



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## NÁVRH VÝROBY TĚLA SPOJKY

MANUFACTURING OF A COUPLING BODY

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Dostál

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Martin Dostál**  
Studijní program: Strojírenská technologie  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh výroby těla spojky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o výrobu dílce pomocí technologie objemového tváření za tepla. Na tuto oblast bude rovněž vypracována literární rešerše. Dále bude práce obsahovat návrh technologického postupu výroby součásti, technické hodnocení včetně výkresové dokumentace a závěry se zhodnocením navrhované technologie.

### Cíle diplomové práce:

- vypracování aktuální literární rešerše,
- zhodnocení možností výroby,
- návrh výroby součásti,
- provedení technologických a kontrolních výpočtů,
- návrh nástroje včetně nezbytné výkresové dokumentace.

### Seznam doporučené literatury:

DRASTÍK, František. Výpočty z oboru kování a lisování. Praha: SNTL, 1972, ISBN 04-227-72.

HAŠEK, Vladimír. Kování. Praha: SNTL, 1965, ISBN 04-233-65.

FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William a CADDELL, Robert. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, ISBN 978-1-107-00452-8.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. Brno: VUT v Brně, 1992, ISBN 80-214-0401-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem výroby těla spojky. Výrobním podnikem je Zetor Kovárna s.r.o. Jedná se o tvarově mírně složitější součást, která se používá v automobilovém průmyslu. Výrobní série činí 80 000 kusů za rok. Materiál pro výrobu je nízkouhlíková ocel 12 020. Ze všech posuzovaných výrobních technologií je zvolena výroba zápusťkovým kovááním za tepla. Pro ni je dále navržen vhodný tvar výkovku. Vstupním polotovarem je tyč o průměru 100 mm a výšce 201 mm. V rámci návrhu se řeší i dělení a předehřev polotovaru. Zápusťkové kováání je navrženo ve třech krocích. Zvolená kovací síla pro poslední operaci je 30,7 MN. Navržený výrobní lis je LZK 4 000. Pro dokončovací střížné operace je vybrán lis LKOA 200.

### **Klíčová slova**

Tváření za tepla, zápusťkové kováání, ocel 12 020, spojka

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the design of the production of the clutch body. The production company is Zetor Kovárna s.r.o. It is a slightly more complex component used in the automotive industry. The production run is 80,000 pieces per year. The material for production is low-carbon steel 12 020. Of all the evaluated production technologies, production by hot die forging is chosen. A suitable shape of the forging is also designed for it. The input blank is a rod with a diameter of 100 mm and a height of 201 mm. The proposal also deals with the cutting and preheating of the input blank. Die forging is designed in three steps. The selected forging force for the last operation is 30.7 MN. The proposed production press is the LZK 4,000. The LKOA 200 press is selected for finishing cutting operations.

### **Keywords**

Hot forming, die forging, steel 12 020, clutch

---



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DOSTÁL, Martin. *Návrh výroby těla spojky* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157139>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh výroby těla spojky vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně 24.5.2024

místo, datum

Bc. Martin Dostál

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Janu Řiháčkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Velký dík patří také panu Ing. Pavlovi Janečkovi a celému oddělení TPV z firmy Zetor Kovárna s.r.o., kde mi umožnili spolupráci na závěrečné práci. Děkuji také své rodině a přátelům za podporu během studia.

---

**OBSAH**

Zadání práce	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD .....	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	11
1.1 Variantní řešení výroby .....	12
2 TECHNOLOGIE ZÁPUSTOVÉHO KOVÁNÍ .....	15
2.1 Technologičnost .....	16
2.2 Návrh výkovku .....	16
2.3 Polotovar .....	20
2.4 Přípravné operace .....	21
2.5 Ohřev polotovaru.....	22
2.6 Výronková drážka .....	25
2.7 Zápustky .....	26
2.7.1 Předehřev, mazání a údržba zápustek .....	27
2.7.2 Vyhazovače .....	29
2.8 Dokončovací operace .....	29
2.9 Technologické výpočty .....	32
2.10 Klikové mechanické lisy .....	34
2.11 Numerické simulace .....	35
3 NÁVRH ŘEŠENÍ.....	38
3.1 Návrh výkovku .....	38
3.2 Výronková drážka .....	44
3.3 Polotovar .....	47
3.3.1 Předkovací operace .....	49
3.4 Návrh kovacích operací s podporou simulací .....	52
3.4.1 První operace – pýchování.....	54
3.4.2 Druhá operace – předkování.....	55
3.4.3 Třetí operace – dokování .....	57
3.5 Návrh zápustek .....	60
3.6 Výpočty sil .....	66
3.6.1 Ověření volby lisu .....	69
3.7 Dokončovací operace .....	69
3.8 Zkušební výroba a verifikace numerických simulací .....	73
ZÁVĚR.....	79
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam příloh	
Seznam výkresů	

## ÚVOD

Oblast strojírenství nabízí v dnešní době rozsáhlou škálu výrobních technologií pro zhotovení širokého spektra dílců, například slévání, obrábění nebo tváření. Zásadními faktory pro volbu správné výrobní technologie jsou výhodná ekonomičnost celého procesu a snadná vyrobiteľnosť alebo požadavky na mechanické vlastnosti hotové součásti. [1; 2]

Technologie tváření se vyznačuje schopností přetvoření materiálu bez jeho porušení, vyjma metody stříhání. Obecně patří mezi nejhospodárnější způsoby výroby z důvodu větší úspory zpracovávaného materiálu nebo energie. Její další předností je vysoká produktivita práce nebo možné zlepšení mechanických vlastností vyráběných součástí. Jednou z běžných metod je objemové tváření, při kterém jsou výrobky deformovány za předpokladu trojosé napjatosti. Ve většině případů se jedná o tlakové zatížení, které je pro výrobu vhodné. Důvodem je vznik tlakové napjatosti, která je příznivá pro plastické přetvoření materiálu. Teplota má při tvářecích procesech zcela zásadní vliv. Mezi často používané objemové technologie se zvýšenou teplotou patří například výroba za polotepla nebo za tepla. Se zvyšující se teplotou oceli klesá přetvárná pevnost materiálu a zvyšuje se tím jejich tváriteľnosť. [1; 2; 3]

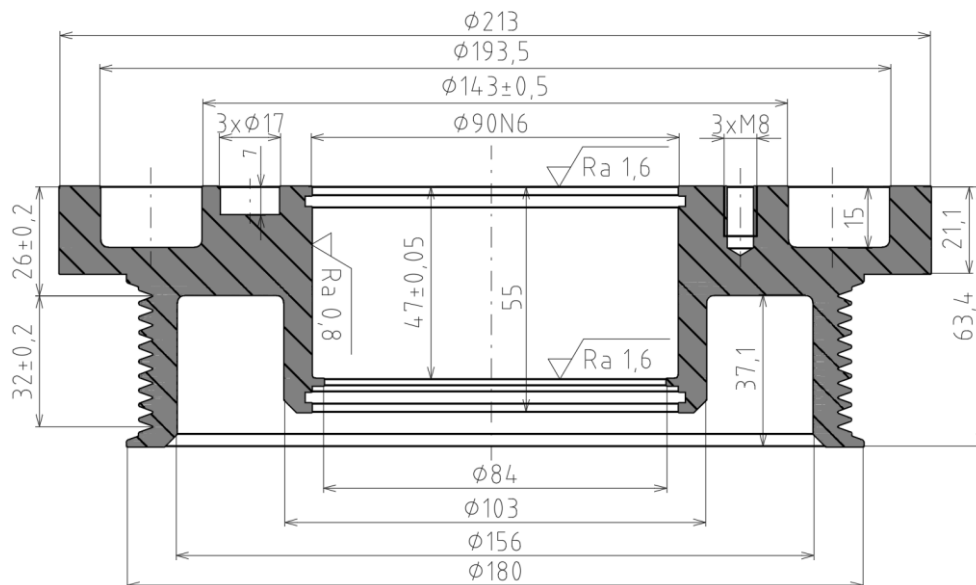
Jednou z často využívaných výrobních metod tváření za tepla je zápustkové kování. Deformace materiálu probíhá ve tvarových nástrojích, tzv. zápustkách. Před zpracováním kovu musí dojít k ohřevu polotovaru na příslušnou teplotu. Díky tomu disponují materiály nižší přetvárnou pevností a lze je tvářet nižšími silami. Mezi další podstatné výhody se řadí dobrá produktivita, ekonomičnosť výroby nebo výrazné zlepšení mechanických vlastností kovaných materiálů. Možné příklady výrobků tvářených zápustkovým kovááním se nachází na obrázku 1. [2; 4]



Obr. 1 Ukázky součástí vyrobených zápustkovým kovááním [5; 6].

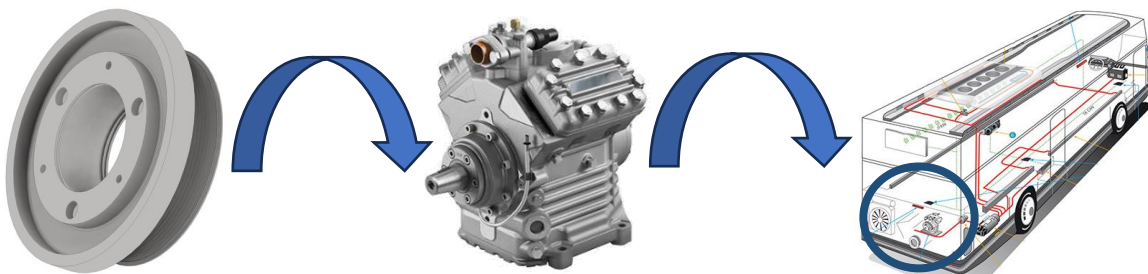
## 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Řešenou součástí je tělo spojky, která je se základními rozměry zobrazena v řezu na obrázku 2. Jedná se o tvarově mírně složitější rotační výrobek. Největší průměr dílce má velikost 213 mm a jeho maximální výška dosahuje hodnoty 63,4 mm. Na součásti se nachází jedna kruhová drážka o šířce 25 mm a hloubce 15 mm. Rovněž obsahuje tři závitové otvory M8 s tolerancí umístění 0,1 mm a tři mělké díry  $\varnothing 17$  mm s přesností H7 a úhlovou roztečí  $120^\circ$ . Uprostřed součásti se nachází díra o průměru 90 mm s tolerancí N6, ve které se vyskytuje tenký rotační výstupek o výšce 1,5 mm a  $\varnothing 84$  mm. Spojka disponuje jemným drážkováním o délce  $32 \pm 0,2$  mm. Dalším tvarovým prvkem je zahlobnění s hloubkou 37,1 mm. Prochází celým obvodem součásti a je vymezené průměry 156 mm a 103 mm, viz obr. 2. Její celková drsnost odpovídá  $Ra = 3,2 \mu\text{m}$ . Na některých plochách je požadována drsnost povrchu až  $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ . Ostatní technické a rozměrové detaily se nachází ve výkresové dokumentaci (2024\_DP\_217110\_S01). Výroba bude probíhat v brněnské firmě Zetor Kovárna s.r.o.



Obr. 2 Schématická geometrie průřezu těla spojky s vybranými rozměry.

Pro zaváděnou výrobu se požaduje zhotovit 80 000 kusů za rok. Řešený výrobek je konstrukční součástí elektromagnetických systémů (obr. 3) pro moderní chladicí zařízení, které se používají například v automobilovém průmyslu. Spojka se nachází na hnací hřídeli v kompresorech, které mohou mít různý počet válců a jsou základní součástí klimatizačních jednotek. Požadavky na dílec jsou dobrá odolnost vůči opotřebení, malá hmotnost, dobrá obrobitelnost nebo nízká cena v poměru s dobrými mechanickými vlastnostmi spojky v jejím celém průřezu. [7; 8; 9; 11]



Obr. 3 Ilustrační obrázek spojky a příklad jejího použití [9].

Pro výrobu součásti byla zvolena nízkouhliková ocel 12 020 (ČSN 41 2020). Ekvivalentem dle německé normy DIN 17 210-84 je Ck 15 nebo C16E dle EN 10084. Uvedený materiál byl zvolen z důvodu jeho velmi dobré obrobitelnosti a také tvárnosti, a to za tepla i za studena. Její mechanické vlastnosti a chemické složení jsou pro zvažované použití vyhovující. [8; 10]

Specifikace konkrétních hodnot je blíže popsána v tabulkách 1 a 2. Zvolená ocel je vhodná pro chemicko-tepelné zpracování, například cementování. Značného zvýšení kvality a životnosti výrobku se dosahuje při zařazení samotného tepelného zpracování, které zcela zásadně mění mechanické vlastnosti ocelí třídy 12. Konkrétní způsob lze předepsat s ohledem na zvolenou výrobní variantu. Rozsahy teplot pro různé případy jsou uvedeny v příloze 1. [8; 10; 11]

Tab. 1 Předepsané rozsahy chemického složení nízkouhlíkové oceli 12 020. [8; 10]

Uhlík [%]	Mangan [%]	Křemík [%]	Chróm [%]
0,13 až 0,20	0,60 až 0,90	0,15 až 0,40	Max. 0,25
Nikl [%]	Měď [%]	Fosfor [%]	Síra [%]
max. 0,30	max. 0,30	0,040	0,040

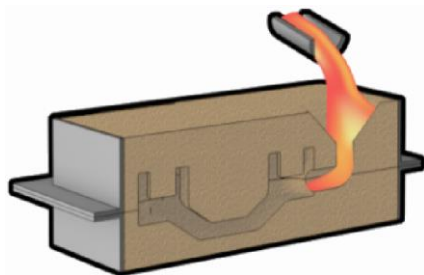
Tab. 2 Mechanické a jiné vlastnosti oceli 12 020. [8; 10]

$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	Tvrdost [HBW]	$A_5$ [%]	Z [%]	Svařitelnost
min. 225	min. 390	min. 111	26	55	zaručená

## 1.1 Variantní řešení výroby

Řešenou součást lze vyrobit mnoha různými způsoby. Pro výběr vhodné výrobní technologie se hodnotí několik důležitých parametrů, například vyrobiteľnost (rozměrová přesnost, dosažení požadovaných vlastností), produktivita (automatizace, množství odpadu), ekonomičnost nebo obtížnost zpracování zvoleného materiálu. Důležité je najít optimální kombinaci mezi všemi posuzovanými faktory, kterých je ve skutečnosti mnohem více. Z rozměrových charakteristik vyráběné součásti je zřejmé, že pro dosažení všech rozměrových a geometrických tolerancí spojky se musí dílec dokončit obráběním. Pro výrobu základního tvaru je zvažováno [12; 13]:

- Odlévání – výrobní metoda, při které dochází k natavení kovu a následně k jeho odlití do dutiny formy (obr. 4). Po ztuhnutí dochází ke vzniku součásti, tzv. odlitku. Řešený dílec lze vyrobit například gravitačním litím, kterým lze zhotovit různě velké a tvarově složité dílce. Z hlediska vyrobiteľnost jsou problémem požadované přesnosti spojky, například geometrické tolerance či drsnost povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Při velké automatizaci výroby se jedná poměrně produktivní metodu. Pro výrobu 80 000 kusů je vyhovující. Nevýhodou je volba oceli 12 020, která není pro odlévání použitelná. Další problém nastává kvůli velkému smrštění oceli při jejím nerovnoměrném chladnutí, které zvyšuje riziko vzniku vad pro zvažovanou výrobu spojky. Pro tento problém existují technická řešení, ale nejsou příliš vhodná. Z hlediska požadovaných mechanických vlastností jsou odlitky nevhodné. Velkým mínusem je nedostupnost výrobního zařízení firmy. [14; 15]



a) 3D model

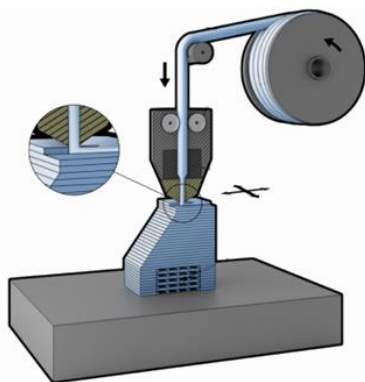


b) praxe

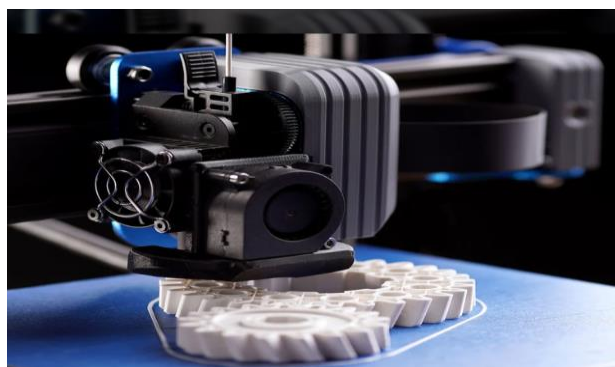
Obr. 4 3D model odlévání a jeho ukázka v praxi [15; 16].



