákladů. V této práci nebyly uvažovány náklady na samotné kování v jednodutinové zápustce, jelikož nebyly společností CPF poskytnuty. V položkách celkových nákladů na kování předkovku jsou zařazeny: *náklady na materiál*, *náklady na broušení* a v neposlední řadě *náklady na kování předkovku*. Náklady na kování předkovku se vypočítávají z pracnosti vykování předkovku.

Nejprve se vypočetly celkové náklady na kování předkovku pro stávající proces výroby. Náklady na materiál se vypočítají jako součin hmotnosti předkovku a ceny materiálu za jeden kilogram. Hmotnost předkovku byla 115,5 kg. Cena jednoho kilogramu oceli DIN 42CrMo4 je 19,50 Kč/kg. Hodnota nákladů na materiál je tedy 2252,25 Kč. Náklady na broušení byly po domluvě s technologem stanoveny na 150Kč. CPF poskytlo hodnotu nákladů na kování předkovku, která činí 2660 Kč. CPF uvedlo, že předkovek podle stávajícího stavu výroby se vykoval za 14 minut. Celkové náklady na vykování předkovku jsou 5062,25 Kč/ks. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé položky nákladů uvedeny v tabulce č. 24.

Náklady na materiál (hmotnost předkovku • cena Kč/kg) [Kč]	2252,25
Náklady za broušení [Kč]	150,00
Náklady na kování předkovku [Kč]	2660,00
<b>Σ [Kč/ks] Celkové náklady na kus</b>	<b>5062,25</b>

**Tab. 24 Celkové náklady na kování předkovku pro stávající proces výroby**

U předkovku podle varianty D byly náklady na broušení ponechány stejné (150 Kč). Stejná zůstala také cena za jeden kilogram materiálu (19,50 Kč/kg), jelikož se jedná o stejný materiál. Hmotnost předkovku však byla snížena na 97,4 kg (při měrné hmotnosti 7850 kg/m<sup>3</sup>). Náklady na materiál poté činí 1899,30 Kč. Čas nutný pro vykování jednoho předkovku dle návrhu varianty D byl změřen na 15 minut. Čas na vykování předkovku mohl být změřen díky tomu, že CPF umožnila vykování zkušebního předkovku podle návrhu varianty D (viz kapitola 10). Na základě času vykování předkovku byla poskytnuta CPF hodnota nákladů na vykování předkovku, která činí 2850 Kč. Celkové náklady na kování předkovku varianty D jsou 4899,30 Kč/ks. Všechny položky nákladů jsou uvedené v tabulce č. 25.

Náklady na materiál (hmotnost předkovku • cena Kč/kg) [Kč]	1899,30
Náklady za broušení [Kč]	150,00
Náklady na kování předkovku [Kč]	2850,00
<b>Σ [Kč/ks] Celkové náklady na kus</b>	<b>4899,30</b>

**Tab. 25 Celkové náklady na kování pro variantu D**

Z ekonomického hodnocení celkových nákladů na kování předkovku se jeví jako výhodnější varianta D. U této varianty se v důsledku nižší hmotnosti předkovku ušetří na nákladech za materiál. Je třeba zmínit, že vykování předkovku podle varianty D je pracnější než u stávajícího výrobního procesu. Vykování předkovku podle varianty D trvalo o jednu minutu déle než u stávajícího stavu výroby. V porovnání se stávajícím stavem výroby jsou náklady na kování předkovku u varianty D o 190 Kč vyšší. Ale i přesto díky ušetřeným nákladům na materiál jsou celkové náklady na kování předkovku varianty D oproti stávajícímu stavu výroby **nižší o 162,95 Kč na každý kus**.

Jedna výrobní dávka tohoto typu ojnic představuje 100 ks. CPF uvádí, že ročně vyrobí mezi 200 až 300 ks těchto ojnic. V tabulce č. 26 je porovnání hodnot celkových nákladů pro stávající stav výroby a varianty D. Tabulka porovnává celkové náklady na kování předkovku obou variant pro výrobní množství 200, 250 a 300 ks ojnic za jeden rok.

