



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin MINÁRIK**  
Osobní číslo: **S14N0090P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**  
Název tématu: **Kompletní návrh technologie výroby zápustkového výkovku  
turbinové lopatky**  
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. Úvod - plastická deformace v návaznosti na zápustkové kování
2. Návrh tvaru výkovku (stanovení přídavek, tolerancí, atd.)
3. Návrh tvaru předkovku včetně specifikace výchozího polotovaru
4. Návrh tvaru dutiny zápustky a ověření návrhu numerickou simulací
5. Celkové zhodnocení a stanovení technologie výroby lopatky
6. 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:

**Doc. Ing. Vladimír Bernášek, CSc.**

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 a 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. Minářík	<b>Jméno</b> Martin	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	„Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Bernášek, CSc.	<b>Jméno</b> Vladimír	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU – FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtně</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Kompletní návrh technologie výroby zápustkového výkovku turbínové lopatky		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	92	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	58	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	19
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce je zaměřena na stanovení technologie zápustkového kování výkovku lopatky turbíny s ohledem na technické možnosti firmy Czech Precision Forge a.s. V rámci technologického postupu byl navrhnut tvar výkovku lopatky, podle kterého byly zkonstruovány jednodutinové vložky, které budou uchyceny v zápustkovém bloku. V případě způsobu kování s předkováním, byly navíc navrženy tvary předkovek, zhotovených na vzduchovém bucharu nebo na horizontálním kovacím lisu. Jejich vhodnost byla následně ověřena simulací kování na protiběžném bucharu v programu Deform 3D. Na základě ekonomicko-technologického rozboru vyplynulo, že je výhodnější kování s předkováním. Navíc simulace kování s předkovek prokázala, že nejvhodnější variantou zápustkového kování výkovku lopatky je vyrobít předkovek na horizontálním kovacím lisu.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p><b>ZPRAVIDLA JENDOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Zápustkové kování, návrh tvaru výkovku, návrh jednodutinové vložky, návrh tvaru předkovek, simulace v programu Deform 3D.</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Bc. Minářík	<b>Name</b> Martin	
<b>FIELD OF STUDY</b>	„ Materials Engineering and Engineering Metallurgy “		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. Bernášek, CSc.	<b>Name</b> Vladimír	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Complete proposal of technology production die forging of turbine vane		

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

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

<b>TOTALLY</b>	92	<b>TEXT PART</b>	58	<b>GRAPHICAL PART</b>	19
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This thesis is focused on determination of technology of closed-die forging of forging turbine vane. The designed technology regards the technological equipment of the company Czech Precision Forge a.s. Within the scope of technological process was designed shape of the forging turbine vane. According to this shape, dies were designed with finisher cavity. These dies will be inserted in the die blocks for forging at a counterblow hammer. For forging with pre-forging were designed shapes of the preforms. The preforms will be produced either at air power hammer or at horizontal forging press. Their suitability was checked by simulation of forging at the counterblow hammer in the software Deform 3D. According to economical – technological analysis is more suitable the forging with pre-forging. The simulation of forging with preforms showed, that the most suitable option of the closed – die forging is to produce the preform at the horizontal forging press.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Closed – die forging, design shape of forging, design die with finisher cavity, design shape of preforms, simulation in the software Deform 3D.</p>

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, panu Doc. Ing. Vladimíru Bernáškoví, CSc., za jeho ochotu, cenné rady při řešení dané problematiky a metodickou pomoc při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval firmě Czech Precision Forge a. s. za realizaci této diplomové práce a poskytnutí potřebného vybavení pro její vypracování. Děkuji panu Ing. Vladimíru Lüftnerovi, Zdeňkovi Langrovi a svému konzultantovi panu Aleši Hejdukovi z firmy Czech Precision Forge a. s., za jejich čas a přínosné poznatky při odborných konzultacích. V neposlední řadě bych rád poděkoval paní Ing. Soně Benešové, Ph.D., za její podporu v oblasti simulací v programu Deform 3D.

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“.

## Obsah

1 Úvod.....	9
2 Kování.....	10
2.1 Plastická deformace.....	10
2.1.1 Vliv napjatosti na plastickou deformaci.....	12
2.1.2 Mechanická schémata deformací.....	13
2.2 Odpevňovací procesy.....	14
2.2.1 Dynamická rekrystalizace.....	14
3 Volné kování.....	15
4 Zápustkové kování.....	16
4.1 Zápustky.....	19
4.1.2 Opotřebení zápustek.....	19
4.1.3 Materiály zápustek.....	21
4.2 Zápustky pro buchary.....	22
4.2.1 Postupová zápustka.....	23
4.2.2 Vedení zápustek.....	25
5 Úvod do experimentu.....	27
5.1 Lopatka parní turbíny.....	27
5.2 Volba kovacího stroje.....	28
6 Návrh tvaru výkovku.....	28
6.1 Volba dělicí roviny.....	28
6.2 Stanovení stupně přesnosti.....	30
6.3 Přídavky na obrábění.....	31
6.4 Technologické přídavky.....	32
6.4.1 Technologické přídavky z hlediska tvaru čisté lopatky.....	32
6.4.2 Stanovení velikosti úkosů.....	34
6.4.2 Stanovení poloměrů zaoblení.....	34
6.5 Stanovení dovolených rozměrových a tvarových úchylek výkovků.....	35
6.5.1 Ukazatel členitosti tvaru.....	36
6.5.2 Materiál výkovku lopatky.....	37
6.5.3 Stanovení mezních úchylek dle normy ČSN EN 10243-1.....	38
7 Konstrukce zápustky.....	39
7.1 Návrh dokončovací dutiny.....	39
7.2 Návrh výronkové drážky.....	39



7.2.1 Výronková drážka zápusťky pro předkovek na vzduchovém bucharu .....	40
7.2.2 Výronková drážka zápusťky pro předkovek z horizontálního kovacího lisu.....	41
7.3 Vedení a upnutí zápusťky .....	44
8 Volba polotovaru.....	45
8.1 Ohřev válcované loupáné tyče pro předkování na vzduchovém bucharu .....	45
8.2 Ohřev válcované loupáné tyče pro předkování na horizontálním kovacím lisu .....	46
9 Zápusťkové kování s předkováním.....	46
9.1 Návrh tvaru předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu .....	46
9.1.1 Ověření navrženého tvaru předkovku simulací v programu Deform 3D .....	50
9.1.2 Návrh změny tvaru předkovku pro vzduchový buchar .....	53
9.1.3 Ověření tvaru předkovku po redukci objemu simulací v programu Deform 3D.....	53
9.2 Návrh tvaru předkovku zhotoveného na horizontálním kovacím lisu.....	56
9.2.1 Ověření tvaru předkovku simulací v programu Deform 3D .....	60
9.3 Kování bez předkování.....	62
10 Ekonomicko-technologické zhodnocení .....	62
10.1 Porovnání kování s a bez předkování.....	63
10.2 Porovnání kování s předkováním na vzduchovém bucharu vs. LKH .....	63
11 Závěr.....	64
Seznam literatury.....	67
Seznam obrázků .....	70
Seznam tabulek .....	72
Grafická část.....	73

## Seznam zkratek

$\varepsilon$	POMĚRNÁ DEFORMACE [-]
R <sub>m</sub>	MEZ PEVNOSTI V TAHU [MPa]
R <sub>p0,2</sub>	SMLUVNÍ MEZ KLUZU [MPa]
A	TAŽNOST [%]
Z	KONTRAKCE [%]
KCU	VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST S U VRUBEM [J/ cm <sup>2</sup> ]

## 1 Úvod

Diplomová práce na téma „kompletní návrh technologie výroby zápustkového kování turbínové lopatky“ je zadána společností Czech Precision Forge a.s., v diplomové práci dále uváděna pod oficiální zkratkou CPF. Tato společnost je známá svojí kvalitou vyráběných výrobků nejen na českém, ale také mezinárodním trhu v oblasti zápustkového a volného kování. S ohledem na bohatou tradici společnosti CPF je sortiment vyráběných produktů „výkovků“ zaměřen především na energetický, lodní, letecký, dopravní a ropný průmysl.

Cílem diplomové práce je navrhnout vhodný technologický postup zápustkového kování zadané lopatky s ohledem nejen na technické možnosti firmy CPF, ale také na ekonomicko-technologický rozbor uvažovaných možných způsobů kování. Firma CPF poskytla výkresovou dokumentaci čisté lopatky, podle níž je navržen tvar výkovku lopatky. V rámci technologického postupu je vytvořena dutina zápustky s výronkovou drážkou pro uvažované způsoby zápustkového kování výkovku lopatky. V případě varianty kování s předkováním je navržen tvar předkovku, jehož vhodnost je následně ověřena simulací kování v programu Deform 3D. Je vhodné zmínit, že tato diplomová práce není zaměřena výhradně na simulaci v programu Deform 3D, proto jsou v práci uvedeny pouze vstupní údaje pro simulaci a následně její podstatné výsledky.

## 2 Kování

Kování je technologie objemového tváření za tepla, při které je kovový polotovár přetržitě plasticky deformován (viz podkapitola 2.1) pohybujícím se nástrojem. Jelikož je v praxi kladen požadavek na co nejrychlejší a nejlevnější výrobu při dosažení co nejlepší jakosti výkovku, hovoříme z průmyslového hlediska zejména o kování strojním. Strojní kování nejenom urychluje a zproduktivňuje výrobu výkovků, ale také výrazně snižuje namáhavou ruční práci v porovnání s ručním kovááním. Na kovaný polotovár působí nástroj buď klidnou silou (tzv. kování na lisech) nebo úderem (tzv. kování na bucharech). Kováním se získává výkovek o požadovaném tvaru, s příznivou makrostrukturou a vhodnou mikrostrukturou. Zároveň se výkovek vyznačuje vysokými hodnotami mechanických a fyzikálních vlastností. Do oblasti strojního kování patří jak technologie volného kování, tak zápusťkového kování [1, 2, 3]. I když je tato diplomová práce zaměřena pouze na technologii zápusťkového kování (viz kapitola 4), bude v literární rešerši stručně řešena i problematika volného kování (viz kapitola 3).

Výkovky se vyznačují vláknitou strukturou, získanou tvářením polotovaru s lící strukturou (tzv. ingotu) za tepla. Podstata vzniku a význam vláknitosti výkovku bude řešena v kapitole 3 a 4.

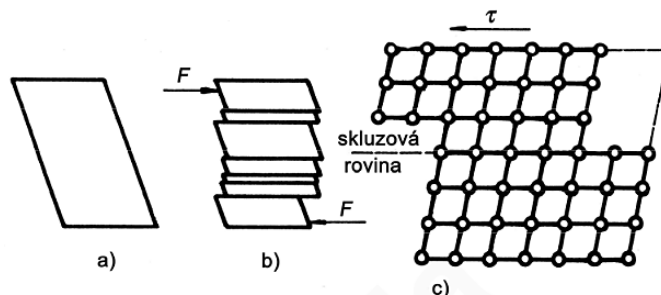
### 2.1 Plastická deformace

Tváření je možné definovat jako výrobní operaci, při které je ve výchozím polotovaru vyvolán stav napjatosti v oblasti nad mezí kluzu daného materiálu v důsledku působení vnějších sil vyvolaných tvářecím nástrojem a strojem. V této oblasti výchozí polotovár mění trvale svůj tvar a rozměry, aniž by došlo k porušení jeho celistvosti. Současně také dochází ke změnám mechanických a fyzikálně-chemických vlastností materiálu. Před dosažením meze kluzu daného materiálu atomy mění svou polohu pouze v rozsahu menším než je mřížková konstanta. Po zániku vnějších tvářecích sil se atomy vrací do svých rovnovážných poloh. To znamená, že plastickou deformaci předchází pokaždé deformace elastická. Proto je celková deformace materiálu dána součtem elastické a plastické deformace [4, 5, 6]. Plastická deformace může nastat následujícími mechanismy:

1. *Skluzem*
2. *Dvojčatěním* [4,7]

**Skluz** je základním mechanismem plastické deformace, avšak bývá v odborné literatuře též označován jako translace. Vnější síly od tvářecího nástroje způsobují v materiálu normálová a smyková napětí. Zatímco elastickou deformaci může vyvolat účinek normálového nebo smykového napětí, plastickou deformaci tvářeného materiálu způsobuje pouze jedno z těchto napětí. Aby plastická deformace mohla proběhnout, je zapotřebí, aby smykové napětí dosáhlo takzvaného kritického smykového napětí. Deformace se uskutečňuje posunutím části krystalu vůči sobě podél určitých krystalografických rovin, přičemž atomy se posunou o celý počet meziatomových vzdáleností. Skluzový mechanismu probíhá v určitém skluzovém systému,

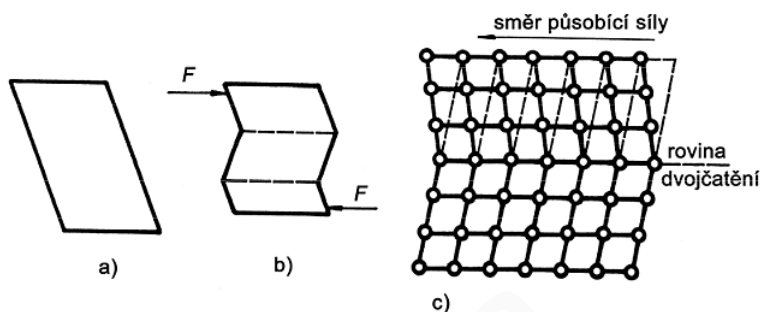
který je tvořen rovinou skluzu a směrem skluzu (viz obr. 1). Skluz zpravidla neprobíhá naráz v celém objemu materiálu, ale začíná v rovinách kluzu, které jsou nejhustěji obsazeny atomy (malé meziatomové vzdálenosti). Zároveň platí, že směr skluzu je totožný se směrem nejhustěji obsazenými atomy, kde se pohyb atomů setkává s nejmenším počtem překážek. (tzn. energeticky nejvýhodnější) [1, 4, 6, 7, 8].



Obr. 1 Skluzový mechanismus plastické deformace [6]

Kovové materiály pro kování se vyznačují krystalickou strukturou, která je tvořena krystalovou mřížkou. Ve skutečnosti neexistují materiály s ideální strukturou, ale s určitými poruchami krystalové mřížky (např. bodové poruchy, dislokace). Část volných dislokací se pod účinkem kritického skluzového napětí uvede do pohybu po kluzné rovině. Přitom dochází k postupnému přemísťování atomů po dané kluzné rovině v určitém směru skluzu. Trvalý posuv atomů nastává pouze v tom skluzovém systému, v němž dosahuje smykové napětí prahového, již zmíněného, kritického smykového napětí. Je možné konstatovat, že plastická deformace nastává pohybem dislokací a zároveň během deformace dochází k jejich generování [1, 4, 7, 8].

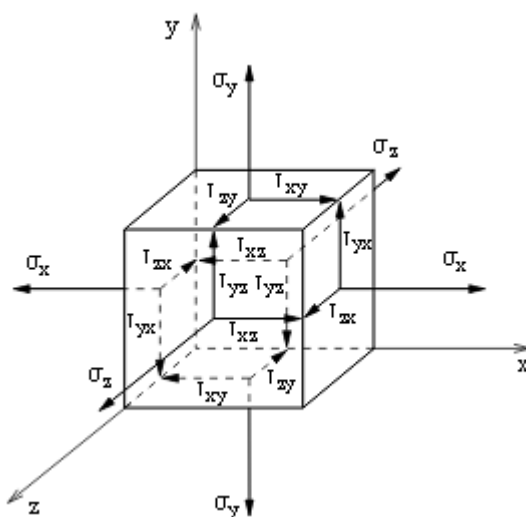
**Dvojčatění** je druhý možný mechanismus plastické deformace, která se uskutečňuje přesunem atomů v krystalu a to pouze o část meziatomové vzdálenosti, čímž dojde k posunutí určité části zrna (krystalu). Mřížka v této oblasti má stejné pravidelné uspořádání jako původní mřížka a zároveň je souměrná s mřížkou neposunutou podle určité krystalografické roviny. Tato rovina je nazývána rovinou dvojčatění (viz obr. 2). Tento mechanismus plastické deformace se uplatňuje především při vysokých rychlostech deformace a nízkých teplotách, přičemž se nedosahuje velkých plastických deformací [1, 6, 7]. Jelikož dvojčatění probíhá za specifických podmínek, není při procesu kování tento druh deformace příliš častý.



Obr. 2 Mechanismus dvojčatění plastické deformace [6]

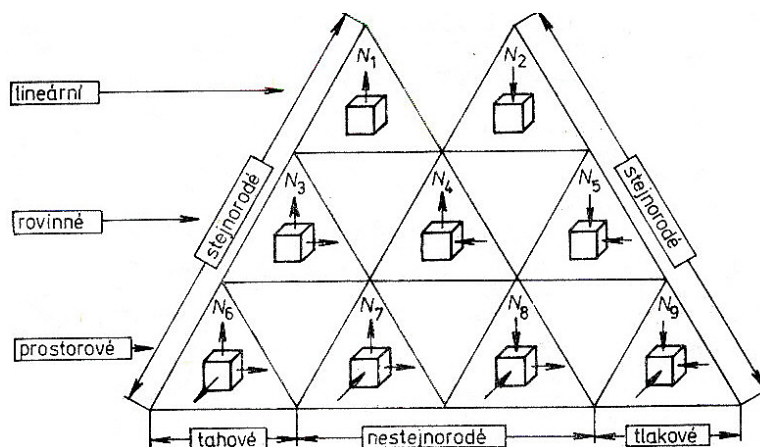
### 2.1.1 Vliv napjatosti na plastickou deformaci

Napjatost je stav tělesa, vznikající působením vnějších sil. Pro snazší představu o napjatosti je možné hmotný bod tělesa nahradit prostorovým elementem, na jehož stěnách prostřednictvím vnějších tvářecích sil vznikají jak normálová, tak smyková napětí (viz obr. 3). Potom lze obecný stav napjatosti popsat devíti složkami napětí (třemi složkami vektorů normálových napětí a šesti složkami vektorů smykových napětí) [1, 2, 9, 10].



Obr. 3 Napětí působící na prostorový element ( $\sigma$  – normálové napětí,  $\tau$  – smykové napětí) [9]

Prostorová napjatost se popisuje pro jednoduchost prostřednictvím hlavních normálových napětí, působících v hlavních rovinách. Hlavní rovina je definována jako rovina v tělese, ve které je smykové napětí nulové. Proto stav napjatosti vyjadřuje informace pouze o přítomnosti, velikosti a smyslu hlavních normálových napětí v uvažovaném tvářeném tělese. Stav napjatosti je možné znázornit pomocí devíti schémat hlavních napětí (viz obr. 4), přičemž rozeznáváme jednoosou (lineární), dvojosou (rovinnou) a trojosou (prostorovou) napjatost [1, 4, 6, 9].



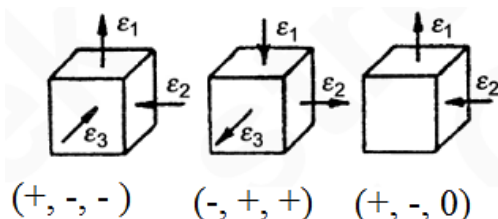
Obr. 4 Schéma stavu napjatosti [1]

Z hlediska tváření má význam stav napjatosti, protože ovlivňuje tvářitelnost materiálů. Zpravidla platí, čím větší bude mít vliv tlakové napětí na úkor tahového napětí, tím větší bude tvářitelnost materiálu. Bude-li dodržena tato podmínka, je možné tvářet kovy i s nižšími plastickými vlastnostmi [1, 4, 6].

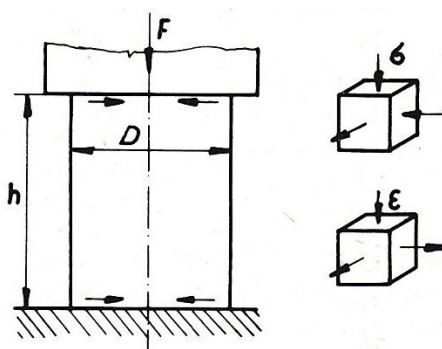
Působením tvářecí síly, vyvolávající hlavní napětí, současně vzniká v místě největšího odporu materiálu proti plastické deformaci určité napětí. Jelikož toto napětí má stejnou velikost jako hlavní napětí a zároveň působí proti hlavnímu napětí, označuje se deformačním odporem materiálu. Budou-li hlavní napětí mít stejný smysl (nikoliv stejnou velikost) v průběhu tváření, hovoříme o stejnorodé napjatosti. V tomto případě dojde k vzrůstu deformačního odporu materiálu, který se projeví zvýšením potřebných tvářecích sil. Avšak deformační odpor materiálu výrazně ovlivňuje kovácká teplota (viz kapitola 4), deformační rychlost a tření [1, 4, 8, 10, 11]. Z tohoto hlediska stav napjatosti při kování nemá až takový význam na deformační odpor materiálu.

### 2.1.2 Mechanická schémata deformací

Na základě zákona o zachování objemu tvářeného materiálu je stav deformace popsán pouze třemi reálnými schémata hlavními deformací (viz obr. 5). Pro analýzu tvářecích pochodů mají význam především mechanická schémata deformace, která dávají grafickou představu o přítomnosti smyslu hlavních napětí a deformací. Na obrázku 6 je ilustrován příklad mechanického schématu deformace v tvářeném materiálu během operace pěchování rovnými kovadly [1, 4, 12].



Obr. 5 Schémata hlavních deformací ( $\varepsilon$  – poměrná deformace) [6]



Obr. 6 Znáznornění mechanického schématu deformace během operace pěchování rovnými kovadly ( $D$  – průměr špaluku,  $h$  – výchozí výška špaluku) [12]

## 2.2 Odpevňovací procesy

Jak již bylo zmíněno, během plastické deformace se produkují nové dislokace, což se projeví zvýšením jejich hustoty ve struktuře tvářeného materiálu. S rostoucí hustotou dislokací stoupá deformační odpor materiálu. Pohyb dislokací během plastické deformace bývá obvykle blokován ostatními dislokacemi, příměšovými atomy nebo hranicemi zrn a subzrn. Aby se dislokace mohly dále pohybovat, je zapotřebí zvýšit působící síly. Tento proces se v průběhu tváření projevuje zpevněním materiálu. Zpevnění má za následek jednak zvýšení hodnot meze kluzu a meze pevnosti, a zároveň zhoršenou tažnost a kontrakci tvářeného kovu. Podle změny mechanických vlastností je patrné, že se zpevněním tvářeného materiálu snižuje jeho plasticita. Jak při tváření za tepla, tak za studena je účinek zpevnění materiálu eliminován odpevňovacími „uzdravovacími“ procesy:

1. *Zotavení*

2. *Rekrystalizace*

[4, 9, 10]

Tváření za tepla probíhá při teplotách 60 až 70% teploty tavení kovu, tedy vysoko nad teplotou rekrystalizace. Během zpevnění materiálu při tváření za tepla probíhá současně rekrystalizace. Jedná se o takzvanou dynamickou rekrystalizaci (viz oddíl 2.2.1). Proto je zpevnění materiálu více výrazné při tváření kovu za studena než při tváření za tepla. Odpevňovací procesy jsou ovlivněny materiálovými (např. stav struktury, chemickým složením) a deformačními parametry (např. teplota, velikost a rychlost deformace) [1,4].

### 2.2.1 Dynamická rekrystalizace

Rekrystalizace je obecně tepelně aktivovaný děj, který probíhá při dosažení rekrystalizační teploty. Rekrystalizační teplota je u čistých kovů 35 až 40% jejich teploty tavení. Jak bylo v podkapitole 2.2 uvedeno, dynamická rekrystalizace nastává v tvářeném materiálu během vysokoteplotní deformace. Podstatou rekrystalizace je vytvoření zárodků nedeformovaných zrn o téže krystalické mřížce, jako deformovaná zrna tvářeného materiálu. Tyto zárodky vznikají nejčastěji na hranicích původních zrn. Dynamicky rekrystalizovaná zrna rostou do určité velikosti zrn, odpovídající velikosti deformace. Tím se liší dynamická rekrystalizace od rekrystalizace statické, při které zrna rostou až do vzájemného styku. Rekrystalizací se snižuje zpevnění materiálu, jelikož během tohoto děje se výrazně snižuje hustota dislokací. Zároveň se zvýší plastické vlastnosti tvářeného materiálu [1, 3, 4, 10].

Jelikož dynamická rekrystalizace neodstraní zcela zpevnění materiálu při plastické deformaci za tepla, může proběhnout statická rekrystalizace, popřípadě statické zotavení. Tyto statické odpevňovací procesy se uskuteční za předpokladu, že bude ukončena plastická deformace materiálu (např. během chlazení deformovaného materiálu z vysokých teplot v záпустce). Jedná se o takzvaný postdynamický proces [1, 6, 8].

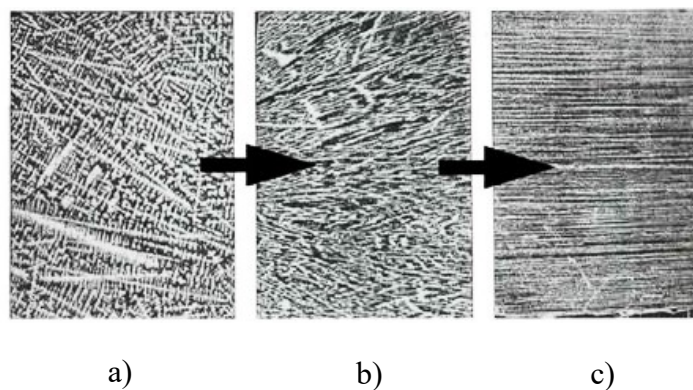


### 3 Volné kování

Volné kování je proces tváření, který umožňuje zhotovit výkovky značných rozměrů o hmotnosti až 350 tun. Takovéto výkovky je nemožné nebo neúčelné vyrobít jinými technologiemi. Volné výkovky se vyznačují relativně jednoduchými tvary, jelikož se používají jednoduché kovářské nástroje. Tyto nástroje je možno rozdělit na základní (např. kovádla, kovátko, sekáče), pomocná (např. kleště, objímky) a měřicí (např. úhelníky, šablony). Jelikož nástroje nepůsobí převážně na celý objem kovaného polotovaru najednou, energetická náročnost tvářených strojů je menší v porovnání se zápustkovým kovááním. Vlastní proces kování spočívá ve využití základních kovářských operací (prodlužování, pýchování, děrování, osazování a prosazování, přesazování, sekání, ohýbání, zkrucování). Podobně jako každá technologie, tak i volné kování má své nedostatky. Povrch výkovku je nerovný, silně zokujený, se značnými materiálovými přídatky a velkými rozměrovými úchyly. Pro části výkovků, které by se obtížně kovaly (např. mělká a krátká osazení) se předepisují technologické přídatky. Z toho vyplývá, že se výkovky vyznačují omezenou tvarovou složitostí [1, 4, 5].

Jako výchozí polotovary pro volné kování se používají polotovary s lící strukturou (tzv. ingoty) nebo polotovary s tvářenou strukturou získanou válcováním (např. sochory, bloky). Kovářské ingoty, dále v textu pouze ingoty, se odlévají z uklidněné oceli. Ingot má tvar vícebokého komolého jehlanu s vydutými stěnami a zaoblenými hranami. Tělo ingotu se rozšiřuje od paty směrem k hlavě ingotu. Tvar příčného průřezu ingotu je obvykle mnohoúhelníkový (např. šesti, osmi, dvanácti). Tyto průřezy jsou ovšem typické pro těžké ingoty, kdežto ingoty s hmotností do 1 tuny se vyznačují převážně průřezy kruhovými [1, 2].