- 3D tisk – jedná se o aditivní metodu, při které se materiál ve zvolené formě prášku nebo drátu postupně přidává, tzn. vrství. Následně se tepelným působením speče. Principem je primární tvorba modelu, který se rozřeže na jednotlivé vrstvy podle tvaru a vybrané technologie, například WAAM nebo FDM (obr. 5). Pro tisk lze použít široká nabídka kovů, avšak zvolená ocel 12 020 pro výrobu 3D tiskem není vhodná. Při výrobě vzniká pouze minimální odpad. Je vhodná pro tvarově složité anebo odlehčené součásti, které jsou jinými metodami nevyrobitelné. Disponuje celkem dobrou tvarovou přesností a kvalitou povrchu, ale pro vyšší přesnosti součástí, například drsnost  $Ra = 0,8 \mu\text{m}$  nebo tolerance N6, se musí dále dokončit jinou technologií. Nevýhodou je omezená velikost výtisků. Dalším výrazným problémem jsou velmi dlouhé výrobní časy, které jsou pro vyráběnou sérii 80 000 kusů ekonomicky nerentabilní. Velmi nákladné je rovněž pořízení nového výrobního zařízení, kterým výrobní podnik nedisponuje. Mechanické vlastnosti výtisků nejsou pro zvažované použití spojky dostačující. S ohledem na všechny výše uvedené důvody jsou dále zvažovány jiné varianty výroby. [17; 18; 19]



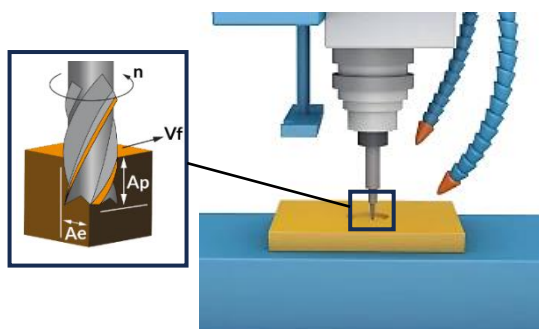
a) 3D model tisku



b) praxe

Obr. 5 3D model principu metody FDM a její ukázka v praxi [17; 19].

- Obrábění – základním principem je postupný úběr materiálu (obr. 6) z polotovaru ve formě třísek, které představují vznik odpadu. I běžným užitím uvedené technologie lze dosáhnout velmi přesných rozměrových a geometrických hodnot. Nejnižší požadovaná drsnost povrchu spojky  $Ra = 0,8 \mu\text{m}$  je dosažitelná. Díky její všestrannosti lze vyrábět rozličné tvary, kterými dílec disponuje. Z těchto hledisek je pro výrobu řešeného dílce vyhovující. Stanovený materiál 12 020 je pro obrábění vhodný. Při použití moderního a automatizovaného CNC zařízení se jedná o velmi produktivní metodu vhodnou i pro 80 000 kusů. Problémem řešeného dílce je jeho větší tvarová složitost, tj. nutnost použití více obráběcích metod, čímž dojde ke snížení produktivity. Hlavním nedostatkem při výrobě geometrie spojky z běžného polotovaru je vznik velkého množství odpadu. Pro řešený návrh výroby se jedná o vhodnou variantu pouze pro finální dokončení součásti, například z tvářeného předkovku. Proto jsou zvažovány další možnosti výroby. [4; 20]



a) Schéma principu obrábění – frézování

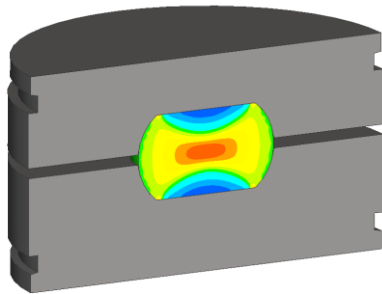


b) praxe

Obr. 6 3D model a ukázka z praxe – obrábění [20; 22].



- Zápustkové kování – jde o objemové zpracování ohřátého materiálu (obr. 7) v dutinách nástrojů nazývaných zápustky, které se běžně skládají z pohyblivé vrchní a statické spodní části. Jedná se o produktivní technologii vhodnou pro malosériové až hromadné zakázky. Pro výrobu osmdesáti tisíce kusů je vyhovující. Z materiálového hlediska je ocel 12 020 dobře kovatelná. Jedná se o velmi efektivní metodu, při které vzniká pouze minimálním množství odpadu. Další velkou výhodou je výrazné zlepšení mechanických vlastností zpracovaných dílců. Z tohoto hlediska je kování pro zvažované účely spojky vhodné. Mírným nedostatkem je vyšší energetická náročnost provozu nebo náklady na pořízení nových výrobních strojů. S tím se pojí zásadní výhoda, jelikož výrobní podnik potřebným zařízením disponuje. K nevýhodám patří například nedosažení požadované kvality povrchu  $Ra = 0,8 \mu\text{m}$  anebo přesností některých rozměrů, například geometrické tolerance házení 0,05. Proto se musí výrobek na hotovo dokončit jinou technologií, třeba obráběním. Firma rovněž disponuje potřebným zařízením, ale dokončení lze realizovat také v kooperaci s jinou výrobní společností. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem se jeví zápustkové kování jako vhodná výrobní metoda. [2; 13; 21]



a) simulace kování



b) praktická výroba

Obr. 7 3D model a ukázky z praxe – zápustkové kování [22].

Na základě posouzení variantních návrhů výroby je zvolena technologie zápustkového kování. Z uvažovaných možností se jedná o nejvhodnější metodu. Její zvolení je provedeno s ohledem na všechny posuzované parametry, například velikost série, požadované mechanické vlastnosti, ekonomičnost výroby nebo dispozice výrobního zařízení podniku. Navržená metoda výroby lze realizovat například na bucharech anebo na svislých kovací lisech (obr. 8).



a) buchar



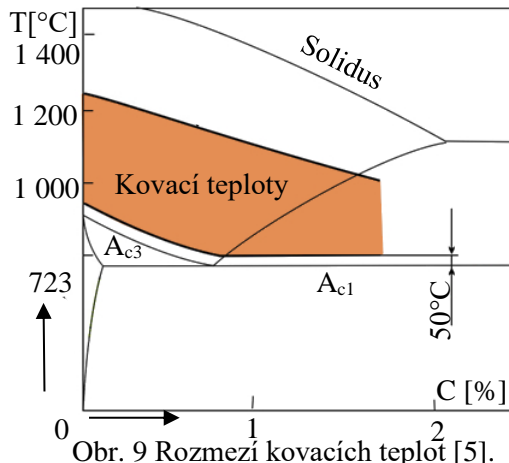
b) svislý kovací lis

Obr. 8 Ukázka kovacích strojů [23].

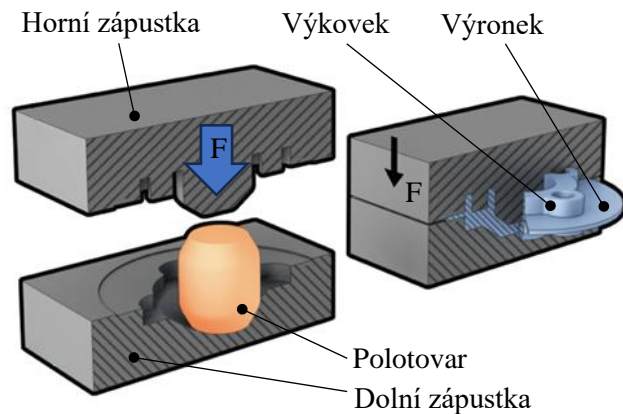
S ohledem na typ, složitější tvar a členitost výrobku, počet vyráběných kusů, který činí 80 000 součástí anebo dostupnost strojního zařízení výrobní společnosti Zetor Kovárna s.r.o. bude výroba zápustkovým kovááním probíhat na svislých kovacích lisech LZK. Pro zvolenou variantu řešení bude zaměřena teoretická i praktická část práce.

## 2 TECHNOLOGIE ZÁPUSTOVÉHO KOVÁNÍ

Zápustkové kování se řadí mezi metody objemového tváření za tepla, při kterém dochází ke zpracování kovů v plastickém stavu. Výroba nastává při kovací teplotách (obr. 9), které se nachází v oblasti nad teplotou rekrytalizace. Při plastické deformaci téměř nedochází ke zpevnění materiálu. Požadovaného tvaru výrobku se dosahuje výraznou změnou průřezu výchozího materiálu působením vnějších sil. Jejich důsledkem dojde k řízenému přesunu kovu. Přemístění se realizuje v dutině zápustky, která má tvar vyráběného výkovku anebo předkovku. Při zápustkovém kování na tvářecím lisu se kvůli bezpečnostním důvodům používají otevřené zápustky (obr. 10), aby z nich mohl v případě potřeby vytéct ven nadbytečný kov. [2; 12; 13]

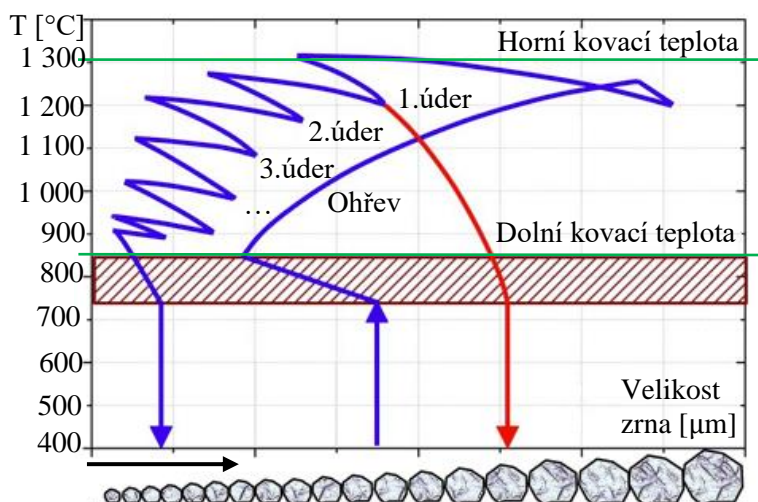


Obr. 9 Rozmezí kovací teplot [5].

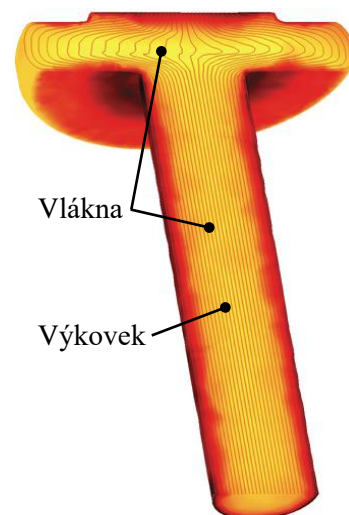


Obr. 10 Schéma principu zápustkového kování [10].

Důležitou úlohou kování je odstranění hrubé lící struktury a metalurgických vad vzniklých při výrobě oceli, které jsou nežádoucí. Tvářením za tepla se zrno zjemňuje, ale ihned působením vlastního tepla rekrytalizuje a zvětší se. Protože při kování teplota materiálu klesá, dochází tak ke zpomalení rekrytalizace, tzn. zrno tolik neroste (obr. 11). Při současném průběhu primární rekrytalizace a opakované obnově zrna je umožněno takřka neomezené přetvoření. Důležité je správné nastavení dokovací teploty – čím je nižší, tím je jemnější zrno a patrnější směr protažení krystalů. Její vliv se projevuje na výsledných mechanických vlastnostech výkovek. [2; 12; 13]



Obr. 11 Kovací režim v závislosti na velikosti zrna a na teplotě [2].



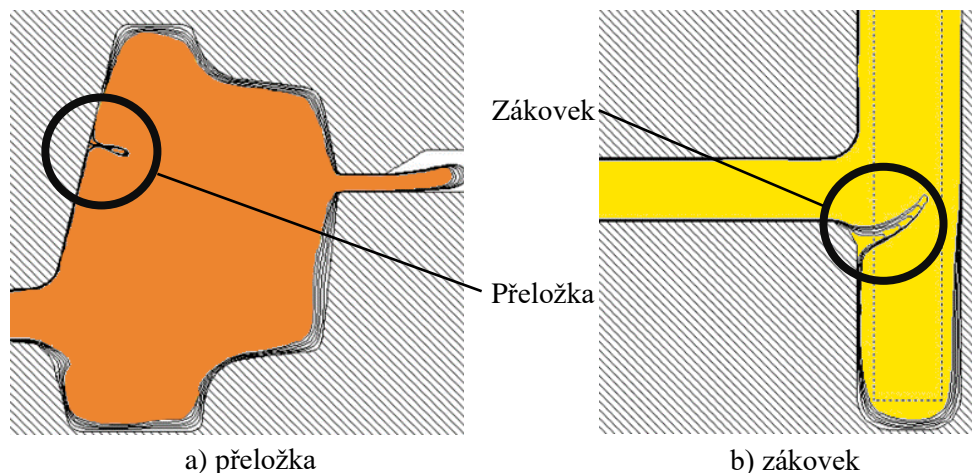
Obr. 12 Průběh vláken [7].

Dalším charakteristickým jevem při kování je vznik vláknité struktury (obr. 12) v přetvářených materiálech. K její tvorbě dochází v důsledku přítomnosti nečistot v povrchových vrstvách krystalů oceli, které nepodléhají rekrytalizaci. Vzniklou texturu již nelze žádným tvářecím pochodem ani tepelným zpracováním odstranit. Důkladné prokování a správný průběh vláken mají příznivý vliv na mechanické vlastnosti zpracovaných výkovek. [1; 12; 21]

## 2.1 Technologičnost

Při navrhování zápusťkových výkovků se musí přihlížet nejen k potřebnému tvaru výrobku, ale také k možnosti bezvadné a levné výroby. Dalšími určujícími faktory jsou například vlivy na trvanlivost zápusťek nebo na mechanické vlastnosti výkovků. Příklady všeobecných pravidel pro jejich vhodnou konstrukci lze shrnout do několika bodů [12; 13; 14; 21; 24]:

- správná volba materiálu – dobře tvárné oceli, ovlivnění obsahem uhlíku a další prvků,
- polotovary – má být pěchován a neměl by být protlačován,
- jednoduché tvary, dostatečně velké poloměry, přechody a úkosy,
- předkovávat pouze nezbytně nutné otvory, například větší než 10 mm,
- volit co nejvíce neobráběných ploch – optimálně pouze plochy kované na finální tvar,
- vyhnout se tvarově podobným symetrickým výkovkům – nákladná výroba zápusťek,
- omezit výskyt malých výstupků a počet blízko sebe nacházejících se žeber,
- tenké průřezy rychle chladnou – nevhodný vznik velkých pnutí a deformací ve výkovku,
- musí se brát v úvahu rozdílné smršťování dlouhých a krátkých částí dílců,
- zohlednění toku kovu – malé poloměry a ostré přechody způsobují vznik vad (obr. 13),
- mezi velkými rozdíly průřezů navrhovat plynulé přechody,
- dosažení velmi přesných a hladkých ploch – zařazení kalibrace,
- dělicí plochy volit rovné oproti lomeným – snazší a levnější výroba nástrojů,
- snaha navrhovat dostatečně velké technologické roviny kvůli upnutí při obrábění,
- zaplňování formy – vhodnější pěchováním oproti vtláčování.



Obr. 13 Znázornění možných typů vad – přeložka a zároveň [24].

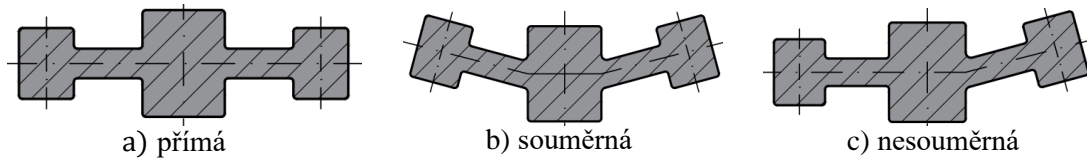
## 2.2 Návrh výkovku

K velmi důležité části návrhu výroby patří tvorba výkovku, která má podstatný vliv na volbu polotovaru, konstrukci zápusťek nebo míru zmetkovitosti. Pro správné určení všech parametrů se primárně vychází z výkresu součásti (rozměry, materiál) a podle uvažovaného stroje. Při jeho tvorbě lze postupovat na základě různých doporučení [12; 13; 21; 25; 26; 27; 28]:

- Hmotnost výkovku – základní údaj, který je důležitý pro stanovení dalších parametrů, například mezních úchylek nebo hmotnosti polotovaru. V praxi se určuje výpočetními softwary anebo v ojedinělých případech ručními analytickými metodami. [21; 26]
- Tvar dělicí roviny – existuje několik základních druhů, mezi které patří například přímé, souměrné nebo nesouměrně lomené roviny (obr. 14). Plochy určují hranici mezi horní a spodní částí výkovku. Jejich pozice se stanovuje s ohledem na technologické hledisko výroby, tzn. vyjmutí ze zápusťek, dle výronkové drážky nebo tečení materiálu. [21; 26]
- Druh používané oceli – tvářený materiál má podstatný vliv na průběh výroby. Slouží na určení stupně obtížnosti kování, což závisí hlavně na chemickém složení kovu. [20; 26]

Vysoce legované oceli s velkým obsahem uhlíku se špatně tváří a tím způsobují větší opotřebování zápustek. Rozlišují se dva základní druhy [26]:

- Skupina M1 – ocel s obsahem C do 0,65 % a obsahem legujících prvků (Mn, Ni, Cr, Mo, V, W) do 5 % hmotnosti,
- Skupina M2 – ocel s množstvím uhlíku nad 0,65 % nebo celkovým obsahem (Mn, Ni, Cr, Mo, V, W) nad 5 % hmotnosti.



Obr. 14 Příklady různých typů dělicích rovin [26].