Stávající stav výroby předkovku		Předkovek dle varianty D	
Počet kusů vyrobených ročně	Celkové náklady na kování pro roční výrobu	Počet kusů vyrobených ročně	Celkové náklady na kování pro roční výrobu
200 ks/ročně	1 012 450	200 ks/ročně	979 860
250 ks/ročně	1 265 562,5	250 ks/ročně	1 224 825
300 ks/ročně	1 518 675	300 ks/ročně	1 469 790

**Tab. 26 Porovnání celkových nákladů pro různý počet vyrobených kusů předkovku ojnice**

Pokud by se ročně vyrábělo až 300 ks ojnic, tak by rozdíl mezi celkovými náklady na kování předkovku mezi stávajícím stavem výroby a variantou D byl až 48 885 Kč.

## 12 Závěr

Cílem této práce bylo:

1. Provést analýzu stávajícího stavu výroby ojnice ve společnosti CPF a provést simulaci procesu kování v jednodutinové zápustce.
  - **Tvar předkovku byl nevyhovující**, část materiálu přesahovala přes okraj dutiny zápustky. Vlivem nevhodného tvaru předkovku byl **vysoký počet úderů (17 úderů), naddimenzované množství přebytečného materiálu.**
2. Na základě zjištěných dat ze simulace vytvořit několik možných variant úpravy tvaru předkovku. Optimalizací tvaru předkovku se mělo dosáhnout jeho nejvhodnějšího tvaru, který by nezpůsobil vznik kovářských vad, měl nižší objem materiálu a zmenšil počet úderů nutných na vykování.
3. Následně se navržené změny tvaru předkovku ověřily v simulaci procesu kování. V tabulce č. 27 jsou shrnuty výsledky tří nejdůležitějších simulací (stávající stav výroby, varianta A, varianta D). V porovnání se stávajícím stavem výroby mají obě varianty (A, D) menší hmotnost. **Varianta A uspořila přibližně 12 kg a druhá varianta D dokonce 18 kg.** Zmenšování objemu znamenalo snižování počtu úderů nutných na vykování. **Varianta A měla o 4 úderů méně (o cca 24 % méně úderů) než stávající stav výroby. U varianty D bylo uspořeno až 8 úderů (o cca 47 % méně úderů).** Cílem optimalizace bylo také vytvoření vhodného tvaru předkovku. Neboť nevhodným tvarem může dojít k tomu, že materiál nezaplní zcela dutinu zápustky nebo se na povrchu předkovku vytvoří přeložky. **U předkovku varianty C byl nevhodně změněn (zmenšen) rozměr dřívku, což vedlo k tvorbě přeložek na povrchu výkovku. Obě varianty (A i D) neměly na povrchu výkovku přeložky.** Před simulací kování byla zařazena simulace ochlazování předkovku. Jedna ze simulací (varianta E) měla ověřit, zda se změna doby ochlazování projeví na výsledku simulace procesu kování. **Bylo zjištěno, že kratší doba ochlazování předkovku, má vliv na výskyt přeložek na povrchu výkovku.** Všechny simulace procesu kování měly nastavenou rychlost taktu bucharu na 40 úderů/minutu, ale u varianty B byla změněna na 30 úderů/minutu. Cílem bylo ověřit, zda změnou rychlosti taktu úderů se změní chování při kování. **Simulace varianty B ukázala, že změna rychlosti taktu úderů neměla na výsledek kování žádný vliv.**



	<p><i>Předkovka stávající stav výroby</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hmotnost předkovku: 115,5 kg (při 7850 kg/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Celkový počet úderů: 17</li> <li>- Objem předkovku: 0,01421522 m<sup>3</sup></li> <li>- Přeložky ve výkovku: Nebyly</li> </ul>
	<p><i>Předkovka varianta A</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hmotnost předkovku: 103,2 kg (při 7850 kg/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Celkový počet úderů: 13</li> <li>- Objem předkovku: 0,0123241 m<sup>3</sup></li> <li>- Přeložky ve výkovku: Nebyly</li> </ul>
	<p><i>Předkovka varianta D</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hmotnost předkovku: 97,4 kg (při 7850 kg/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Celkový počet úderů: 9</li> <li>- Objem předkovku: 0,01241286 m<sup>3</sup></li> <li>- Přeložky ve výkovku: Nebyly</li> </ul>

**Tab. 27 Srovnání nejdůležitějších variant**

4. Ekonomicko-technologické zhodnocení:

- Posuzovaly se celkové náklady na vykování předkovku pro předkovek podle návrhu CPF a podle varianty D
- **Výhodnější je varianta D. U této varianty byly ušetřeny náklady na materiál (díky menší hmotnosti předkovku). V důsledku toho byly potom celkové náklady na jeden předkovek o 162,95 Kč nižší než u stávajícího stavu výroby.**