Krystalická neboli dendritická struktura ingotu je charakteristická chemickou i fyzikální nestejnorodostí a výskytem vnitřních nečistot. V ingotu se nacházejí endogenní vměstky (sulfidické, oxidické), které se ukládají vlivem segregace kolem primárních zrn tuhnutí oceli. Současně se odměšuje uvnitř zrn fosfor, čímž jsou o něj primární zrna oceli na povrchu bohatší. Tvářením za tepla „prokováním“ dochází k rozrušení lící struktury ingotu. To znamená, že se podobně jako při tvářením za studena začnou protahovat hranice a povrchové vrstvy zrn. Takto protažená zrna vytvářejí texturu. Jak již bylo v úvodu této kapitoly zmíněno, kování je technologie tváření za tepla, při níž probíhá dynamická rekrytalizace. Právě vlivem dynamické rekrytalizace budou protažená zrna nahrazena zrnami nedeformovanými. Avšak vměstky vyloučené na hranicích již neexistujících zrn nepodléhají dynamické rekrytalizaci a zachovávají si tak protažený tvar. Proto zjemněná protažená zrna ve směru hlavní deformace vytvářejí vlákna kovu (viz obr. 7 a obr. 11). Ve směru vláken jsou plastické vlastnosti (např. tažnost, kontrakce, vrubová houževnatost) a pevnost výkovku vyšší než ve směru příčném. Vytvořená vlákna výkovku se nedají odstranit, je možné měnit pouze jejich směr prostřednictvím dalšího kování (např. zápustkového kování). Směr největšího normálového napětí má souhlasit se směrem vláken, kdežto tečné napětí má být k němu kolmé. Je nutné si uvědomit, že vláknitost není vlastností kovu, ale je dána zejména složením kovu a nečistotami. Vlákňitost je tedy příčinou, proč se výkovky tvářené za tepla vyznačují anizotropií [1, 2, 3, 11].



**Obr. 7 Vznik vláknitosti volně kovaného výkovku (a- výchozí strukturní stav, b – přeměna dendritické struktury, c – vláknitá struktura) [3]**

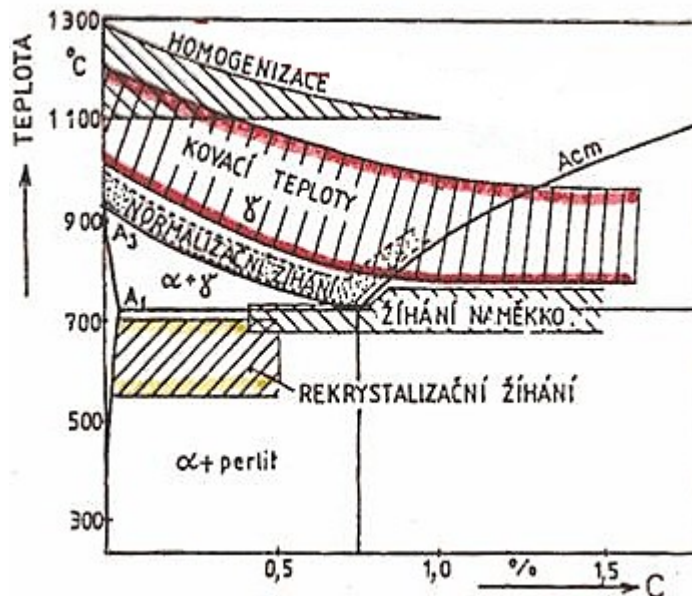
## 4 Zápustkové kování

Zápustkovým kovááním je možné vyrábět tvarově členité výkovky s vysokou rozměrovou přesností, avšak s rozměrovým a hmotnostním omezením. Podle hmotnosti zápustkových výkovků, které jsou kovárny schopné vyrobit v závislosti na jejich technickém vybavení, lze tyto rozdělit na zápustkové kovárny zaměřené na výrobu rozměrných výkovků s hmotností od 50 kg do 900 kg a zápustkové kovárny produkující méně hmotné výkovky do 50 kg. Zápustkové kování v porovnání s jinými výrobními technologiemi (např. volného kování, lití nebo obrábění) je hospodárnější z hlediska využití materiálu [1].

Při návrhu technologie zápustkového kování se nejdříve vychází z počtu vyráběných výkovků, ze strojního vybavení kovárny a druhu výchozího polotovaru. Pro zápustkové kování nejsou používány polotovary s lící strukturou, ale se strukturou tvářenou. Jedná se nejčastěji o válcované tyče kruhového nebo čtvercového průřezu, ale také o bloky nebo sochory. Pro výkovky s mimořádnými nároky na rozměrovou přesnost lze také aplikovat tažené nebo loupáné tyče kruhového průřezu. Jelikož jsou polotovary dodávány v určitých normalizovaných rozměrech, je nutné zajistit jejich dělení na požadované rozměry (např. řezáním pásovou nebo kotoučovou pilou, dále stříháním a lámáním). Před vlastním procesem kování jsou dělené polotovary ohřáty v ohřívacích pecích (např. karuselová, komorová nebo elektroindukční pec) na vhodnou kovací teplotu. Kování neprobíhá při určité teplotě, nýbrž v určitém teplotním intervalu. Tento teplotní interval je vymezen horní a dolní kovací teplotou, který je znázorněn na obrázku 8. Horní kovací teplota ocelí leží zhruba 200°C až 300°C pod křivkou solidu. Dolní kovací teplota je nejnižší přípustná teplota polotovaru, při které je nezbytné kování přerušit a provést meziohřev výkovku. Z obrázku 8 je patrné, že se dolní kovací teplota volí pro podeutektoidní oceli nad teplotou  $A_3$ , a u nadeutektoidních ocelí nad teplotou  $A_1$  [1, 4, 5, 6, 13].

Jak již bylo uvedeno v oddílu 2.2.1, během kování narůstá deformační odpor tvářeného materiálu. S rostoucí kovací teplotou se deformační odpor materiálu snižuje, materiál se tedy stává tvárnějším. Z technologického hlediska je kování za vysokých teplot výhodné, neboť není potřeba velkých kovacích sil a zároveň dochází k menšímu opotřebení zápustek. Jestliže se polotovar běžně kove při teplotách těsně pod horní kovací teplotou, potom dochází k zhrubnutí austenitického zrna tvářeného materiálu. Následným normalizačním žháním se

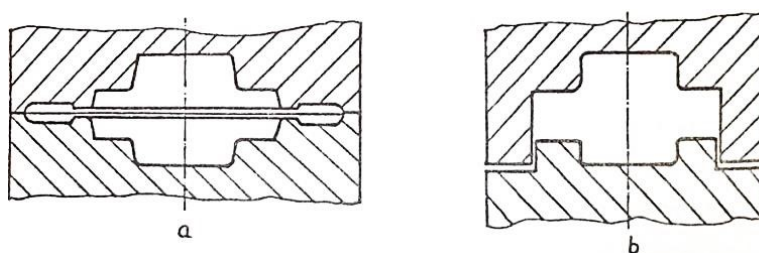
získá jemnozrnná struktura. V případě ohřevu oceli těsně nad horní kovací teplotou dochází k jejímu přehřátí. Tím dochází k zhoršení plastických vlastností (zejména vrubové houževnatosti, dále tažnosti a kontrakci), ovšem na pevnost oceli přehřátí nemá vliv. V případě ohřevu na teploty, které se bezprostředně blíží teplotě solidu dané oceli, dojde k jejímu nevratnému poškození. Tento mezní stav je nazýván spálení oceli [1, 4, 6, 13].



Obr. 8 Pásno kovacích teplot [3]

Jak vyplývá ze samotného názvu této technologie, vlastní proces kování je uskutečňován v zápustkách. Zápustky jsou jednoúčelové, většinou dvoudílné tvarové nástroje. Dutina zápustek odpovídá tvaru výkovku, případně předkovku. Podle konstrukce zápustek lze rozlišit dva základní způsoby zápustkového kování:

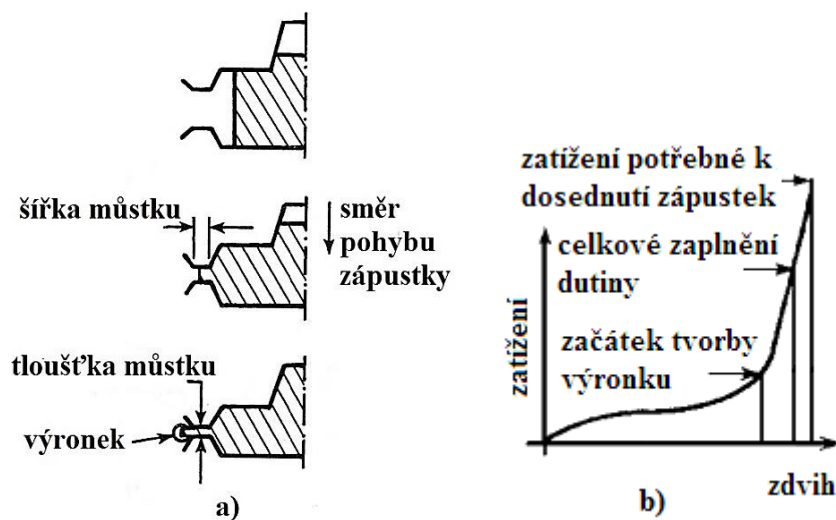
1. Výronkové kování (otevřená zápustka)
2. Bezvýronkové kování (zavřená zápustka) [1, 4, 7, 14, 15]



Obr. 9 Konstrukce zápustky (a – s výronkem, b – bez výronku) [13]

Tato diplomová práce bude dále zaměřena pouze na výronkové kování, které se provádí v otevřené zápustce. Na obrázku 9 - a) a 10 je znázorněna *jednodutinová otevřená zápustka*, ve které je po obvodě dutiny v dělicí rovině zápustky vytvořena výronková drážka. Výronková drážka je tvořena můstkem a zásobníkem (viz kapitola 7). Vlastní proces kování spočívá v umístění polotovaru o požadované kovací teplotě do dutiny spodní zápustky. Na

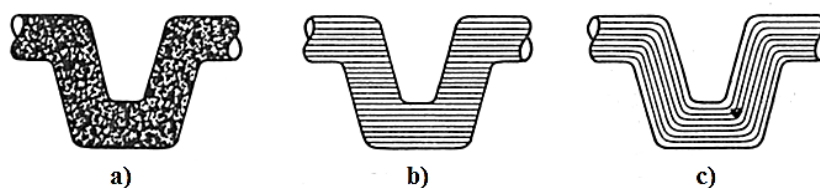
polotovary působí horní díl zápustky rázem nebo tlakem prostřednictvím tvářecího stroje (bucharu nebo lisu). Zápustkové kování je příznačné tím, že dochází k tváření celého objemu výchozího polotovaru najednou. Pro překonání deformačního odporu materiálu je tedy nezbytné vynaložit větší energii, než v případě volného kování. Z tohoto důvodu je zápustkové kování považováno za energeticky náročnější způsob kování. Jak je patrné z obrázku 10, polotovary jsou v počáteční fázi procesu přechovány. Stěny dutiny zápustky způsobují řízené tečení kovu. Zmenšující se vzdálenosti mezi oběma díly zápustek kov zaběhne do výronkového můstku (viz obr. 10), kde poklesne jeho teplota. Tím se vyvolá odpor proti vytěsňování kovu do výronkové drážky. Tento protitlak je potřebný pro dokonalé vyplnění dutiny zápustky. V okamžiku jejího zaplnění dochází k překonání protitlaku a přebytečný kov je vytlačen do zásobníku výronkové drážky. Tento přebytečný kov je podle kovářské terminologie nazýván jako výronek. Po vlastním procesu kování je výronek odstříhnut od výkovku na ostříhavadle (např. na okrajovacím lisu). Kvůli nižším teplotám, při kterých proces ostřížení výronku probíhá, může dojít k deformaci výkovku. V případě požadavku na vysokou rozměrovou přesnost výkovku je do technologického postupu zařazena operace *kalibrování*, která je prováděna po odstranění výronku. Kalibrováním se získává výkovek s přesnou hmotností, hladkým a čistým povrchem, a také přesným rozměrem. Kalibrace výkovku se obvykle provádí za zvýšených teplot na stejném kovací stroji v dokončovací dutině zápustky (obvykle jedním úderem), případně na kovací stroji se speciální kalibrační dutinou. Má-li výkovek větší přídavky, potom během kalibrace může vzniknout malý výronek. Ten se odstraní následným obrobením nebo okrojením za studena [1, 3, 4, 7, 15].



**Obr. 10 Průběh výronkového kování ( a- vyplňování dutiny zápustky, b – průběh zatížení během kování) [15]**

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, zápustkovým kovááním se změnil pouze směr vláken, která kopírují obrys výkovku (viz obr. 11 – c). Zápustkové výkovky se tedy vyznačují dobrou odolností proti rázům a únavě. To je dáno tím, že směr vláken je kolmo na předpokládanou dráhu šíření trhlin v materiálu. Naopak odlitky se nevyznačují vláknitostí, neboť při tuhnutí nedochází k plastické deformaci kovu (viz obr. 11 – a). Trhliny se mohou šířit přes nehomogenity „póry“. Podle obrázku 11 – b je patrné, že vlákna obrobku jsou paralelně jednosměrná a ukončena v místě změny obrysu součásti. Protože při obrábění nedochází k toku kovu, potom směr vláken je shodný se směrem vláken výchozího materiálu dodaného výrobcem. Trhlinka se šíří paralelně se směrem vláken, podél hranic zrn a rozhraní mezi kovem a vměstky. Výrobky zhotovené obráběním mají sice vyšší odolnost proti únavě a

rázům vzhledem k odlítkům, ale menší v porovnání s výkovky. Zápustkové kování je tedy vhodné zejména pro vysoce dynamicky namáhané součásti (např. lopatky turbín) [1, 11, 16, 17, 18].



**Obr. 11 Porovnání výrobku (a – odlitku, b – obrobku, c – výkovku) [18]**

Po zvážení počtu vyráběných kusů výkovků, technických možností kovárny a ekonomicko-technologického hodnocení výroby je zvolen druh kovacího stroje (buchar, lis). Poté se navrhne tvar zadaného výkovku tak, aby byl výkovek vyrobitelný (viz kapitola 6). Na základě navrženého tvaru výkovku je navržena konstrukce kovacího nástroje „zápustky“ (viz kapitola 7).

## 4.1 Zápustky

Zápustky jsou vyráběné buď jako zápustkové bloky (pro buchary, vřetenové lisy), nebo jako vložky (viz kapitola 7). Vložky a zápustkové bloky se zhotovují buď jednosměrným, nebo všestranným prokováním. Vlastní dutiny se získávají třískovým obráběním (např. CNC frézováním), případně obráběním nekonvenčním (např. elektroerozivním obráběním). Kromě obrábění je možné také dutiny lisovat za studena. Aby se vložky a zápustkové bloky mohly obrábět, je výchozí materiál dodán ve stavu žháném na měkko. Zápustkové bloky se mohou navíc i odlévat (např. gravitačním litím na keramickou vložku, litím pomocí vodou chlazeného modelu). Výhoda litých zápustkových bloků spočívá v odlití dutin zápustky, a tím ušetření následujících technologií pro zhotovení dutin. Pouze dělicí rovinu je třeba ohrubovat a povrch dutiny přešetřit [1, 4]. Takto vyrobenou zápustku je nutné, pro dosažení požadovaných vlastností, ještě tepelně zpracovat (např. žhání na snížení vnitřního pnutí, zušlechťování). Po tepelném zpracování se zápustky dále mechanicky upravují (např. pískováním, broušením a leštěním) [1].

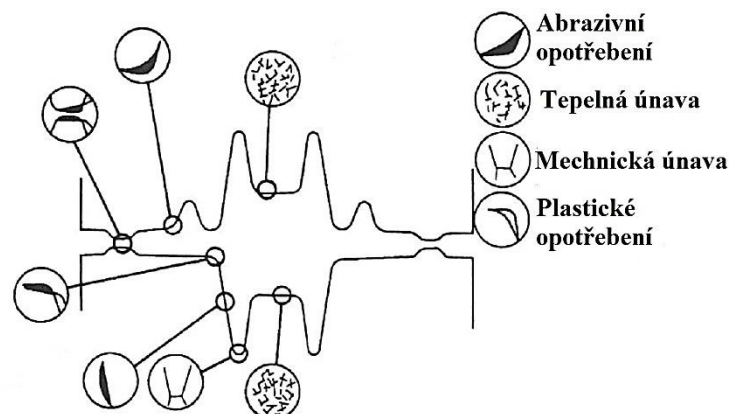
V této diplomové práci bude dále pojednáváno pouze o zápustkách pro buchary, z důvodů uvedených v experimentální části práce.

### 4.1.2 Opotřebení zápustek

Jelikož je kovaný polotovár, případně předkovek, ve styku s povrchem dutiny zápustky, povrchová vrstva zápustkové dutiny se vlivem přestupu tepla ohřívá. Teplota v zápustce je tedy nerovnoměrně rozložena, neboť teplota jádra zápustky je nižší než teplota povrchu dutiny zápustky. Zvýšením teploty má povrchová vrstva tendenci zvětšit svůj objem, ale studenější jádro zápustky jej omezuje. Tyto objemové rozdíly způsobují vznik tlakového napětí v povrchové vrstvě dutiny zápustky a tahových napětí v jádře zápustky. Teplota

povrchu dutiny zápustky se snižuje při jednotlivých kovacích operacích (např. vyjmutí výkovku a vložení polotovaru, případně předkovku), nebo v důsledku ochlazení mazivem (grafit ve vodě). To se projeví smrštěním materiálu zápustky. Je možné konstatovat, že v povrchové vrstvě dutiny zápustky dochází k teplotním šokům. Ty jsou tedy způsobeny periodickým ohříváním a ochlazováním povrchu zápustky, a tím vznikají objemové změny. Tyto objemové změny vedou ke vzniku pnutí, a tím dochází ke vzniku tepelných trhlinek v povrchové vrstvě dutiny. Zápustky jsou během procesu kování namáhány nejen tepelně, ale také mechanicky. Cyklickým namáháním zápustek dochází k mechanické únavě materiálu, při které nastane nevratné porušení jejího materiálu. Na počátku cyklického namáhání dochází ke změnám mechanických vlastností materiálu zápustky. V místech koncentrace napětí (např. malé poloměry zaoblení) se objevují únavové trhlinky, které postupně rostou. Tyto trhlinky rostou a vytvářejí trhlinu, která způsobí únavový lom materiálu [4, 7, 13, 15, 19].

Ohřátím povrchu dutiny se snižuje pevnost zápustky a její odolnost proti deformaci. Tím teplotní namáhání napomáhá opotřebení zápustky otěrem, který zapříčiňuje ztrátu materiálu z povrchu zápustky a změnu její geometrie. Toto opotřebení je následkem interakce volných nebo vázaných abrazivních částic mezi povrchem zápustky a kovaným materiálem (např. tvrdé oxidy na povrchu kovaného polotovaru). Podle obrázku 12 dochází k otěru zejména v přechodech a kolem výronkové drážky. Zápustka je během kování namáhána značnými tlaky, které jsou způsobeny kovacími silami stroje. Jestliže dojde k překročení meze kluzu materiálu zápustky, pak bude zápustka plasticky deformována (stlačována a roztahována) [4, 7, 15, 19].



Obr. 12 Mechanismy porušení a jejich působení v zápustce [7]

Pro snížení teplotního gradientu, a tím tepelných pnutí mezi povrchem dutiny a jádrem zápustky, se doporučuje zápustky předehřívát na teplotu  $250 \pm 10^\circ\text{C}$ . Předehřívání by se mělo provádět co nejrovnoměrěji a to v celém objemu jednotlivých zápustek. Teplota zápustek ovšem během upínání na kovací stroji klesne přibližně na provozní teplotu  $200^\circ\text{C}$ . Jelikož se předehřevem snižuje přestup tepla do zápustky, snižuje se tím rychlost chladnutí kovaného polotovaru nebo předkovku. To má příznivý vliv na zvýšení životnosti zápustky, neboť kovaný materiál nezvyšuje výrazně svůj deformační odpor a nezvýší se tedy tlakové namáhání. Jinak řečeno, nedochází tak k značnému opotřebení dutiny zápustky plastickou deformací a otěrem. Klesne-li teplota zápustek během kování pod teplotu  $150^\circ\text{C}$ , potom je nezbytné kování přerušit a zápustky opakovaně ohřát na provozní teplotu. Přehřev během kování se obvykle provádí prostřednictvím plynových hořáků [4, 13, 21].

Během kování se nesleduje pouze optimální provozní teplota zápustek, ale také jejich maximální dovolená teplota. Spodní část zápustky se v průběhu kování ohřívá z důvodu nepřetržitého styku s teplejším tvářeným materiálem. Protože vrchní část zápustky je pouze v krátkém časovém styku s tvářeným materiálem, zvýšení teploty nebývá tak výrazné. Překročí-li teplota zápustky 350°C, potom je nutné zápustky chladit (např. vzduchem, proudem vzduchu nebo mazivem). Velký důraz v technologii zápustkového kování je kladen na mazání zápustek, neboť se jedná o zabránění ulpívání výkovku v dutině zápustky a zároveň se sníží tření mezi tvářeným materiálem a zápustkou. To se projeví snížením deformačního odporu a práce. V případě výkovku lopatky parní turbíny je použito tuhé mazivo dispergované ve vodě (grafit ve vodě). Nanesením maziva na ohřátou zápustku se voda začne odpařovat (ochlazení zápustky) a grafit se uchytí na povrch zápustky [1, 22].

Další možností jak zvýšit živostnost zápustek je jejich vložkování, o kterém je pojednááno v kapitole 7.

#### 4.1.3 Materiály zápustek

Jako materiál pro zápustky je volena zpravidla nástrojová ocel pro práci za tepla (viz tab. 1). Z hlediska namáhání a opotřebení zápustek v průběhu kování jsou na ocele kladeny následující požadavky:

- a) Vyšší pevnost a tvrdost v blízkosti povrchu zápustky zajistí zvýšenou odolnost proti opotřebení zápustky (otěr).
- b) Odolnost proti plastickým deformacím (vysoká mez kluzu).
- c) Ocel s dobrou prokalitelností.
- d) Odolnost proti vzniku tepelných trhlin při tepelné únavě zápustky.
- e) Velká odolnost proti poklesu pevnosti v závislosti na teplotě a jejím působení.
- f) Odolnost proti mechanické únavě.
- g) Dostatečná houževnatost oceli za normálních i vyšších pracovních teplot.
- h) Malá tepelná roztažnost.

[4, 7]

	Chrom molybdenové oceli			Wolframová ocel	Nízkolegovaná ocel	Niklová ocel
AISI	H10	H11	H13	H21	6F3	L6
DIN EN ISO 4957	X32Cr MoV3- 3	X38Cr MoV5- 1	X40Cr MoV5- 1	X30WCrV9- 3	54NiCrMo6V6	55NiCrMoV7
ČSN	19541	19552	19554	-	-	19 663

Tab. 1 Nástrojová ocel pro práci za tepla [7, 23, 24]

## 4.2 Zápustky pro buchary

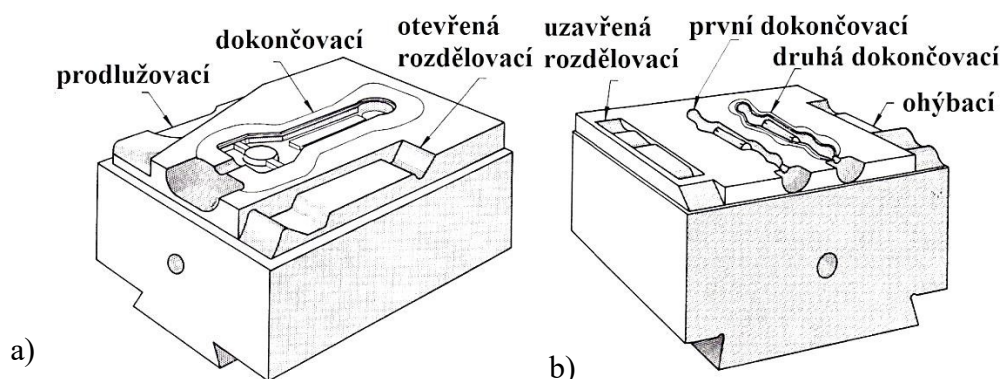
K zaplnění dutiny zápustky dochází přednostně ve směru rázu horního dílu zápustky. Jak již bylo v oddílu 4. 1. 2 zmíněno, vrchní část zápustky není v nepřerušovaném styku s povrchem tvářeného kovu. Díky tomu se výkovek ze strany horního dílu zápustky ochlazuje pomaleji než ve spodní oblasti výkovku. Deformační odpor tvářeného materiálu v oblasti vyšších teplot, tedy ve vrchní části výkovku, je výrazně menší. Na základě nerovnoměrnosti teplot ve výkovku během kování, jsou zpravidla složitější a vyšší části výkovku (např. žebra, výstupky) umístěny v horním dílu zápustky. Podle počtu dutin na pracovní ploše zápustkového bloku lze rozlišit kování:

a) *jednodutinové*

b) *postupové*

[ 4, 7, 15 ]

*Jednodutinová zápustka* je charakteristická jednou dutinou, jejíž tvar odpovídá tvaru výkovku. Proto se tato dutina nazývá dutinou dokončovací. Kování v této zápustce je vhodné zejména pro těžké a rozměrové výkovky, které není možné vykovat v postupových zápustkách. V případě tvarově složitých výrobků je polotovar předkován (např. volným kovááním nebo kovacími válci) a dokován v dokončovací dutině. Z ekonomického hlediska je kování v jednodutinových zápustkách vhodné zejména pro malosériovou výrobu. Naopak pro větší série je výhodné předkování polotovaru provádět v zápustkovém bloku, na jehož pracovní ploše se nachází jednak *dutiny předkovací a dokončovací*. Takováto zápustka se nazývá *zápustkou postupovou* (viz obr. 13) [4, 7, 20, 25, 26].



**Obr. 13** Postupová zápustka (a – s otevřenou rozdělovací dutinou, b – s uzavřenou rozdělovací dutinou) [7]

Účelem předkování je rozdělení materiálu výchozího polotovaru ve směru podélném nebo příčném. Takto upravený polotovar se nazývá předkovek, jehož tvar by měl být pokud možno co nejbližší k tvaru výkovku. Předkováním se tedy usnadní tok materiálu v dokončovací dutině, v níž by nemělo docházet k toku materiálu ve směru osy výkovku, ale ve směru příčném. Jelikož bude minimální pohybu kovu v dokončovací dutině, sníží se její opotřebení. Při správném předkování se rovněž sníží nebezpečí vzniku nežádoucích zákovků. Zákovky jsou vesměs považovány za vady ve výkovku [1, 4, 7, 25, 26].



Jelikož je konstrukce dokončovací dutiny u jednodutinové a postupové zápustky stejná, budou dále v literární rešerši popsány pouze předkovací dutiny postupové zápustky (viz oddíl 4.2.1). Otázka postupu při návrhu dokončovací dutiny zápustky je řešena v kapitole 7.