- Ukazatel členitosti tvaru – zahrnuje působení vlivu rozměrových variací různě tlustých průřezů stěn. Důvodem je rozdílné smrštění nebo nestejně opotřebení zápustky. Jedná se o poměr hmotností dvou těles – výkovku a jeho zvětšeného obalu. Z výsledku se dle přílohy 2a určí, do které skupiny řešený výkovek patří. Stanoví se vztahem [26]:

$$S = \frac{m_{\text{výk}}}{m_{\text{ot}}} [-], \quad (2.1)$$

kde:  $m_{\text{výk}}$  – hmotnost výkovku [kg],

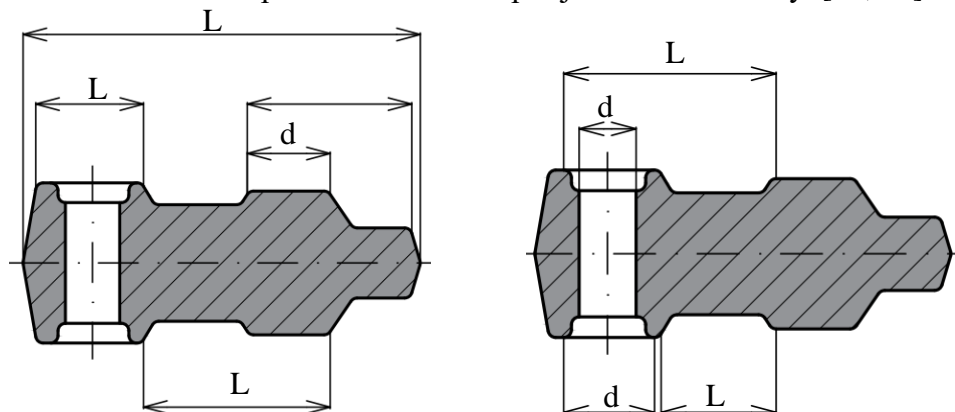
$m_{\text{ot}}$  – hmotnost obalového tělesa výkovku [kg],

$$\text{kde: } m_{\text{ot}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \cdot \rho \text{ [kg]}, \quad (2.2)$$

kde:  $h$  – výška obalu [mm],

$\rho$  – hustota oceli [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

- Mezní úchytky a minimální přídatky – vztahují se k jednotlivým druhům rozměrů a tvarů. Úchytky představují velikost odchylky rozměrů od jejich základní hodnoty. Některé z nich mají charakter přídatku materiálu, například na obrábění, které se určují pro délku, šířku nebo výšku (příloha 2a). Dle příslušných tvarových nebo rozměrových charakteristik se rozlišují na základě normy ČSN EN 10 243-1 úchytky [13; 21; 26]:
  - Délky, šířky a výšky – jejich hodnoty se vztahují na všechny rozměry (mimo rozteči) výkovku. Určují se pro největší rozměr. Při malých rozdílech úchylek se doporučuje hodnoty sjednotit pro snadnější zpracování výkresů a provedení kontroly. Stanovují se pro vnitřní a vnější rozměry (obr. 15) dle příslušné tabulky v příloze 2a, dle které se stanoví také hodnota přídatku materiálu pro jednotlivé rozměry. [21; 26]

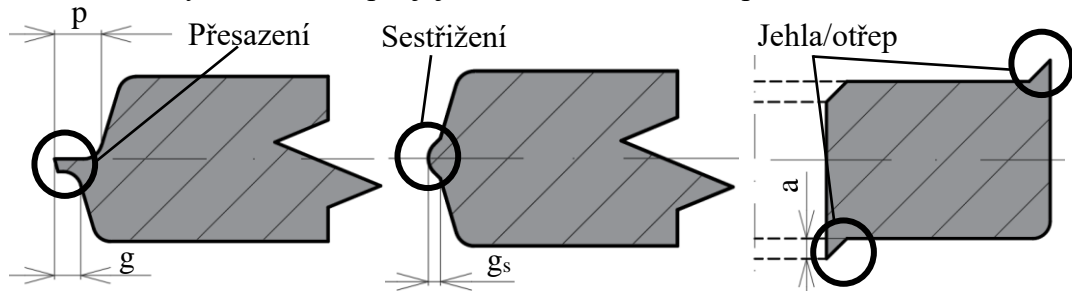


Obr. 15 Vnitřní a vnější rozměry výkovku [26].

- Děrované otvory – tolerance se určují podle přílohy 2a, ale kladné a záporné hodnoty se musí navzájem zaměnit. Běžně se používají mezní úchytky pro největší průměr nebo délku součásti. Jejich hodnota se následně musí uvést na konstrukčním výkresu výkovku u všech příslušných rozměrů anebo souhrnně v tabulkovém dodatku. [26]

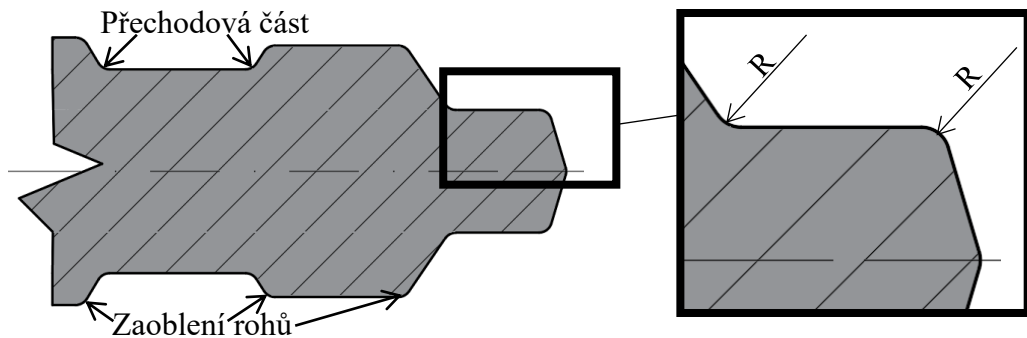


- Přesazení, otřepty a jehly – přesazení udává přípustný rozsah souososti mezi bodem na jedné a odpovídajícím bodem na druhé protilehlé straně dělicí plochy ve směrech rovnoběžných s dělicí rovinou zápustky. Používají se bez ohledu na ostatní úchytky. Jeho velikost závisí na hmotnosti dílce nebo tvaru dělicí plochy použitých nástrojů, viz obr. 16. Otřep vzniká při ostřížení materiálu. Jeho velikost se měří od stěny tělesa výkovku k hraně stříhu (obr. 16). Před konečným schválením výkresu výkovku se v něm musí vyznačit pozice jehel, pokud jsou dovoleny. Jejich tolerance se vztahují k hmotnosti výkovku. Postup k jejich určení se nachází v přílohách 2a a 3a. [21; 26]



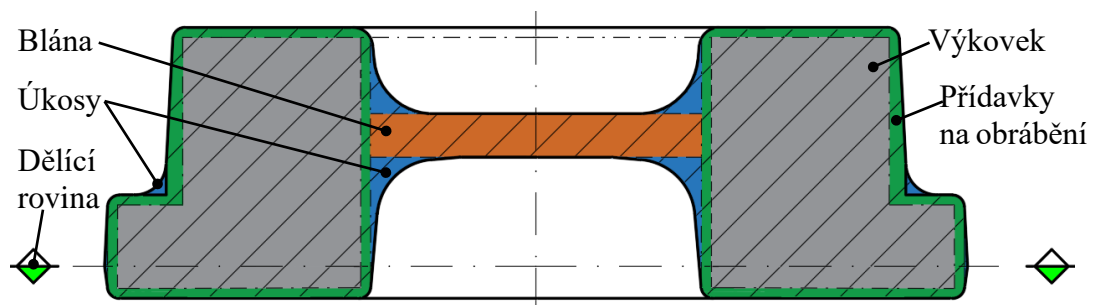
Obr. 16 Schémata pro znázornění přesazení, sestřížení a otřepu [7].

- Technologické přídavky – hotové součásti často nejsou svým tvarem vhodné ke kování v zápustkách. Proto se musí výkovek upravit, tzn. přidat materiál do těžko vyrobitelných míst, například malé díry, příliš členité tvary, úzké anebo hluboké vybrání. Mezi další druhy technologických přídavků patří několik dílčích podskupin [13; 21; 26]:
  - Zaoblení hran – ostré přechody jsou na výkovech nežádoucí. Proto se doporučuje jejich velikost zvolit co největší možnou, kterou konstrukce dovoluje. Hlavním důvodem zaoblení je usnadnění toku materiálu v dutině zápustek. Příklady různých tvarů zaoblení a hran jsou na obrázku 17. Hodnoty úchylek se nachází příloze 3a. Jejich velikost se určuje na základě výrobních zkušeností nebo dle norem. [21; 26]



Obr. 17 Příklad zaoblení a přechodů hran – součást a detail [26].

- Úkosy – používají se pro všechny kolmé plochy k dělicí rovině (obr. 18). Důvodem je snadné vyjímání výkovku ze zápustky nebo její nižší opotřebení. S ohledem na smrštění kovu při ochlazování výkovku se volí vnitřní úhly úkosů větší než vnější. Jejich velikost se určuje dle zkušeností nebo podle norem (příloha 3b). [12; 21; 26]



Obr. 18 Schéma přídavků na výkovku [13; 27].

- Blána – má funkci nahrazení průchozí díry dodatečným materiálem, tzv. přepážkou, který se později ostříhuje. Umístění blány se většinou navrhuje na základě polohy dělicí roviny nebo se stanovuje s ohledem na složitost tvaru výkovku. Její tloušťku (obr. 19) lze určit dle doporučení normy ČSN 42 9030 (příloha 2b), podle zkušenosti technologů nebo na základě různých výpočetních vztahů: [26; 27; 28]:

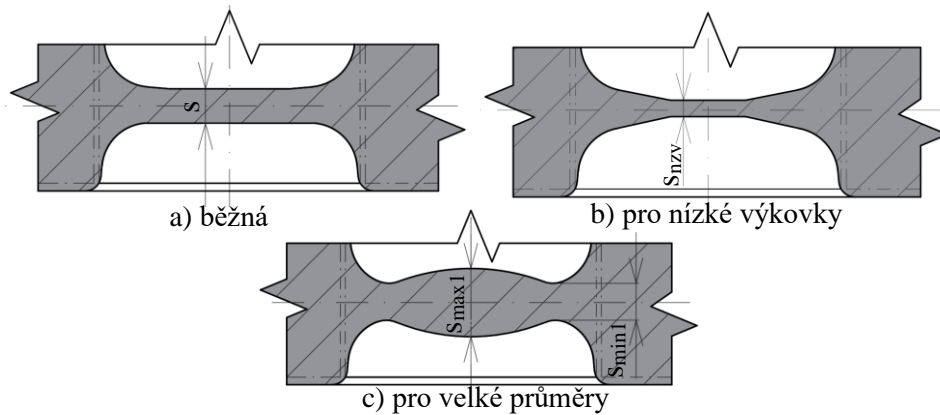
$$s = 0,45 \cdot \sqrt{D_v - 0,25 \cdot h_1 - 5} + 0,6 \cdot h_1 \text{ [mm]}, \quad (2.3)$$

kde:  $D_v$  – největší průměr otvoru [mm],

$h_1$  – polovina výšky díry [mm].

Jestliže pro velikost otvoru platí  $\varnothing d_o - 1,25 \cdot R > 26$ , tak se doporučuje zvolit blánu se středovým úkosem (obr. 19). Pro velké průměry výkovků poté platí podmínky  $s_{min1} = 0,65 \cdot s$  a  $s_{max1} = 1,35 \cdot s$ . Pro nízké výkovky se doporučuje zvolit tloušťku blány na základě dvou podmínek  $s_{max2} = 5 \cdot s$  a  $s_{min2} = s$ . Pro výpočet jejího rozměru  $s_{nzv}$  se následně vychází z jednoduchého vzorce [27]:

$$s_{nzv} = 0,4 \cdot \sqrt{D_v} \text{ [mm]}. \quad (2.4)$$



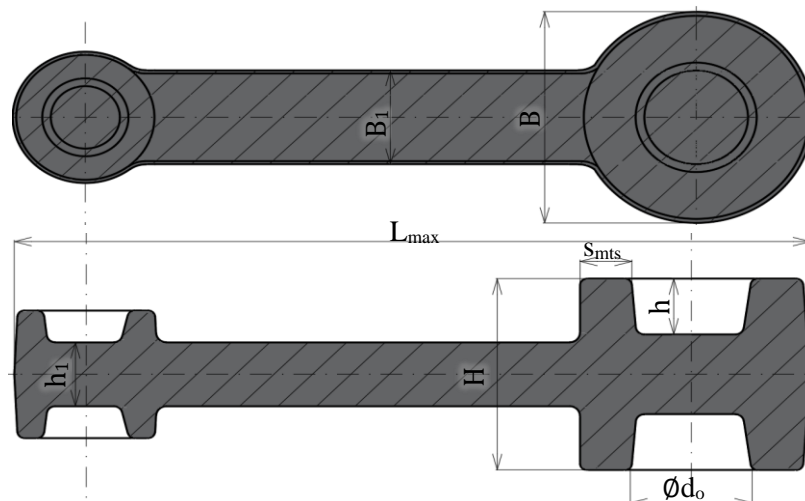
Obr. 19 Schématické příklady různých typů kovacích blán [27].

- Nejmenší tloušťka dna, stěn a žebel – příliš slabé stěny výkovků způsobují prudké ochlazování materiálu. Důsledkem nehomogenního a rychlého chladnutí je zhoršení zatékání kovu do úzkých oblastí a zvýšení vnitřního pnutí v ocelích. Dochází také ke snížení životnosti zápustek kvůli jejich většímu opotřebení. Pro ocelové výkovky se doporučuje stanovit minimální tloušťka stěn  $s_{mts}$  podle (obr. 20) [25; 26; 27; 28]:

$$s_{mts} = 0,158 \cdot \sqrt{L_{max} \cdot h_s} \text{ [mm]}, \quad (2.5)$$

kde:  $L_{max}$  – největší délka výkovku ve směru kolmo k rázu [mm],

$h_s$  – výška stěny nebo žebra na výkovku [mm].



Obr. 20 Nejmenší rozměry výkovku [25; 26].

## 2.3 Polotovar

Pro zajištění ekonomické a efektivní výroby musí být součástí všech návrhů výpočet rozměrů výchozího polotovaru. Pro zápusťkové kování na svislých kovacíh lisech je jeho nejčastějším typem tyč s kruhovým průřezem. Pro výpočet velikosti uvedeného tvaru se vychází ze znalosti objemu řešeného výkovku, který se určuje analytickým výpočtem nebo s pomocí počítačových softwarů. Vzhledem ke stálé platnosti zákona o zachování objemu se musí objem polotovaru a výkovku rovnat avšak k němu je nezbytné připočíst objem předpokládaného výronku a opalu. Postup a vztahy pro stanovení rozměrů polotovaru lze shrnout do několika bodů [13; 21; 29]:

$$V_{\text{pol}} = V_{\text{výk}} + V_{\text{výr}} + V_{\text{opl}} \text{ [mm}^3\text{]}, \quad (2.6)$$

kde:  $V_{\text{pol}}$  – objem polotovaru [mm<sup>3</sup>],

$V_{\text{výk}}$  – objem výkovku [mm<sup>3</sup>],

$V_{\text{výr}}$  – objem výronku [mm<sup>3</sup>],

$V_{\text{opl}}$  – objem opalu [mm<sup>3</sup>].

- Výsledný objem výronku  $V_{\text{výr}}$  se vypočítá dle vztahu:

$$V_{\text{výr}} = o_v \cdot \left[ b \cdot h_v + \left( N + \frac{h_v}{2} \right) \cdot B_z \right] \text{ [mm}^3\text{]}, \quad (2.7)$$

kde:  $b_m$  – šířka můstku [mm],

$h_v$  – výška můstku [mm],

$B_z$  – délka zatečení kovu [mm],

$N$  – výška zásobníku [mm],

kde:  $N = h_v + n$  [mm],

kde:  $n$  – výška zvětšení zásobníku [mm],

$o_{bv}$  – obvod výkovku bez výronku [mm],

kde:  $o_{bv} = \pi \cdot D_v$  [mm].

$$(2.8)$$

- Doprovodným jevem při kování oceli za tepla je vznik opalu. Jeho objem  $V_{\text{opl}}$  se určí:

$$V_{\text{opl}} = k \cdot (V_{\text{výk}} \cdot V_{\text{výr}}) \text{ [mm}^3\text{]}, \quad (2.10)$$

kde:  $k$  – koeficient pro indukční ohřev;  $k = (0,005 \text{ až } 0,010)$  [-].

Rozměry polotovaru musí respektovat pravidlo pěchování, tj. štíhlostní poměr. Konkrétně se jedná o poměr průměru ku délce špalíku. Slouží pro ověření možného nekontrolovatelného vybočení polotovaru do strany z důvodu ztráty stability v počátku jeho pěchování. Odvozený vzorec pro výpočet výchozího průměru polotovaru [21; 29; 30]:

$$D_o = 1,08 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{\text{pol}}}{\lambda}} \text{ [mm]}, \quad (2.11)$$

kde:  $\lambda$  – koeficient štíhlostního poměru s rozsahem (1,5 ÷ 2,8) [-].

Určení přesné délky polotovaru se provádí dle odvozeného vztahu [21; 29; 30]:

$$L_o = \frac{4 \cdot V_{\text{pol}}}{\pi \cdot D_o^2} \text{ [mm]}. \quad (2.12)$$

Následně je nezbytné provést ověření štíhlostního poměru [21; 29]:

$$\lambda = \frac{L_o}{D_o} = [-]. \quad (2.13)$$

Výsledek uvedeného výpočtu se musí nacházet v intervalu štíhlostního poměru (1,5 ÷ 2,8).