**Z výše uvedeného vyplývá, že nejvýhodnějším návrhem tvaru předkovku je varianta D.**

## 13 Seznam literatury

- [1] LENFELD, Petr. *Technologie II. Tváření kovů, zpracování plastů*. [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec. [cit. 4. 10. 2015]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [2] BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK. *Technologie tváření*. [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. [cit. 22. 9. 2015]. Dostupné z: <http://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kmm/ttss/prednasky.html>
- [3] STANĚK, Vojtěch. *Perspektivy objemového tváření za tepla*. Brno. 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [4] GRÁF, Radomír, 2011. *Zápusťkové kování pastorku*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [5] HAŠEK, Vladimír. *Kování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [6] LEIDORF, Michal, 2009. *Zápusťkové kování náboje kola*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [7] PROCHÁZKA, Jiří, et al. *Technologie slévání, tváření a svařování*. 2.vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1982.
- [8] PERNIS, Rudolf. *Teória tvárnenia kovov*. 1. vyd. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2007. ISBN: 978-80-8075-244-6.
- [9] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Deformační chování materiálů*. [online]. Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2013. [cit. 5. 10. 2015]. Dostupné z: [http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler\\_Kawulok\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu.pdf](http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf)
- [10] POČTA, Bohumil. *Základy teorie tváření kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1966.
- [11] DALIBOR, Vojtěch a Pavel NOVÁK ml. *Koroze a degradace kovových materiálů*. [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [cit. 16. 11. 2015]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze\\_materialu\\_pro\\_restauratory/kadm/pdf/1\\_5.pdf](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/1_5.pdf)
- [12] VAŠKO, Michal, 2010. *Technologie zápusťkového kování hřídele*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [13] ŠIMON, Miroslav, 2012. *Výroba držáku objemovým tvářením*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [14] LENFELD, Petr. *Technologie II. Tváření kovů, zpracování plastů*. [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec. [cit. 23. 10. 2015]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/03.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm)
- [15] ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN: 80-03-00651-1.

- [16] SEMIATIN, S. L. *Metals handbook ninth edition*. Volume 14 forming and forging. Metals Park, Ohio: ASM International, 1988. ISBN: 0-87170-020-4.
- [17] MAÁR, Karol. *Kovanie*. 1.vyd. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 1991. ISBN: 80-7099-073-2.
- [18] KOTOUČ, Jiří et al. *Tvářecí stroje*. 1.vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN: 80-01-01003-1.
- [19] ČERMÁK, Jiří a Jan ŠANOVEC. *Přípravky a nástroje pro tváření kovů za tepla*. Praha: ČVUT, 1973.
- [20] ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání: zápusťkové kování, slévání (Návody do cvičení)*. 1.vyd. Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN: 978-80-248-2274-7.
- [21] ALTAN, Taylan, Gracius NGAILE a Gangshu SHEN, *Cold and hot forming: fundamentals and applications*. Materials park, Ohio: ASM International, 2005. ISBN-13: 978-0-87170-805-2.
- [22] ŠANOVEC, Jan. *Technologická cvičení. Návrh technologie zápusťkového kování*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [23] ŠUCHMANN, Pavel, et al. *Vývoj nových nástrojových ocelí pro kovací zápusťky*. *Technik*. 2010.[online].[cit. 19. 10. 2015]. ISSN: 1210-616x. Dostupné z:[http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_10/lists/papers/303.pdf](http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_10/lists/papers/303.pdf)
- [24] JKZ Budějovice a.s. [online]. ©2010 [cit. 29. 11. 2015]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/produkty>
- [25] ČSN ISO 41 9103. *Ocel 19 103 uhlíková*. Praha: Český normalizační institut, 1967.
- [26] ČSN ISO 42 9030. *Výkovky ocelové zápusťkové-Přídavky na obrábění, mezní úchylky rozměrů a tvarů*. Praha: Český normalizační institut, 1987.
- [27] ČERMÁK, Jan. *Podklady pro předmět Projekt 1-část kování*. [online]. 2004 [cit. 18. 9. 2015]. Dostupné z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/PRO1/vykovek\\_zadani.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/PRO1/vykovek_zadani.pdf).
- [28] ČADA, Radek, Jakub MACHÁLEK a Barbora FRODLOVÁ. *Týmová cvičení předmětu technologie tváření a slévání*. Návody do cvičení předmětu: Technologie tváření a slévání. [online]. 1.vyd.Ostrava: Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 17. 10. 2015]. ISBN: 978-80-248-2718-6. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2718-6.pdf>.
- [29] BEDNÁŘ, Bohumil, et al. *Technologičnost konstrukce I*. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN: 80-01-03268-X.
- [30] DIETER, G. E., H. A. KUHN a S. L. SEMIATIN. *Handbook of workability and process design*. [online]. 1.vyd. Material park, Ohio: ASM International, 2003. [cit. 10. 11. 2015]. ISBN: 0-87170-778-0.
- [31] RATHI, Mahendra G., Nilesh A. JAKHADE. An overview of forging processes with their defects. *International Journal of Scientific and Research Publications*. [online]. Indie, 2014, č. 4 [cit. 12. 11. 2015]. ISSN: 2250-3153.