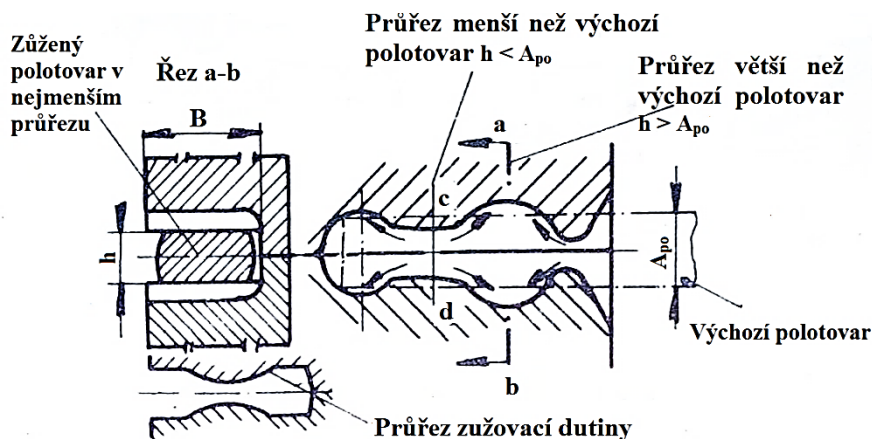
#### 4.2.1 Postupová zápustka

Kováním v předkovacích dutinách, v literatuře též nazývané jako přípravné dutiny, se rozděljuje výchozí polotovary do jednotlivých průřezů a tvarů. Tvar těchto dutin odpovídá požadovanému tvaru předkovku. Počet a typ dutin se volí v závislosti na tvaru ideálního předkovku. Ideální předkovek se konstruuje pouze pro podélné výkovky (např. ojnice, lopatky, táhla). Předkovací dutiny jsou vždy bez výronkové drážky, kdežto dokončovací dutina je charakteristická výronkovou drážkou (viz kapitola 7). Předkovací dutiny jsou v zápustkovém bloku rozmístěny kolem dutiny dokončovací. Ovšem platí zásada, aby méně namáhané dutiny (např. prodlužovací, ohýbací) byly umístěny na okraji zápustkového bloku. Kdežto více namáhané dutiny je vhodné umístit blíže ke středu zápustky. Přípravné dutiny jsou obvykle otevřené, neboť se nacházejí na samé hraně (na boku) pracovní plochy zápustkového bloku (viz obr. 13) [4, 19, 20, 25].

Pro snazší manipulaci s kovaným polotovarem v postupové zápustce se vykove úchytka v přípravné dutině, za níž se polotovary kovářskými kleštěmi drží. Pro manipulaci s úchytkou musí být v zápustkovém bloku vybrání pro kleště. U postupové zápustky se nejdříve navrhuje tvar dokončovací dutiny, která odpovídá tvaru výkovku. Dokončovací dutina v postupové zápustce se umísťuje tak, aby její těžiště bylo co nejbližší k těžišti zápustkového bloku. Z hlediska složitosti tvaru výkovku nemusí být dokončovací dutina v postupové zápustce pouze jedna, ale mohou být dvě i tři [4, 25].

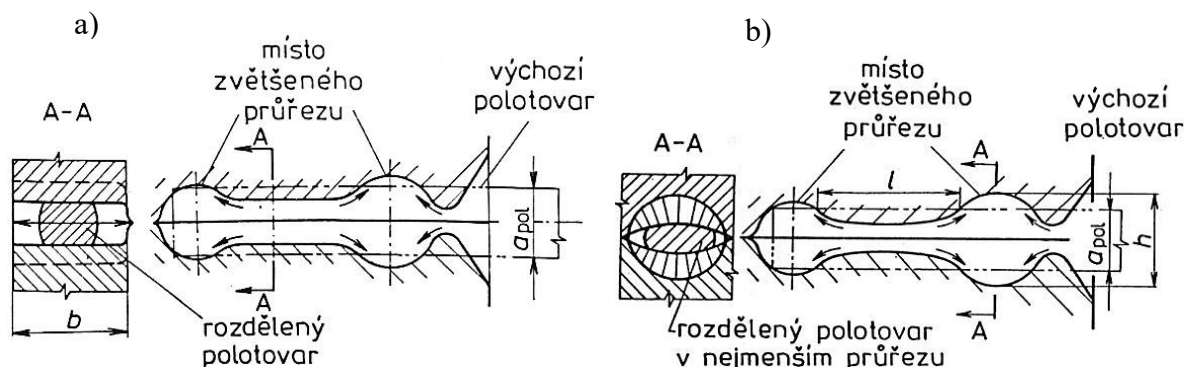
Mezi předkovací dutiny patří:

- a) **Zužovací dutina**, ve které se kov přemísťuje ve směru osy výkovku. Výchozí polotovar se v určitém místě nepatrně redukuje a jinde nepatrně pěchuje (viz obr. 14). V této dutině se kove jedním úderem beranu bucharu a to bez pootočení. Předkovek se poté klade do další dutiny v zápustkovém bloku. Tato dutina se používá při malých rozdílech průřezu hotového výkovku [20, 27, 25].



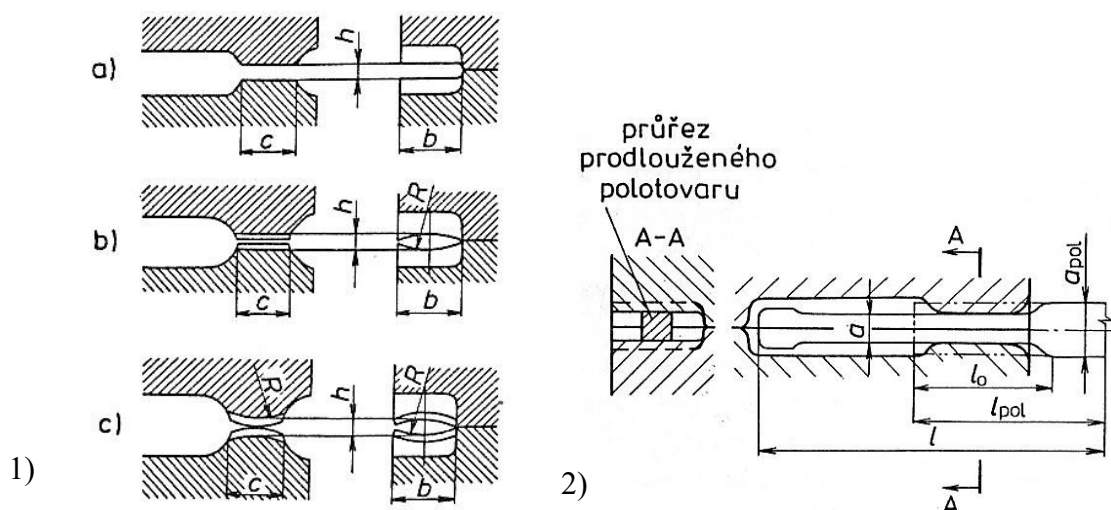
Obr. 14 Zužovací dutina [20]

- b) **Dutina rozdělovací** může být konstruovaná jak otevřená, tak uzavřená. *Otevřená dutina* se používá tehdy, je-li za potřeby větší přemístění materiálu v podélné ose se současným napěchováním a redukcí v příčném průřezu (viz obr. 15 - a). *Dutina uzavřená* dosahuje nejintenzivnějšího tečení materiálu ve směru podélné osy (viz obr. 15 - b). Také napěchování a redukce je větší než v případě dutiny zužovací a dutiny rozdělovací otevřené. Tato uzavřená dutina se používá pro předkování osově souměrných výkovků. V obou případech provedení rozdělovací dutiny se kove na dva až čtyři úder s pootočením o  $90^\circ$  [4, 20, 27, 25].



Obr. 15 Rozdělovací dutina (a – otevřená, b – uzavřená) [28]

- c) Kováním v **dutině prodlužovací** dochází k postupné redukci původního průřezu, za současného prodloužení kovaného materiálu (viz obr. 16 - 2). Tato dutina je obvykle první operací při postupovém kování [7, 20, 25].

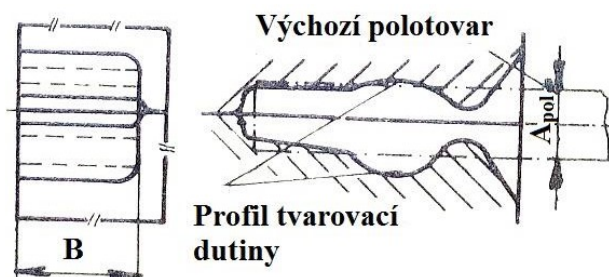


Obr. 16 Prodlužovací dutina (1 - tvary prodlužovací dutiny, 2 - schéma dutiny) [4, 25]

Tvar prodlužovací dutiny podle obrázku 16 – 1 se použije, pokud druhou operací v postupovém kování bude kování v dutině rozdělovací uzavřené. Bude-li ovšem po kování v prodlužovací dutině následovat rovnou kování jedním úderem v dutině tvarovací nebo ohýbací, potom tvar prodlužovací dutiny odpovídá podle obrázku 16 – 1 písmenu b. V případě kování v dutině prodlužovací, označené písmenem c, bez použití dalších

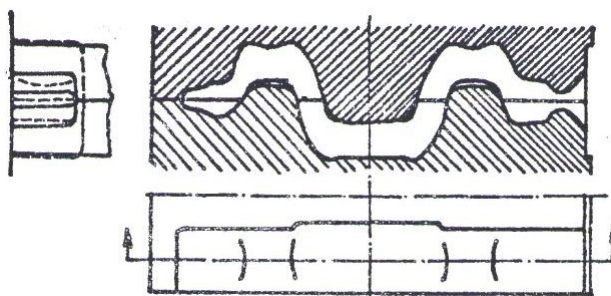
předkovacích dutin (viz obr. 16 - 1), je předkovek následně kován v dokončovací dutině [4, 20].

- d) V *dutině tvarovací* dochází k nepatrnému přemístování materiálu ve směru osy (nepatrné prodloužení) a uděluje materiálu půdorysný tvar výkovku. Kove se na jeden nebo dva údery bez otáčení. Předkovek se umísťuje do další dutiny v poloze pootočené o  $90^\circ$  [4, 18, 20].



Obr. 17 Tvarovací dutina [20]

- e) V *dutině ohýbací* dochází k ohýbání materiálu podle půdorysného tvaru výkovku s nepatrným přemístěním a zúžením průřezu. Tato dutina slouží k ohýbání jednak předkovek, ale také polotovaru. Při konstrukci dutiny je nezbytné, aby materiál byl ve vodorovné poloze a zároveň byl podepřen na dvou místech. Ta musí být vhodně umístěna vzhledem k bodu dotyku vrchní části nástroje. Poloměry zaoblení se volí co největší, aby se znemožnilo přeložení materiálu u ostrých ohybů. Kove se na jeden až dva údery. Předkovek se z ohýbací dutiny vkládá do další dutiny zápustky pootočený o  $90^\circ$  [4, 20, 25].



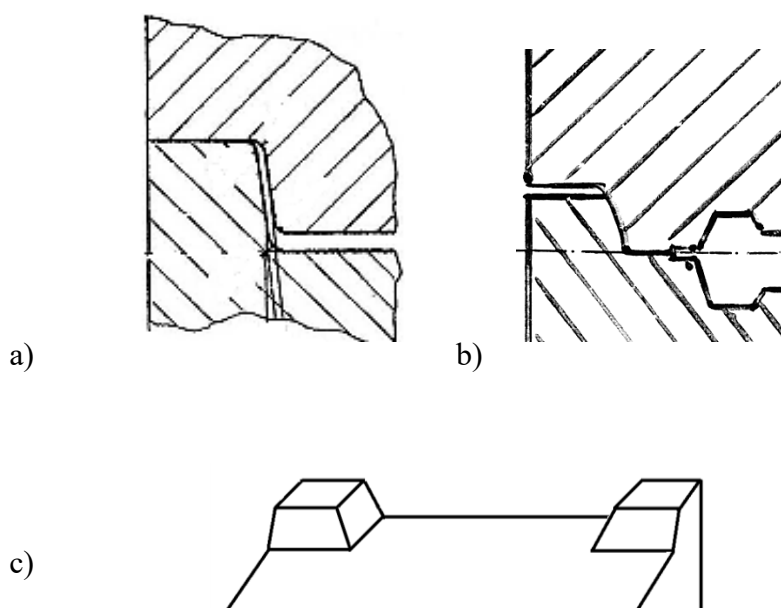
Obr. 18 Ohýbací dutina [14]

#### 4.2.2 Vedení zápustek

Při kování na bucharech nelze zcela zaručit, pouze vedením beranu tvářecího stroje, požadované přesnosti výkovků. To znamená, že jednotlivé díly zápustky se mohou navzájem posunout. Vedení se navrhuje jak pro jednodutinové zápustky, tak pro zápustky postupové.

Pro zamezení výkovků je možné navrhnout následující varianty vedení:

- a) *Kruhové* (obvodové vedení) se používá zejména u kruhových a čtvercových zápustek pro rotační tvary výkovků (viz obr. 19 - a)
- b) U podélných zápustek je možné vymezit příčný přesah *podélným vedením* (viz obr. 19 – b).
- c) *Křížové* vedení slouží k vymezení v příčném, ale také v podélném směru (viz obr. 19 – c).
- d) *Vodící kolíky* jsou obvykle umístěné v rohu podélné zápustky, tak aby střed zápustky ležel ve středu jejich spojnic, případně na průsečíku spojnic (viz kapitola 7).
- e) *Opěrný zámek* v dutině zápustky (viz podkapitola 6.1). [4, 20]



Obr. 19 Způsoby vedení zápustek (a – kruhové vedení v řezu, b – podélné vedení v řezu, c - křížové vedení) [20]

## Experimentální program

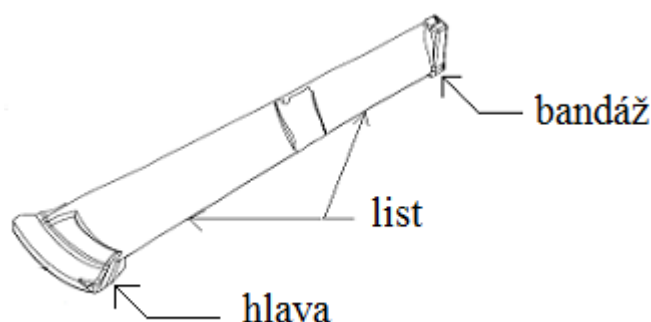
### 5 Úvod do experimentu

Cílem experimentální části diplomové práce je navrhnout technologii zápustkového kování lopatky parní turbíny pro firmu CPF, s ohledem na jejich technické možnosti. Program práce je rozvrhnut do následujících bodů:

- Návrh tvaru výkovku lopatky parní turbíny v CAD programu od společnosti Siemens (NX).
- Návrh tvaru dutiny zápustky.
- Stanovení výchozího polotovaru a navrhnout tvar předkovku s ohledem na technické vybavení firmy CPF.
- Ověření výrobitelnosti výkovku lopatky parní turbíny simulací v programu Deform.
- Ekonomicko-technologické zhodnocení.

#### 5.1 Lopatka parní turbíny

Parní turbína je tepelný lopatkový rotační motor, v němž se mechanická energie získává přeměnou tepelné energie prostřednictvím expanze vodní páry. Lopatky parní turbíny se obecně rozlišují na rozváděcí a oběžné. Lopatka zadaná firmou CPF patří do skupiny oběžných lopatek, jejichž funkcí je převedení kinetické energie proudu páry na mechanickou energii. Proto v této diplomové práci bude dále pod pojmem lopatka chápána oběžná lopatka parní turbíny. Na obrázku 20 je znázorněn model výkovku lopatky, jejíž hlavní částí je hlava, list a bandáž. Na hlavě čisté lopatky je zhotoven stromečkovitý závěs (viz příloha A), prostřednictvím kterého je lopatka uchycena k disku. Funkcí bandáže lopatky je zamezení přetékání páry přes okraj lopatky [28, 29].



Obr. 20 Model výkovku lopatky turbíny

Jelikož se parní turbína obvykle skládá z několika stupňů (vysokotlaký, středotlaký, nízkotlaký), mají potom lopatky v každém stupni odlišnou délku listu. Největší lopatky se nacházejí v nízkotlakém stupni parní turbíny. Naopak menší lopatky se umísťují do vysokotlakého a středotlakého stupně turbíny [28, 29]. Podle délky zadané lopatky (1030,5 mm) lze konstatovat, že se jedná o lopatku do nízkotlakého stupně parní turbíny.

## 5.2 Volba kovacího stroje

Na základě strojního vybavení firmy CPF a tvarové složitosti lopatky, bude výkovek lopatky vykovan na protiběžném bucharu.

Protiběžný buchar					
Označení stroje	Beche B40				
Energie úderu [kJ]	400				
Hmotnost horního beranu [kg]	44 000				
Hmotnost dolního beranu [kg]	48				
Rozměry zápustek [mm]	výška	max.	550	min.	300
	šířka	max.	1140	min.	700
	délka	max.	2500	min.	500

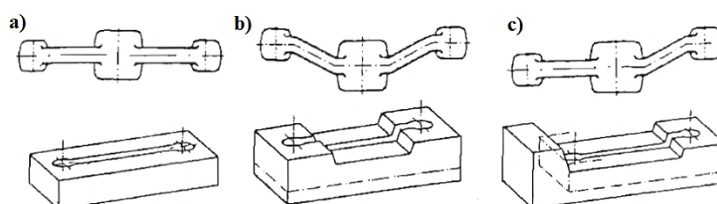
Tab. 2 Parametry protiběžného bucharu [21]

## 6 Návrh tvaru výkovku

Při návrhu tvaru výkovku se vždy vychází z výkresové dokumentace součásti dodané zákazníkem. Podle tvarové složitosti lopatky parní turbíny je nutné zvolit vhodnou dělicí rovinu (viz podkapitola 6.1). Tvar výkovku musí být ovšem navržen tak, aby byl snadno technologicky vyrobitelný a to s ohledem, jak na funkční požadavky součásti, tak také na výrobní a ekonomické požadavky. Proto je nutné u zadaného tvaru lopatky stanovit přídatky na obrábění (viz podkapitola 6.3) a případně i technologické přídatky (viz podkapitola 6.4). Výkres výkovku musí obsahovat všechny nezbytné rozměry a řezy, které jsou nutné pro konstrukci vlastní dutiny zápustky. Zákazník by měl také specifikovat, v jaké přesnosti provedení by měl být výkovek vykovan. Není-li tomu tak, potom se předpokládá, že výkovek je vykovan s běžným stupněm přesnosti (viz podkapitola 6.2). Posledním krokem je schválení výkresu zákazníkem, případně navržení změn v samotné konstrukci výkovku.

### 6.1 Volba dělicí roviny

Dělicí rovinu je možné definovat jako rovinu, která rozděluje zápustku na dva díly, za účelem vyjmutí výkovku z dutiny zápustky. Tvar dělicí roviny nemusí být jenom přímý (viz obr. 21 - a), ale lze využít i nepravidelnou (lomenou) dělicí rovinu (viz obr. 21 - b, c) [11, 20, 25, 30]. Porovnáním obrázků 21 - a, b je patrné, že výška zápustkového bloku bude menší v případě přímé dělicí roviny.

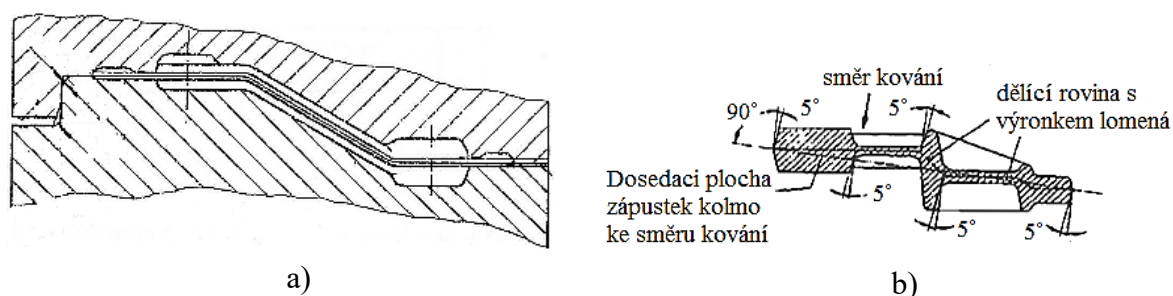


Obr. 21 Tvar dělicí plochy (a – přímá, b – lomená souměrná, c – lomená nesouměrná) [11, 30]

O typu dělicí roviny rozhoduje tvarová složitost výkovku. Pro velmi tvarově složité výkovky, jako v případě zadané lopatky, je zvolena lomená dělicí rovina. Při kování lopatky s lomenou dělicí rovinou je ovšem nutné předpokládat vznik značných bočních sil. Pokud tyto síly nebudou eliminovány, mohou způsobit vzájemné posunutí jednotlivých částí zápustek. Toto posunutí by mělo za následek nežádoucí přesazení výkovku (viz kapitola 6.5) [4, 20].

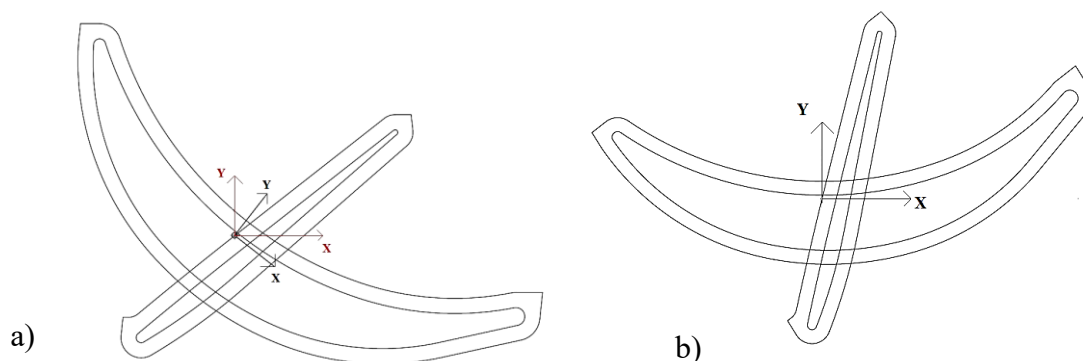
Aby se vliv bočních sil při kování lopatek eliminoval, je nezbytné navrhnout takové konstrukční opatření, které je v souladu s tvarem lopatky. Pro kování lopatky je možné navrhnout dvě konstrukční varianty:

- a) *Opěrný zámek v dělicí rovině zápustky (viz obr. 22 - a).*
- b) *Natočení dělicí roviny (viz obr. 22 - b).* [4, 20]



**Obr. 22 Konstrukční prvky pro zachycování bočních sil (a- opěrný zámek v dutině zápustky, b- natočení dělicí roviny) [4, 11]**

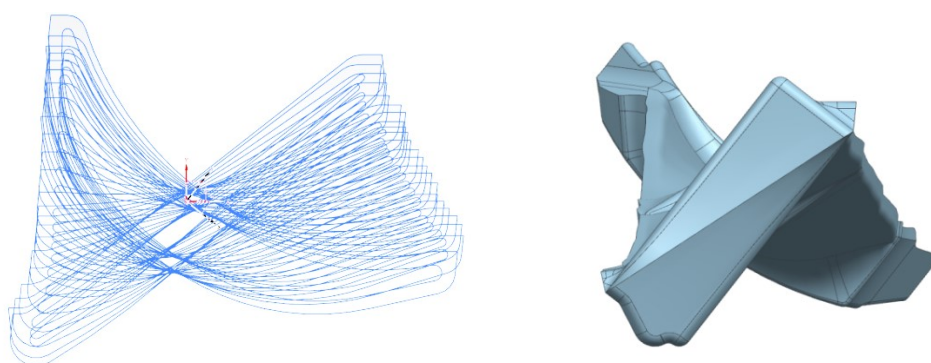
Základním krokem při návrhu výkovku lopatky je konstrukce jednotlivých řezů (viz příloha B). Z konstrukce prvního a posledního řezu výkovku lopatky (viz obr. 23) je patrný sklon bandáže a hlavy lopatky. Kdyby byl výkovek lopatky konstruován v původním souřadnicovém systému, potom by materiál během kování zcela nezaplnil dutinu zápustky v oblasti bandáže. Dalším předpokládaným problémem by bylo pracné vyjmutí výkovku z dutiny zápustky, neboť by vnější úkosy byly minimální nebo žádné. Vytvořením opěrného zámku v dutině zápustky, pro daný výkovek, se boční síly sice eliminují, ovšem dutina zápustky nebude zaplněna. V takovém případě se jedná o zmetek. Z tohoto důvodu není účelné pro výkovky lopatek vytvářet v dutině zápustky opěrný zámek.



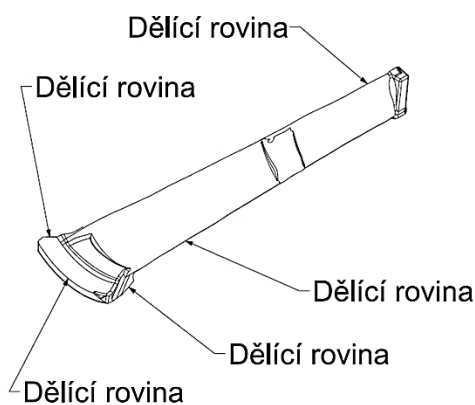
**Obr. 23 Konstrukce prvního a posledního řezu lopatky (a – natočení pod úhlem 38°, b – bez natočení). Červeně znázorněná souřadnice představuje směr kování, černě znázorněná souřadnice je souřadnicí konstrukční**

Aby materiál bez problému vyplnil dutinu zápustky, je vhodnější konstruovat jednotlivé řezy výkovku lopatky pod úhlem třicet osm stupňů vůči směru kování (viz obr. 23 - a). Tento úhel byl stanoven na základě zkušeností firmy CPF. Tím vznikají dva odlišné souřadnicové systémy. Souřadnicový systém, v němž jsou řezy konstruovány, je označen jako konstrukční, a původní souřadnicový systém jako kovací.

Po zkonstruování všech řezů výkovku lopatky je patrné, že lomená dělicí rovina bude natočená ke směru kování (viz obr. 24 a obr. 25). Natočením dělicí roviny vůči směru kování se jednak eliminují boční síly při kování, rovněž se dosáhne úplného zaplnění dutiny zápustky v oblasti bandáže lopatky. Pro usnadnění vyjmutí výkovku lopatky z dutiny zápustky je možné v každém řezu výkovku lopatky vytvořit vnější úkosy (viz oddíl 6.4.2). Vnější úkosy se předepisují až po přidavku na obrábění (viz podkapitola 6.3). Tyto úkosy nejsou již konstruovány v konstrukčním směru, ale ve směru kovacím.



**Obr. 24 Směr kování (a- konstrukce řezu výkovku lopatky s vnějšími úkosy a přidavkem na obrábění, b – výkovek lopatky)**



**Obr. 25 Dělicí rovina výkovku lopatky**

## 6.2 Stanovení stupně přesnosti

Jak již bylo v úvodu kapitoly 6 zmíněno, pokud zákazník nestanoví stupeň přesnosti výkovku lopatky, potom předepsané přidavky na obrábění a mezní úchytky tvarů a rozměrů výkovku jsou stanoveny pro běžné kování. Pro označení stupně přesnosti na výkresu výkovku je možné využít jak starší, doposud platnou normu ČSN 42 9030, nebo normu ČSN EN 10243-1.



Norma ČSN 42 9030 rozlišuje tři možné specifikace přesnosti zápusťkových výkovků:

- a) *Výkovky v obvyklém provedení (označení ČSN 42 9030.1)*
- b) *Výkovky v přesném provedení (označení ČSN 42 9030.2)*
- c) *Výkovky ve velmi přesném provedení (označení ČSN 42 9030.3)* [22]

Norma ČSN EN 10243-1 rozeznává pouze dva stupně přesnosti zápusťkových výkovků:

- a) *„Stupeň přesnosti kování F s mezními úchytkami, které poskytují přiměřený stupeň přesnosti pro obvyklé použití, dosažitelný běžně použitelným kovářským zařízením a způsoby kování“.*
- b) *„Stupeň přesnosti kování E se zúženými mezními úchytkami pro ty případy, kdy obvyklé mezní úchytky nejsou přiměřené“.* [30]

Jelikož firma CPF využívá při návrhu tvaru výkovků normu ČSN EN 10243-1, bude také norma v této diplomové práci uplatňována. Podle této normy je na výkresu výkovku (viz příloha B) předepsaný stupeň přesnosti kování F. Je vhodné poznamenat, že tato norma neobsahuje hodnoty pro stanovení přídávky na obrábění a hodnoty úkosů. Z tohoto důvodu budou přídávky na obrábění stanoveny podle normy ČSN 42 9030 (viz podkapitola 6.3). Mezní úchytky rozměrů a tvarů (viz kapitola 6.5) naopak podle normy ČSN EN 10243-1.