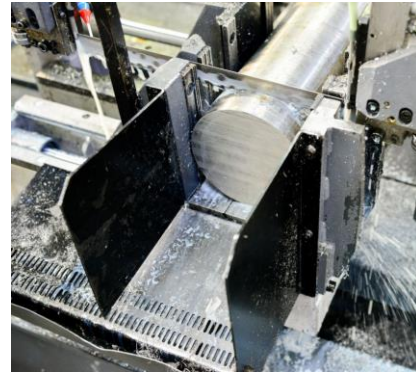
## 2.4 Přípravné operace

Pokud není jako vstupní materiál využit předkovek z předchozí operace kování, tak se používají hutní válcované polotovary. Nejčastěji se jedná o tyče s kruhovým nebo čtvercovým průřezem. Pro další zpracování se musí ocel rozdělit na konkrétní rozměry. Jejich délka nebo hmotnost se předem stanovují na základě potřeb zvolené výrobní metody. Jednotlivé technologie se hodnotí zejména dle kvality výsledné plochy polotovaru nebo ekonomičnosti procesu, tj. vzniklé ztráty na materiálu nebo jejich produktivita. Možné způsoby dělení polotovarů jsou [1; 12; 13; 14]:

- Upichování – obráběcí technologie (obr. 21), která probíhá na upichovacích automatech nebo univerzálních soustružích. Jejím využitím je méně časté. Používá se pro tyče kulatých průřezů. Hlavními výhodami jsou přesné rozměry polotovarů a hladké dělicí plochy bez stlačení. Mínusem jsou dlouhé výrobní časy. Dalšími nevýhodami jsou neekonomičnost kvůli značným ztrátám materiálu v podobě třísek a nízká produktivita. [12; 14]
- Řezání – způsob při kterém dochází ke ztrátě části materiálu ve formě třísek (obr. 22). Dělení probíhá převážně na pásových a kotoučových pilách. Lze řezat materiály pouze do určité tvrdosti. Polotovary jsou rozměrově přesné, řezná plocha má vysokou jakost a nedochází k její deformaci. Při kusovém dělení tyčí je méně produktivní. Výhodnější je řezání svazků, ale na úkor vyšších nároků na nástroje a strojní zařízení. [12; 14]

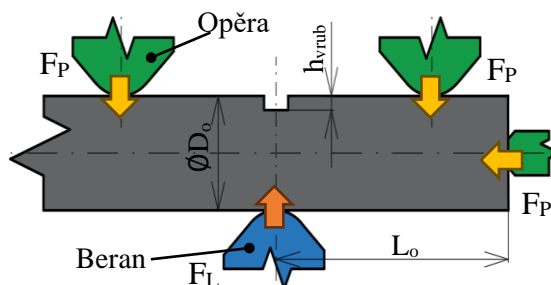


Obr. 21 Upichování kulatiny [20].

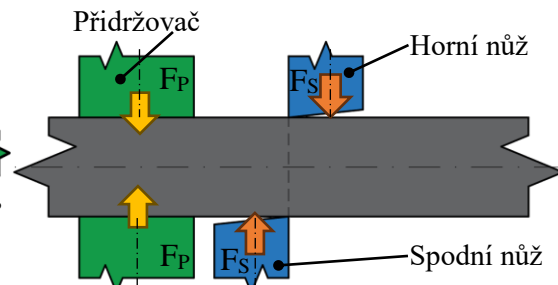


Obr. 22 Řezání tyče [22].

- Lámání – je určeno pro tvrdší oceli s  $R_m$  nad 700 MPa, pro těžko obrobitelné materiály a pro velké průměry tyčí. Používají se speciální lámací stroje. Před dělením se místo lomu nahřívá plamenem. Tím dojde k vytvoření potřebného vrubu a zmenší se plocha průřezu (obr. 23). Druhým používaným způsobem tvorby vrubu je nařiznutí pilou. Jedná se o poměrně produktivní a nízkoenergetický způsob. Nevýhodou je vznik nerovné čelní plochy nebo trhlin a jejich šíření do materiálu. [12; 13; 14]
- Stříhání – jedná se o nejrozšířenější způsob dělení ocelí (obr. 24). Velmi rychlá, levná a účinná technologie, která se dá dobře automatizovat. Lze dělit různé typy průřezů tyčí. Nejčastěji využívané stroje jsou klikové lisy. Za studena se stříhají menší průměry tyčí přibližně do 120 mm a měkčí materiály s mezí pevnosti do 400 MPa. Pro větší průměry nebo tvrdší oceli se zařazuje ohřev. Nevýhodou je potřeba přebrušování nástrojů, nižší kvalita střížné plochy nebo vznik otřepů, které se musí před kovááním odstranit. [1; 12]



Obr. 23 Technologie lámání [14; 21].



Obr. 24 Schéma metody stříhání [13; 14].



## 2.5 Ohřev polotovaru

Nedílnou součástí zápusťkového kování je ohřev zpracovávaného kovu. Se zvyšující se teplotou roste tvařitelnost kovových materiálů a snižuje se jejich deformační odpor. Potřebná tvářecí síla přitom klesá. Základním předpokladem pro využití plastických vlastností ocelí je správná volba rozsahu kovací teplot (obr. 9), které jsou vymezeny horní (HKT) a dolní (DKT) teplotou. Při překročení HKT vyvstává nebezpečí přehřátí nebo spálení kovu naopak DKT je omezena teplotou rekrytalizace. Při kvalitní a stabilizované výrobě se musí zavádět reprodukovatelnost ohřevu s nízkým kolísáním teploty u jednotlivých kusů. Důležité je provedení ohřevu v co nejkratším možném čase. Čím je rychlejší, tím větší jsou tepelná pnutí a tepelný spád, a zároveň vzniká tenčí vrstva okují a také nižší míra oduhlíčení. Ideální je homogenní rozložení teplotního pole v příčném i podélném průřezu polotovaru. Dále se musí dodržet přípustná rychlost ohřevu mezi povrchem ohřívajícího polotovaru a jeho středem. Početně se stanoví dle [2; 12; 27; 31]:

$$v_o = \frac{k_s \cdot a_t \cdot \Delta T}{t^2} \text{ [K} \cdot \text{h}^{-1}\text{]}, \quad (2.14)$$

kde:  $k_s$  – tvarový součinitel [-]; pro válec  $k_s = 5,6$ ,  
 $a_t$  – součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ],  
 $t$  – tloušťka ohřívajícího tělesa [m],  
 $\Delta T$  – přípustný teplotní rozdíl v ohřívající tělese [K].

Při ohřívání vznikají důsledkem rozdílné teploty středu a povrchu polotovaru tepelná pnutí. Vzhledem k jejich nadměrnému vzniku se zavádí výpočetní kontrola, podle které nesmí být překročeno vnitřní dovolené napětí dané vztahem [27, 31]:

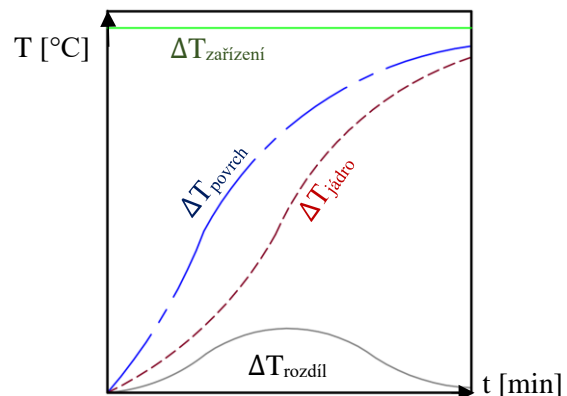
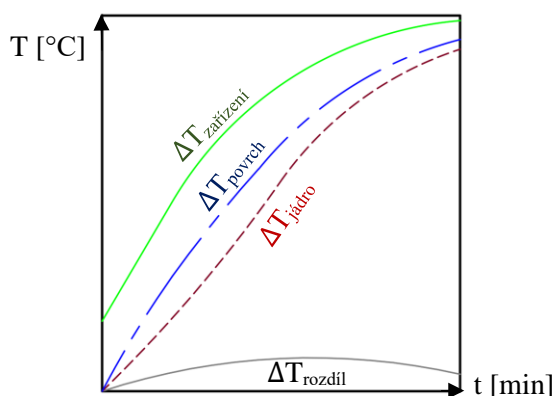
$$\sigma_m = (0,5 \div 0,67) \cdot R_m \text{ [MPa]}, \quad (2.15)$$

kde:  $R_m$  – mez pevnosti v tahu [MPa].

Přípustný rozdíl teplot je různý v závislosti na teplotě zařízení v okamžitu, kdy je do ní vkládán zpracovávaný polotovar, viz obr. 25 a obr. 26. Jedná se o řízený nebo konstantní režim ohřevu. Výpočetní metodou se určí dosazením do vzorce [27; 31]:

$$\Delta T = \frac{k_s \cdot \sigma_m}{\alpha_t \cdot E} \text{ [K]}, \quad (2.16)$$

kde:  $\alpha_t$  – teplotní délková roztažnost [ $\text{K}^{-1}$ ],  
 $E$  – modul pružnosti v tahu [MPa].



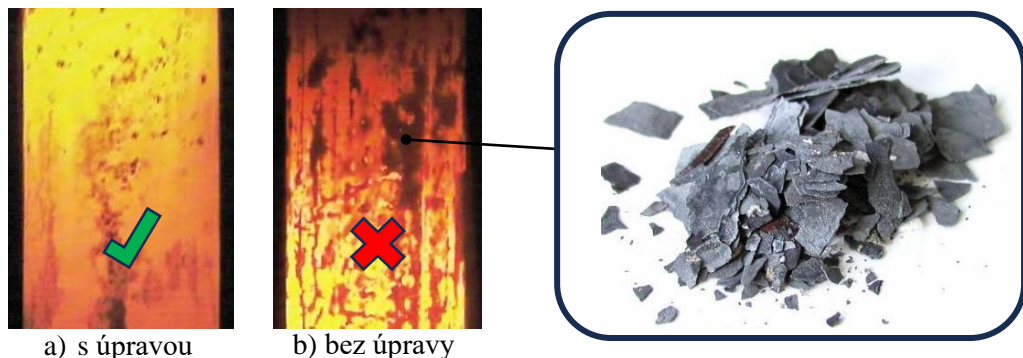
Obr. 25 Řízený teplotní režim ohřevu [27;31] Obr. 26 Konstantní teplotní režim ohřevu [27; 31].

Hlavním cílem správného postupu ohřevu ocelí je najít optimální rovnováhu mezi jednotlivými parametry a zajistit [2; 12; 27]:

- homogenní teplotní pole v celém průřezu a podél podélné osy polotovaru,
- zachovat jakost a celistvost materiálu,
- nejmenší vrstvu okují,
- minimální oduhlíčení povrchu.

Při nesprávném ohřevu mohou vznikat nežádoucí jevy nebo vady [2; 12; 13; 21]:

- **Přehřátí** – nastává při překročení hranice horní kovací teploty. Dochází ke zhrubnutí austenitického zrna a separaci síry na hranicích jeho zrn. Sulfidy zabrání vzniku jemné struktury i při následném tváření a ocel se znehodnotí. Nápravným řešením je dodatečné tepelné zpracování, například difuzním žháním s vyššími teplotami. [12; 13; 21]
- **Spálení** – dochází k němu při výrazném překročení hranice HKT. Způsobí natavení hranic austenitických zrn, ve kterých se začne rozpouštět síra nebo fosfor. Důsledkem je velká křehkost a značné zhoršení mechanických vlastností oceli. Materiál se nevratně poškodí a nelze další úpravou opravit. [12; 13; 21]
- **Oduhličení** – vzniká kvůli přebytečnému výskytu kyslíku na povrchu oceli při teplotách nad 900 °C. Dochází ke spalování uhlíku, který difuzí proniká z jádra na povrch. Proto může oduhličená vrstva dosahovat poměrně značných tloušťek a to až v řádech desetin milimetru. Dále má nepříznivý vliv na všechny vlastnosti, které jsou ovlivněné uhlíkem, například pevnost nebo povrchová tvrdost. Pro snížení rizika oduhličení je vhodné zařadit co nejkratší ohřev a používat pece s ochranou atmosférou. [12; 13; 21]
- **Oxidace** – nastává v důsledku styku ohřívané oceli s ovzduším pece při teplotách mezi 800 až 1 250 °C. Hlavní činitelé jsou kyslík, vodní pára, kysličník siřičitý nebo kyselina uhličitá. Na povrchu zpracovávaného materiálu se vytvoří vrstva okují, kde její tloušťka může být až několik milimetrů. Zavisí to na chemickém složení oceli nebo podmínkách ohřevu, tj. ohřívací teplota, celková doba ohřevu či pecní atmosféra. Ztráta materiálu se nazývá opal. Problémem okují je riziko jejich zakování. Následkem jsou poté například zhoršené mechanické vlastnosti a rozměrová kvalita povrchových vrstev nebo zvýšené opotřebení tvářecích nástrojů. Podstatného snížení tvorby oxidační vrstvy jde docílit použitím pecí s ochranou atmosférou anebo nanesením tzv. tekutého krytu. Jedná se například o aplikaci tekutého hliníku na povrch polotovaru, který lze podle potřeby ještě nastříkat vapeným mlékem. Sníží se tím tvorba okují (obr. 27), ale také míra oduhličení. Dále dojde také ke zpomalení času ochlazování oceli. Nevýhodou uvedené povrchové úpravy je větší časová a tím i ekonomická náročnost. [12; 13; 21; 32]



Obr. 27 Srovnání špalíků dle úpravy tekutým hliníkem, odstraněné (ochlazené) okuje [32; 33].

Pro ohřev kovů na potřebnou tvářecí teplotu rozlišujeme dva základní principy [2; 12; 13; 21]:

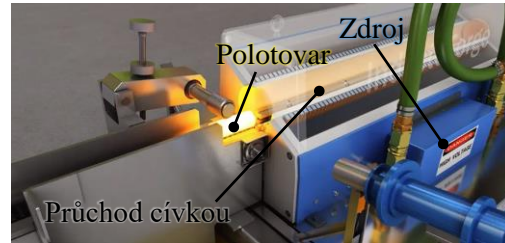
- **Nepřímý ohřev** – podstatou je ohřev polotovaru vnějším zdrojem. Mechanismy přenosu tepla jsou proudění (konvekce), sálání (radiace) anebo vedení (kondukce) například ve vozových, komorových (obr. 28) nebo průběžných plynových pecích. Tepelná energie vzniká nejčastěji spalováním plynu nebo minerálního oleje. Lze použít také elektrické odporové pece s nepřímým odporovým ohřevem. Uvedené způsoby jsou vhodné pro ohřev objemných polotovarů nebo předkovek, kde nezávisí na jejich tvarové složitosti. Další předností je také možnost zpracování velkého množství výrobků. Nedostatkem je delší doba ohřevu, díky které dochází k nadměrné tvorbě okují. Dalším nežádoucím doprovodným prvkem je částečné oduhličení povrchu dílců v důsledku vlivu chemické reakce polotovaru s atmosférou pece, která bývá standardně nechráněná. [2; 12; 13; 21]

- **Přímý ohřev** – je založen na využití elektrické energie a lze jej provádět indukčně nebo konduktivním způsobem. V principu jde o vyvinutí tepla přímo v samotném polotovaru. Jednou z používaných metod je přímý elektrický odporový ohřev. Princip jeho činnost funguje na základě Joulova zákona. Dochází k přímému prostupu elektrického proudu ohříváním polotovarem, který je připojen ke zdroji uzavřeného obvodu. Výhodami jsou velká rychlost ohřevu, minimalizace vzniku okují a oduhličení. Jako hlavní nedostatek se jeví potřeba velkého výkonu pro rozměrnější dílce. S tím je spojena vyšší energetická a ekonomická náročnost na zařízení pro ohřev. [2; 12; 13; 21; 36]

Nejvyužívanějším přímým způsobem je indukční ohřev, při kterém vzniká teplo vlivem indukovaných vířivých proudů v ohříváném materiálu na základě ohmického odporu. Polotovar se umísťuje do vinutí cívky, která je připojena na zdroj vysokofrekvenčního střídavého proudu (obr. 29). Nevýhodou je nerovnoměrnost prostupu vířivých proudů, kdy jejich intenzita směrem k jádru dílce klesá. Pro optimální účinnost se musí cívka přizpůsobit průřezu výrobku rozměry cívky a také použitím různého kmitočtu proudu. Výhodami jsou například krátká doba ohřevu, nízké zokuzení nebo oduhličení povrchu. Další předností je reprodukovatelnost a dobrá automatizace celého ohřívacího procesu. Hojně se používá pro všechny kruhové nebo profilové polotovary malých až středních průřezů. Jde o nejvíce používanou metodu ohřevu pro zápusťkové kování. [1; 12; 13; 21]



Obr. 28 Komorové pece [35].



Obr. 29 Indukční zařízení [36].

Další přípravnou operací před vložením polotovaru do zápusťky je odstraňování volně přilnavé vrstvy okují. Jedná se o standardně používaný úkon při kování běžných výkovků z ocelí. Pro odstranění okují existuje několik způsobů [2; 12; 21; 34]:

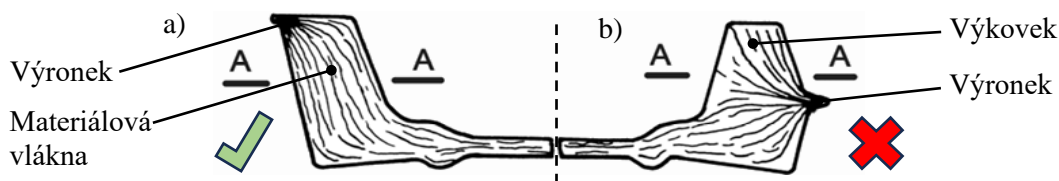
- **Napěchování** – polotovar se méně nebo více přetvoří za současného odloupení křehké oxidační vrstvy. Technologie se často používá i jako předkovací operace. Nedostatkem může být nedostatečné odstranění okují na celém povrchu polotovaru.
- **Tlaková voda (otryskání)** – principem je stříkání vodního média pod tlakem až 500 barů. Vlivem odpařující se vody, smršťování horkého povrchu a mechanické energie vodního paprsku se uvolňuje ulpívající vrstva okují (obr. 30). Metoda se dobře automatizuje do řízených výrobních linek. Proces nelze použít pro příliš malé průřezy polotovarů kvůli velkému riziku jejich nadměrného ochlazení. Dosedací plocha materiálu nemusí být plně očištěna. Používá se pro polotovary s většími průřezy a vyššími hmotnostmi.
- **Kartáče** – volně ulpělá vrstva okují se odstraňuje pomocí ocelovo drátěných kartáčů. Proces je vhodný pro automatizaci do kontinuálního provozu. Nedostatkem je poměrně velké a rychlé opotřebení kartáčů a tedy nutnost jejich časté výměny.