- [32] CUBBERLY, W a Ramon BAKERJIAN. *Tool and manufacturing engineers handbook*. [online]. 1.vyd. Desk ed. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1989. [cit. 22. 11. 2015]. ISBN: 0-87263-351-9.
- [33] TYNE, Chet Van. Grain flow in forgings- the basics. In: forgemag.com [online]. 6. 10. 2014 [cit. 26. 11. 2015]. Dostupné z: [www.forgemag.com/articles/84265-grain-flow-in-forging---the-basics](http://www.forgemag.com/articles/84265-grain-flow-in-forging---the-basics)
- [34] FABÍK, Richard. Modelování *tvářecích procesů*. [online]. 1.vyd. Material park, Ohio: ASM International, 2013.[cit. 21. 11. 2015]. ISBN: 978-80-248-3362-0.
- [35] BENEŠOVÁ, Soňa. 2007. *Materiálové modelování a numerická simulace jako nástroj pro vývoj technologických procesů*. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.
- [36] BUDÍNSKÝ, Ferdinand. *Součásti strojů pístových*. I. Konstrukční část. 1.vyd. Praha: Publikáční odbor Spolku posluchačů a absolventů strojního a elektrotechnického inženýrství, 1949.
- [37] SPÁLA, Karel, Václav KROUZA. *Části strojů. Část. 3. Čepy, nápravy a hřídele, ložiska hřídelů, spojky hřídelů, klikové ústrojí, hřídele klikové a kliky, ojnice a táhla, křížové hlavy a vedení, kliková ložiska, výstředníky, vačka a palce, páky, písty a tyče pístové*. 4. vyd. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1952.
- [38] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. ISBN: 978-80-247-3475-0.
- [39] CZECH PRECISION FORGE a.s. (CPF), interní informace, [www.cpforgemag.com/cs](http://www.cpforgemag.com/cs)
- [40] ČSN ISO 41 5142. *Ocel 15 142 Cr - Mo*. Praha: Český normalizační institut, 1978.
- [41] Bohdan Bolzano s.r.o. [online]. ©2016 [cit. 15. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-42crmo4>
- [42] JKZ Budějovice a.s. [online]. ©2010 [cit. 18. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/node/164>
- [43] Feron, a.s. [online]. ©2004-2016 [cit. 18. 4. 2016]. Dostupné z: [http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)
- [44] KREMER, Rudolf, Karel OBROUČKA. *Ohřev kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974.
- [45] JKZ Budějovice a.s. [online]. ©2010 [cit. 28. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/node/273>

## Grafická příloha

### Seznam příloh:

- Příloha A:** Přídavky na obrábění ploch výkovků pro obvyklé provedení  
**Příloha B:** Mezní úchytky a tolerance rozměrů výkovků pro stupeň přesnosti 3  
**Příloha C:** Slovník  
**Příloha D:** Výkres předkovku varianty D