### 6.3 Přídávky na obrábění

Přídávky na obrábění je nutné předepsat z důvodu ohřevu polotovaru, případně potřebného přehřevu předkovku nebo polotovaru v průběhu kování. Ohřívání se provádí v pecní atmosféře, obsahující okysličující plyny (kyslík, oxid uhličitý a vodní pára). Oxidační atmosféra způsobí nejen okujení povrchové vrstvy tvářeného materiálu, ale také jeho oduhličení. Oduhličení zasahuje ovšem do hloubky pod povrch oceli, v níž není ocel již ovlivněna okujemi. Přídávky na obrábění se předepisují pro odstranění znehodnoceného povrchu výkovku způsobené procesem kování. Aby bylo možno odstranit oduhličenou vrstvu výkovku a povrchové vady (způsobené válcováním použitých polotovarů) obráběním, určují se přídávky na obrábění podle platné normy ČSN 42 9030 [4, 27, 31].

<i>Největší průměr, střední hodnota šířky a délky ve směru kolmo k rázu</i>		<i>Největší výška hotového výrobku</i>							
		přes	25	40	63	100	160	250	400
		do 25	40	63	100	160	250	400	630
Přes	do	<i>Přídávky na obrábění ploch</i>							
	25	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0			
25	40	1,5	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5		
40	63	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5		
63	100	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	
100	160	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	
160	250	2,5	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5
250	400	2,5	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,0
400	630	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
630	1000	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0

Tab. 3 Přídávky na obrábění ploch pro obvyklé provedení (rozměry v mm) [22]

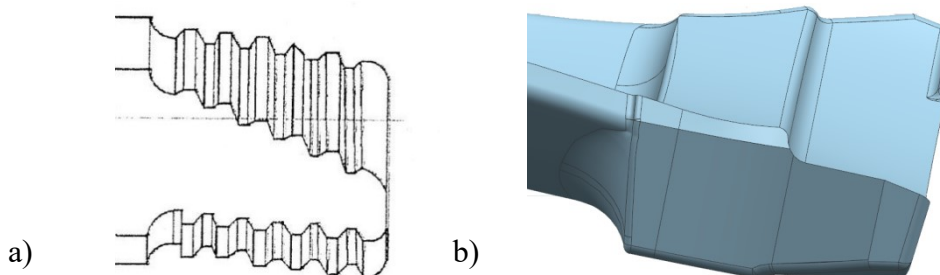
Pro stanovení přídávku na obrábění se vychází z rozměrů čisté lopatky (viz příloha A). Výška lopatky je 116,48 mm, šířka 230 mm a délka 1103,5 mm. Střední hodnota šířky a délky ve směru kolmo k rázu je 666, 75 mm. Po dosazení příslušných hodnot do tabulky 3, je výsledný přídavek na obrábění 4,5 mm. S ohledem na tvarovou složitost výkovku je nutné brát v úvahu nutnost dalšího přiláhu. Případným přiláhem by nastalo intenzivnější oduhlíčení předkovku či polotovaru. Po vykování by se přídávkem na obrábění 4,5 mm zcela neodstranila oduhlíčená vrstva výkovku. Z tohoto důvodu je předepsán přídavek na obrábění 5 mm. Tímto opatřením se zamezí výrobě nežádoucích zmetků výkovku lopatky.

## 6.4 Technologické přídávky

Pod pojmem technologické přídávky rozumíme upravení konstrukce čistého tvaru lopatky z hlediska vyrobitelnosti. To znamená pro konstrukční prvky obtížně vyrobitelné, nebo nevyrobitelné, se předepisují technologické přídávky. Do této skupiny přídávku také patří zaoblení hran a přechody výkovku, boční úkosy a stanovení dovolených rozměrových a tvarových úchylek výkovků.

### 6.4.1 Technologické přídávky z hlediska tvaru čisté lopatky

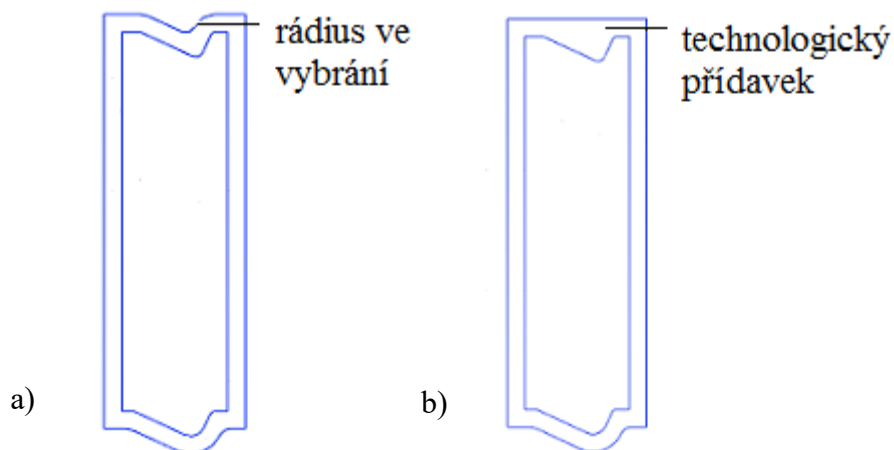
Při návrhu tvaru výkovku je nutné zhodnotit konstrukční tvar čisté lopatky z hlediska technologie zápusťového kování. Jak vyplývá z výkresu lopatky (viz příloha A), stromečkovitý závěs je tvořen drážkami. Tyto drážky představují konstrukční prvek, který nelze vykovat. Proto je předepsán technologický přídavek (viz obr. 26), který bude odstraněn následným obrobením výkovku (např. frézováním).



**Obr. 26 Stromečkovitý závěs (a - čistý tvar lopatky, b - technologický přídavek na drážky)**

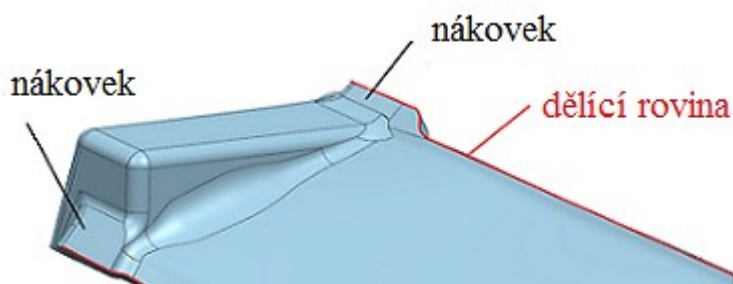
Dalším konstrukčním prvkem, kde je technologický přídavek předepsán, je díra o průměru 13,2 mm v listu lopatky (viz příloha A). Díry nelze přímo vykovat, ovšem z technologického hlediska je možné vytvořit blánu při předkování polotovaru. Pod pojmem blána rozumíme přepážku v dutině výkovku, která je po ukončení kování odstraněna následným děrováním. Tento postup se obvykle využívá u děr větších průměrů [32]. Důvodem je pracnost při předkování a tím také vyšší cena výkovku. Proto je zde přídavek předepsán formou zanedbání díry.

Na obr. 27 je znázorněna bandáž čisté lopatky a bandáž s technologickým přídatkem. Přídatkem je předepsán z důvodu velmi malého rádiusu ve vybrání. Technologický přídatkem je předepsán tak, že se vybrání během kování zanedbá. Vybrání v bandáži je možné vykovat, ale za předpokladu předepsání dostatečně velkého poloměru přechodu.



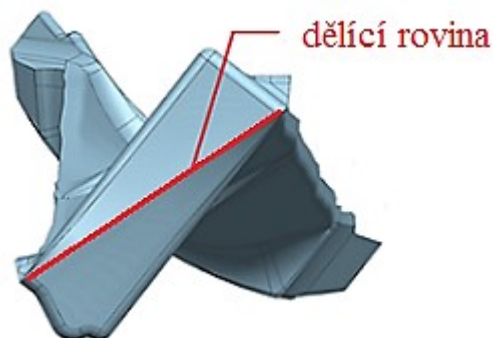
**Obr. 27 Bandáž lopatky (a- bez technologického přídatku, b-s technologickým přídatkem)**

Za technologický přídatkem je možné považovat i konstrukční prvek ve formě nákovku za účelem průchodu lomené dělicí roviny na výkovku (viz obr. 28).



**Obr. 28 Technologický přídatkem ve formě nákovku**

Přechod dělicí roviny z jedné strany výkovku lopatky na druhou je řešen technologickým přídatkem ve formě úkosu na čelní ploše bandáže (viz obr. 29).



**Obr. 29 Úkos na čelní ploše bandáže výkovku lopatky**

### 6.4.2 Stanovení velikosti úkosů

Funkcí úkosů je usnadnění vyjmutí výkovku z dutiny zápustky. Úkosy mohou být obecně vnější i vnitřní. Na základě tvaru výkovku lopatky jsou předepsány pouze úkosy vnější. Je nutné si uvědomit, že každý úkos představuje nárůst materiálu výkovku a zároveň negativně ovlivňuje zatékání materiálu do dutiny zápustky. Proto je snaha volit takové hodnoty úkosů, které značně neovlivní zatékání materiálu do zápustky. Hodnoty úkosů stanovuje norma ČSN 42 9030 podle typu kovacího stroje. Jsou uvedeny v tabulce 4 [11, 20, 25, 31].

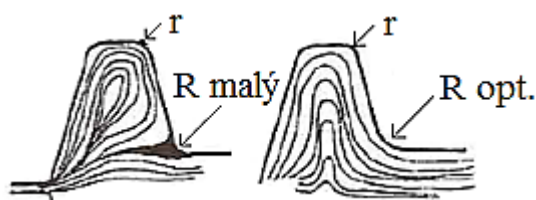
	Vnější	Vnitřní
Zápustkové výkovky se běžně vyrábějí s úkosy	3°	7°
Lisy s vyhazovači	2° až 3°	3° až 5°
Vodorovné stroje	0° až 5°	0° až 5°
<i>Pro buchary a lisy bez vyhazovače</i>	7°	10°

**Tab. 4 Velikost úkosů [31]**

Podle příslušné normy vychází pro kování výkovků na bucharech vnější úkosy o velikosti 7°. Na základě zkušeností firmy CPF je stanoven vnější úkos o velikosti 6°.

### 6.4.2 Stanovení poloměrů zaoblení

Poloměrem zaoblení se zamezí ostrým přechodům (R) a hranám (r), které představují koncentrátor napětí (tzv. vrub). Z tohoto důvodu je odolnost výkovku proti mechanickému namáhání vyšší. Vlákná výkovku nejsou v místě zaoblení přerušena (viz obr. 30), to se projeví zvýšením odolnosti výkovku proti korozi v místě zaoblení. Bude-li nedostatečný poloměr zaoblení přechodů (R), mohou během kování vznikat vady ve formě přeložek [11, 31].



**Obr. 30 Vliv poloměru zaoblení přechodů na vznik přeložky [11]**

Podobně jako u vnějších úkosů, tak také každé zaoblení na výkovku představuje materiál navíc. Na druhou stranu je snaha volit co největší zaoblení, neboť materiál bude lépe zatékat do dutiny zápustky a zároveň se sníží opotřebení hran zápustek [11].

Hodnoty poloměru zaoblení stanovuje norma ČSN 42 9030, podle tabulky 5. Pro stanovení poloměru zaoblení u výkovku lopatky není možné postupovat podle příslušné normy, s ohledem na problematické určení potřebných rozměrů daného výkovku. Není také možné jednoznačně stanovit, v jakém souřadnicovém systému by měli být rozměry naměřeny.

Druhým aspektem je tvarová složitost výkovku lopatky. Z těchto důvodů, bylo vycházeno z praktických zkušeností firmy CPF pro daný výkovek lopatky. Pro zaoblení hran je zvoleno 5 mm a pro přechod 10 mm.

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

**Tab. 5 Zaoblení hran r a přechodů R výkovku (h – hloubka dutiny výkovku, f – šířka příslušné části výkovku) [31]**

## 6.5 Stanovení dovolených rozměrových a tvarových úchylek výkovků

Při kování se rozměry výkovku i zápusky mění v důsledku tepelné roztažnosti materiálu. Teplota výkovku se během kování a následného chladnutí snižuje, až se teplota vyrovná s teplotou okolí. Rozměry výkovku se zmenší o hodnotu smrštění. Jelikož rozdělení hmoty ve výkovku není rovnoměrné, není rovnoměrně rozdělena ani konečná kovací teplota. Potom není smrštění rovněž rovnoměrné, čímž nastávají změny v délkových a šířkových rozměrech výkovku. Hodnoty smrštění závisí jednak na kovací teplotě, dále na druhu tvářeného materiálu (viz tab. 6) a na tvaru výkovku. Budou-li výkovky kovány při minimálních teplotách, potom je hodnota smrštění o jednu třetinu menší než u výkovků kovaných za vyšších kovacích teplot. Při kování podélných výkovků (např. ojnice, páky) je pro největší délkové rozměry hodnota smrštění zvětšena až o 50%. Dále je změna rozměrů výkovků ovlivněna opotřebením zápusťek během kování (viz podkapitola 4.2) [11, 25].

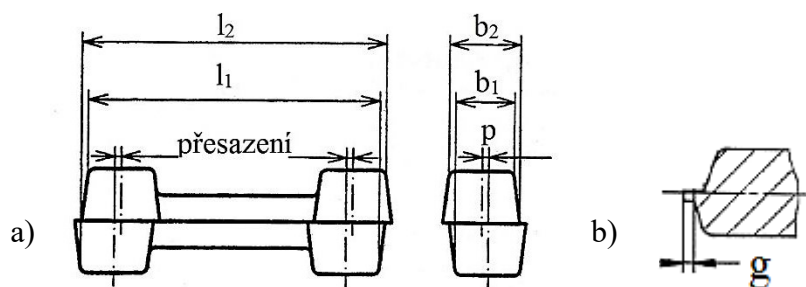
Materiál výkovku	Smrštění v %
Nízko a středně uhlíkové oceli	1
Legované oceli	1,5
Austenitické oceli	1,5 až 2%

**Tab. 6 Hodnoty smrštění [14, 33]**

Mezní úchyly rozměrů jsou definovány jako úchyly rozměrů od jmenovitých rozměrů výkovku, kdežto úchyly tvaru jsou úchyly od požadovaného geometrického tvaru výkovku. Úchyly rozměrů a tvaru výkovku lopatky jsou stanoveny normou ČSN EN 10243-1, která zahrnuje *mezní úchyly rozměrů (déłky, šířky, výšky a tloušťky), přesazení, otřep a přímost výkovku*.

Přesazení je možné definovat jako rozměr (p), o který mohou být přesazeny body po jedné straně dělicí roviny vůči bodům na druhé straně dělicí roviny ve směru rovnoběžném s hlavní

dělicí rovinou (viz obr. 31 - a). Otřep (g) je zbytek materiálu, který vytekl do dělicí roviny zápustky během kování (obr. 31 - b) [22].

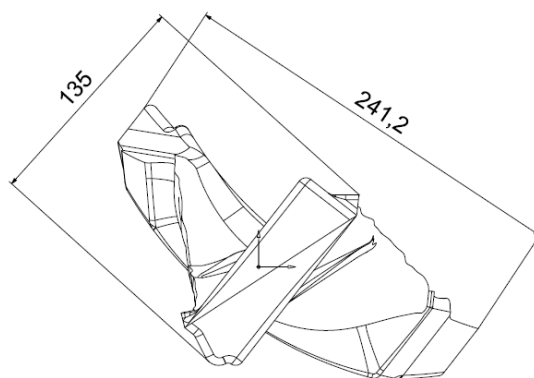


Obr. 31 Úchylky tvaru (a- přesazení, b- otřep) [30, 31]

Pro stanovení mezních úchylek je třeba znát rozměry a hmotnost výkovku, tvar dělicí roviny, druh tvářené oceli (viz oddíl 6.5.2) a stanovit ukazatel členitosti tvaru výkovku (viz oddíl 6.5.1).

### 6.5.1 Ukazatel členitosti tvaru

Normy ČSN EN 10243-1 definuje ukazatel členitosti tvaru výkovku jako „*poměr hmotnosti výkovku ke hmotnosti obalového tělesa, vytvořeného z největších rozměrů výkovku*“. Jelikož navržený tvar výkovku lopatky je nerotačního tvaru, potom obalovým tělesem je nejmenší kvádr, který daný výkovek obklopí [30]. Platí pravidlo, kdy tloušťka výkovku je rozměr napříč dělicí plochy zápustky, kdežto výška je pouze do dělicí roviny. Vždy se výška, šířka a tloušťka stanovuje ve směru kování. Podle obrázku 32 a výkresu výkovku lopatky (viz příloha B) je šířka výkovku 241,2 mm, tloušťka 135 mm a délka 1133,5 mm. Hmotnost navrženého výkovku je 29,755 kg.



Obr. 32 Šířka, tloušťka výkovku lopatky ve směru kování

Norma ČSN EN 10243-1 rozlišuje 4 skupiny ukazatele členitosti tvaru:

- a) S<sub>4</sub>: do 0,16
- b) S<sub>3</sub>: nad 0,16 do 0,32
- c) S<sub>2</sub>: nad 0,32 do 0,63
- d) S<sub>1</sub>: nad 0,63 do 1

[30]

Objem kvádru je vypočítán vztahem 1:

$$V = l \cdot b \cdot t \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

Kde  $l$  je délka [mm],  $b$  je šířka [mm] a  $t$  je tloušťka výkovku [mm].

$$V = 1133,5 \cdot 241,2 \cdot 135 = 36\,909\,027 \text{ mm}^3 = \underline{0,0369 \text{ [m}^3\text{]}}$$

Hmotnost kvádru „obalového tělesa“ je určena vztahem 2:

$$m = V \cdot \rho \text{ [kg]} \quad (2)$$

Kde  $V$  je objem kvádru [m<sup>3</sup>] a  $\rho$  je hustota oceli [kg/m<sup>3</sup>].

$$m = 0,0369 \cdot 7850 = \underline{289,74 \text{ [kg]}}$$

Ukazatel členitosti tvaru je stanoven podle vztahu 3:

$$S = m_{\text{výkovku}} / m_{\text{obalového tělesa}} \text{ [-]} \quad (3)$$

$$S = 29,755 / 289,74 = \underline{0,103 \text{ [-]}}$$

Výsledná hodnota ukazatele členitosti tvaru výkovku je menší než 0,16. Ukazatel členitosti tvaru výkovku lopatky patří tedy do skupiny S4.

### 6.5.2 Materiál výkovku lopatky

Materiál pro výkovek lopatky (DIN X22CrMoV12-1) byl zvolen ve spolupráci s firmou CPF, na základě konkrétního požadavku zákazníka na mechanické vlastnosti hotové lopatky (viz tab. 7).

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	Z [%]	KCU [J/cm <sup>2</sup> ]	HB
666,4 až 813,4	≥ 814	≥ 13	≥ 40	≥ 39.2	248 až 285

**Tab. 7 Požadované mechanické vlastnosti lopatky [21]**

Ocel X22CrMoV12-1 patří do skupiny martenzitických žáropevných a žáruvzdorných legovaných ocelí. Tato ocel se používá zejména v oblasti výroby kotlů, parních turbín a součástí pro letecký průmysl [34]. Podle normy ČSN se jedná o ocel 17 134. Příslušná ocel je dodávána ve stavu žíhaném na měkko o tvrdosti maximálně 220 HB, aby se polotovár dal dělit na požadované rozměry. Chemické složení příslušné oceli je uvedeno v tabulce 8.

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Ti	Ni	S	P	Cu
0,12 až 0,19	Max. 0.5	Max. 0.7	10 až 11.5	0,6 až 0,8	0,25 až 0,40	Max. 0,2	Max. 0,2	Max. 0,6	Max. 0,015	Max. 0,030	Max. 0,3

**Tab. 8 Chemické složení oceli X22CrMoV12-1 v hmotnostních % [21]**

Podle normy ČSN EN 10243-1 se stanovuje stupeň obtížnosti kování s ohledem na druh používané oceli. Oceli s vyšším obsahem uhlíku a vysokolegované jsou obtížněji tváritelné než oceli s menším obsahem uhlíku a legujících prvků. Podle chemického složení oceli se rozlišují dvě skupiny stupně obtížnosti kování:

- 1) **Do skupiny M1** patří oceli s obsahem uhlíku do 0,65% a celkovým obsahem legujících prvků (Mn, Ni, Cr, Mo, V, W) do 5% hmotnosti.
- 2) **Skupina M2** zahrnuje oceli s obsahem uhlíku nad 0,65% nebo celkovým obsahem legujících prvků (Mn, Ni, Cr, Mo, V, W) nad 5% hmotnosti. [30]

Stupněm obtížnosti kování pro ocel X22CrMoV12-1, dle chemického složení oceli, je skupina M2. To znamená, že daná ocel bude obtížně tváritelná.

### 6.5.3 Stanovení mezních úchylek dle normy ČSN EN 10243-1

V předchozích oddílech této podkapitoly byly stanoveny údaje, které jsou nezbytné pro stanovení mezních úchylek rozměrů a tvaru výkovku lopatky. Mezní úchytky se stanovují z tabulek uvedených v příloze C. Prvním krokem je zvolení příslušné tabulky, odpovídající stupni přesnosti kování (označené jako písmenem F) pro konkrétní stanovení mezních úchylek. Hmotnost výkovku se přiřadí do příslušné kolonky s odpovídajícím rozmezím hmotnosti. V případě stanovení mezních úchylek rozměrů se postupuje po šikmé přímce ze stupně kování M1 na stupeň kování M2. Z bodu M2 se přejde po příslušné přímce do bodu ukazatele členitosti S1. Z toho bodu se po šikmé přímce přestoupí do bodu S4. Již stačí znát příslušné jmenovité rozměry a stanovit odpovídající toleranci. Stanovení mezních úchylek otřepu a přesazení je podobné jako v předchozím případě. Vychází se z hmotnosti výkovku a typu dělicí roviny (nesouměrná lomená). Stanovené mezní úchytky výkovku lopatky jsou uvedené v tabulce 9.

	Délka	Šířka	Výška	Tloušťka	Přesazení	Otřep	Přímost
Rozměry [mm]	1133.5	241.2	67.5	135	-	-	-
Tolerance [mm]	+6.7 -3.3	+4.2 -2.1	+3.3 -1.7	+4.2 -2.1	1.7	2	2.2

**Tab. 9 Mezní úchytky rozměrů a tvaru výkovku lopatky**

Jelikož lomená dělicí rovina je nesouměrná a proměnlivá, stanovení největší výšky výkovku lopatky je značně problematické. Jinak řečeno, je téměř nemožné určit přesně maximální výšku výkovku. Při stanovení výšky výkovku se vždy hodnoty pohybovali v rozmezí od 32



mm do 100 mm. Proto je za největší výšku výkovku považována polovina rozměru tloušťky výkovku, která se nachází také v příslušném rozmezí. Pro mezní úchytky výšky a tloušťky výkovku platí následující pravidlo „tolerance tloušťky musejí být vždy vyšší než výšky“.

## 7 Konstrukce zápustky

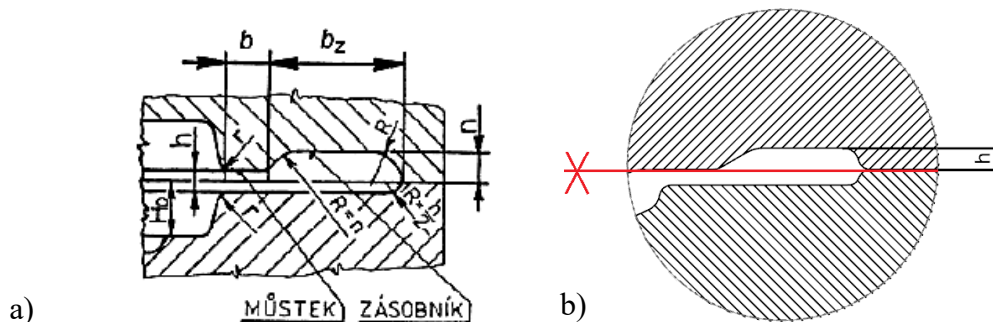
Na základě provedené literární rešerše (viz podkapitola 4.2) je možné konstatovat, že pro takto tvarově složitý tvar výkovku je nezbytné zařadit do technologického postupu předkování výchozího polotovaru (viz kapitola 9). Z hlediska rozměrů výkovku lopatky a množství vykováných výkovků (viz kapitola 10) je zvoleno kování v jednodutinové zápustce. Proces konstrukce zápustky spočívá nejen v návrhu tvaru dokončovací dutiny (viz podkapitola 7.1), ale také v návrhu výronkové drážky (viz podkapitola 7.2). Problematice upnutí a vedení zápustky v protiběžném bucharu je věnována podkapitola 7.3.

### 7.1 Návrh dokončovací dutiny

Při návrhu tvaru dokončovací dutiny zápustky se vychází z navrženého tvaru výkovku lopatky. Z důvodů uvedených v podkapitole 6.5, je nutné dutinu zápustky zvětšit o velikost smrštění rozměrů výkovku. Podle tabulky 6 odpovídá zvolenému materiálu výkovku lopatky hodnota smrštění 1,5 %. Dutina je vždy umístěna do těžiště zápustkového bloku, kudy prochází osa bucharu a výslednice sil vznikající během kování.

### 7.2 Návrh výronkové drážky

Podle normy ČSN 22 8308, která předepisuje tři nejběžnější tvary výronkové drážky, je zvolena výronková drážka zobrazená na obrázku 33 - a. S ohledem na tvar výkovku lopatky a průběh dělicí roviny (viz obr. 25), je zapotřebí zvolenou výronkovou drážku upravit. Z obrázku 33 - b je patrné, že ve výronkové drážce je zanedbána výška můstku nad dělicí rovinou zápustky. Kdyby byl můstek nad dělicí rovinou ponechán, znamenalo by to kování přebytečného materiálu, neboť nad dělicí rovinou se nachází minimální část lopatky.



Obr. 33 Výronkové drážka [ a – dle ČSN 228308, b – navržený tvar výronkové drážky (b- šířka můstku,  $b_z$  – šířka zásobníku,  $h$  – výška můstku,  $n$  – hloubka (výška) zásobníku,  $H_D$  – hloubka dutiny zápustky,  $r$  – přechodový rádius dutiny zápustky do výronkové drážky,  $R$  – poloměr zaoblení zásobníku)]

Podle normy ČSN 22 8308 je výška můstku výronkové drážky stanovena podle vztahu 4.

$$h = (0,012 \text{ až } 0,015) \cdot \sqrt{F_D} \quad [mm] \quad (4) \quad [23]$$

Kde  $F_D$  je průmět plochy výkovku v ploše kolmé ke směru rázu, jehož hodnota je uvedena v  $mm^2$ . Hodnota 0,012 je zvolena pro největší výkovky, kdežto hodnota 0,015 pro malé výkovky. Na základě rozměrů výkovku lopatky je zvolena hodnota 0,013. Uvedené hodnoty jsou dosazené do uvedeného vztahu 4.

$$h = 0,013 \cdot \sqrt{149\,360,9454} = \underline{\underline{5,02}} \quad [mm]$$

Vzhledem k nutnosti předkování výchozího polotovaru, který bude proveden dvěma technologickými variantami (vzduchový buchar, horizontální kovací lis), jsou navrženy zápustky pro oba uvažované způsoby předkování. Zápustky se budou lišit pouze v rozměrech výronkové drážky, avšak vypočtená výška můstku výronkové drážky platí pro oba typy navržených zápustek. Otázka stanovení variant předkování a zdůvodnění odlišných rozměrů výronkové drážky pro předkovek na vzduchovém bucharu (viz 7.2.1) a pro předkovek na horizontálním kovacím lisu (viz 7.2.2), je řešena v kapitole 9.