Obr. 30 Různé příklad metod na odstraňování okují [3; 21; 34].

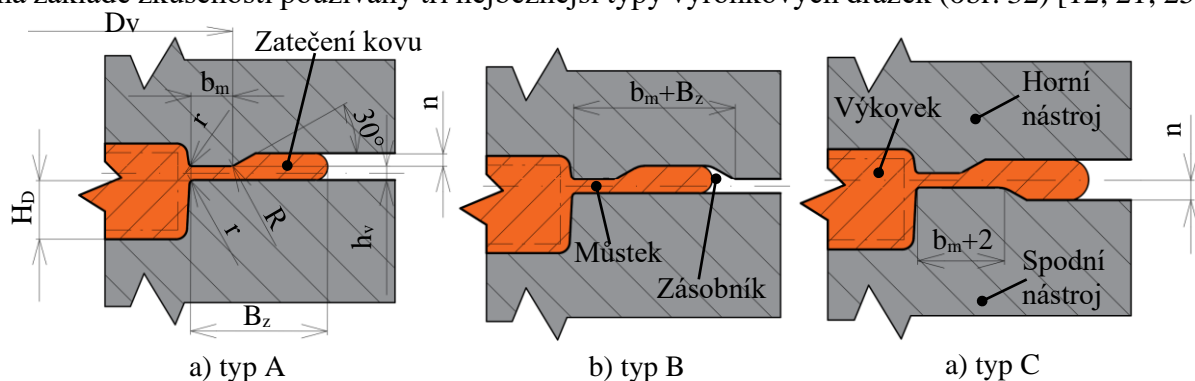
## 2.6 Výronková drážka

Při zápustkovém kování dochází během tváření k toku přebytečného materiálu do dělicí roviny mezi oběma zápustkami – nazývá se výronek. Vzniká ve výronkové drážce nástroje, která se konstruuje s ohledem na členitost nebo složitost výkovku. Dalším důležitým parametrem je snadná a bezvadná proveditelnost ostřížení výronku. Na obrázku 31 lze vidět velký rozdíl ve vzniklých deformacích výkovku po ostřížení výronku při jeho různém umístění. Z toho vyplývá pozitivní vliv jeho umístění v horní polovině. Pro vhodnější usazení výkovků do ostřihovacích nástrojů se výronek rovněž navrhuje v horní polovině zápustky. Mezi další důvody uvedeného umístění patří také pomalejší ohřev horní zápustky vlivem přestupu tepla, a zároveň chladnější můstek, což má pozitivní vliv na delší trvanlivost zápustek. Příliš ohřátý můstek není vhodný, protože zkracuje životnost tvářecích nástrojů. Dalším vlivným parametrem je výsledná tloušťka výronku, která závisí na mezeře v navržené dělicí rovině. [4; 14; 21; 25]



Obr. 31 Výkovek namáhaný na stříh (řez A-A) – poloha výronku a) vhodná; b) nevhodná [14].

Pro lisy se běžně volí otevřená drážka. Důvodem je konstantní zdvih stroje, při kterém na sebe zápustky nesmí dosedat. Jedná se o bezpečnostní opatření, aby nedošlo k jeho poškození. Další vliv mají také pružné deformace stojanu. Jejich velikost se pro každý lis uvádí jiná. Proto jsou na základě zkušeností používány tři nejběžnější typy výronkových drážek (obr. 32) [12; 21; 25]



Obr. 32 Schématické nákresy třech základních konstrukčních variant výronkových drážek [25].

Pro tvarově náročnější dílce se musí vyvinout větší měrné tlaky, tzn. tvářecí síly, čehož se docílí snížením výšky můstku případně zvětšením jeho délky. Tímto způsobem lze regulovat velikost výsledné kovací síly ve všech operacích, která je důležitá pro zatečení kovu a výronková drážka na ni má velký vliv. Čím je můstek nižší a kratší, tím se síla zvyšuje a naopak. Proto je velmi podstatné správné určení všech rozměrů drážky. Potřebné konstrukční výpočty [21; 25; 29; 30]:

- Výpočet výšky můstku podle vzorce odvozeného z nomogramu [29; 30]:

$$h_v = 0,1725 \cdot m_{\text{výk}}^{0,16} \cdot D_v^{0,5} \text{ [mm]}, \quad (2.17)$$

kde:  $D_v$  – maximální průměr výkovku [mm],  
 $m_{\text{výk}}$  – hmotnost výkovku [kg].

Hledaná výška můstku lze určit i z nomogramu dle normy ČSN 22 8306, viz příloha 4.

- Šířka můstku se zjistí podle vztahu [25; 29; 30]:

$$b_m \leq 3 \cdot h_v \text{ [mm]}. \quad (2.18)$$

- Hloubka zásobníku se stanoví [25; 29; 30]:

$$n = 0,4 \cdot h_v + 2 \text{ [mm]}. \quad (2.19)$$



- Výpočet poloměru přechodu dutiny do výronku [25; 29; 30]:

$$r = \frac{\sqrt{S_v}}{200} + 0,004 \cdot H_D \text{ [mm]}, \quad (2.20)$$

kde:  $S_v$  – obsah průmětu výkovku v dělicí rovině [ $\text{mm}^2$ ],

$$\text{kde: } S_v = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (2.21)$$

$H_D$  – výška odsazení dolní hrany drážky od spodní dutiny zápustky [ $\text{mm}^2$ ].

- Poloměr zaoblení přechodu do zásobníku se určí dosazením do vztahu [25; 29; 30]:

$$R = \frac{h_v}{2} \text{ [mm]}. \quad (2.22)$$

- Celková plocha výkovku s můstkem se vypočítá podle vzorce [25; 29; 30]:

$$S_c = \frac{(\pi \cdot D_{\text{výr}}^2)}{4} \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (2.23)$$

kde:  $D_{\text{výr}}$  – průměr výronku [mm],

$$\text{kde: } D_{\text{výr}} = D_v + 2 \cdot b_m \text{ [mm]}. \quad (2.24)$$

## 2.7 Zápustky

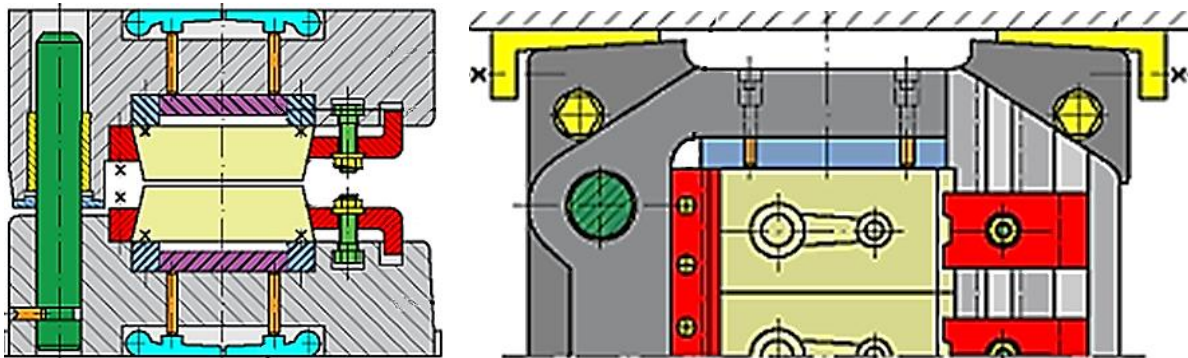
Zápustky jsou hlavním kovací nástrojem. Běžně se skládají ze dvou částí – horní a spodní díl. Pro každou operaci se navrhuje jednotlivě. S ohledem na základní druhy kování se rozdělují na přípravné, předkovací a dokovací. Principem jednotlivých typů zápustek je postupné přiblížení se k tvaru výkovku, který se kalibruje v poslední operaci. Z toho plyne velký význam dokovací dutiny na výsledný povrch nebo rozměry součástí. Proto se klade velký důraz na jejich kvalitní konstrukční provedení (poloměry, úkosy, smršťení oceli) a na výrobu (úprava povrchu, tepelné zpracování či technologie zhotovení). Důležitým konstrukčním prvkem je výronková drážka, která je blíže popsána v kapitole 2.6. Běžně užívané tvary zápustek jsou kruhové a hranolovité (obr. 33). Pro jejich výrobu je podstatná správná volba materiálu. Vzhledem k velkým tlakům a teplotám jsou vhodné středně až vysoce legované oceli s vysokou pevností, houževnatostí a velkou trvanlivostí proti namáhání při práci za tepla, např. chromniklové oceli. [2; 12; 21]



Obr. 33 Příklady tvarů zápustek – hranolovité a kruhové [37].

K ovlivnění zápustek dochází také různým způsobem s jejich zacházením při provozu a upínání. Jejich trvanlivost je za jinak stejných podmínek závislá na i způsobu tváření, výkonu a stavu kovacího stroje anebo seřízení zápustek. S ohledem na to se musí uvážit hlavně výkon stroje vůči velikosti a složitosti výkovku. Pro členitější součásti nelze zápustkové dutiny zaplnit jen pýchováním. Materiál zde teče kolem přechodů, čímž jsou hrany a výstupky v nástrojích více namáhány vyšším tlakem a dochází k většímu opotřebení. Z toho vyplývá, že čím méně se musí materiál přemísťovat, tím menší vzniká opotřebení a dosahuje se delší životnosti zápustek. Proto se musí provést vhodný návrh tvaru předkovku, tak ať se materiál tváří ve více operacích. Vliv na trvanlivost zápustek má také zpracovávaný objem materiálu. Při jeho velkém přebytku pak dochází nadměrnému přemísťování, což vede k většímu opotřebení nástrojů. [2; 12; 13; 21]

Zápustky se upevňují do upínacích kruhových nebo hranolovitých držáků, které jsou uchyceny na spodní desku a k beranu lisu, viz obr. 34. Běžně se pomocí příložek a šroubů upínají dvě až tři sady zápustek s ohledem na počet kovací operací. Správné upnutí nástrojů má značný vliv na jejich životnost. Většina případů předčasně poškozených zápustek je způsobena nevhodným upnutím a špatným použitím upínacích prvků – šrouby, příložky a středící zámky. Proto se musí dodržovat základní zásady, mezi které patří třeba kontrola stavu všech upínacích ploch, správně předepsané sklony bočních ploch s předepsanými úhly nebo zhodnocení stavu upínacích prvků (nezdeformované). Přesnost vedení horní zápustky oproti dolní se zajišťuje vodícími sloupky upínače. Mezi další prvky, které zvyšují přesnost patří kruhové, podélné, příčné nebo křížové vybrání a dále zámky pro zachycení posouvajících sil, bandáže a vodící kolíky. [2; 12; 21; 27]



Obr. 34 Ukázkové schéma držáku zápustkových vložek v lisu [27; 31].

### 2.7.1 Předehřev, mazání a údržba zápustek

Vysokolegované nástrojové materiály, ze kterého se zápustky běžně vyrábí mají po tepelném zpracování poměrně nízkou houževnatost. Proto se musí nástroje před kovááním rovnoměrně předehřát. Dle chemického složení oceli a typu kovací operace se běžně předepisuje předehřev v rozmezí teplot 150 až 300 °C. Čím je dutina zápustky složitější, tím větší důležitosti nabývá její tepelná příprava. Měření dosažených teplot se provádí kapkovou zkouškou nebo pyrometry. V případě vynechání předehřevu se zvyšuje riziko prasknutí nástrojů, což vede k jejich zničení. Dalším důvodem jeho použití je snížení teplotního gradientu mezi povrchem zápustek a jejich jádrem. Dochází tím ke snížení tepelných pnutí, které jsou nežádoucí. Mezi další důvody užití předehřevu patří také zmenšení přestupu tepla (zpomalení ochlazování výkovku) nebo snížení opotřebení zápustek. Předehřev lze aplikovat různými způsoby, například ohřátými ocelovými bloky, plynovými hořáky (samostatný, pískový rošt, věncovitý tvar) anebo indukční metodou. Běžně používané a velmi účinné jsou plynové nebo indukční způsoby (obr. 35). [2; 12; 21; 38]



a) indukční



b) ohřátá ocel

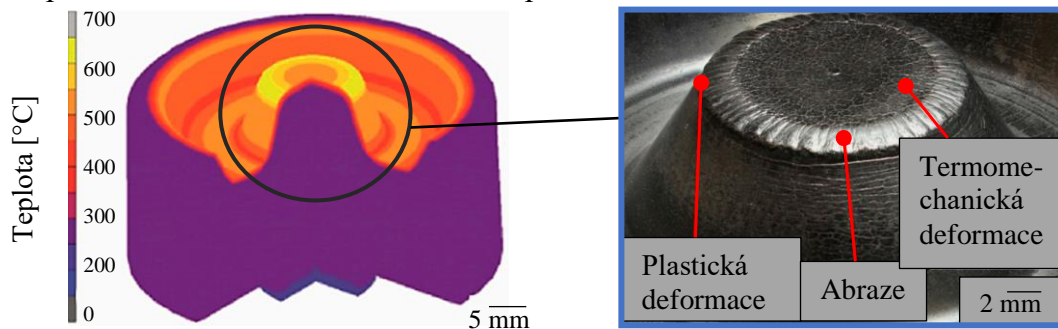


c) plynový mobilní

Obr. 35 Různé způsoby předehřevu zápustek – indukční, ohřátá ocel a mobilní plynový [38].

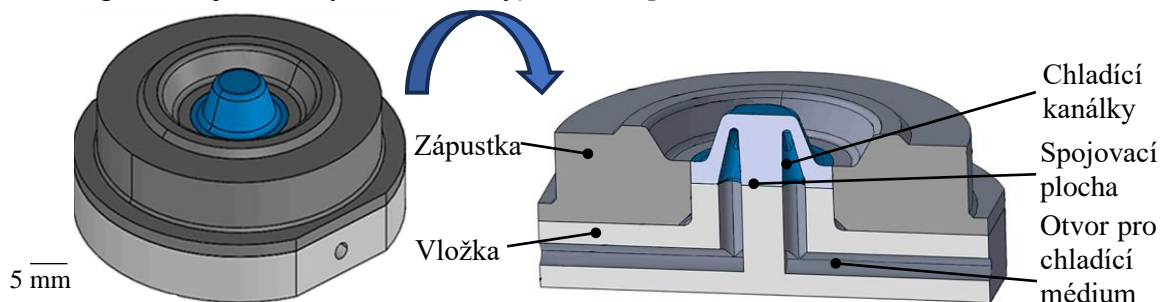
Opačným případem od předehřevu je chlazení zápustek. Jeho potřeba vyvstává při nadměrném vyhřívání funkčních ploch nástrojů (obr. 36). Důsledkem je zvýšení opotřebení nástrojů vlivem abraze nebo plastických a termomechanických podmínek. Je důležité ochlazovat rovnoměrně a mírně. Příliš prudké a nerovnoměrné ochlazování vede ke vzniku velkých vnitřních pnutí.

Takový ochlazovací režim může následně způsobit deformaci nástrojů – vznik trhlin. Existuje několik možných způsobů provedení, například ochlazování stlačeným vzduchem, mazivem anebo pomocí vodních kanálek v blocích zápustek, viz obr. 37. [2; 12; 21; 39]



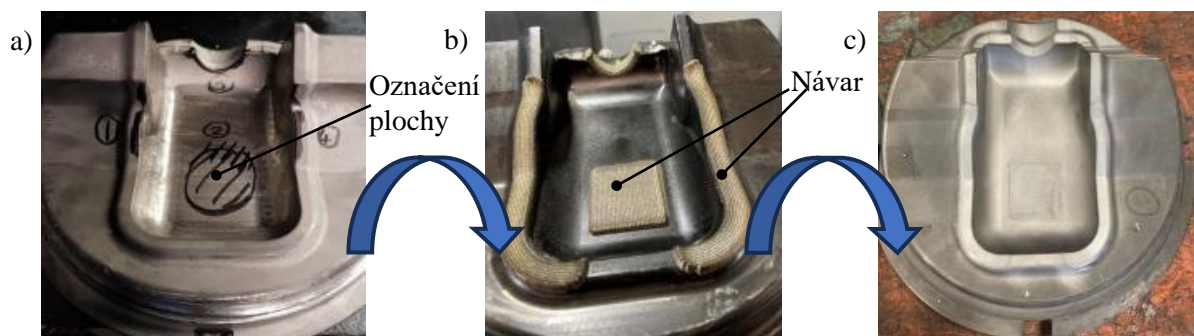
Obr. 36 Nadměrné teplotní vyhřívání funkčních ploch a příklad různých činitelů opotřebení [39].