**Příloha A:**

Největší rozměr výkovku ve směru kolmém k rázu [mm]		Největší výška výkovku $H$							
		přes	25	40	63	100	160	250	400
		do 25	40	63	100	160	250	400	630
přes	do	Největší tloušťka dna, blány, disku a stěny výkovku							
<b>0</b>	<b>25</b>	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0			
<b>5</b>	<b>0</b>	1,5	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5		
<b>40</b>	<b>63</b>	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5		
<b>63</b>	<b>100</b>	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	
<b>100</b>	<b>160</b>	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	
<b>160</b>	<b>250</b>	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5
<b>250</b>	<b>400</b>	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,0
<b>00</b>	<b>630</b>	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
<b>630</b>	<b>1000</b>	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0

**Tab. 28** Přídavky na obrábění ploch výkovků pro obvyklé provedení (ČSN 42 9030) [21]

Největší rozměr výkovku ve směru kolmém k rázu [mm]		Největší výška výkovku <i>H</i>							
		přes	25	40	63	100	160	250	400
		do 25	40	63	100	160	250	400	630
přes	do	Největší tloušťka dna, blány, disku a stěny výkovku							
<b>0</b>	<b>25</b>	1,3	1,3	1,8	1,8	1,8			
<b>25</b>	<b>40</b>	1,3	1,8	1,8	1,8	2,2	2,2		
<b>40</b>	<b>63</b>	1,8	1,8	1,8	2,2	2,2	2,2		
<b>63</b>	<b>100</b>	1,8	1,8	2,2	2,2	2,2	2,7	3,2	
<b>100</b>	<b>160</b>	1,8	2,2	2,2	2,2	2,7	3,2	3,2	
<b>160</b>	<b>250</b>	1,8	2,2	2,2	2,7	3,2	3,2	3,5	4,0
<b>250</b>	<b>400</b>	2,2	2,2	2,7	3,2	3,2	3,5	4,0	4,5
<b>400</b>	<b>630</b>	2,2	2,7	3,2	3,2	3,5	4,0	4,5	5,0
<b>630</b>	<b>1000</b>	2,7	3,2	3,2	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5

Tab. 29 Přídavky na obrábění ploch výkovků pro přesné provedení (ČSN 42 9030) [21]

Největší rozměr výkovku ve směru kolmém k rázu [mm]		Největší výška výkovku $H$							
		Přes	25	40	63	100	160	250	400
		Do 25	40	63	100	160	250	400	630
přes	do	Největší tloušťka dna, blány, disku a stěny výkovku							
<b>0</b>	<b>25</b>	1,1	2,0	1,6	1,6	1,6			
<b>25</b>	<b>40</b>	1,1	1,6	1,6	1,6	1,9	1,9		
<b>40</b>	<b>63</b>	1,6	1,6	1,6	1,9	1,9	1,9		
<b>63</b>	<b>100</b>	1,6	1,6	1,9	1,9	1,9	2,4	2,8	
<b>100</b>	<b>160</b>	1,6	1,9	1,9	1,9	2,4	2,8	2,8	
<b>160</b>	<b>250</b>	1,9	1,9	1,9	2,4	2,8	2,8	3,0	3,5
<b>250</b>	<b>400</b>	1,9	1,9	2,4	2,8	2,8	3,0	3,5	4,0
<b>400</b>	<b>630</b>	1,9	2,4	2,8	2,8	3,0	3,5	4,0	4,5
<b>630</b>	<b>1000</b>	2,4	2,8	2,8	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0

Tab. 30 Přídavky na obrábění ploch výkovků pro velmi přesné provedení (ČSN 42 9030)  
[21]