### 7.2.1 Výronková drážka zápustky pro předkovek na vzduchovém bucharu

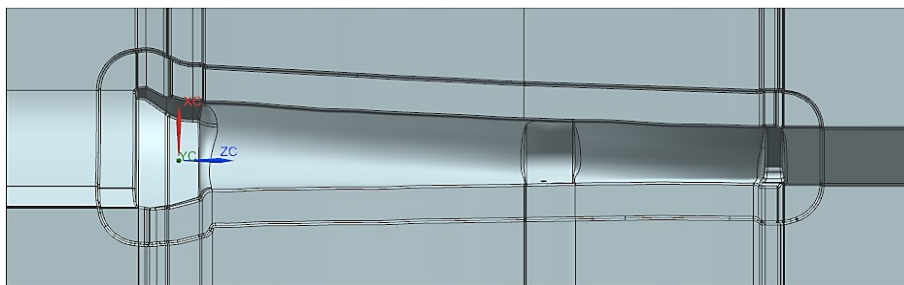
Zbylé rozměry výronkové drážky jsou standardně stanoveny podle normy ČSN 22 8308, v níž je uvedena tabulka pro stanovení rozměrů výronkové drážky (viz příloha D). Vychází se z vypočtené výšky můstku výronkové drážky (podle vztahu 4), pro který odpovídá šířka můstku 18 mm, šířka zásobníku 46 mm a hloubka zásobníku 7 mm. Poloměr zaoblení dutiny zápustky do výronkové drážky ( $r$ ) je stanoven podle tabulky 10, která udává maximální dovolenou hodnotu zaoblení vzhledem k energii protiběžného bucharu.

Dvojčinné buchary - hmotnost beranu [kg]	Protiběžné buchary - práce [J]	$r_{max}$
do 2000	do 98 066,5	3
2000 až 5000	98 066,5 až 196 133	4
nad 5000	196 133 až 343 282,75	5
	<i>nad 343 282,75</i>	6

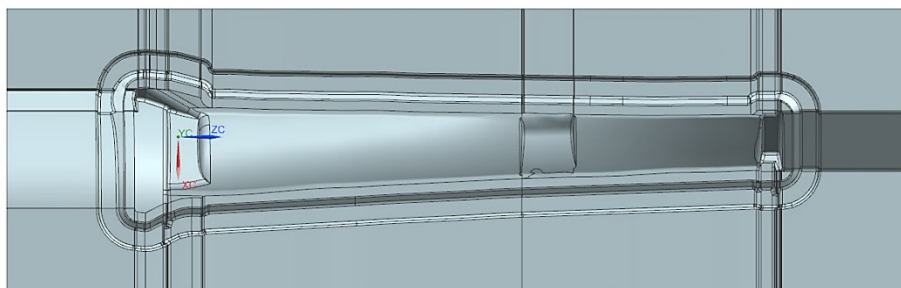
**Tab. 10<sup>1</sup> Maximální dovolený poloměr zaoblení dutiny zápustky do výronkové drážky [20]**

Podle technických parametrů protiběžného bucharu firmy CPF (viz tab. 2) je energie úderu 400 kJ. Z tabulky 10 je patné, že poloměr zaoblení  $r$  může být zvolen až do 6 mm. S ohledem na konstrukční tvar výronkové drážky je zvolen poloměr zaoblení o velikosti 4 mm. Ostatní poloměry zaoblení jsou stanoveny na základě praktických zkušeností konstruktérů firmy CPF.

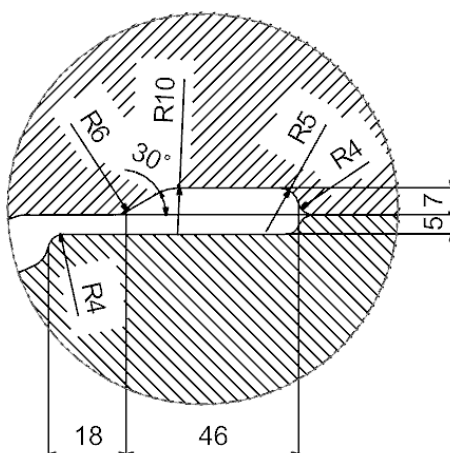
<sup>1</sup> Hodnoty uvedené v literatuře [20] jsou uvedeny v jednotkách [kp · m], které nejsou v dnešní době již používané. Z tohoto důvodu jsou hodnoty převedeny na jednotku Joul (1 kp · m odpovídá 9,80665 J).



Obr. 34 Tvar dokončovací dutiny spodní části zápusky s výronkovou drážkou



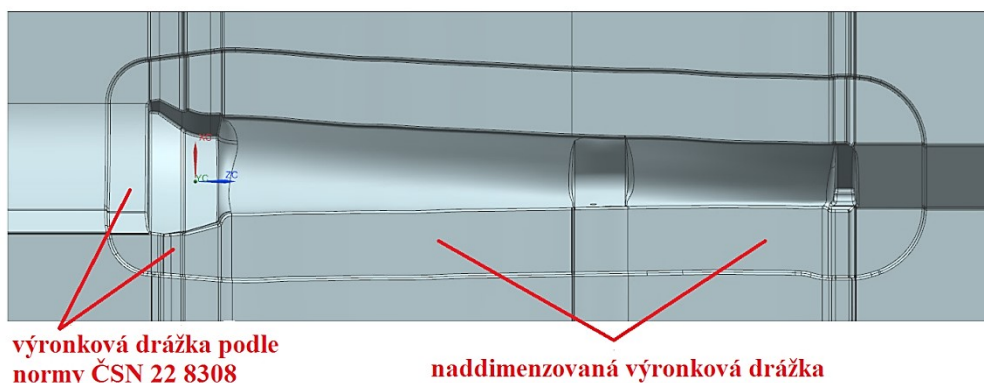
Obr. 35 Tvar dokončovací dutiny horní části zápusky s výronkovou drážkou



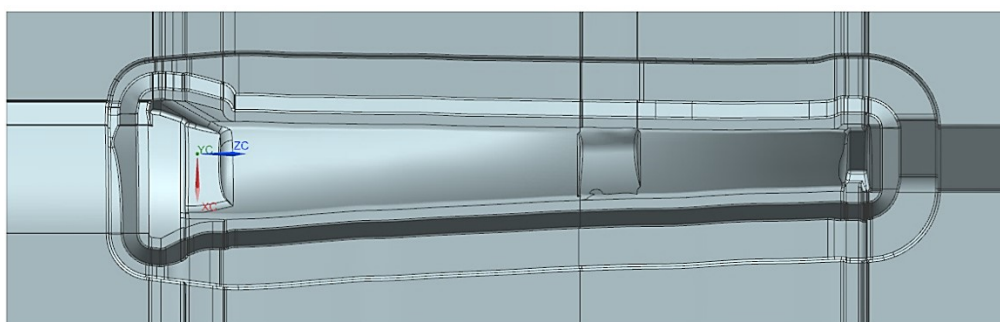
Obr. 36 Řez výronkové drážky se zakótovanými rozměry

### 7.2.2 Výronková drážka zápusky pro předkovek z horizontálního kovacího lisu

Návrh výronkové drážky je úzce spjatý s navrženým tvarem předkovku zhotoveného na horizontálním kovacím lisu, kterému je podrobně věnovaná podkapitola 9. 2. Vzhledem ke stejnému průměru hlavy u obou navržených předkovků (viz obr. 52 a obr. 57) a na základě výsledku simulace předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu (viz oddíl 9.1.3), jsou rozměry výronkové drážky v oblasti hlavy daného výkovku stanoveny podle normy ČSN 22 8308 (viz oddíl 7.2.1). V oblasti listu a bandáže výkovku lopatky je nezbytné výronkovou drážku naddimenzovat (viz obr. 37, obr. 38). Důvodem je větší objem předkovku ve zmíněných oblastech výkovku v porovnání s objemem předkovku zhotoveným na vzduchovém bucharu.

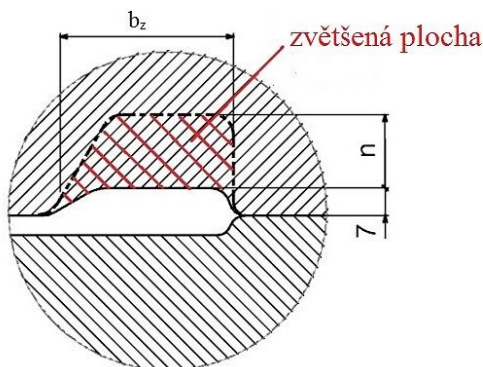


**Obr. 37 Spodní část zápustky s naddimenzovanou výronkovou drážkou**



**Obr. 38 Vrchní část zápustky s naddimenzovanou výronkovou drážkou**

Aby byla zajištěna dostatečná kapacita výronkové drážky v oblastech většího přebytku materiálu předkovku, je nutné zvolit vhodnou konstrukční úpravu výronkové drážky. Jednou z možných variant je prohloubení výronkové drážky v oblasti listu a paty výkovku lopatky, při zachování výšky výronkového zásobníku o velikosti 7 mm (viz oddíl 7.2.1) v oblasti hlavy výkovku lopatky. To by ovšem znamenalo provedení potřebného přechodu z normalizovaného zásobníku do zásobníku prohloubeného. V tomto případě by pravděpodobně přechod bránil toku přebytečného materiálu ve výronkové drážce. To by mohlo negativně ovlivnit požadovanou kvalitu výkovku lopatky (nebezpečí vzniku přeložek). Z tohoto důvodu by bylo nutno provést také nepatrné prohloubení výronkové drážky v oblasti hlavy výkovku lopatky, za účelem snížení přechodu a tím snížení možného ovlivnění kvality výkovku. Schůdnější variantou se zdá být rovnoměrné prohloubení výronkové drážky po celém obvodu zápustky. Tento konstrukční návrh eliminuje omezení toku materiálu ve výronkové drážce během kování. Pod pojmem prohloubení výronkové drážky je myšleno navýšení výšky výronkového zásobníku. Pro stanovení potřebné výšky výronkového zásobníku, o který bude zvětšen normalizovaný zásobník, je třeba přibližně spočítat zvětšenou plochu výronkové drážky (viz obr. 39). Opět se vychází z tvarů uvažovaných předkovků (viz obr. 52 a obr. 57). Tato plocha je stanovena z průměru předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu v přechodu z listu do bandáže výkovku a z průměru výchozího polotovaru pro předkování na horizontálním kovacím lisu.



**Obr. 39** Prohloubení výronkové drážky

*Stanovení prohloubení výronkové drážky:*

1. Průměr předkovku vykovaného na vzduchovém bucharu v oblasti přechodu z listu do bandáže výkovku lopatky je 57 mm (viz obr. 57). Průměr výchozího polotovaru pro předkování na horizontálním kovacím lisu je 85 mm (viz obr. 52).

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 57^2}{4} = 2\,551,76 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5)$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 85^2}{4} = 5\,674,5 \text{ [mm}^2\text{]}$$

2. Zvětšená plocha výronkové drážky je stanovena podle vztahu 6:

$$S = S_2 - S_1 = 5\,647,5 - 2\,551,76 = 3\,122,74 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (6)$$

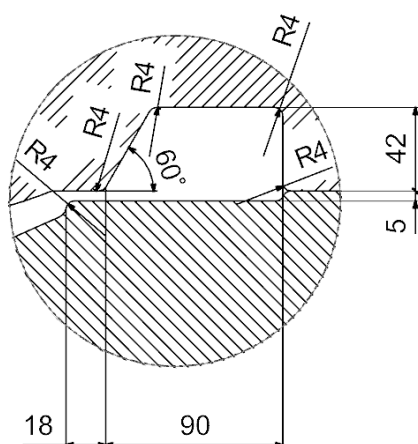
3. Výšku upraveného zásobníku lze ovlivnit jeho šířkou. Z obrázku 39 je patrné, že čím menší bude šířka zásobníku, tím bude větší jeho výška. Proto je pro vhodnou výšku zásobníku stanovena šířka  $b_z$  o velikosti 90 mm. Výsledná výška upravené plochy zásobníku, která je v obrázku 39 zakótována písmenem  $n$ , je stanovena z výpočtu zvětšené plochy zásobníku.

$$S = b_z \cdot n \rightarrow n = \frac{S}{b_z} = \frac{3\,122,74}{90} = [35 \text{ mm}] \quad (7)$$

4. Celková výška zásobníku je stanovena sečtením výšky zásobníku pro zvětšenou plochu výronkové drážky ( $n$ ) s výškou zásobníku podle normy ČSN 22 8308 (viz oddíl 7.2.1).

$$n_{\text{celkový}} = n + 7 = 35 + 7 = 42 \text{ [mm]} \quad (8)$$

Z výše uvedených informací vyplývá, že došlo k upravení pouze zásobníku výronkové drážky v oblasti listu a bandáže výkovku lopatky (viz obr. 37 a obr. 38). Konečné rozměry upravené výronkové drážky jsou znázorněné na obrázku 40.

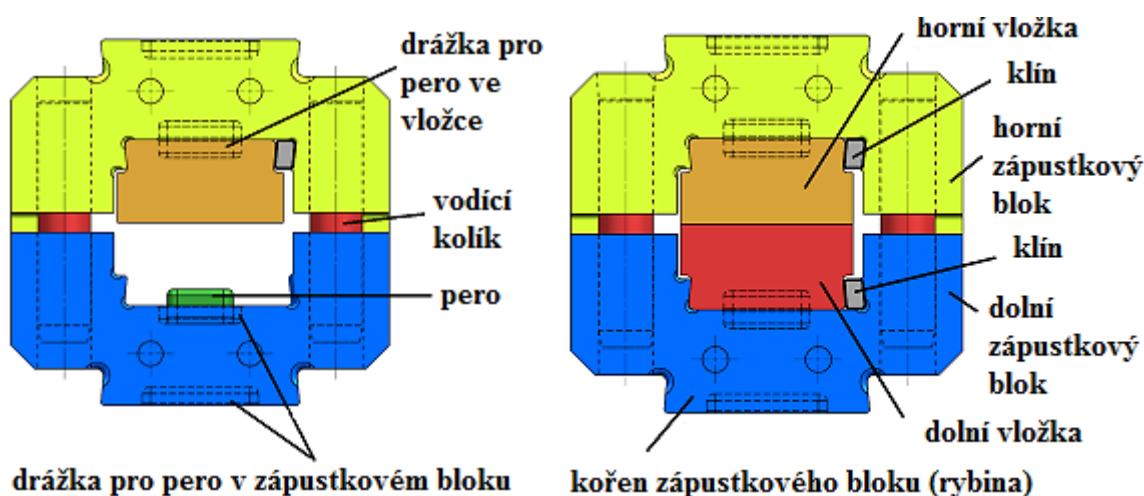


Obr. 40 Řez upravené výronkové drážky se zakótovanými rozměry

### 7.3 Vedení a upnutí zápustky

Vzhledem k rozměrům navrženého tvaru výkovku lopatky (viz příloha B) by byla výroba vlastního zápustkového bloku, jako monobloku, výrazně neekonomická. Z tohoto důvodu je nutné hledat takové technické řešení, které by cenu zápustky výrazně snížilo. Jelikož nejdražší položkou ve výrobě zápustky je samotný materiál, jsou v zápustkovém bloku uchyceny vložky, ve kterých je vypracována vlastní kovací dutina. Z důvodu dodržení terminologie bude dále v práci pojednáváno o vložkách. Při samotném procesu kování dochází k opotřebení dutiny vložek, nikoliv vlastního zápustkového bloku. Proto ve chvíli kdy již vložky nelze dále použít, kvůli opotřebení kovací dutiny, stačí zhotovit pouze nové vložky. Vložky se zpravidla líčují do zápustkového bloku za tepla nebo za studena, podle normy ČSN 22 8308, s přesahem H8/u7.

Další možnou variantou uchycení vložek ve vybrání zápustkového bloku je prostřednictvím dvou protilehlých klínů (viz obr. 41). Zmíněnou variantu uchycení vložek využívá firma CPF.



Obr. 41 Upevnění a vedení vložek v zápustkovém bloku [21]

Vložky jsou konstruovány s rybinou, tak aby se mohli vložit do rybinové drážky zápusťkového bloku. Jedna strana vložek lícuje se stěnou rybinové drážky, kdežto druhá strana je ve styku s klínem. Boční stěna klínu musí tedy lícovat s boční stěnou rybinové drážky a zápusťkového bloku. Prostřednictvím klínů se zajistí boční upevnění vložek v zápusťkovém bloku. Zajištění proti posunutí vložek je zajištěno pomocí pera, umístěného v drážce pro pero. Středění vložek je zajištěno čtyřmi vodícími kolíky (viz obr. 41). Zápusťkový blok je podobně jako vložka konstruován s rybinou, za účelem uložení do rybinové drážky v beranu protiběžného bucharu. Aby byl zápusťkový blok zajištěn v podélném směru proti posunutí, je na čele rybinové drážky vypracována drážka pro pero. Zápusťkový blok je zajištěn podobně jako samotné vložky v zápusťkovém bloku.

Pro vložky je zvolena dle DIN EN ISO 4957 ocel 56NiCrMoV7 (dle ČSN 19 663) o větší jakosti, než je materiál vlastního zápusťkového bloku (dle DIN EN ISO 4957 ocel 34CrNiMo6, ekvivalentní označení podle ČSN je 16 343). Výkresy navržených vložek pro jednotlivé předkovky jsou uvedeny v příloze E.

## 8 Volba polotovaru

Výchozí polotovar pro výkovek lopatky je stanoven v technických požadavcích zákazníka, kde je požadována válcovaná loupáná tyč. Válcovaná tyč je dodána dodavatelem v normalizovaných rozměrech. Jelikož jsou pro kování výkovek lopatek uvažovány a zkonstruovány jednodutinové vložky, je nezbytné výchozí válcovanou loupánou tyč zpracovat do vhodného tvaru předkovku. Ten se získá předkováním prostřednictvím volného kování (vzduchový buchar), nebo předkováním v zápusťkách (horizontální kovací lis). Ještě před samotnou operací předkování je potřeba stanovit délku válcované tyče pro předkovek, která se oddělí pilou z dodané normalizované tyče. Tato délka je stanovena na základě hmotnosti navrženého tvaru předkovku (viz kapitola 9). Poté následuje ohřev válcované tyče, který je pro zmíněné varianty předkování odlišný.

### 8.1 Ohřev válcované loupáné tyče pro předkování na vzduchovém bucharu

V případě předkování na vzduchovém bucharu je válcovaná tyč o požadovaném průměru a délce umístěna do plynové pece. Technické parametry pece jsou uvedeny v příloze F. Teplota a doba ohřevu je stanovena na základě praktických zkušeností firmy CPF. V zásadě by se teplota na povrchu tyče měla pohybovat kolem 1180 °C a ve středu tyče maximálně o 20 °C méně. Doba ohřevu je stanovena na 20 až 25 minut. Během ohřevu nedochází jenom k oduhličení povrchu oceli, ale také k tvorbě okují. Tvorba okují je zapříčiněna pecní atmosférou. Vzniklé okuje je třeba odstranit, jinak by mohlo dojít k jejich zakovávání. Tím by došlo k výraznému opotřebení vložek a zvětšení rozměrových tolerancí výkovek než je požadováno. Převážná část okují se obvykle odstraní již během předkování tyče, zbylé okuje jsou odstraněny pomocí tlakové vody. Při tomto procesu dochází k ochlazení povrchové vrstvy předkovku, která se bezprostředně ohřeje od vnitřního objemu materiálu.

## 8.2 Ohřev válcované loupáné tyče pro předkování na horizontálním kovacím lisu

Při předkování na horizontálním kovacím lisu se ohřívá pouze část válcované loupáné tyče, která bude pýchována. K ohřátí se využívá elektrická indukční pec, jejíž technické parametry jsou rovněž uvedeny v příloze F. Podobně jako u plynové pece, je teplota ohřevu válcované loupáné tyče do 1200 °C. Výhodou elektroindukčního ohřevu je výrazně kratší doba ohřevu, která je stanovena na 3 minuty. Uvedené hodnoty jsou stanoveny po konzultaci s technologií firmy CPF. Tento způsob ohřevu výchozího polotovaru je charakteristický zejména nízkou tvorbou okují. Z tohoto důvodu budou okuje, při stanovení délky prořezu z normalizované délky válcované loupáné tyče (viz podkapitola 9.2), zanedbány.

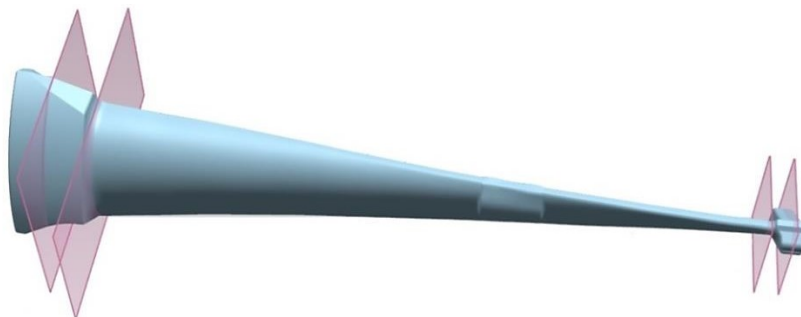
## 9 Zápustkové kování s předkováním

V rámci technických možností firmy CPF je uvažováno předkování buď na vzduchovém bucharu (viz podkapitola 9. 1) nebo na horizontálním kovacím lisu (viz podkapitola 9. 2). Aby byla opodstatněna nutnost předkování válcované loupáné tyče, bude také uvažována možnost kování požadovaného výkovku z konstantního průměru tyče (viz podkapitola 9.3).

Vhodnost navržených tvarů předkovků, kromě tyče o konstantním průměru, bude ověřena simulací kování výkovku lopatky v programu Deform 3D. Jelikož tato diplomová práce není zaměřena výhradně na simulace zápustkového kování, budou uvedeny pouze základní údaje potřebné pro samotné simulování.

### 9.1 Návrh tvaru předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu

Tvar předkovku je stanoven z rozměrů dutiny vložky, neboli z tvaru výkovku, zvětšený o přídavek na smrštění. V programu NX se na výkovku lopatky provedou řezy v oblasti hlavy, bandáže a přechodových oblastí z listu do hlavy a do bandáže lopatky (viz obr. 42).



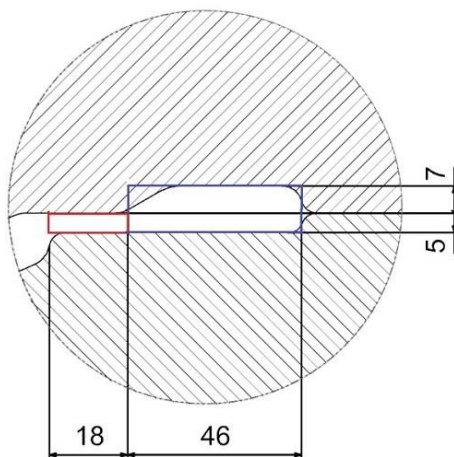
Obr. 42 Místa provedených řezů, znázorněných prostřednictvím rovin

Při samotném návrhu předkovku je nutné do výpočtů zahrnout též výronkovou drážku vložek. Plocha výronkové drážky se vypočítá jejím rozdělením na dva obdélníky (viz obr. 43), přičemž se zanedbají poloměry zaoblení a přechod můstku do zásobníku.



Plocha výronkové drážky je stanovena z obsahu obdélníku:

1.  $S' = 18 \cdot 5 = 90 \text{ [mm}^2\text{]}$
2.  $S'' = 46 \cdot 12 = 552 \text{ [mm}^2\text{]}$
3.  $S_c = S' + S'' = 90 + 552 = \underline{\underline{642}} \text{ [mm}^2\text{]}$



Obr. 43 Řez výronkové drážky, rozdělený na dva obdélníky

Vypočtená plocha výronkové drážky, označená jako  $S_c$ , se přičte k jednotlivým průřezům výkovku lopatky. V odborné literatuře se uvádí, že výronková drážka by měla být zaplněna maximálně ze 70% celkového objemu. Z tohoto důvodu je stanovena plocha odpovídající 70% zaplnění z celkového objemu výronkové drážky. Jelikož je výronková drážka po celém obvodu dutiny vložky, je nutné zaplněnou plochu ještě dvakrát vynásobit (podle vztahu 9).

$$S_{70\%} = 2 \cdot (S_c \cdot 0,7) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (9)$$

$$S_{70\%} = 2 \cdot (642 \cdot 0,7) = \underline{\underline{898,8}} \text{ [mm}^2\text{]}$$

Průměry předkovku jsou tedy stanoveny z příslušných průřezů výkovku lopatky a z plochy výronkové drážky zaplněné ze 70% jejího objemu (vztah 10 a 11):

$$S = S_1 + S_{70\%} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (10)$$

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (11)$$

Kde  $S_1$  je plocha řezu výkovku lopatky  $[\text{mm}^2]$ ,  $S$  je plocha představující dutinu vložek se 70% zaplněním výronkové drážky  $[\text{mm}^2]$  a  $D$  je příslušný průměr předkovku  $[\text{mm}]$ .

Stanovení příslušných průměrů předkovku podle vztahu 10 a 11:

a) Průměr hlavy předkovku



Obr. 44 Největší průřez hlavy výkovku lopatky

Výpočet: 1.  $S_1 = 11\,217,888 \text{ [mm}^2\text{]}$

$$S = 11\,217,888 + 898,8 = 12\,116,68888 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$2. S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \text{ [mm]}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 12\,116,68888}{\pi}} = 124,21 \text{ [mm]} = \underline{\underline{125 \text{ [mm]}}}$$

b) Průměr předkovku v přechodu z hlavy do listu lopatky



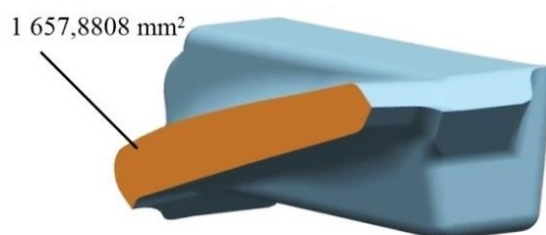
Obr. 45 Průřez v přechodové oblasti hlavy do listu výkovku lopatky

Výpočet: 1.  $S_2 = 5\,172,8765 \text{ [mm}^2\text{]}$

$$S = S_2 + S_{70\%} = 5\,172,8765 + 898,8 = 6\,071,6765 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$2. S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6\,071,6765}{\pi}} = \underline{\underline{88 \text{ [mm]}}}$$

c) Průměr předkovku v přechodu z listu do bandáže lopatky



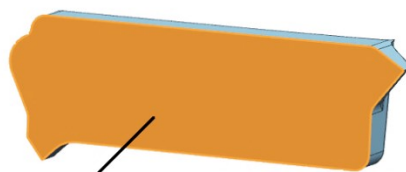
Obr. 46 Průřez v přechodové oblasti listu do bandáže výkovku lopatky

Výpočet: 1.  $S_3 = 1\,657,8808 \text{ [mm}^2\text{]}$

$$S = S_1 + S_{70\%} = 1\,657,8808 + 898,8 = 2\,556,6808 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$2. S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2\,556,6808}{\pi}} = \underline{\underline{57}} \text{ [mm]}$$

d) Průměr bandáže předkovku



5 093.8050 mm<sup>2</sup>

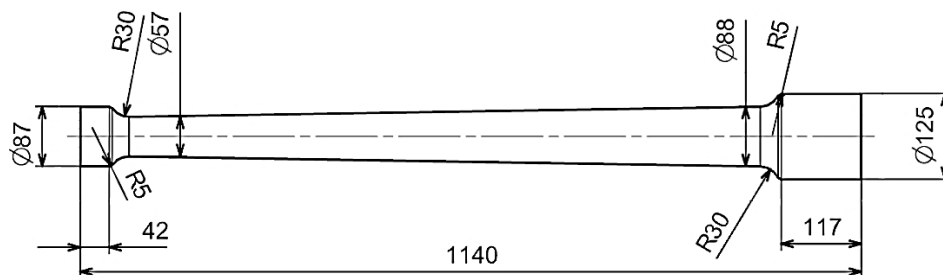
**Obr. 47 Průřez v bandáži výkovku lopatky**

Výpočet: 1.  $S_4 = 5\,093,8050 \text{ [mm}^2\text{]}$

$$S = S_1 + S_{70\%} = 5\,093,8050 + 898,8 = 5\,992,605 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$2. S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5\,992,605}{\pi}} = \underline{\underline{87}} \text{ [mm]}$$

Navržený tvar předkovku, zobrazený na obrázku 48, odpovídá výše stanoveným průměrům a typu kovacího stroje. Technické parametry vzduchového bucharu jsou uvedeny v příloze F. Poloměry zaoblení předkovku nejsou libovolně zvoleny, nýbrž jsou určeny poloměrem zaoblení beranu vzduchového bucharu. Celková délka předkovku vychází z délky dutiny zápustky, kdežto délky velké hlavy a malé hlavy předkovku jsou zvoleny.