Mezi další důležité činnosti při kování patří průběžné mazání nástrojů. Důsledkem je značné snížení tření mezi zápustkami a zpracovávaným materiálem. S ohledem na to dojde ke snížení deformačního odporu, síly a práce. Vhodně zvolené mazací médium může zabránit ulpívání výkovek v dutině a usnadní tak jeho vyjmutí. Dominantní výhodou je snížení opotřebení a tím zvýšení životnosti zápustek. Podmínkou použitelných maziv je velká odolnost proti vysokým teplotám a tlakům, které jsou nedílnou součástí při kování. Jejich další důležitou vlastností musí být malá a stálá viskozita. Základní rozdělení běžně používaných prostředků jsou na tuhá (dispergovaná v oleji nebo vodě), konzistentní (mýdla, tuky) a kapalná (minerální a organické oleje, emulgační oleje nebo syntetické látky) maziva. [2; 12; 21]



Obr. 37 Zápustka s chladicími kanálky – v základním pohledu a v řezu [39].

S ohledem na vyšší cenu nástrojů jsou důležitou součástí údržby opravy zápustek. Vytvoří-li se v kovací dutině lokální trhliny nebo malé vymáčknutí bez porušení ostatních tvarů, je možná oprava. Vhodným způsobem se používá navaření v kombinaci s obrobením (obr. 38). Povrch pro návar se musí řádně připravit, což znamená odstranit rozrušený materiál, obrobit a odmastit opravované místo. Před samotným navařováním se zápustka musí předehřát s ohledem na jakost materiálu na potřebnou teplotu. Pro snadnější a účelnější opravy se využívá vložkování dutin. Výhodou je značná úspora zápustkové oceli nebo větší životnost nástrojů (vhodnější rozložení napěťových stavů). Další možnost jejich využití je za určitých podmínek pro malé změny rozměrů zápustek (změny poloměru, snížení hloubky dutin apod.). [2; 12; 21; 40]

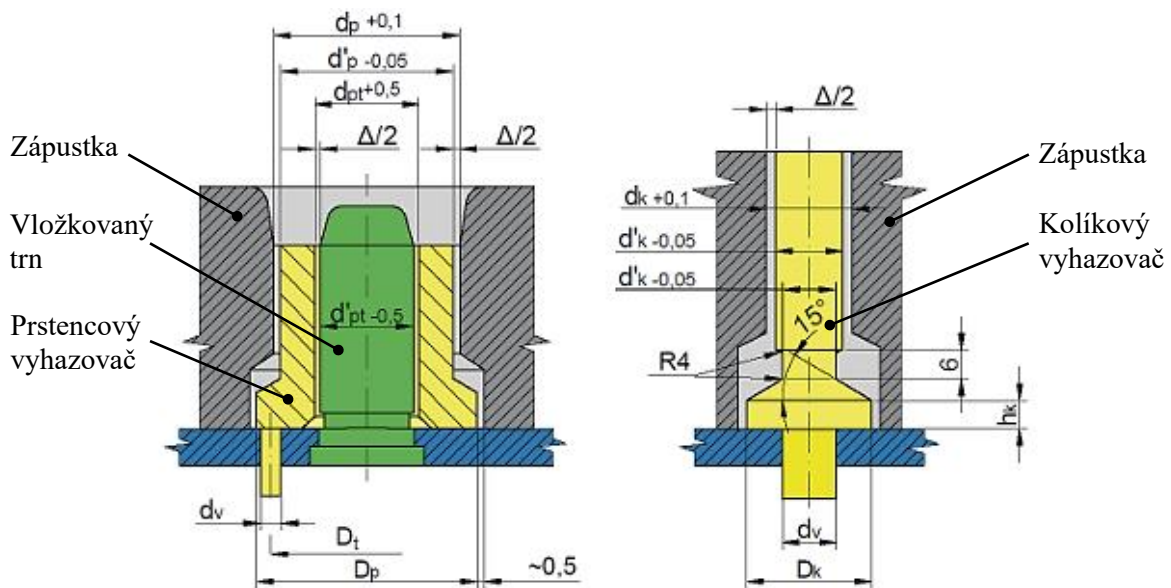


Obr. 38 Ukázka při postupu oprav nástrojů – a) označení ploch, b) návar, c) obrobený stav [40].



## 2.7.2 Vyhazovače

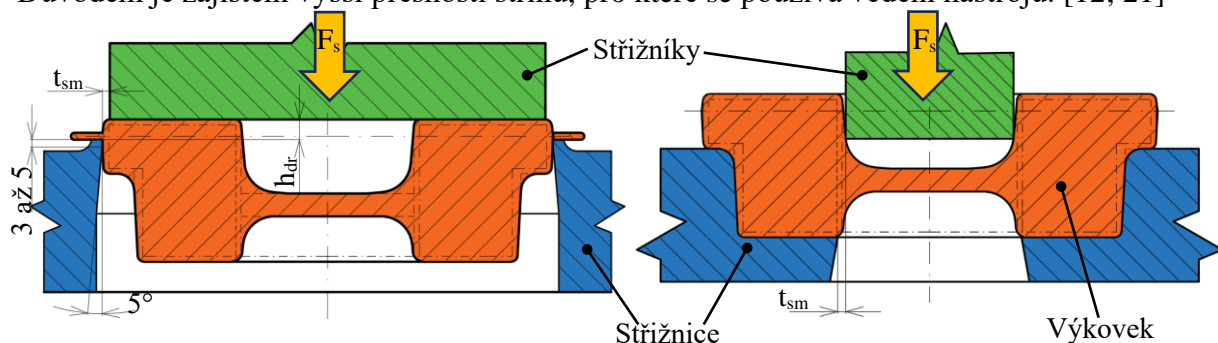
Při tváření na kovacích lisech se běžně používají vyhazovače (obr. 39). Při kování dochází mezi tvářeným materiálem a dutinou zápustky ke tření, které brání v pohybu kovu. Dochází k tomu při vyplňování a také při vyjímání výkovků z nástrojů. Dalšími vlivy na ulpívání součástí jsou například větší hloubky dutin, technologické úkosity a nedostatečné mazání. Cílem vyhazovačů je snadnější vyjmutí výkovků z dutin zápustek. Jejich použití nabývá na důležitosti hlavně při kování členitých dílců. Principem jejich činnosti je vytlačení výkovku z dutiny nástroje. Pohyb vyhazovačů se vyvozuje pohybem beranu přes pomocný mechanismus. Jejich tvar je závislý hlavně na geometrii součástí. Podle normy ČSN 22 8306 se dělí na tři základní skupiny, tj. vyhazovače prstencového tvaru (pro výkovky se zahluobením v jejich středu), kolíkové (pro středové nebo mimostředové vyhazování) anebo vložkové. Z konstrukčního hlediska se musí dodržet minimální vůle mezi vyhazovači a zápustkami. Při jejich pohybu nesmí nedocházet k zadírání kvůli příliš malé vůli anebo zatíkáni kovu do vzniklé mezery při naopak moc velké vůli. Jejich vhodnou konstrukcí a činností lze zvýšit životnost zápustek. [12; 21; 25; 40]



Obr. 39 Příklady různých typů vyhazovačů – prstencový (vlevo) nebo kolíkový (vpravo) [25].

## 2.8 Dokončovací operace

Mezi důležité dokončovací operace patří odstranění výronku, které se řeší jeho odstřížením. U výkovků s předkováným otvorem, který má podobu blány, se musí provést jejich vyděrování. Blána se následně odstraňuje za vyšších teplot, které se pro nízkouhlíkové nelegované oceli pohybují přibližně v rozmezí 800 až 950 °C. Dělicími nástroji jsou průstřížnice a průstřížníky, na které se klade patřičný důraz především kvůli jejich správnému vycentrování, viz obr. 40. Důvodem je zajištění vyšší přesnosti stříhu, pro které se používá vedení nástrojů. [12; 21]

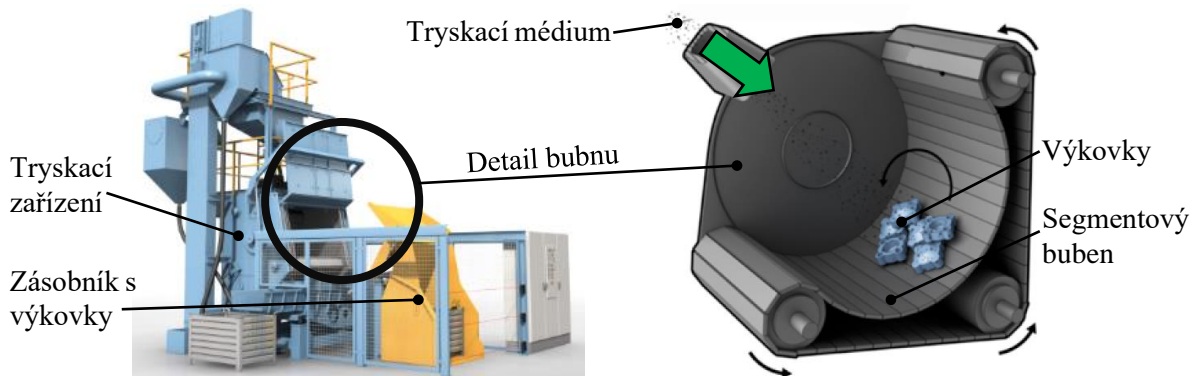


Obr. 40 Ukázka principu ostřížení výronku (vlevo) a děrování blány (vpravo) [27; 31; 41].



Pro dosažení stále stejné kvality stříhu se musí udržovat nástroje stále ostré. Zamezí se tím vzniku nežádoucích otřepů, které jsou doprovodným jevem při odstraňování přebytečného materiálu. Pro zajištění vyšší trvanlivosti břitu lze nástroje navařovat hodnotnější a kvalitnější oceli. Dosáhne se tím lepších mechanických vlastností při nižších nákladech oproti výrobě celého průstřížníku z kvalitního a drahého materiálu. Neméně důležité je předepsat správné tepelné zpracování. Ostříhované výkovky jsou stále velmi teplé. Proto se musí navrhnout dělicí nástroje ze speciální oceli, která je určena pro práci za zvýšených teplot, například materiál 19 663. Před dělením se doporučuje nástroje mírně přehřát a v průběhu mazat. Z hlediska jejich konstrukce se doporučuje nastavit vůli mezi použitými tvářecími nástroji na jejich průměr okolo 10 až 20 %. Dále je vhodné navrhnout vnitřní úkos průstřížnice v rozmezí 5° až 15°. Hlavním důvodem je zamezení uvíznutí výkovku nebo blány v nástroji. Mezi další dokončovací technologie patří například rovnání, kalibrování nebo tryskání výkovků. [2; 12; 21; 41]

Tryskání výkovků je dokončovací technologie, při které dochází k mechanickému vrhání média (nejčastěji ocelového) stlačeným vzduchem nebo odstředivou silou (obr. 41). Hlavním úkolem je odstranit z povrchu všech součástí vzniklé okuje. Vlivem tlakových a řezných účinků dochází k drcení a odstraňování nežádoucích okují. Doprovodným jevem je vznik mírné deformace svrchní povrchové vrstvy výrobků. Mezi nejpoužívanější tryskací prostředky patří sekaný drát, litinové nebo ocelové broky a tvrdý drcený korund. Na výslednou kvalitu povrchu má velký vliv velikost zrn použitého omílacího média. Nejlepších výsledků se pak dosahuje ocelovými broky. Výsledný povrch dílců spíše tváří a nevytvářejí na něm nežádoucí řezné hrany. Jsou také ekonomicky dobře dostupné. Nejvíce používané zařízení jsou bubnové metací stroje. [12; 21]



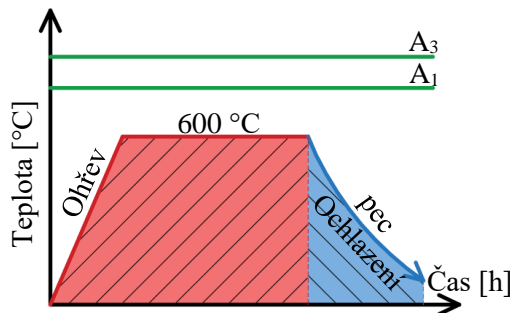
Obr. 41 Typ strojního zařízení pro tryskání a jeho princip [42].

Pro kvalitní dokončení výkovků se používá technologie rovnání, která slouží pro dosažení přesných rozměrů. Hlavní uplatnění nachází v případech, kdy dojde k zakřivení výrobků při vyjmutí z dutiny zápustky. Další použití nastává při nesprávném ostřížení výronku za vzniku dodatečných deformací. Před rovnacím procesem se musí odstranit všechny vzniklé otřepy. Důvodem je velké riziko jejich zakování do povrchu výkovku a jeho znehodnocení. Pokud je tvářený výkovek již vychladlý, tak se musí dodatečně lokálně anebo v celém objemu dohřát. Rovnání výkovků se provádí z pravidla v jiné zápustce než v dokončovací. Důvodem použití dalších nástrojů je hlavně kvůli snížení jejich opotřebování. [2; 12; 21; 42]

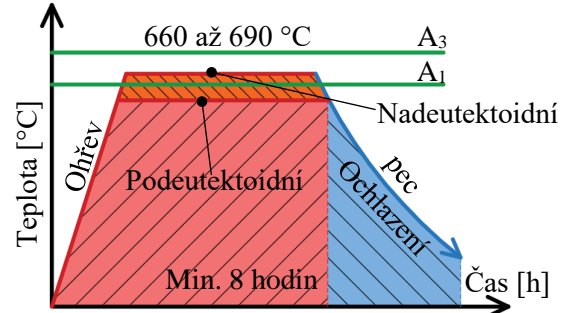
Pro zvýšení kvality výkovků se zařazuje jejich tepelné zpracování, kterým záměrně měníme vlastnosti materiálu součástí. Mezi často používané způsoby patří žíhání [12; 21; 27, 44]:

- Na odstranění pnutí – jedná se o proces bez překrytí. Slouží k snížení pnutí na minimum, která jsou ve výrobcích vytvořena předchozím tepelným zpracováním. Provádí se při poměrně nízkých teplotách v rozmezí 550° až 650 °C. Ideální jsou teploty co nejbližší křivce  $A_{c1}$  (obr. 42), protože zbylá pnutí jsou tím menší, čím je vyšší teplota. Ohřev na teplotu výdrže musí být pomalý, aby v důsledku tepelného spádu nevznikala další pnutí. Zpracování probíhá při krátké výdrži po dobu několika hodin. Dosahuje se mírného zlepšení jakosti oceli, ale ne tak dobrého jako třeba při zušlechťování.

- Na měkko – tepelný způsob zpracování při kterém nedochází k překrystalizaci. Zařazuje se pro sferoidizaci perlitického cementitu, tzn. přeměna z lamelárního na globulární. Tím se podstatně zlepšuje obrobiteľnosť tvrdších ocelí s obsahem uhlíku nad 0,4 %, viz obr. 43. Při nižším obsahu uhlíku dochází spíše ke zhoršení. Zásadní je pokles tvrdosti materiálu a změna jeho mikrostruktury. Probíhá při vyšších teplotách v rozmezí 650 až 710 °C při dlouhé výdrži, tj. minimálně 8 hodin, s následným s ochlazováním v peci.

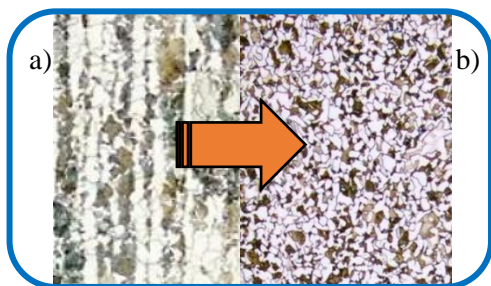


Obr. 42 Žíhání na snížení pnutí [27; 44].

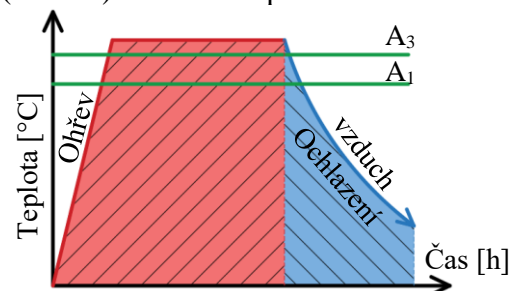


Obr. 43 Žíhání na měkko [27; 44].

- Normalizační – je tepelné zpracování, při kterém dochází k přeměně s překrystalizací. Slouží k odstranění nehomogenní struktury (obr. 44) a k snížení vnitřního pnutí. Hrubší zrna se zjemní, vytvoří homogenní strukturu, vyrovná se jeho pevnost a zvýší se mechanické vlastnosti materiálu. Dojde k celkovému zvýšení jakosti kovu. Běžně se zavádí ihned po ostřížení výkovků. Teplota výdrže se pohybuje zhruba 30 až 70 °C nad křivkou  $A_{c3}$  s trváním v rozmezí 1 až 4 hodin (obr. 45). Ochlazení probíhá na vzduchu.

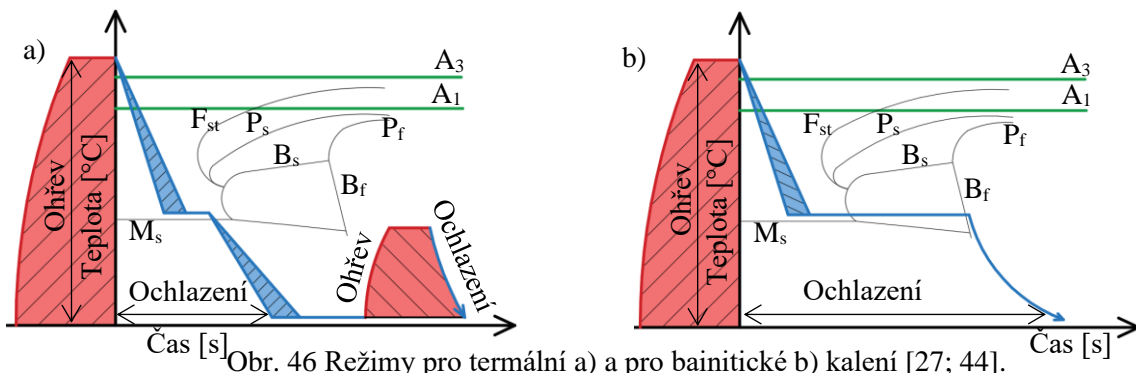


Obr. 44 Řádkovitá struktura před a) homogenní po normalizaci b) [44].