**Příloha B:**

Největší průměr výkovku $D$ nebo $0,5 \cdot (L+B)$ ve směru kolmo k rázu		Rozměr výkovku ve směru rázu ( $H$ )							
		přes 0	25	40	63	100	160	250	400
		do 25	40	63	100	160	250	400	630
do 25	mezní	+0,25	+0,25	+0,30	+0,35	–	–	–	–
	úchytky	-0,10	-0,15	-0,15	-0,15	–	–	–	–
	tolerance	0,35	0,40	0,45	0,50	–	–	–	–
přes 25 do 40	mezní	+0,25	+0,30	+0,35	+0,40	–	–	–	–
	úchytky	0,15	0,15	0,15	0,15	–	–	–	–
	tolerance	0,40	0,45	0,50	0,55	–	–	–	–
přes 40 do 63	mezní	+0,30	+0,35	+0,40	+0,40	+0,45	–	–	–
	úchytky	0,15	0,15	0,15	0,20	0,25	–	–	–
	tolerance	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	–	–	–
přes 63 do 100	mezní	+0,40	+0,40	+0,45	+0,45	+0,55	+0,65	–	–
	úchytky	-0,15	-0,20	-0,20	-0,25	-0,25	-0,30	–	–
	tolerance	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80	0,95	–	–
přes 100 do 160	mezní	+0,45	+0,45	+0,50	+0,55	+0,60	+0,70	–	–
	úchytky	-0,20	-0,25	-0,25	-0,25	-0,30	-0,35	–	–
	tolerance	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,05	–	–
přes 160 do 250	mezní	+0,55	+0,55	+0,60	+0,65	+0,70	+0,80	+0,95	–
	úchytky	-0,25	-0,30	-0,30	-0,30	-0,35	-0,40	-0,45	–
	tolerance	0,80	0,85	0,90	0,95	1,05	1,20	1,40	–
přes 250 do 400	mezní	+0,65	+0,70	+0,75	+0,80	+0,85	+0,95	+1,10	–
	úchytky	-0,35	-0,35	-0,35	-0,35	-0,40	-0,45	-0,50	–
	tolerance	1,00	1,05	1,10	1,15	1,25	1,40	1,60	–