**Obr. 48 Tvar předkovku na vzduchovém bucharu**

Pro předkovek bude použita válcovaná tyč o průměru 125 mm, jejíž délka se stanoví z hmotnosti přířezu. Ten se určí z hmotnosti předkovku (46 kg) s přihlédnutím na ztrátu materiálu opalem. Protože v technologickém postupu kování není uvažován meziohřev polotovaru, je na základě zkušeností firmy CPF zvolen opal odpovídající 2% hmotnosti předkovku. Tato hodnota také odpovídá hodnotě, která je uváděná v odborné literatuře.

Výpočet: 1. Hmotnost průřezu = hmotnost předkovku + 2% opal z hmotnosti předkovku [kg]  
Hmotnost průřezu = 46 + 2% z 46 = 46,92 [kg]

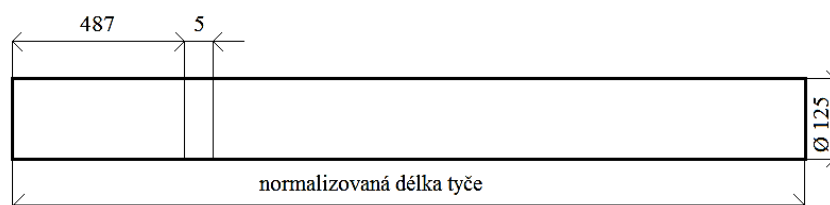
2. Délka tyče pro jeden předkovek:

$$L = \frac{4 \cdot m}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

Kde  $d$  je výchozí průměr tyče [m],  $m$  je hmotnost průřezu [kg] a  $\rho$  je hustota oceli [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$$L = \frac{4 \cdot 46,92}{7850 \cdot \pi \cdot 0,125^2} = 0,487 \text{ [m]} = 487 \text{ [mm]}$$

Pro stanovení počtu průřezu z normalizované délky válcované loupáné tyče je potřeba k délce tyče pro jeden předkovek přičíst 5 mm, kvůli prořezu pilou (viz obr. 49).



Obr. 49 Prořez tyče o Ø 125 x 492 pro jeden předkovek

### 9.1.1 Ověření navrženého tvaru předkovku simulací v programu Deform 3D

Při simulaci kování výkovku lopatky z předkovku se vychází z předpokladu, že válcovaná loupáná tyč je již předkovaná na vzduchovém bucharu do požadovaného tvaru (podle obrázku 48). Jelikož knihovna materiálů v programu Deform 3D neobsahuje požadovaný materiál výkovku (DIN X22CrMoV12-1), je pro samotné simulování zvolen nejbližší podobný materiál (DIN X20CrMoV12-1). Dále je uvažován předkovek již ve stavu ohřátém na teplotu 1200 °C. Na počátku kování je teplota předkovku nižší, neboť během manipulace z pece k protiběžnému bucharu dochází k jeho ochlazení na vzduchu. Z tohoto důvodu je simulace nejdříve zaměřena na ochlazení předkovku po dobu jedné minuty. Tato doba byla stanovena po domluvě s technologií a metalurgem z firmy CPF. Aby bylo možné provést simulaci na ochlazení předkovku, je vytvořena okrajová podmínka pro přestup tepla předkovku s okolním prostředím, která je definována pro celý povrch předkovku. Součinitel přestupu tepla je 0,02 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ].

Originální znění z programu Deform 3D	Překlad	Hodnoty/stav
Temperature	Teplota	1200 °C
Process duration	Průběh trvání	1 minuta
Number of elements mesh	Počet elementů sítě	105 220
Material	Materiál	DIN X20CrMoV12-1

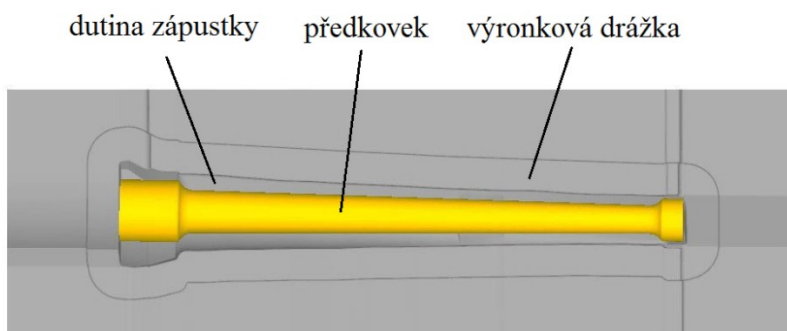
Tab. 11 Data pro simulaci ochlazení předkovku v programu Deform 3D

Po simulaci ochlazování předkovku následuje simulace vlastního procesu kování. Teplota předkovku na počátku kování je 850 až 1178 °C. Teplota 850 °C odpovídá teplotě v nejjednodušším bodě předkovku, naopak teplota 1179 °C odpovídá teplotě v nejteplejším bodě předkovku. Předkovek je ve stavu plastickém, kdežto horní a dolní vložka ve stavu tuhém. Teplota vložek je uvažována pro první úder 150 °C, pro druhý úder 200 °C, pro třetí a další údery 250 °C. Jelikož není v rámci simulace zohledněn přestup tepla z předkovku do zápustky, není zadán materiál vložek. Pro simulaci kování je opět stanovena podmínka přestupu tepla předkovku s okolním prostředím, která je definována pro celý povrch předkovku. Pro stanovení hmotnosti horního ústrojí bucharu je potřeba znát hmotnost horní vložky (1575,4kg), horního zápustkového bloku (5838 kg) a horního beranu (44 000 kg). Ovšem hmotnost spodní části ústrojí beranu je stanovena z hmotnosti spodní vložky (1451,5 kg), hmotnosti dolního zápustkového bloku (5229 kg), hmotnosti beranu (48 000 kg) a z hmotnosti předkovku (46 kg). Horní vložka je označena jako primární. Pro první tři údery je po domluvě s technologií firmy CPF stanovena účinnost bucharu na 30% a zbylé údery na 70%. Dále je uvažováno smykové tření mezi předkovkem a vložkami (konstanta 0,3).

	<b>Originální znění z programu Deform 3D</b>	<b>Překlad</b>	<b>Hodnoty/ stav</b>
Předkovek „workpiece,,	Temperature	Teplota	850 až 1179 [°C]
	Material	Materiál	DIN X20CrMoV12-1
	Object type	Typ objektu	Plastický
	Number of elements mesh	Počet elementů sítě	312 432
Vložky „dies,,	Temperature	Teplota	150 [°C] (pro 1 úder) 200 [°C] (pro 2 úder) 250 [°C] (pro 3 a další úder)
	Object type	Typ objektu	tuhý „rigid,,
	Hammer mass	Hmotnost horního ústrojí bucharu	51, 413 [N · s <sup>2</sup> / mm]
	Bottom die mass	Hmotnost spodního ústrojí bucharu	54, 726 [N · s <sup>2</sup> / mm]
Protiběžný buchar „counter blow hammer,,	Energy	Energie	4 · 10 <sup>8</sup> [N · mm]
	Blow efficiency	Účinnost protiběžného bucharu	30% pro 1 až 3 údery 70% ostatní údery

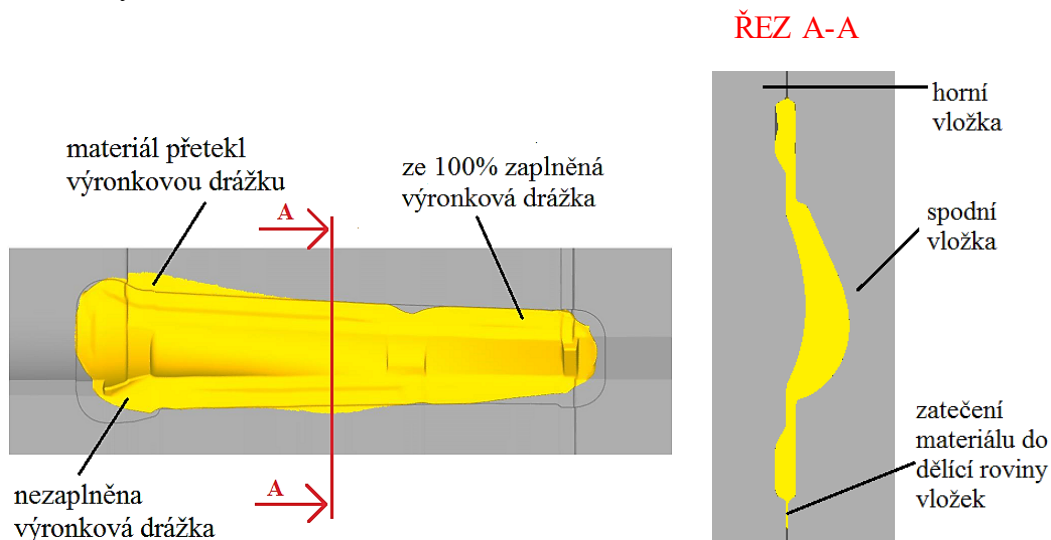
**Tab. 12<sup>2</sup> Data pro simulaci proces kování na protiběžném bucharu v programu Deform 3D**

<sup>2</sup> Program Deform 3D vyžaduje zadávání hodnot parametrů v základních jednotkách. Proto hmotnost ústrojí bucharu je uvedena v jednotkách [N · s<sup>2</sup> / mm]. Pro převod na základní jednotku hmotnosti, podle mezinárodní soustavy jednotek „SI“, je 1 [N · s<sup>2</sup> / mm] odpovídá 1000 [kg]. Uvedené hodnoty jsou uvedeny tedy v tunách.



Obr. 50 Usazení navrženého tvaru předkovku v dutině zápustky

Simulace kování výkovku lopatky z navrženého předkovku ukázala, že dutina vložky se zcela zaplní. Zároveň došlo v oblasti hlavy výkovku lopatky k přetečení výronkové drážky vložky a jejímu úplnému zaplnění v oblasti listu výkovku (viz obr. 51). Přetečení výronkové drážky je způsobeno větším objemem materiálu předkovku než je samotný objem samotné dutiny a výronkové drážky vložky. To svědčí o nesprávném určení zejména průměru hlavy předkovku (viz podkapitola 9.1). Je nutné ovšem poznamenat, že průměr hlavy předkovku byl stanoven z největšího průřezu hlavy výkovku lopatky (viz obr. 44). Tento průřez není ovšem stejný po celé délce hlavy výkovku lopatky, nýbrž se zmenšuje. Z tohoto důvodu je možné považovat výpočet pouze za orientační. Ne vždy je možné při návrhu nového výkovku a vložek ověřit tvar předkovku pomocí simulace. Potom nezbyvá nic jiného, než vykovat jeden nebo dva zkušební vzorky.

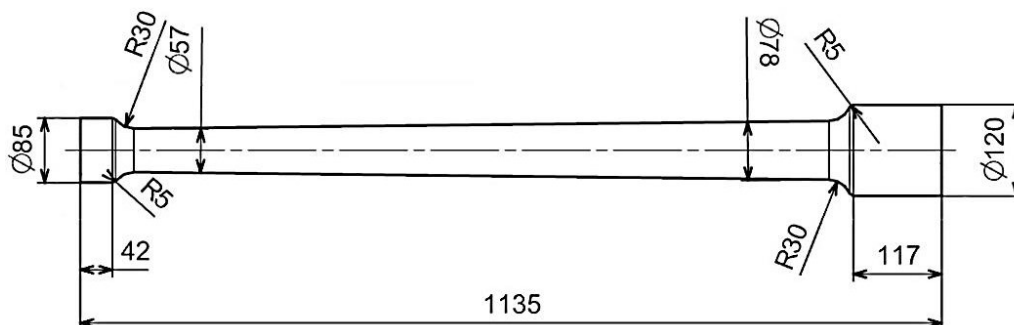


Obr. 51 Zaplnění dutiny a výronkové drážky vložek na základě provedené simulace provedené v programu Deform 3D

Na základě výsledku simulace je možné konstatovat, že navržený tvar předkovku nelze použít pro kování výkovku lopatky. Z toho důvodu je nutné provést změnu předkovku, o kterém je pojednáváno v oddíle 9.1.2.

### 9.1.2 Návrh změny tvaru předkovku pro vzduchový buchar

Po analýze prvotní simulace se jeví jako nejvhodnější řešení zachování tvaru předkovku s radikální redukcí objemu materiálu. Toho se dosáhne změnou průměrů a délek předkovku (viz obr. 52). Provedené změny byly opět konzultovány s technologií firmy CPF.



Obr. 52 Zredukovaný objem předkovku

Z nového návrhu předkovku vyplývá, že se bude předkovávat z válcované loupáné tyče o průměru 120 mm. Délka tyče pro jeden předkovek je stanovena stejným způsobem jako při původním návrhu předkovku. Hmotnost navrženého předkovku je 40,5 kg.

*Výpočet:* 1. Hmotnost přířezu = hmotnost předkovku + 2% opal z hmotnosti předkovku [kg]  
Hmotnost přířezu = 40,5 + 2% ze 40,5 = 41,31 [kg]

2. Délka tyče pro jeden předkovek je stanovena podle vztahu 12:

$$L = \frac{4 \cdot 41,31}{7850 \cdot \pi \cdot 0,12^2} = 0,465 \text{ [m]} = 465 \text{ [mm]}$$

Stanovení počtu přířezů z normalizované délky válcované loupáné tyče je určeno stejně jako v podkapitole 9.1.

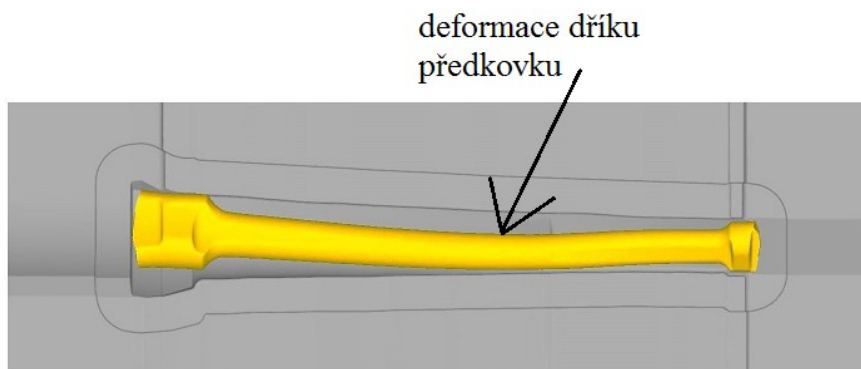
### 9.1.3 Ověření tvaru předkovku po redukcí objemu simulací v programu Deform 3D

Stejně jako v první simulaci je provedeno nejdříve ochlazování předkovku. Potřebná data pro simulování ochlazování předkovku jsou shodná s tabulkou 11. Poté následuje simulace vlastního procesu kování předkovku na protiběžném bucharu. Jelikož se kove z předkovku o menším objemu materiálu než v původním návrhu, teplota předkovku na začátku kování je odlišná (883 až 1170 °C). Data, která jsou odlišná od tabulky 12, jsou uvedena v tabulce 13.

	Originální znění z programu Deform3D	Překlad	Hodnota
Předkovek „workpiece„	Temperature	Teplota	883 až 1170 °C
	Number of elements of mesh	Počet elementů sítě	105 220
Zápustky „dies„	Bottom die mass	Hmotnost dolního ústrojí bucharu	54,7 [N • s <sup>2</sup> / mm]

**Tab. 13 Data pro simulaci zredukovaného předkovku v programu Deform 3D**

Při prvním úderu se předkovek v dutině zápustky deformuje (viz obr. 53). Tuto deformaci lze připsat geometrii dutiny vložek. Dalšími údery se zmíněná deformace předkovku eliminuje tečením materiálu v dutině vložek.

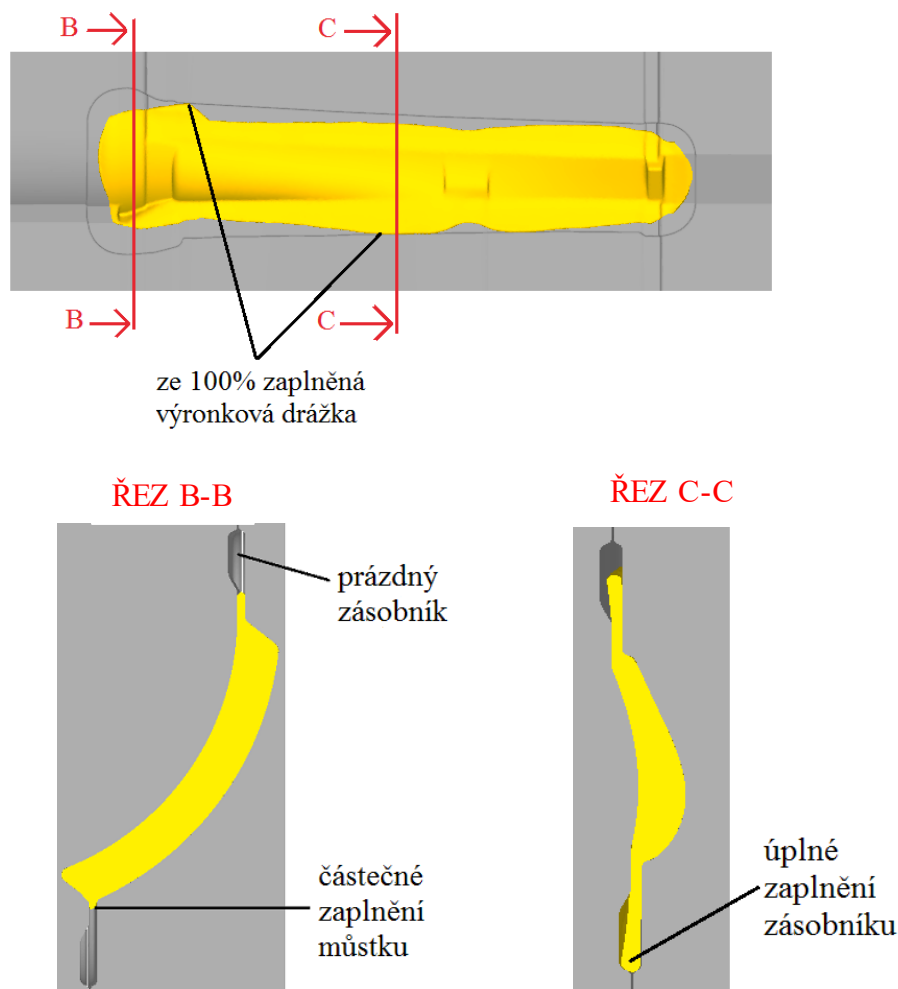


**Obr. 53 Zkroucení předkovku v dutině zápustky po prvním úderu**

Z obrázku 54 je patrné, že kovací dutina vložek je zcela zaplněná, aniž by došlo k přetečení výronkové drážky přebytečným materiálem. Avšak během kování nedošlo k ideálnímu, to znamená rovnoměrnému zaplnění výronkové drážky po celém obvodu. Tento stav je přisuzován tvarové složitosti požadovaného výkovku, který byl navržen na základě výkresové dokumentace hotové součásti lopatky. Protože simulace rovněž neodhalila vznik nežádoucích přeložek ve výkovku lopatky, potom lze konstatovat, že navržený tvar předkovku (viz obr. 52) je pro kování daného výkovku akceptovatelný.

Velký důraz při návrhu zápustkového kování je kladen na zaplnění vlastní kovací dutiny vložky s minimálním přebytkem materiálu ve výronkové drážce. Více materiálu ve výronkové drážce představuje kování přebytečného materiálu a tím i větší vynaloženou energii protiběžného bucharu. Navržený tvar předkovku nelze proto označit za ideální tvar, s ohledem na úplné zaplnění zásobníku výronkové drážky v oblasti hlavy a listu výkovku lopatky. Z uvedených výsledků simulace vyplývá, že by bylo vhodné navržený tvar předkovku optimalizovat a to opětovnou redukcí objemu předkovku, případně zásahem do vlastní konstrukce předkovku (např. zploštění velké hlavy předkovku). Doladění tvaru předkovku a následná simulace nelze z časových důvodů řešit v rámci této diplomové práce.

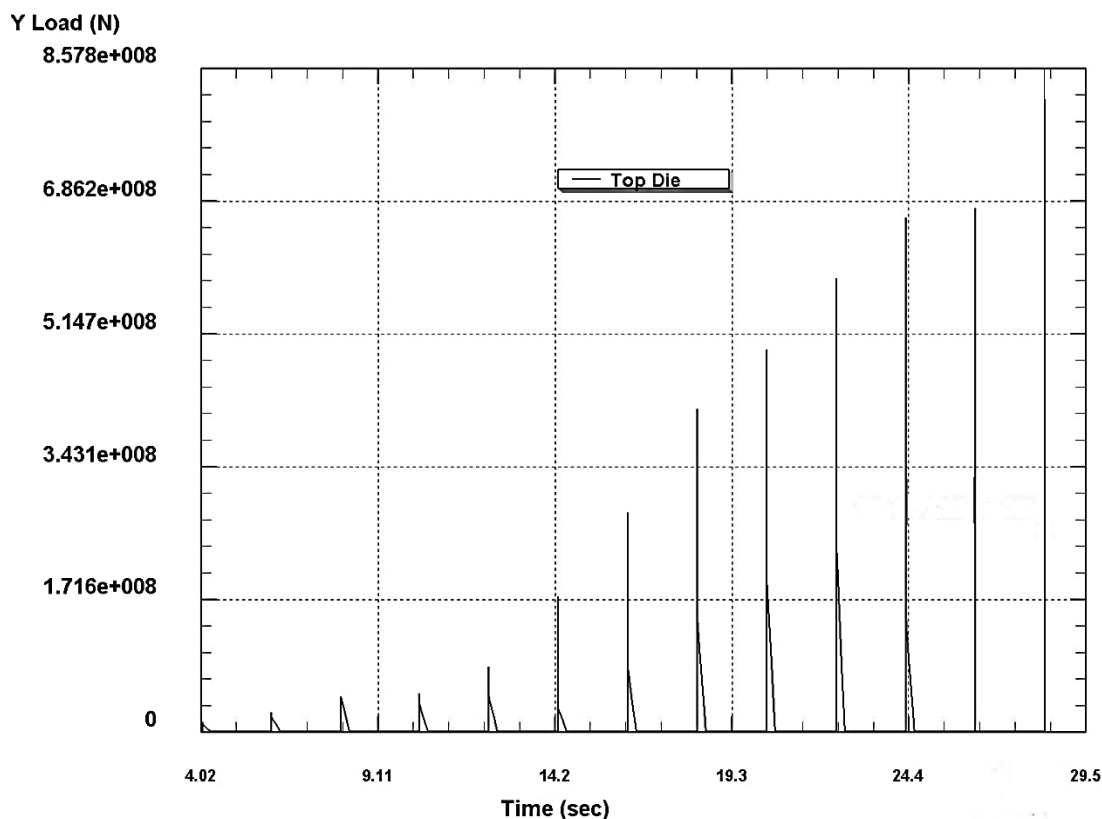




Obr. 54 Zaplnění dutiny a výronkové drážky vložek na základě provedené simulace v programu Deform 3D

Na základě provedeného řezu označeného jako B-B (viz obr. 54), lze hlavu výkovku lopatky považovat za kritickou oblast. Důvodem je nepatrné zatečení materiálu pouze do můstku výronkové drážky. Jak již bylo výše uvedeno, tento jev souvisí s geometrií navrženého tvaru výkovku. Otázkou zůstává, zda při změně podmínek kování by došlo k zaplnění dutiny vložek. Proto pro ověření zaplnění dutiny v oblasti hlavy výkovku lopatky je doporučeno vykovat několik zkušebních vzorků.

Počet úderů kování výkovku lopatky na protiběžném bucharu je stanoven podle grafu (viz obr. 55), který vyjadřuje závislost zatížení horní zápustky (tzn. horní díl vložky a zápustkového bloku) na čase. Hodnoty na ose zatížení jsou udávány v Newtonech, kde  $e^{+008}$  představuje  $10^8$ . V grafu jsou vykresleny píky, které znázorňují jednotlivé úderu protiběžného bucharu během kování. Uvedený graf neznázorňuje pík představující první úder, neboť první úder byl simulován zvlášť v jiné databázi. Pro vyhodnocení počtu úderu a zatížení horní zápustky postačí graf znázorňující zbylé úderu (obr. 55), které byly simulovány v jedné databázi. K celkovému počtu úderů protiběžného bucharu je tedy nutné k uvedenému počtu píků, jež jsou zachyceny na obrázku 55, přičíst ještě pík pro první úder. Na základě provedené simulace by byl tedy výkovek lopatky vykovan 14 úderu.

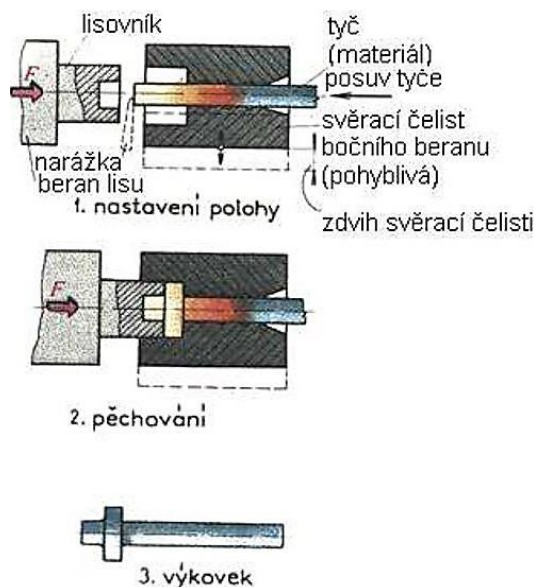


**Obr. 55 Závislost zatížení horní zápustky na čase (load – zatížení, time – čas, top die - horní zápustka)**

Z hlediska nárůstu zatížení horní zápustky při jednotlivých úderech z grafu vyplývá, že při každém následném úderu je zatížení zápustky větší. To je způsobeno poklesem teploty kovaného materiálu, vlivem přestupu tepla na rozhraní mezi tělesem (předkovek) a okolním prostředím (vzduch). Jak bylo zmíněno v literární rešerši, s poklesem teploty se zvyšuje deformační odpor materiálu. Nárůst zatížení také souvisí s tečením přebytečného materiálu do výronkové drážky v průběhu kování.