Obr. 45 Režim normalizačního žíhání [27; 44].

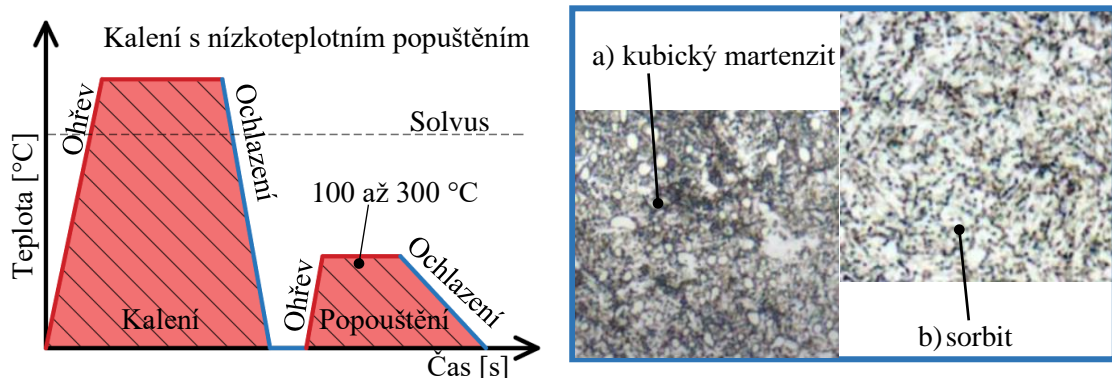
K dalším často využívaným technologiím tepelného zpracování výkovku patří zušlechťování. Jde o zahřátí oceli na potřebnou kalící teplotu, která se pro poutektoidní oceli pohybuje okolo 30 až 50 °C nad křivkou  $A_{c3}$ . Poté následuje výdrž na dosažené teplotě a ochlazování při rychlosti větší, než je nadkritická. V oceli dochází ke vzniku částečně nebo zcela nerovnovážné struktury. Správně zušlechťované výrobky mají stejnoměrnou pevnost a houževnatost v celém průřezu. Ohřev se provádí přímým (pro malé a nelegované součásti) či stupňovitým způsobem (vysoce legované dílce). Pro následné ochlazování se používá vzduch, olej nebo voda. Rozlišuje se několik druhů kalících režimů, například lomené, termální a bainitické kalení (obr. 46). [12]



Obr. 46 Režimy pro termální a) a pro bainitické b) kalení [27; 44].

Po zakalení oceli následuje důležitá fáze popouštění (obr. 48). Jejím cílem je snížení vnitřních pnutí, které vznikají při kalení a také změna mechanických vlastností kovu. Snahou je dosažení optimálního poměru tvrdosti a houževnatosti. Teploty se při popouštění nachází v oblasti pod  $A_{c1}$ . Běžně se provádí v popouštěcích pecích. Ochlazení probíhá na vzduchu. Podle tepelného režimu se dělí fáze popouštění na dvě hlavní kategorie [12; 21; 44]:

- Za nízkých teplot – režim pro nástrojové oceli, které jsou nadeutektoidní. Teploty se pohybují přibližně v rozmezí okolo 100 až 300 °C. Dochází při něm k odstranění křehké tetragonální martenzitické struktury a také k snížení pnutí bez značného snížení tvrdosti (kubický martenzit), viz obr. 48. Tvrdost se dle typu oceli pohybuje okolo 45 ÷ 66 HRC.
- Za vysokých teplot – slouží pro zpracování konstrukčních ocelí (podeutektoidní) jsou teploty v rozmezí okolo 400 až 650 °C. Hlavním cílem je odstranění vnitřního pnutí, přeměna křehkých a také pevných martenzitických struktur na měkčí s vyšší mezí kluzu a houževnatostí – sorbit. Maximální tvrdost se pohybuje od 214 až do 269 HBW.



Obr. 48 Zušlecht'ování a rozdíl při popouštěním a) nízkoteplotním a b) vysokoteplotním [44].

## 2.9 Technologické výpočty

Pro správné přetvoření kovu musí kovací stroje vyvinout poměrně velké síly. Pro jejich správné určení je třeba znát velikost tvářecí síly. Ocel se díky rázu a vysoké kovací teplotě přemísťuje v dutině zápustky. Dochází zde k matematicky velmi těžko popsatelnému nehomogennímu stavu napjatosti. Proto výpočetní metody uvažují pouze zjednodušený model rozložení napětí ve výkovku. Velikost kovací síly je závislá především na rozměrech výkovku a jeho výronku, hmotnosti a velikosti nebo na tření mezi materiálem a nástroji. Zjištění minimální potřebné síly lze provést několika způsoby výpočtů na základě různých přístupů autorů [1; 4; 13; 21; 25]:

- Brjuchanov a Rebelskij – jednoduchý výpočet dle největšího průměru výkovku, plochy výkovku a přirozeného přetvárného odporu za kovací teploty:

$$F_{KBR} = 8 \cdot (1 - 0,001 \cdot D_v) \cdot \left(1,1 + \frac{20}{D_v}\right)^2 \cdot \sigma_p \cdot S_v \text{ [N]}, \quad (2.24)$$

kde:  $\sigma_p$  – přirozený přetvárný odpor [MPa].

- Storozhev – oproti předchozímu přístupu se jedná o komplexnější výpočet pro kruhové výkovky. Zahrnuje sílu na přetvoření výronku a také kovu v zápustce:

$$F_{KS} = \sigma_p \cdot \left\{ \left(1,5 + \frac{b}{2 \cdot h_v}\right) \cdot S_{v\dot{y}r} + \left[1,25 \cdot \ln \left(\ln \frac{D_v}{h_v} + 2 \cdot \frac{h_v}{D_v}\right) + \frac{b}{h_v} - 0,375\right] \cdot S_v \right\}, \quad (2.25)$$

kde:  $S_{v\dot{y}r}$  – plocha výronku [mm<sup>2</sup>],

$$S_{v\dot{y}r} = \frac{\pi \cdot (D_{v\dot{y}r}^2 - D_v^2)}{4} \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (2.26)$$

- Tomlenov – z uvedených metod se jedná o nejkompaktnější výpočet. Podstatou řešení je zahrnutí oblasti vtoku nadbytečného materiálu do výronkové drážky. Zde dochází ke vzniku značného odporu proti přetvoření tvářené oceli.

Důvodem je malá výška a pokles teploty kovu v konečné fázi kování. Řešení zahrnuje normálovou sílu  $F_N$ , která působí ve směru pohybu zápusťky a tečnou sílu  $F_T$ , která řeší smyková napětí na bočních stěnách výkovku. Ve výpočtu se neuvažuje vliv úkosů stěn a řeší se smyková napětí až na hranici  $\tau_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_p$ . Při výpočtu jsou obě složky sečteny:

$$F_{KT} = F_N + F_T \text{ [N]}, \quad (2.27)$$

$$\text{kde: } F_N = 2 \cdot \pi \cdot \sum_{j=1}^n S_j \cdot r_j \text{ [N]}, \quad (2.28)$$

kde:  $S_j$  – dílčí plochy v úsecích  $\Delta r_j$  pod křivkou deformačních odporů  $[\text{mm}^2]$ ,

$r_j$  – vzdálenost těžiště jednotlivých ploch  $[\text{mm}]$ ,

$$F_T = \pi \cdot f \cdot \sigma_p \cdot \sum_{j=1}^n D_j \cdot \Delta z_j \text{ [N]}, \quad (2.29)$$

kde:  $f$  – součinitel tření [-]; volen z rozmezí  $(0,35 \div 0,45)$ ,

$D_j$  – vzdálenost těžiště jednotlivých ploch  $[\text{mm}]$ ,

$\Delta z_j$  – výška plochy výkovku v horní zápusťce  $[\text{mm}]$ .

Výše uvedené vztahy vycházejí z velikostí deformačních odporů. Jejich rozložení je sledováno po průřezu výkovku. Pro rotačně symetrické tvary se nejprve musí určit odpor v oblasti výronku. Jedná se o tzv. nultý průřez  $\sigma_{d0}$ . Důvodem je jeho větší hodnota oproti vnitřnímu prostoru výkovku, protože zahrnuje také přirozený přetvárný odpor  $\sigma_p'$ , který počítá s vlivem poklesu teploty ve výronku. Stanoví se dosazením do vzorce:

$$\sigma_{d0} = (1 + 0,73 \cdot f) \cdot \sigma_p' \text{ [MPa]}, \quad (2.30)$$

$$\text{kde: } \sigma_p' = C_o \cdot \sigma_p \text{ [MPa]}, \quad (2.31)$$

kde:  $C_o$  – souhrnný koeficient [-]; volí se v závislosti na hmotnosti výkovku a teplotě materiálu ve výronku.

Dále se v řešení pokračuje postupně podle jednotlivých průřezů výkovku, pro které se odvozuje vzorec na základě obecného vztahu:

$$\sigma_{dj} = \sigma_{d(j-1)} + \sigma_p \cdot \frac{\Delta r_j}{z_j} \text{ [MPa]}, \quad (2.32)$$

kde:  $z_j$  – výška průřezu výkovku  $[\text{mm}]$ .

Pro určení normálové složky síly je třeba znát velikost jednotlivých oblastí pod křivkami napětí. První geometrickou oblastí je obdélníková plocha:

$$S_j = \sigma_{dj} \cdot \Delta r_j \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (2.33)$$

kde:  $\Delta r_j$  – změna délky plochy řešeného průřezu  $[\text{mm}]$ ,

$$\text{kde: } r_j = \frac{\Delta r_j}{2} + \sum \Delta r_i \text{ [mm]}, \quad (2.34)$$

kde:  $r_j$  – délka plochy řešeného průřezu  $[\text{mm}]$ .

Následně lze provést jejich součin se vzdáleností těžiště řešených ploch od středové osy výkovku, tj.  $S_j \cdot r_j$ .

Druhým typem hledané oblasti je trojúhelníková plocha pod křivkou napětí, pro kterou platí následující výpočet:

$$S_j = \frac{\sigma_{d(j+1)} - \sigma_{d(j)}}{2} \cdot \Delta r_j \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (2.35)$$

Následně lze vypočítat velikost hledané plochy součinem obsahu a poloměru  $S_j \cdot r_j$ . Pro výpočet tečné složky kovací síly je třeba znát hodnotu součinu vzdálenosti od těžiště jednotlivých ploch a jejich výšky od pohyblivého nástroje, tzn.  $D_{ji} \cdot \Delta z_{ji}$ .



Při dokončovacích operacích se výronky výkovků ostříhují zpravidla na menších než kovacích lisech. S ohledem na to se musí vypočítat potřebná síla na jejich ostřížení. Její výpočet se běžně provádí podle zjednodušeného vzorce odvozeného dle geometrie výronku [1; 2; 12; 21]:

$$F_{SV} = 1,7 \cdot \tau_s \cdot o_v \cdot 2 \cdot h_v \text{ [N]}, \quad (2.36)$$

kde:  $o_v$  – obvod výronku [mm],

$$\text{kde: } o_v = D_{výr} \cdot \pi \text{ [mm]}, \quad (2.37)$$

$\tau_s$  – mez pevnosti ve stříhu [MPa],

$$\text{kde: } \tau_s = 0,8 \cdot R_m \text{ [MPa]}. \quad (2.38)$$

Dalším krokem je děrování výkovku, tzv. prostřížení středové blány. Jedná se o průchozí otvor, který se pouze předkovává. Potřebné výpočty ke zjištění střížných sil jsou odvozeny na základě geometrie dělené blány. Výsledek pak slouží pro vhodnou volbu tvářecího lisu [1; 2; 12; 21]:

$$F_{SS} = 1,7 \cdot \tau_s \cdot o_s \cdot s \text{ [N]}, \quad (2.39)$$

kde:  $o_s$  – obvod blány [mm],

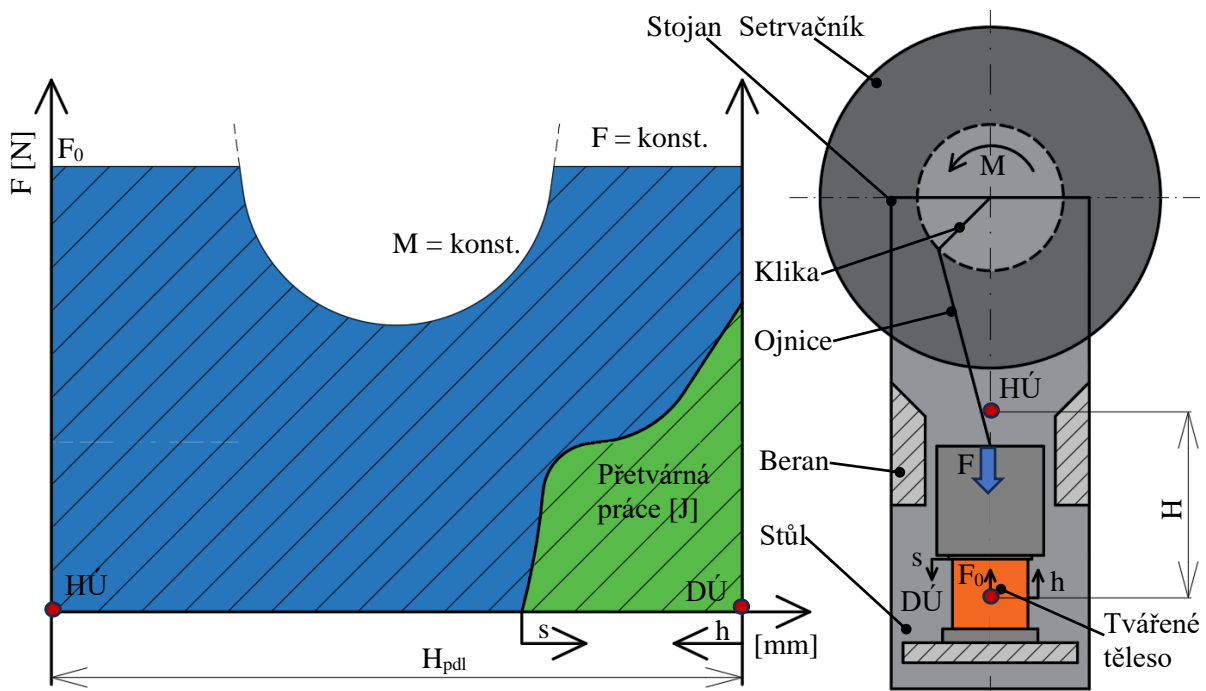
$$\text{kde: } o_s = d_{ps} \cdot \pi \text{ [mm]}, \quad (2.40)$$

kde:  $d_{ps}$  – průměr prostřížení blány [mm].

## 2.10 Klikové mechanické lisy

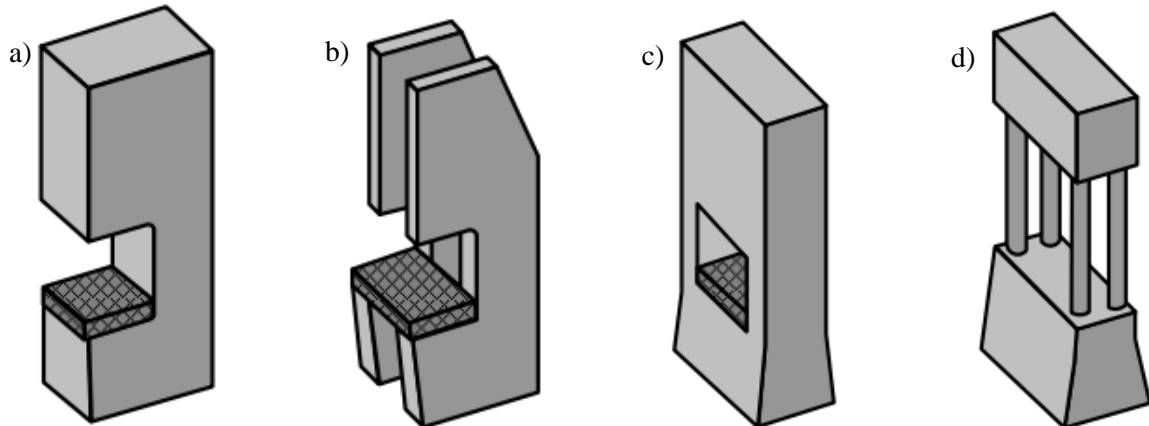
Klikové mechanické lisy patří mezi nejvíce používané stroje v oblasti objemového tváření za tepla. Jejich hlavní funkcí je generování potřebné tvářecí síly, která pak působí na výstupním členu klikového mechanismu a je závislá na velikosti jeho zdvihu, respektive na úhlu natočení kliky (obr. 49). Principem činnosti je převod rotačního pohybu hřídele od motoru na posuvný pohyb beranu. Rozlišuje se základní rozdělení s ohledem na použitý mechanismus – kolenové, výstředníkové a klikové lisy. Pro práci na klikových zařízeních platí několik pravidel [64; 65]:

- zdvih beranu je určitý a jeho tlak je poměrně klidný – například oproti bucharu,
- velikost práce při jednom pracovním zdvihu je dána kinetickou energií setrvačnicku,
- maximální přípustná síla na beranu je určena pevností konstrukčních uzlů stroje,
- pro tváření se využívá pouze část energie pohybujícího se beranu.