**Tab. 31 Mezní úchytky a tolerance rozměrů výkovků pro stupeň přesnosti 3 (ČSN 42 9030) [21]**

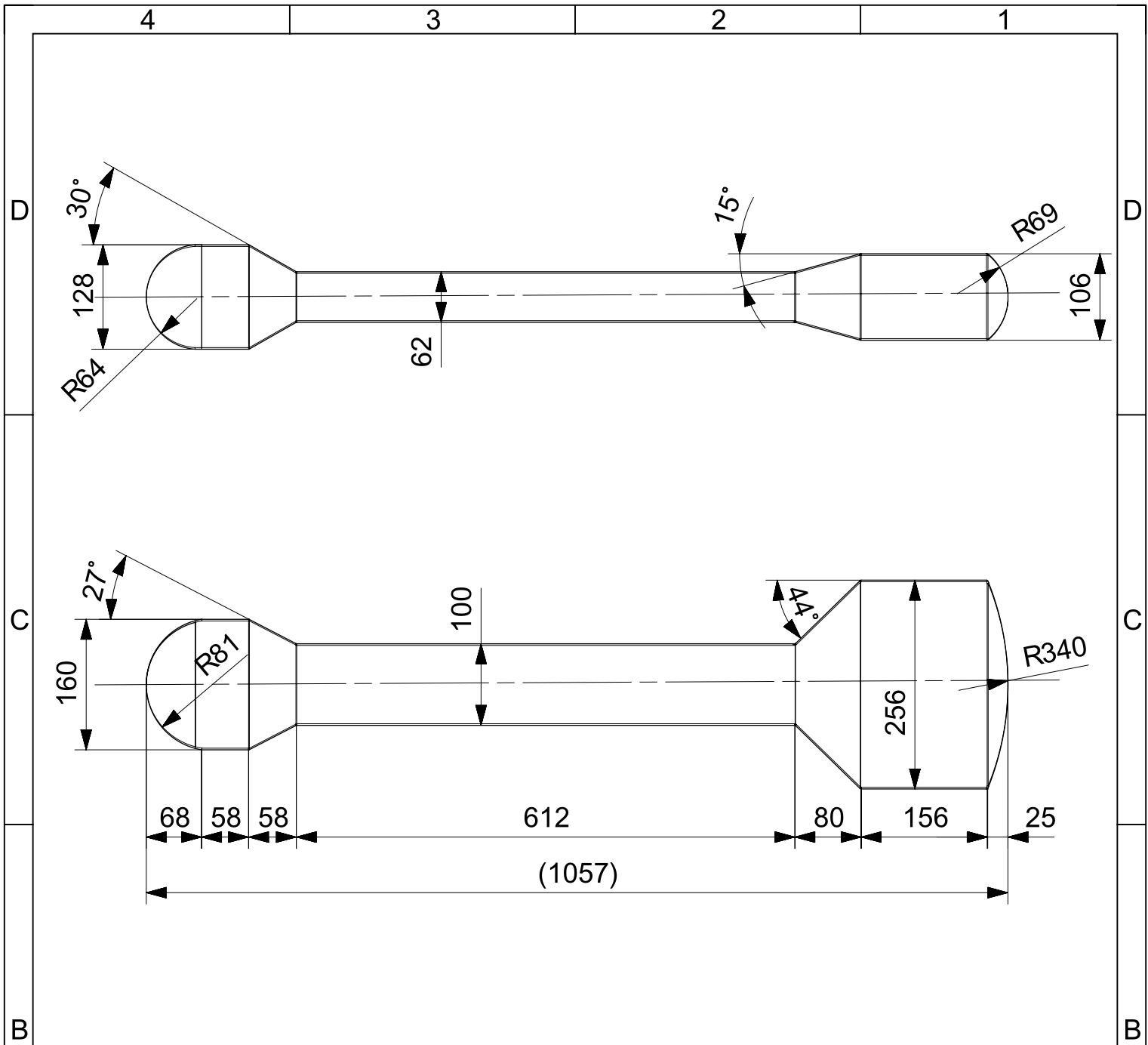
**Příloha C:**

<b>Anglicky</b>	<b>Český překlad</b>	<b>Anglicky</b>	<b>Český překlad</b>
Flow stress	Intenzita napětí	Dwell	Výdrž
Finite element method	Metoda konečných prvků	Main	Hlavní
Multiple operation	Opakovaná operace	Deformation	Deformace
Forming express	Šablona rychlého nastavení pro tváření	Heat transfer	Přestup tepla
Heat transfer express	Šablona rychlého nastavení přestupu tepla	Plastic	Plastický
Mode	Režim	Rigid	Tuhý
Step increment	Přírůstek kroku	Function	Funkce
Solution step definition	Definice výpočetního kroku	Free resting	Volně položený
Step increment control	Nastavení přírůstku kroku	Enable thermal expansion	Umožnit tepelnou roztažnost
Stop	Stopka	Inter object	Vztahy mezi objekty
Process duration	Délka trvání procesu	Heat transfer coefficient	Souč. přestupu tepla
Workpiece	Předkovek	Geometry type	Typ geometrie
Object type	Typ objektu	Whole part	Celá součást
Temperature	Teplota	Process type	Typ procesu
Number of elements	Počet elementů	Hot forming	Tváření za tepla
Size ratio	Poměr velikostí	Temperature calculation	Výpočet teploty
Min. element size	Minimální velikost elementu	Calculate temperature in workpiece only	Výpočet teploty pouze v předkovku

**Tab. 32 Slovník**


Anglicky	Český překlad	Anglicky	Český překlad
Boundary conditions	Okrajové podmínky	Workpiece temperature	Teplota předkovku
Properties	Vlastnosti	Workpiece mesh	Síť předkovku
Target volume	Cílový objem	Workpiece material	Material předkovku
Reference temperature	Referenční teplota	Top die temperature	Teplota horní zápustky
Top / Bottom die	Horní / Dolní zápustka	Top die efficiency	Účinnost horní zápustky
Geometry	Geometrie	Top die mass	Hmotnost horní soustavy beranu a zápustky
Friction	Tření	Bottom die mass	Hmotnost dolní soustavy beranu a zápustky
Top die energy	Energie horní zápustky	Friction coefficient	Třecí součinitel
Counter blow hammer	Protiběžný buchar	Number of elements	Počet elementů
Bottom die temperature	Teplota spodní zápustky	Heating time	Doba ohřívání
Distance between object	Vzdálenost mezi objekty		

**Tab. 33 Slovník**




### NEKÓTOVANÉ RÁDIUSY R2

	<b>PŘEDKOVEK</b>	<b>DIN 42CrMo4</b>	/		<b>97,400</b>				<b>1</b>
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.	
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.	

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 <p>FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI</p> <p><small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small></p>
Kreslil / Drawn by	16.5.2016	MARTIN JUREK			
Prezkousel / Checked by					
Schvalil / Approved by					

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:

 <p>Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK</p>	Soubor-model / ASM-file predkovek_3_brezen	Projekt / Project: <b>DIPLOMOVÁ PRÁCE</b>	Meritko / Scale <b>1:7</b>
	Soubor-vykres / DRW-file predkovek_3_brezen	C.sestavy / Assembly No.	
Nazev / Title <b>PŘEDKOVEK VARIANTY D</b>		Rev. Cislo vykresu / Drawing No. <b>DP_1</b>	Format <b>A4</b>
---		List / sheet no. 1	Pocet listu / sheets 1

4

3

2

1