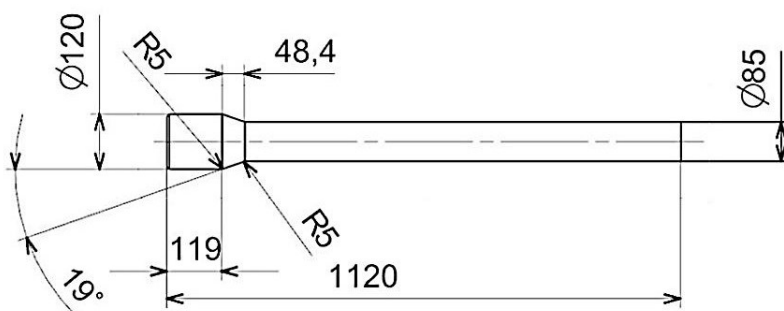
## 9.2 Návrh tvaru předkovku zhotoveného na horizontálním kovacím lisu

Předkování na horizontálním kovacím lisu, též označeného zkratkou LKH, se provádí ve třídílné uzavřené zápustce. Jak je uvedeno v kapitole 4 literární rešerše, kování v uzavřených zápustkách nedochází k tvorbě výrobku. Dvoudílná zápustka vytváří potřebnou dutinu a navíc plní funkci sklíčidla. Třetím dílem je osově pohyblivý lisovník („razník“) pro pěchování válcované loupané tyče. Určený objem kovaného materiálu je vymezen pomocí narážky, která vymezení kovací polohu tyče (viz obr. 56). Pěchována je pouze část tyče, která přesahuje, to znamená, že není „upnutá“ zápustkou [4]. Ve firmě CPF se jedná konkrétně o horizontální kovací lis s vodorovným svíráním čelistí, kde zápustky jsou opět řešeny pomocí vložek.



**Obr. 56 Princip předkování na horizontálním kovacím lisu [3]**

Cílem tohoto předkování je pěchovat válcovanou loupanou tyč o průměru 85 mm na průměr 120 mm (viz obr. 57). Výchozí průměr 85 mm válcované loupané tyče pro předkování na horizontálním kovacím lisu je stanoven z průměru malé hlavy předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu (viz obr. 52). Pokud by nebyl tento předkovek navržen, potom by se průměr stanovil stejně, jak je uvedeno v podkapitole 9.1. Podobně byl stanoven napěchovaný průměr 120 mm.



**Obr. 57 Navržený tvar předkovku zhotoveného na horizontálním kovacím lisu**

Při kování na horizontálním kovacím lisu je nutné ověřit, zda nedojde k deformaci předkovku během pěchování. Proto je doporučeno, aby délka neupnuté části válcované loupané tyče nebyla větší než 2,5 násobek jejího průměru. K určení pěchovacího poměru (tzn. délka volné části k průměru polotovaru) je potřeba stanovit délku, která bude pěchována. Aby mohla být tato délka stanovena, je třeba znát délku válcované loupané tyče pro jeden předkovek. Pro její určení se vychází ze vztahu 12, kde hmotnost navrženého předkovku je 56 [kg], výchozí průměr válcované loupané tyče je 85 [mm] a hustota oceli je 7850 [kg/m<sup>3</sup>]. Z důvodů uvedených v podkapitole 8.2, není k hmotnosti předkovku uvažována ztráta materiálu opalem.

$$L = \frac{4 \cdot m}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

$$L = \frac{56 \cdot 4}{7850 \cdot \pi \cdot 0,085^2} = \frac{225,6}{178,179} = 1,266 [m] = 1266 [mm]$$

Postup pro stanovení počtu prořezů z normalizované válcované loupáné tyče je podobný jako u vzduchového bucharu (viz obr. 49).

Pro stanovení délky válcované loupáné tyče pro pěchování (viz obr. 58) se vychází z hmotnosti hlavy předkovku (viz obr. 57).

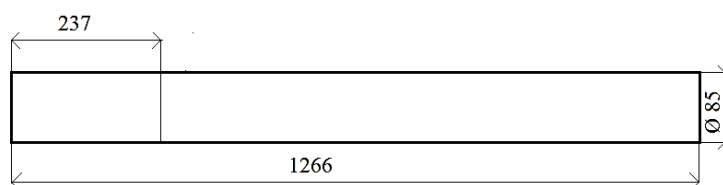
$$m_{hlavy} = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \quad (13)$$

Kde  $d$  je průměr napěchované hlavy předkovku [m],  $l$  je délka hlavy předkovku [m] a  $\rho$  je hustota oceli [ $\text{kg/m}^3$ ].

$$m_{hlavy} = 7850 \cdot \frac{\pi \cdot 0,12^2}{4} \cdot 0,119 = 10,56 [\text{kg}]$$

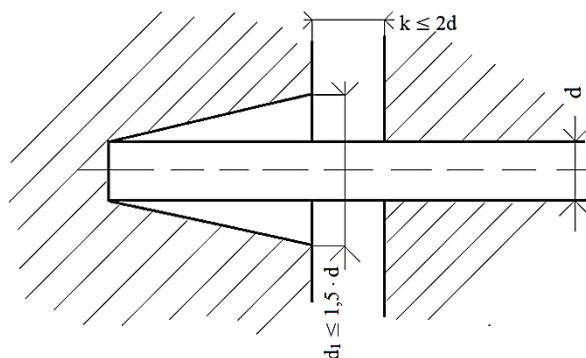
Vlastní výpočet délky volné části válcované loupáné tyče určené pro pěchování je proveden dle vztahu 12 s tím, že výchozí průměr polotovaru je 85 mm.

$$L = \frac{10,56 \cdot 4}{7850 \cdot \pi \cdot 0,085^2} = \frac{42,24}{178,179} = 0,237 [m] = 237 [mm]$$



**Obr. 58 Válcovaná loupáná tyč  $\varnothing 85 \times 1266$ , délka volné části 237 mm.**

Stanovený pěchovací poměr (237 : 85) je 2,8. To znamená, že během pěchování volné části válcované loupáné tyče o délce 237 mm by došlo k porušení předkovku. Proto je nutné předepsat pro předkování polotovaru dvě operace. První operace spočívá v kování válcované loupáné tyče v kuželové dutině lisovníku (viz obr. 59). Tvar předkovku s příslušnými rozměry po první operaci je zobrazen na obrázku 60.



**Obr. 59 Schéma pěchování v kuželovité dutině lisovníku [4]**

Menší průměr kuželovité napěchované hlavy předkovku odpovídá průměru výchozího polotovaru, ovšem zvětšený průměr je stanoven podle vztahu 14 (viz obr. 59).

$$d_1 \leq 1,5 \cdot d \text{ [mm]} \quad (14)$$

$$d_1 \leq 1,5 \cdot 85 = 128 \text{ [mm]}$$

Stanovení délky napěchované hlavy polotovaru po první operaci podle vztahu 12.

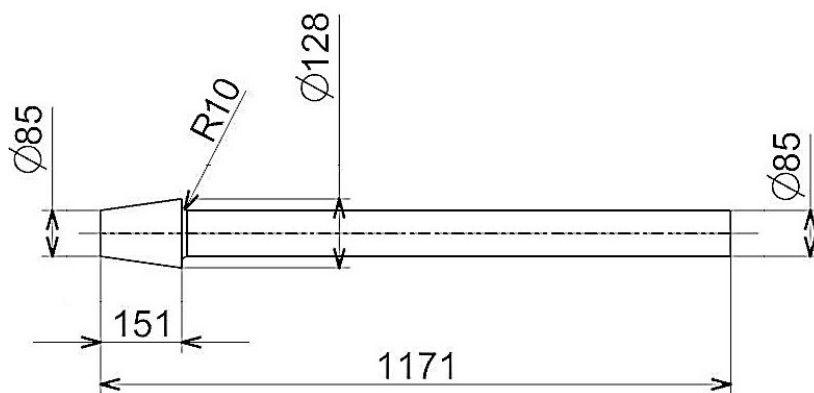
$$L = \frac{4 \cdot m}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} \text{ [m]} \quad (12)$$

Kde průměr  $d$  je stanoven jako aritmetický průměr předkovku a hmotnost je 10,56 [kg]

$$d = \frac{85+128}{2} = 106,5 \text{ [mm]} \quad (15)$$

Po dosazení příslušných hodnot je stanovena délka pěchované kuželovité hlavy:

$$L = \frac{10,56 \cdot 4}{7850 \cdot \pi \cdot 0,1065^2} = \frac{42,24}{279,72} = 0,151 \text{ [m]} = 151 \text{ [mm]}$$



Obr. 60 Tvar předkovku po první operaci pěchování

Druhou operací předkování je pěchování rovným lisovníkem v dutině zápustky. Touto operací se získá tvar předkovku, který je zobrazen na obrázku 57. Přejed z hlavy předkovku na průměr 85 mm je určen konstrukcí horizontálního kovacího lisu a nástroje.

Porovnáním navržených předkovků (viz obr. 52, obr. 57) je patrné, že předkovek na horizontálním kovacím lisu má konstantní průměr 85 mm až k hlavě předkovku. Kdežto předkovek na vzduchovém bucharu se vyznačuje proměnlivým průřezem v oblasti dřívku předkovku. Z toho vyplývá, že pro kování předkovku, zhotoveného na horizontálním kovacím lisu, v jednodutinové zápustce, je třeba výronkovou drážku naddimenzovat zejména v oblasti listu výkovku lopatky (viz oddíl 7.2.2).

### 9.2.1 Ověření tvaru předkovku simulací v programu Deform 3D

Postup simulace kování navrženého tvaru předkovku je stejný, jako v případě simulace předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu (viz oddíl 9.1.1 a 9.1.2). Zadané parametry pro simulaci ochlazování předkovku odpovídají parametrům uvedeným v tabulce 11. Pro simulaci kování na protiběžném bucharu je nutné zadat změněné hodnoty hmotnosti horního a dolního ústrojí bucharu. Důvodem je odlišná hmotnost předkovku (56 kg) a také hmotnost vložek s upravenou výronkovou drážkou. Hmotnost horní vložky je 1 534,8 [kg] a spodní vložky je 1 447 [kg]. Počáteční kovací teplota předkovku je 850 až 1178 °C. Zbylé parametry odpovídají tabulce 12.

	Originální znění z programu Deform3D	Překlad	Hodnota
Předkovek „workpiece„	Temperature	Teplota	850až 1178 °C
	Number of elements of mesh	Počet elementů sítě	122 696
Zápustky „dies„	Hammer mass	Hmotnost horního ústrojí bucharu	51,37 [N • s <sup>2</sup> / mm]
	Bottom die mass	Hmotnost dolního ústrojí bucharu	54,7 [N • s <sup>2</sup> / mm]

Tab. 14 Data pro simulaci kování z předkovku zhotoveného na LKH

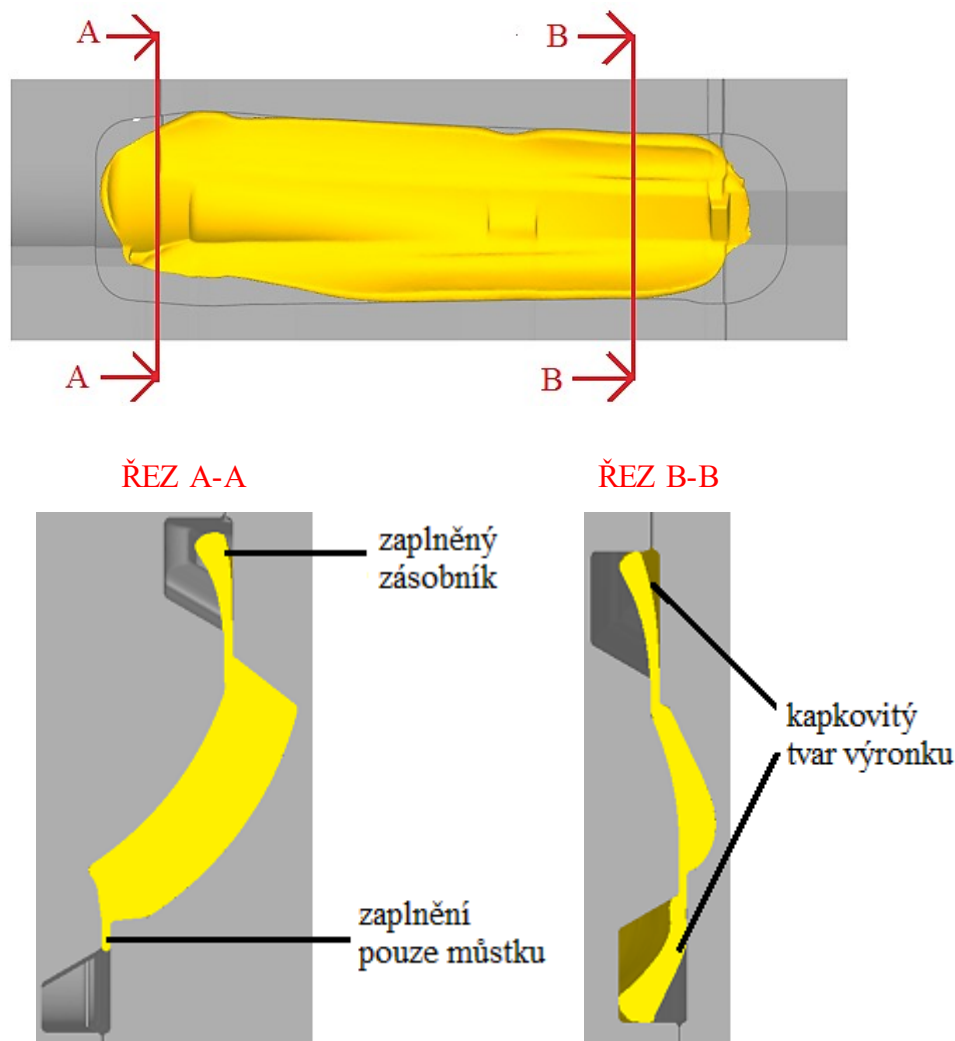
Na základě simulace byly identifikovány přeložky ve výronku (viz obr. 61), vzniklé pravděpodobně vlivem prohloubení zásobníku výronkové drážky. Tyto přeložky nepředstavují vadu výkovku, neboť negativně neovlivňují jakost výkovku lopatky. Přeložky se odstraní následným okrojením výronku na příslušném okrajovacím lisu. Za předpokladu vzniku přeložek ve výkovku lopatky, by musela být v technologickém postupu zařazena ještě operace broušení po vlastním kování. To by vedlo ke zvýšení nákladů na výrobu výkovku lopatky. Z tohoto důvodu je kladen důraz na kování bez přeložek ve výkovku.



Obr. 61 Identifikace přeložek ve výronku (červení tečky).

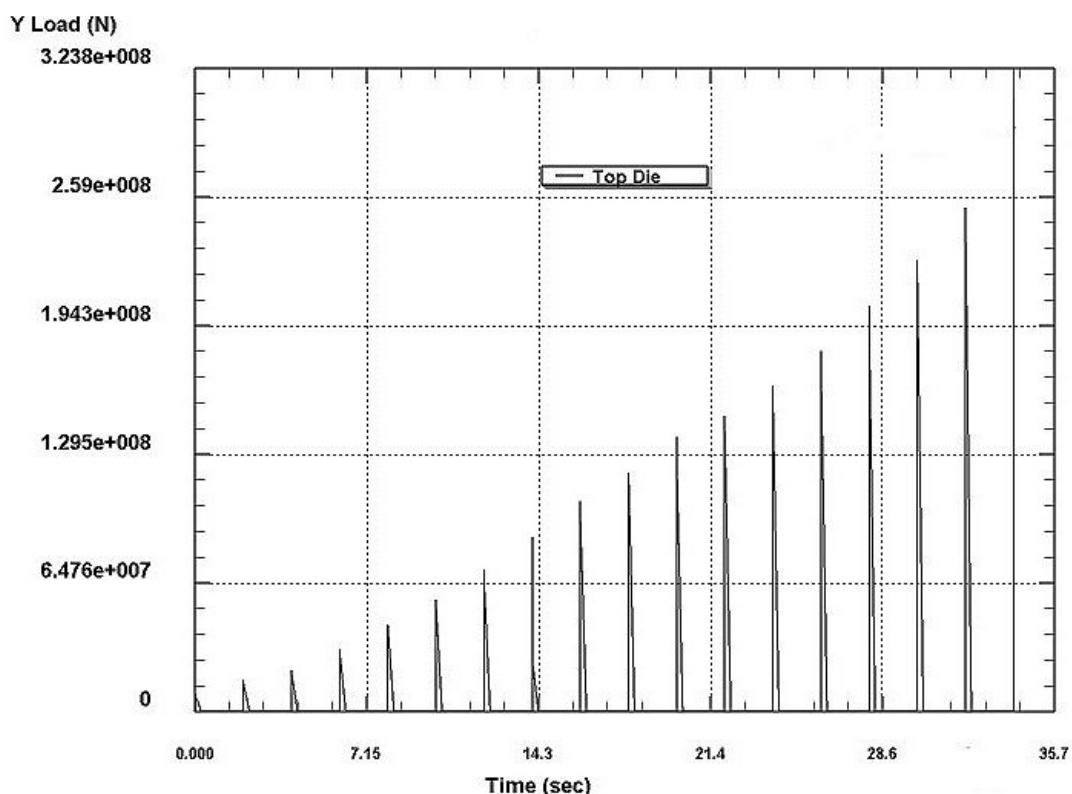
Simulace dále prokázala vhodnost navrženého tvaru předkovku z hlediska zaplnění dutiny vložek, ovšem se značným přebytkem materiálu ve výronkové drážce (viz obr. 62). Největší přebytek materiálu nastal v oblasti listu výkovku lopatky, který je způsoben navrženým tvarem předkovku. Z výsledku simulace lze navíc vypočítat nerovnoměrné zaplnění

výronkové drážky, podobně jako při kování z předkovku kovaného na vzduchovém bucharu (viz obr. 54). Tvářený materiál na jedné straně hlavy výkovku lopatky zaplní pouze můstek výronkové drážky (viz obr. 62 řez A-A). Množství materiálu v můstku je dostatečné, zaručující, aby při změně podmínek kování kov zcela zaplnil dutinu vložek. Z provedeného řezu B-B je patrný kapkový tvar výronku. Ten je pravděpodobně způsoben prohloubením zásobníku výronkové drážky po celém obvodu vložek.



Obr. 62 Zaplnění dutiny vložek a výronkové drážky na základě výsledku simulace v programu Deform 3D

Podobně jako u předchozího vyhodnocení simulace kování (viz oddíl 9.1.3), je stanoven počet úderu ze závislosti zatížení horní zápustky na čase (viz obr. 63). Kde zatížení je opět uváděno v jednotkách Newton a exponenciální hodnota  $e^{+008}$  odpovídá  $10^8$ . V rámci simulování byly všechny úderu simulovány ve stejné databázi, proto i počet vykreslených píků odpovídá celkovému počtu úderů. Z provedené simulace kování výkovku na protiběžném bucharu vyplývá, že výkovek bude u této varianty vykovan 18 úderu.



Obr. 63 Závislost zatížení horní části vložky a zápustkového bloku na čase (load – zatížení, time – čas, top die – horní zápustka).

### 9.3 Kování bez předkování

Tento způsob kování spočívá v tváření válcované loupáné tyče o konstantním průměru 120 mm a o délce 1100 mm. Jelikož není tvar výchozího polotovaru upraven pro snadnější tečení materiálu v dutině vložek, bude docházet ke značnému opotřebení kovací dutiny. Zároveň se polotovar vyznačuje v porovnání s předkovky větším objemem, proto je nutné provést úpravu výronkové drážky. Jak již bylo v úvodu kapitoly 9 zmíněno, tato varianta je uvažována pouze pro opodstatnění nutnosti předkování výchozího polotovaru. S ohledem na vymezený čas provedení diplomové práce, není navržena úprava výronkové drážky s následnou simulací v programu Deform 3D.

## 10 Ekonomicko-technologické zhodnocení

Pro posouzení kování s předkovkem nebo bez předkovku je nutné provést ekonomicko-technologické zhodnocení technologie zápustkového kování. Technologické zhodnocení vychází ze stanovených cílů („kritérií“) zápustkového kování pro zadaný výkovek. Mezi základní kritéria patří zejména zaplnění dutiny vložek tvářeným materiálem, rovnoměrné zaplnění výronkové drážky po celém obvodu s malým přebytkem materiálu a dosažení požadované kvality výkovku (bez vzniku přeložek). Hodnocení zmíněných kritérií je provedeno nejen na základě výsledků simulace v programu Deform 3D, ale také s ohledem na



časovou náročnost předkování a dodatečných operací před vlastním kovááním na protiběžném bucharu.

S technologickým hodnocením se prolíná ekonomické zhodnocení výroby, které spočívá ve stanovení celkových nákladů jednotlivých variant zápusťkového kování (viz tab. 15). Celkové náklady jsou stanoveny z nákladů na materiál, nákladů na předkování a nákladů na dokončovací operace před kovááním „broušení“. Cena kování na protiběžném bucharu nebyla z interních důvodů firmy CPF poskytnuta, proto nebude uvažována do celkových nákladů výroby. Lze ovšem předpokládat, že cena kování bude pro uvedené varianty stejná. Dále nejsou uvažovány náklady na zhotovení vložek a ostatních nástrojů.

		Vzduchový buchar	Horizontální kovací lis „LKH“	Válcovaná loupáná tyč o Ø120 mm
Hmotnost [kg]		40,5	56	97,7
Cena materiálu [Kč]		3 171	4 361,3	7 649,9
Čas [min/ks] / náklady [Kč/ks]	předkování	18 / 2 160	3 / 240	-
	broušení	20 / 120	5 / 30	-
<b>Celkové náklady [Kč]</b>		<b>5451</b>	<b>4 631,3</b>	<b>7 649,9</b>

**Tab. 15 Ekonomické zhodnocení zápusťkového kování**

Cena za jeden kilogram výchozího polotovaru, podle ceníku dodavatele, je 2,9 eur (přibližný přepočet je 78,3 Kč/kg). Počet vyráběných kusů výkovku lopatky na jednu výrobní dávku je 120 kusů. Výrobní dávka se opakuje přibližně šestkrát do roka. Celkové vyráběné množství výkovků lopatky je přibližně 720 kusů za rok. Uvedené doby trvání a náklady na předkování, eventuálně broušení jsou poskytnuty společností CPF.

## 10.1 Porovnání kování s a bez předkování

Z tabulky 15 je patrné, že ekonomicky výhodnou variantou je zápusťkové kování s předkovanou válcovanou loupánou tyčí. A to i za předpokladu, že při kováání přímo z válcované loupáné tyče o průměru 120 mm odpadá operace předkování a broušení před kovááním. Z technologického hlediska představuje kováání s takovým objemem materiálu značné problémy. Ty se týkají vysoké pravděpodobnosti vzniku přeložek ve výkovku a problematického vyplňování dutiny vložek. Tvar předkovku nejen příznivě ovlivňuje tečení tvářeného materiálu v kovací dutině, ale snižuje její opotřebení během kováání. Proto jak z technologického, tak z ekonomického hlediska není pro zadaný výkovek lopatky vhodné volit kováání bez předkování.

## 10.2 Porovnání kování s předkováním na vzduchovém bucharu vs. LKH

Při porovnání celkových nákladů zápusťkového kování s předkováním na horizontálním kovacím lisu (LKH) a na vzduchovém bucharu je patrné, že nižší celkové náklady na kováání

jsou u varianty s horizontálním kovacím lisem. I za předpokladu, že předkovek se vyznačuje větším objemem materiálu, tím i vyššími náklady na materiál. Tato varianta je výhodnější především z důvodu menšího času na předkování a následného broušení. Rychlejší předkování je způsobeno jednodušším tvarem předkovku (viz obr. 57) v porovnání s předkovkem zhotoveným na vzduchovém bucharu (viz obr. 52).

Doba broušení je ovlivněna zejména kvalitou vyrobeného předkovku. Ta je určena především způsobem ohřevu polotovaru (viz kapitola 8), neboť při ohřevu v plynové peci dochází k většímu vzniku okují než při elektroindukčním ohřevu. I přes celkovou snahu okuje odstranit z povrchu předkovku, dochází během kování na vzduchovém bucharu k jejich zakování do povrchu předkovku. Ten se vyznačuje nerovnoměrným povrchem s dalšími různými nežádoucími indikacemi. Aby předkovek odpovídal určití kvalitě, je nutné jej delší dobu brousit.

Z výsledků simulace (viz obr. 61 a obr. 54) lze konstatovat, že během kování obou předkovků nedošlo k indikaci přeložek ve výkovku lopatky. Zároveň ani u jednoho způsobu nebylo splněno kritérium rovnoměrného zaplnění výronkové drážky po celém obvodu vložek. Tato skutečnost ovšem nesouvisí s navrženým tvarem předkovku, nýbrž s tvarem výkovku. Ten odpovídá výkresové dokumentaci čisté lopatky. Z toho je patrné, že rovnoměrné zaplnění výronkové drážky je jen obtížně dosažitelné.

Na základě ekonomicko-technologického rozboru se jeví jako vhodnější varianta kování s předkováním na horizontálním kovacím lisu.

## 11 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout vhodný technologický postup zápustkového kování turbínové lopatky. V rámci tvorby technologického postupu bylo provedeno:

- a) Konstrukční návrh vhodného tvaru výkovku s ohledem na vyrobiteľnosť zápustkovým kovaním a vytvoření výkresové dokumentace.
- b) Volba zápustky s ohledem na tvarovou složitost výkovku a na velikosti výrobní dávky.
- c) Stanovení možných variant zápustkového kování (s předkováním, bez předkování).
- d) Konstrukce kovací dutiny a výronkové drážky vložek pro uvažované způsoby kování. Vytvoření jejich výkresové dokumentace.
- e) Návrh tvaru předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu nebo na horizontálním kovacím lisu „LKH“.
- f) Ověření tvaru předkovku simulací v programu Deform 3D s ohledem na požadavky zápustkového kování.
- g) Volba výchozího polotovaru pro kování bez předkování.
- h) Ekonomicko-technologické zhodnocení

Na základě provedené ekonomicko-technologické studie bylo zjištěno:

### 1) Ekonomické zhodnocení

- Podle celkových nákladů na kování (kromě nákladů kování na protiběžném bucharu) je výhodnější *kování s předkováním* (tzn. na horizontálním kovacím lisu nebo na vzduchovém bucharu) než *kování bez předkování*.
- *Předkování na horizontálním kovacím lisu* je ekonomicky výhodnější než předkování na *vzduchovém bucharu*. Přestože se vyznačuje většími náklady na materiál, tyto náklady jsou kompenzovány kratší dobou předkování a následného broušení předkovku před vlastním procesem kování.

### 2) Technologické zhodnocení kování s předkováním (na vzduchovém bucharu, na horizontálním kovacím lisu).

#### a) Z hlediska navržených způsobu předkování

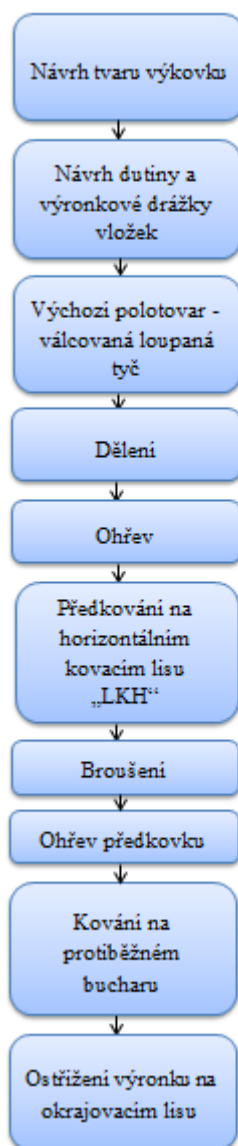
- Předkovek zhotovený na horizontálním kovacím lisu se vyznačuje jednodušší konstrukcí, to znamená kratší dobou předkování v porovnání s předkovkem zhotoveným na vzduchovém bucharu.
- Válcovaná loupaná tyč pro předkování na horizontálním kovacím lisu se ohřívá elektroindukčním ohřevem, ale pouze na předem určené části tyče pro petchování. Tímto způsobem ohřevu dochází k zanedbatelné tvorbě okují. Povrch předkovku po předkování tímto způsobem má vyšší jakost než povrch předkovku, který byl zhotoven na vzduchovém bucharu.
- Válcovaná loupaná tyč pro předkování na vzduchovém bucharu je ohřívána v celém objemu v plynové peci s větším vývojem okují. I přes snahu okuje z povrchu předkovku odstranit, dochází k jejich zakování. Tím se zvyšuje časová náročnost pro následné broušení, kterým se odstraní nežádoucí indikace a nerovnoměrnost povrchu.

#### b) Na základě výsledků simulace v programu Deform 3D.

- Kovací dutina navržených vložek byla tvářeným materiálem zcela zaplněna. Ovšem ani v jednom případě nedošlo k rovnoměrnému vyplnění výronkové drážky po celém obvodu vložek. To je způsobeno navrženým tvarem výkovku lopatky, který odpovídá tvaru čisté lopatky podle výkresové dokumentace dodané zákazníkem. Zároveň simulace kování z předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu odhalila nebezpečnou oblast (hlava výkovku lopatky), kde materiál zatekl pouze do části můstku výronkové drážky (viz obr. 54).
- Na výkovku lopatky, vykovaném z obou uvažovaných předkovků, nebyly identifikovány nežádoucí přeložky.

- Počet úderů potřebných pro vykování výkovku lopatky z předkovku zhotoveného na horizontálním kovacím lisu je větší než v případě kování z předkovku zhotoveného na vzduchovém bucharu.

Na základě výsledků simulací v programu Deform 3D a ekonomického zhodnocení je zvoleno kování s předkováním na horizontálním kovacím lisu. Technologický postup je uveden na obrázku 64.



Obr. 64 Technologický postup pro kování výkovku lopatky parní turbíny

## Seznam literatury

- [1] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1988. 520 s.
- [2] KLIBER, Jiří. *Základy tváření kovů*. 2 vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1998. 267 s. ISBN 80-7078-978-6.
- [3] LENFELD, Petr. Technologie objemového tváření – kování. *Technologie II: tváření kovů, zpracování plastů*. [online]. Technická univerzita Liberec, fakulta strojní.[cit. 5. 10. 2015]. Dostupné z [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/09.htm#091](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm#091)
- [4] HAŠEK, Vladimír. *Kování*. 1. Vydání. Praha: SNTL, 1965. 730 s.
- [5] PFROGNER, F., MOJŽÍŠ, A. *Základy teorie a technologie tváření kovů*. Plzeň: VŠSE, 1980. 198 s.
- [6] ČADA, Radek. *Technologie I*. Studijní opora. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 8. 10. 2015]. ISBN 978-80-248-1507-7. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>
- [7] SEMIATIN, S. L. *ASM Handbook. Vol. 14, Metalforming: Bulk forming*. Materials Park: ASM International, © 2005. 888 s. ISBN 0-87170-708-6.
- [8] SCHINDLER, Ivo, KAWULOK, Petr. *Deformační chování materiálu*. Studijní opora. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 15. 10. 2015]. ISBN 978-80-248-3361-3. Dostupné z: [http://katedry.fimmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/13\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu/Schindler\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu.pdf](http://katedry.fimmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/13_Deformacni_chovani_materialu/Schindler_Deformacni_chovani_materialu.pdf)
- [9] PLÁNIČKA, F., ZAJÍČEK, M., ADÁMEK, V. *Napjatost a hypotézy pevnosti*. [online]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, katedra mechaniky. [cit. 19. 10. 2015]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/napjatost-a-hypotezy-pevnosti/shrnuti.pdf>
- [10] PERNIS, Rudolf. *Teória tvarovania kovov*. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2007. 167 s. ISBN 978-80-8075-244-6.
- [11] BEDNÁŘ, Bohumír, ŠANOVEC, Jan, ČERMÁK, Jan, MICHÁLEK, Ladislav. *Technologie konstrukce I*. Praha: ČVUT, 2005. 146 s. ISBN 80-01-03268-6.

[12] PROCHÁZKA, Jiří, ZAPOTIL, Miroslav, NĚMEC, Milan, NOVOTNÝ, Jiljí. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Praha: ČVUT, 1986. 343 s.

[13] ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1992. 528 s. ISBN 80-03-00651-1

[14] MAÁR, Karol. *Kovanie*. Košice: Technická univerzita v Košicích, 1991. 317 s. ISBN 80-7099-073-2.

[15] ALTAN, Taylan, NGAILE, Gracious, SHEN, *Gangshu. Cold and hot forging: Fundamentals and applications*. Materials Park: ASM International, © 2005. 341 s. ISBN 0-87170-805-1.

[16] WALTERS, John, VAN TYNE, C. J. Grain flow in forging IV- Various Processes and influence of machining. *Forge magazine*. [online]. April 6, 2015 [cit. 21. 11. 2015]. Dostupné z: <http://www.forgemag.com/articles/84328-grain-flow-in-forgings-iv-various-processes-and-influence-of-machining>

[17] WALTERS, John, VAN TYNE, C. J. Grain flow in forgings- the Basics. *Forge magazine*. [online]. October 6, 2014 [cit. 21. 11. 2015]. Dostupné z: <http://www.forgemag.com/articles/84265-grain-flow-in-forgings---the-basics>

[18] Why forging is better. *C\*Blade*. [online]. C\*Blade S.p.a, © 2007-2015. [cit. 16. 11. 2015]. Dostupné z: <http://www.cblade.it/why-forging-is-better.html>

[19] GRONOSTAJSKI, Z., KASZUBA, M., HAWRYLUK, M., ZWIERZCHOWSKI, M. *A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools*. [online]. Elsevier. August, 2014. vol. 14, 528 -539 [cit. 2. 12. 2015]. ISSN 1644 - 9665. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: doi:10.1016/j.acme.2014.07.002

[20] ČERMÁK, J., ŠANOVEC, J. Přípravky a nástroje pro tváření kovů za tepla. Skripta ČVUT Praha, 1973.

[21] Czech precision forge a.s. (CPF). Interní informace o technologii zápusťkového kování. Soukromé sdělení.

[22] MAŠEK, Bohuslav, SEIDEL, Helmut, HARTWIG, Helge. *Moderní koncepty mazání pro použití v náročných kovářských technologiích*. [online]. [cit. 23. 3. 2016] Dostupné z: <http://fortech.zcu.cz/publications/2007/Kov-Hartwig.pdf>

[23] Octopustools [online]. OCTOPUSTOOLS s. r. o. © 2008. [cit. 3. 12. 2015]. Dostupné z: [http://www.octopustools.com/normy\\_materialu.php](http://www.octopustools.com/normy_materialu.php)

[24] Převodník materiálů. *Preciz* [online]. PRECIZ, s.r.o. [cit. 3. 12. 2015]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal>

[25] KOTOUČ, Jiří, ČERMÁK, Jan, ŠANOVEC, Jan, MÁDLE, Luděk. *Tvářecí nástroje*. Praha: ČVUT, 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1

[26] ŠANOVEC, J. *Technologická cvičení*. Návrh technologie zápusťkového kování. Praha: SNTL, 1987. 64 s.

[27] ČADA, Radek, MACHÁLEK, Jakub, FRODLOVÁ, Barbora. *Týmová cvičení předmětu technologie tváření a slévání*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, [cit. 15. 11. 2015]. ISBN 978-80-248-2718-6. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2718-6.pdf>

[28] MĚŠŤÁNEK, Petr. *Určení životnosti závěsů lopatek parních turbín*. Plzeň, 2007/2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd. Vedoucí práce Vladislav Laš.

[29] TOMS, Petr. 3D CFD simulace proudění v turbinovém stupni. [online]. Praha: ČVUT [cit. 14. 3. 2016]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf11/1100024-1.pdf>

[30] ČSN EN 10243-1. *Ocelové zápusťkové výkovky – Mezní úchylky*. Část 1: výkovky kované na bucharech a svislých kovacíh lisech. Praha: Český normalizační institut, 2003.

[31] ČSN 42 9030. *Výkovky ocelové zápusťkové. Přídavky na obrábění, mezní úchylky rozměrů a tvarů*. Praha: Český normalizační institut, 1987.

[32] ČSN 42 9002. *Rozdělení zápusťkových výkovků podle tvaru složitosti*. Praha: Český normalizační institut, 1971.

[33] ČSN 22 8308. *Zápusťky pro buchary. Směrnice pro konstrukci*. Praha: Český normalizační institut, 1979.

[34] HAIHONG INTERNATIONAL TRADE (HK) CO., LIMITED. *Technical data sheet – DINX22 CrMoV12-1*. [online]. [cit. 25. 3. 2016]. Dostupné z: [http://www.ccsteels.com/Stainless\\_steel/1301.html](http://www.ccsteels.com/Stainless_steel/1301.html)

## Seznam obrázků

Obr. 1 Skluzový mechanismus plastické deformace .....	11
Obr. 2 Mechanismus dvojčatění plastické deformace .....	11
Obr. 3 Napětí působící na prostorový element .....	12
Obr. 4 Schéma stavu napjatosti .....	12
Obr. 5 Schémata hlavních deformací .....	13
Obr. 6 Znázornění mechanického schématu deformace během operace pěchování rovnými kovanými .....	13
Obr. 7 Vznik vláknitosti volně kovaného výkovku.....	16
Obr. 8 Pásmo kovacíh teplot .....	17
Obr. 9 Konstrukce záпустky .....	17
Obr. 10 Průběh výronkového kování .....	18
Obr. 11 Porovnání výrobku.....	19
Obr. 12 Mechanismy porušení a jejich působení v záпустce .....	20
Obr. 13 Postupová záпустka .....	22
Obr. 14 Zužovací dutina .....	23
Obr. 15 Rozdělovací dutina.....	24
Obr. 16 Prodlužovací dutina.....	24
Obr. 17 Tvarovací dutina .....	25
Obr. 18 Ohýbací dutina .....	25
Obr. 19 Způsoby vedení záпустek .....	26
Obr. 20 Model výkovku lopatky turbíny.....	27
Obr. 21 Tvar dělicí plochy .....	28
Obr. 22 Konstrukční prvky pro zachycování bočních sil.....	29
Obr. 23 Konstrukce prvního a posledního řezu lopatky.....	29
Obr. 24 Směr kování .....	30
Obr. 25 Dělicí rovina výkovku lopatky.....	30
Obr. 26 Stromečkovitý závěs .....	32
Obr. 27 Bandáž lopatky.....	33
Obr. 28 Technologický přídavek ve formě nákovků.....	33
Obr. 29 Úkos na čelní ploše bandáže výkovku lopatky .....	33
Obr. 30 Vliv poloměru zaoblení přechodů na vznik přeložky .....	34
Obr. 31 Úchytky tvaru.....	36
Obr. 32 Šířka, tloušťka výkovku lopatky ve směru kování .....	36



Obr. 33 Výronkové drážka .....	39
Obr. 34 Tvar dokončovací dutiny spodní části zápusťky s výronkovou drážkou .....	41
Obr. 35 Tvar dokončovací dutiny horní části zápusťky s výronkovou drážkou.....	41
Obr. 36 Řez výronkové drážky se zakótovanými rozměry .....	41
Obr. 37 Spodní část zápusťky s naddimenzovanou výronkovou drážkou.....	42
Obr. 38 Vrchní část zápusťky s naddimenzovanou výronkovou drážkou .....	42
Obr. 39 Prohloubení výronkové drážky .....	43
Obr. 40 Řez upravené výronkové drážky se zakótovanými rozměry .....	44
Obr. 41 Upevnění a vedení vložek v zápusťkovém bloku.....	44
Obr. 42 Místa provedených řezů, znázorněných prostřednictvím rovin .....	46
Obr. 43 Řez výronkové drážky, rozdělený na dva obdélníky .....	47
Obr. 44 Největší průřez hlavy výkovku lopatky .....	48
Obr. 45 Průřez v přechodové oblasti hlavy do listu výkovku lopatky .....	48
Obr. 46 Průřez v přechodové oblasti listu do bandáže výkovku lopatky .....	48
Obr. 47 Průřez v bandáži výkovku lopatky.....	49
Obr. 48 Tvar předkovku na vzduchovém bucharu .....	49
Obr. 49 Prořez tyče o $\varnothing$ 125 x 492 pro jeden předkovek.....	50
Obr. 50 Usazení navrženého tvaru předkovku v dutině zápusťky.....	52
Obr. 51 Zaplnění dutiny a výronkové drážky vložek na základě provedené simulace provedené v programu Deform 3D .....	52
Obr. 52 Zredukovaný objem předkovku .....	53
Obr. 53 Zkroucení předkovku v dutině zápusťky po prvním úderu .....	54
Obr. 54 Zaplnění dutiny a výronkové drážky vložek na základě provedené simulace v programu Deform 3D .....	55
Obr. 55 Závislost zatížení horní zápusťky na čase .....	56
Obr. 56 Princip předkování na horizontálním kovací lisu .....	57
Obr. 57 Navržený tvar předkovku zhotoveného na horizontálním kovací lisu.....	57
Obr. 58 Válcovaná loupaná tyč $\varnothing$ 85 x 1266, délka volné části 237 mm. ....	58
Obr. 59 Schéma pechování v kuželovité dutině lisovníku.....	58
Obr. 60 Tvar předkovku po první operaci pechování .....	59
Obr. 61 Identifikace přeložek ve výronku.....	60
Obr. 62 Zaplnění dutiny vložek a výronkové drážky na základě výsledku simulace v programu Deform 3D .....	61
Obr. 63 Závislost zatížení horní části vložky a zápusťkového bloku na čase .....	62
Obr. 64 Technologický postup pro kování výkovku lopatky parní turbíny .....	66

## Seznam tabulek

Tab. 1 Nástrojová ocel pro práci za tepla .....	21
Tab. 2 Parametry protiběžného bucharu .....	28
Tab. 3 Přídavky na obrábění ploch pro obvyklé provedení .....	31
Tab. 4 Velikost úkosů.....	34
Tab. 5 Zaoblení hran r a přechodů R výkovky.....	35
Tab. 6 Hodnoty smrštění .....	35
Tab. 7 Požadované mechanické vlastnosti lopatky .....	37
Tab. 8 Chemické složení oceli X22CrMoV12-1 v hmotnostních %.....	38
Tab. 9 Mezní úchytky rozměrů a tvaru výkovku lopatky .....	38
Tab. 10 Maximální dovolený poloměr zaoblení dutiny zápusky do výronkové drážky .....	40
Tab. 11 Data pro simulaci ochlazování předkovku v programu Deform 3D.....	50
Tab. 12 Data pro simulaci proces kování na protiběžném bucharu v programu Deform 3D ..	51
Tab. 13 Data pro simulaci zredukovaného předkovku v programu Deform 3D.....	54
Tab. 14 Data pro simulaci kování z předkovku zhotoveného na LKH.....	60
Tab. 15 Ekonomické zhodnocení zápuskového kování .....	63

## Grafická část

### Seznam příloh

- Příloha A: Výkres čisté lopatky s řezy. (volně vložené)
- Příloha B: Výkres výkovku lopatky s řezy. (volně vložené)
- Příloha C: Určení tolerancí výkovku lopatky podle normy ČSN EN 10243-1.
- Příloha D: Stanovení rozměrů výronkové drážky podle normy ČSN 22 8308.
- Příloha E: Výkres vložek (volně vložené).
- Příloha F: Technické parametry zařízení firmy CPF.

Příloha C




1) Maximální dovolené úchytky	Hmotnost (kg)	Stupeň obtížnosti kování		Ukazatel složitosti tvaru				Jmenovité rozměry						
								0	> 16	> 40	> 63	> 100	> 160	> 250
								≤ 16	≤ 40	≤ 63	≤ 100	≤ 160	≤ 250	> 250
Nad - do (včetně)	M1	M2	Ukazatel složitosti tvaru				Úchytky 2)							
			S1	S2	S3	S4								
1,0	0-0,4							1,0 <sup>+0,7</sup> <sub>-0,3</sub>	1,1 <sup>+0,7</sup> <sub>-0,4</sub>	1,2 <sup>+0,8</sup> <sub>-0,4</sub>	1,4 <sup>+0,9</sup> <sub>-0,5</sub>	1,6 <sup>+1,1</sup> <sub>-0,5</sub>	1,8 <sup>+1,2</sup> <sub>-0,6</sub>	2,0 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,7</sub>
1,2	0,4-1,2							1,1 <sup>+0,7</sup> <sub>-0,4</sub>	1,2 <sup>+0,8</sup> <sub>-0,4</sub>	1,4 <sup>+0,9</sup> <sub>-0,5</sub>	1,6 <sup>+1,1</sup> <sub>-0,5</sub>	1,8 <sup>+1,2</sup> <sub>-0,6</sub>	2,0 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,7</sub>	2,2 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,7</sub>
1,6	1,2-2,5							1,2 <sup>+0,8</sup> <sub>-0,4</sub>	1,4 <sup>+0,9</sup> <sub>-0,5</sub>	1,6 <sup>+1,1</sup> <sub>-0,5</sub>	1,8 <sup>+1,2</sup> <sub>-0,6</sub>	2,0 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,7</sub>	2,2 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,7</sub>	2,5 <sup>+1,7</sup> <sub>-0,8</sub>
2,0	2,5-5							1,4 <sup>+0,9</sup> <sub>-0,5</sub>	1,6 <sup>+1,1</sup> <sub>-0,5</sub>	1,8 <sup>+1,2</sup> <sub>-0,6</sub>	2,0 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,7</sub>	2,2 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,7</sub>	2,5 <sup>+1,7</sup> <sub>-0,8</sub>	2,8 <sup>+1,9</sup> <sub>-0,9</sub>
2,4	5-8							1,6 <sup>+1,1</sup> <sub>-0,5</sub>	1,8 <sup>+1,2</sup> <sub>-0,6</sub>	2,0 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,7</sub>	2,2 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,7</sub>	2,5 <sup>+1,7</sup> <sub>-0,8</sub>	2,8 <sup>+1,9</sup> <sub>-0,9</sub>	3,2 <sup>+2,1</sup> <sub>-1,1</sub>
3,2	8-12							1,8 <sup>+1,2</sup> <sub>-0,6</sub>	2,0 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,7</sub>	2,2 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,7</sub>	2,5 <sup>+1,7</sup> <sub>-0,8</sub>	2,8 <sup>+1,9</sup> <sub>-0,9</sub>	3,2 <sup>+2,1</sup> <sub>-1,1</sub>	3,6 <sup>+2,4</sup> <sub>-1,2</sub>
4,0	12-20							2,0 <sup>+1,3</sup> <sub>-0,7</sub>	2,2 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,7</sub>	2,5 <sup>+1,7</sup> <sub>-0,8</sub>	2,8 <sup>+1,9</sup> <sub>-0,9</sub>	3,2 <sup>+2,1</sup> <sub>-1,1</sub>	3,6 <sup>+2,4</sup> <sub>-1,2</sub>	4,0 <sup>+2,7</sup> <sub>-1,3</sub>
5,0	20-36							2,2 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,7</sub>	2,5 <sup>+1,7</sup> <sub>-0,8</sub>	2,8 <sup>+1,9</sup> <sub>-0,9</sub>	3,2 <sup>+2,1</sup> <sub>-1,1</sub>	3,6 <sup>+2,4</sup> <sub>-1,2</sub>	4,0 <sup>+2,7</sup> <sub>-1,3</sub>	4,5 <sup>+3,0</sup> <sub>-1,5</sub>
6,4	36-63							2,5 <sup>+1,7</sup> <sub>-0,8</sub>	2,8 <sup>+1,9</sup> <sub>-0,9</sub>	3,2 <sup>+2,1</sup> <sub>-1,1</sub>	3,6 <sup>+2,4</sup> <sub>-1,2</sub>	4,0 <sup>+2,7</sup> <sub>-1,3</sub>	4,5 <sup>+3,0</sup> <sub>-1,5</sub>	5,0 <sup>+3,3</sup> <sub>-1,7</sub>
8,0	63-110							2,8 <sup>+1,9</sup> <sub>-0,9</sub>	3,2 <sup>+2,1</sup> <sub>-1,1</sub>	3,6 <sup>+2,4</sup> <sub>-1,2</sub>	4,0 <sup>+2,7</sup> <sub>-1,3</sub>	4,5 <sup>+3,0</sup> <sub>-1,5</sub>	5,0 <sup>+3,3</sup> <sub>-1,7</sub>	5,6 <sup>+3,7</sup> <sub>-1,9</sub>
10,0	110-200							3,2 <sup>+2,1</sup> <sub>-1,1</sub>	3,6 <sup>+2,4</sup> <sub>-1,2</sub>	4,0 <sup>+2,7</sup> <sub>-1,3</sub>	4,5 <sup>+3,0</sup> <sub>-1,5</sub>	5,0 <sup>+3,3</sup> <sub>-1,7</sub>	5,6 <sup>+3,7</sup> <sub>-1,9</sub>	6,3 <sup>+4,2</sup> <sub>-2,1</sub>
12,6	200-250							3,6 <sup>+2,4</sup> <sub>-1,2</sub>	4,0 <sup>+2,7</sup> <sub>-1,3</sub>	4,5 <sup>+3,0</sup> <sub>-1,5</sub>	5,0 <sup>+3,3</sup> <sub>-1,7</sub>	5,6 <sup>+3,7</sup> <sub>-1,9</sub>	6,3 <sup>+4,2</sup> <sub>-2,1</sub>	7,0 <sup>+4,7</sup> <sub>-2,3</sub>
								4,0 <sup>+2,7</sup> <sub>-1,3</sub>	4,5 <sup>+3,0</sup> <sub>-1,5</sub>	5,0 <sup>+3,3</sup> <sub>-1,7</sub>	5,6 <sup>+3,7</sup> <sub>-1,9</sub>	6,3 <sup>+4,2</sup> <sub>-2,1</sub>	7,0 <sup>+4,7</sup> <sub>-2,3</sub>	8,0 <sup>+5,3</sup> <sub>-2,7</sub>
								4,5 <sup>+3,0</sup> <sub>-1,5</sub>	5,0 <sup>+3,3</sup> <sub>-1,7</sub>	5,6 <sup>+3,7</sup> <sub>-1,9</sub>	6,3 <sup>+4,2</sup> <sub>-2,1</sub>	7,0 <sup>+4,7</sup> <sub>-2,3</sub>	8,0 <sup>+5,3</sup> <sub>-2,7</sub>	9,0 <sup>+6,0</sup> <sub>-3,0</sub>
								5,0 <sup>+3,3</sup> <sub>-1,7</sub>	5,6 <sup>+3,7</sup> <sub>-1,9</sub>	6,3 <sup>+4,2</sup> <sub>-2,1</sub>	7,0 <sup>+4,7</sup> <sub>-2,3</sub>	8,0 <sup>+5,3</sup> <sub>-2,7</sub>	9,0 <sup>+6,0</sup> <sub>-3,0</sub>	10,0 <sup>+6,7</sup> <sub>-3,3</sub>
								5,6 <sup>+3,7</sup> <sub>-1,9</sub>	6,3 <sup>+4,2</sup> <sub>-2,1</sub>	7,0 <sup>+4,7</sup> <sub>-2,3</sub>	8,0 <sup>+5,3</sup> <sub>-2,7</sub>	9,0 <sup>+6,0</sup> <sub>-3,0</sub>	10,0 <sup>+6,7</sup> <sub>-3,3</sub>	11,0 <sup>+7,3</sup> <sub>-3,7</sub>
								6,3 <sup>+4,2</sup> <sub>-2,1</sub>	7,0 <sup>+4,7</sup> <sub>-2,3</sub>	8,0 <sup>+5,3</sup> <sub>-2,7</sub>	9,0 <sup>+6,0</sup> <sub>-3,0</sub>	10,0 <sup>+6,7</sup> <sub>-3,3</sub>	11,0 <sup>+7,3</sup> <sub>-3,7</sub>	12,0 <sup>+8,0</sup> <sub>-4,0</sub>

1) Viz 5.2.2.2.  
2) Mezní úchytky jsou 2/3 a 1/3 (zaokrouhlené hodnoty).

Tab. C1 Mezní úchytky tloušťky a úchytky stop po vyhazovačích – stupeň přesnosti kování F [30]



Příloha D

Čís.	$\lambda$	$n$	Pěchování			Protlačování					
											
			$s$	$s_z$	$F_{výř}$	$s$	$s_x$	$F_{výř}$	$s$	$s_z$	$F_{výř}$
1	0,6	3	6	18	0,52	6	20	0,61	8	22	0,74
2	0,8	3	6	20	0,69	7	22	0,77	9	25	0,88
3	1,0	3	7	22	0,80	8	25	0,91	10	28	1,04
4	1,6	3,5	8	22	1,02	9	25	1,13	11	30	1,55
5	2,0	4	9	25	1,36	10	28	1,53	12	32	1,77
6	3,0	5	10	28	2,01	12	32	2,33	14	38	2,78
7	4,0	6	11	30	2,68	14	38	3,44	16	42	3,85
8	5,0	7	12	32	3,43	15	40	4,34	18	46	5,06
9	6,0	8	13	35	4,35	16	42	5,30	20	50	6,42
10	8,0	10	14	38	6,01	18	46	7,45	22	55	9,03
11	10,0	12	15	40	7,68	20	50	9,88	25	60	12,08

$F_{výř}$  platí pouze pro výronkovou drážku typ I. a II.

Tab. D1 Hodnoty rozměrů výronkových drážek ( $F_{výř}$  platí pro obvyklé výronkové drážky záпустky) [33]

**Příloha F**

PLYNOVÁ PEC		
označení	Plynová nístějová pec P30901	
Rozměry nístěje obou komor [mm]	výška	900
	hloubka	2200
	šířka	4600
Maximální teplota [°C]	1300	
Teplotní přesnost [°C]	+/-10	
Tepelný výkon [kW]	1920 (obě komory)	
Maximální vsázka [tuny]	20 (jedna komora 10 tun)	
Počet hořáků	6	
Spotřeba [m <sup>3</sup> /h]	až 127	
Hodinový výkon [kg/h]	2000	

**Tab. F1 Technické parametry plynové pece firmy CPF [21]**

ELEKTROINDUKČNÍ PEC	
označení	SOT 400/2,1
Maximální teplota [°C]	1200
Teplotní přesnost [°C]	+/-10
Maximální hmotnost kusu [kg]	90
Rozsah Ø vstupního polotovaru [mm]	40 až 100
Rozsah ohřivané délky [mm]	100 až 600
Příkon [kVA]	480 + 10
Doba ohřevu při Ø 100 [minuty]	3
Počet induktorů	3 (Ø60, Ø80, Ø100)

**Tab. F2 Technické parametry elektroindukční pece firmy CPF [21]**

VZDUCHOVÝ BUCAR	
Označení stroje	Buchar 750
Energie bucharu [kg · m]	1900
Zdvih [mm]	670
Elektrický příkon [kW]	55

**Tab. F3<sup>4</sup> Technické parametry vzduchového bucharu firmy CPF [21]**

<sup>4</sup> Energie bucharu uvedena v tabulce F3 představuje energii dopadu horního beranu s kovadlem. Energie v Joulech je 18 [kJ].

<b>HORIZONTÁLNÍ KOVACÍ LIS „LKH“</b>		
označení	LKH 800	
Síla pēchovacího beranu [kN]	8000	
Síla svēracího beranu [kN]	8000	
Pracovní zdvih pēchovacího beranu [mm]	250	
Zpētný zdvih pēchovacího beranu [mm]	125	
Maximální Ø polotovaru [mm]	100	
Maximální Ø napēchovaného konce [mm]	190	
Rozměry stroje [mm]	výška	5 400
	šířka	3 600
	délka	2 400
Příkon [kW]	55 (45 – motor, 7.5 – hydraulika, 1.5 – chlazení, 0.18 - chlazení)	

**Tab. F4 Technické parametry horizontálního kovacího lisu firmy CP. [21]**

<b>OKRAJOVACÍ LIS</b>	
Označení stroje	CKV 1500
Maximální síla [MN]	15
Zdvh	Mín 900, max 1900 (zdvih 1000)
Rozměry stolu	1600 x 2200
Spotřeba vody na zdvih [litr]	750

**Tab. F5 Technické parametry okrajovacího lisu firmy CPF [21]**