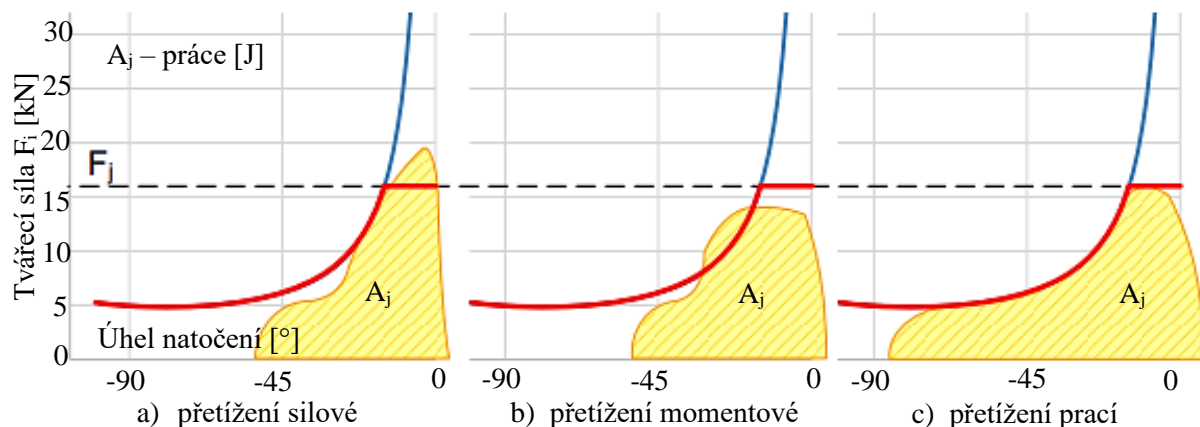
Obr. 49 Schéma principu klikového mechanismu [65].

Důležitými požadavky na volbu zařízení jsou výkonnostní a ekonomické parametry. Z hlediska konstrukce je podstatná tuhost stroje. Podle tvaru stojanu se dělí na čtyři běžné typy, viz obr. 50. Při použití mechanických lisů platí obecně několik výhod. Patří mezi ně například menší otřesy, nižší hlučnost, vykonání každé operace pouze na jeden zdvih, poměrně vysoká přesnost kování, možnost velké automatizace či mechanizace výroby anebo použití vyhazovačů. Naopak mezi jejich nevýhody se řadí horší vykování velmi komplikovaných a členitých výkovek, potřeba vyšší přesnosti při zpracování polotovaru (při přebytku materiálu vyvstává riziko přetížení lisu) nebo nebezpečí zakování okujů kvůli menšímu opadu okujů vlivem klidného tlaku. Standardně se používají v oblasti kovárství pro výrobu rotačních nebo pákových součástí. [13; 45; 46]



Obr. 50 Základy tvary stojanů pro mechanické lisy – a) jedno stojanový otevřený, b) dvo stojanový otevřený, c) dvo stojanový uzavřený, d) sloupový [45].

Pro kovací lisu je velmi důležité přesné výškové seřízení zápustek. Zdvihová funkce použitého mechanismu se určuje z jeho geometrie. Příklady možného vlivu natočení kliky lisu na polohu, sílu, rychlost a zrychlení beranu lisu jsou v příloze 5. Průběh síly na beranu lisu při konstantním kroučícím momentu určuje křivkou silovou využitelnost klikového pohonu (obr. 49). Průběh síly nesmí danou křivku překročit jinak dojde k přetížení pohonu lisu – silově, momentově nebo přetížení prací (obr. 51). Pro zvýšení bezpečnosti se v zařízeních používají pojistná zařízení, například funkční, zvyšující bezpečnost obsluhy nebo jistící proti přetížení. [45; 46]

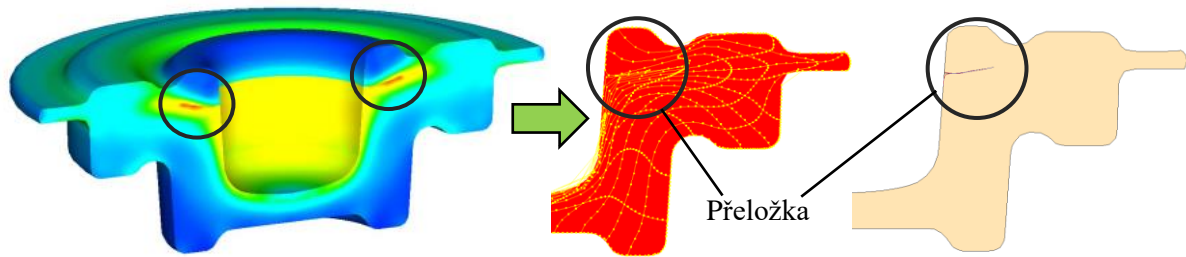


Obr. 51 Možné přetížení klikového lisu: a) silové, b) momentové nebo c) prací [45].

## 2.11 Numerické simulace

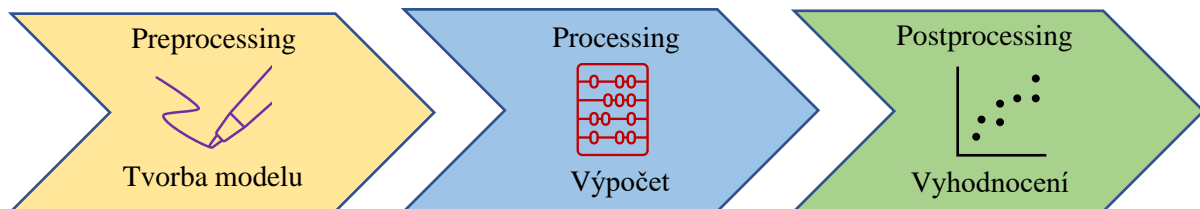
V dnešní době jsou numerické simulace nedílnou součástí všech moderních výrobních podniků. Hlavními důvody použití jsou především udržení konkurence schopnosti, snižování nákladů nebo zvyšování produktivity. Další důležitou funkcí softwarů je uchování velkého množství údajů, dat a tvorby databází. Jejich uplatnění se nachází v širokém spektru tvářecích operací. Obecně lze strojírenské dílce vyrobit mnoha způsoby. Některé pak vedou k defektům (obr. 52), jiné zase k bezvadným výrobkům. Simulacemi se navrhuje optimální výrobní procesy, které se

v případě potřeby dále optimalizují. V mnoha případech návrhů výroby se dopředu pro její ideální průběh jen velmi obtížně stanovují všechny potřebné výrobní parametry (teplota, rychlost, tvar nebo velikost polotovaru, geometrie nástroje, operace). Majoritní využití nachází při návrhu, ověření vyrobitelnosti nebo optimalizaci technologií výroby. [47; 48; 49]



Obr. 52 Analýza vzniku výrobní vady – přeložky [47; 48].

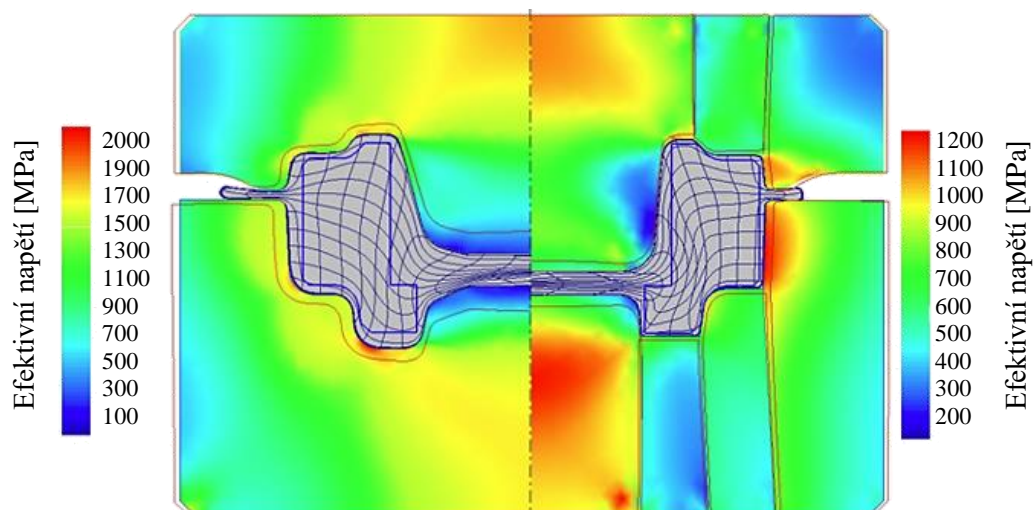
Simulací se rozumí popsání reálného systému prvků prostřednictvím modelu, který slouží jako zjednodušení skutečné podoby řešených těles. Rozdíly mezi nimi mají zásadní vliv na stupeň přesnosti výsledků provedených simulací. Základní etapy práce v simulačních softwarech jsou znázorněny na obrázku 53. [47; 48]



Obr. 53 Základní etapy práce v simulačních softwarech [47; 48].

V oblasti tváření je pro simulace hlavním cílem popsat jednotlivé výrobní pochody na základě vstupních hodnot, které tvoří simulační model, například geometrie, materiál nebo výpočetní přístup. Mezi základní řešené úlohy patří například [24; 47; 48; 49]:

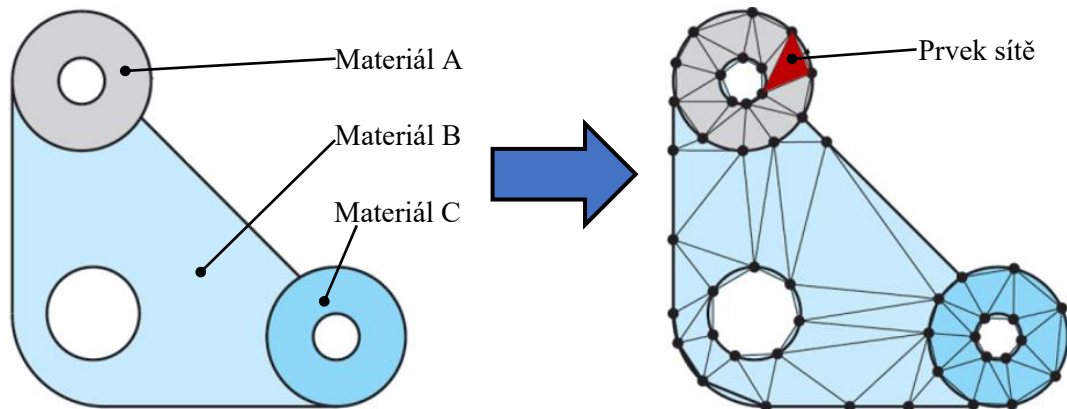
- analýza tvářecí síly a přetvárné práce,
- vyhodnocení deformačně napěťových stavů, průběh zatížení nástrojů,
- optimalizace všech vstupních geometrií – polotovar a nástroje (obr. 54),
- určení kritérií porušení, například kritické hodnoty přetvoření a napjatosti.



Obr. 54 Rozdílný průběh zatížení pro monolitní a vložkový (skládaný) nástroj [24].

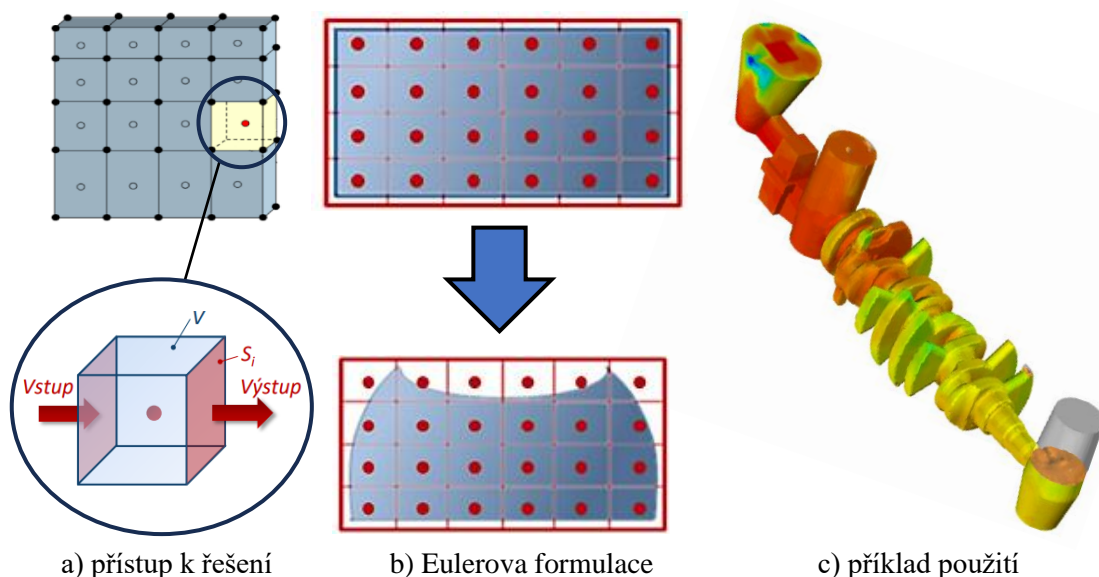
Pro řešení nejrůznějších problémů v oblasti plošného nebo objemového tváření existuje několik numerických metod. Všechny mají své kladné a záporné vlastnosti. Proto se musí správně určit oblast použití a následně zvolit vhodnou variantu. Základními typy jsou metody konečných diferencí, oddělených nebo hraničních prvků. Mezi nejpoužívanější principy patří [47; 48; 50]:

- Metoda konečných prvků – základním principem je diskretizace, viz obr. 55. Jedná se o rozdělení řešeného kontinua na konečný počet prvků, tzn. rozměrů, které dohromady tvoří uzavřenou síť. Výpočet spočívá v sestavení soustavy diferenciálních rovnic pro vzniklé prvky. Řešení je poté aproximováno jako lineární kombinace konečného počtu bázových funkcí, které popisují jednotlivé elementy těles – variační principy. Je zde počítáno s dílčími průběžnými výsledky. Konečným výsledkem je vhodná kombinace zvolených funkcí a neznámých parametrů. Použití například pro pevné látky v oblastech obrábění, svařování, plošného nebo objemového tváření za tepla i za studena. [47; 48]



Obr. 55 Metoda konečných prvků – princip diskretizace [47; 48].

- Metoda konečných objemů – podstatou je rozdělení sledovaného prostoru na konečné objemy. Výpočtová síť je definována pomocí uzlů, které leží uprostřed rozdělených elementů. Při deformaci dochází k toku oblastí, tj. prvků, z jedné do druhé. Hodnoty na objemových elementech se získávají jejich vhodnou interpolací. Využívá se Eulerova formulace řešení. Aplikuje se hlavně na 3D objekty. Používá se především pro tekutiny v oblastech objemového tváření, vstřikování plastů a odlévání kovů (obr. 56). [47; 50]

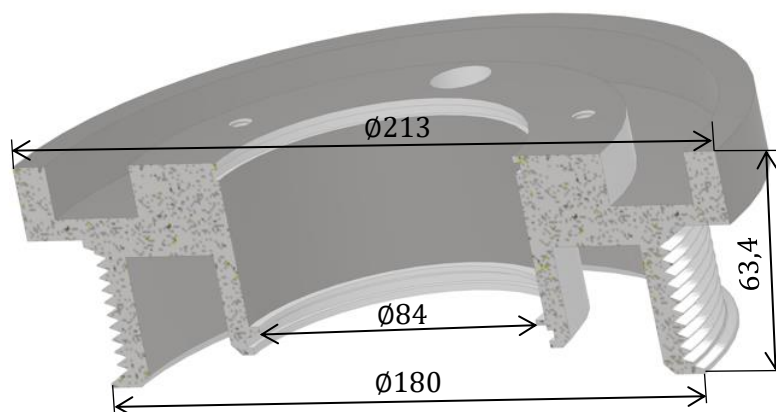


Obr. 56 Ukázka principu metody konečných objemů [47; 48; 50].



### 3 NÁVRH ŘEŠENÍ

Tvářeným dílcem je tělo spojky, viz obr. 57. Z hlediska konstrukčního zpracování jde o výkres 2024\_DP\_217110\_S01. Požadovaná výrobní série činí 80 000 kusů ročně. Materiál pro řešenou součást je nízkouhlíková ocel 12 020, která byla zadána poptávajícím podnikem. Na základě rozboru různých možností výroby byla zvolena technologie – zápustkové kování. Z hlediska technologičnosti hotové součásti se jedná o nevhodnou geometrii pro vykování. Proto se musí v prvním kroku prvně provést vhodný návrh výkovku. Jako výrobní zařízení byl navržen svislý kovací lis LZK s vyhazovači. Důvody uvedené volby stroje jsou například velikost série, tvářený materiál, zařízení podniku anebo možnost dobré automatizace výrobního procesu. Na základě zvoleného způsobu výroby bude navržen postup pro zhotovení výrobku.



Obr. 57 Tělo spojky.

#### 3.1 Návrh výkovku

Zápustkovým kovááním nelze dosáhnout požadovaných přesností a tvarů, které jsou uvedeny na výkresu součásti a následně musí být dohotoveny obráběním. Podle zvolené technologie výroby bude zhotoven návrh výkovku včetně jeho výkresové dokumentace. Pro jeho bezvadnou výrobu a zajištění požadované kvality se musí dodržet několik technologických a konstrukčních zásad. Uvedený postup je proveden v souladu s normami ČSN EN 10 243-1 a ČSN 42 9030. Současně s ním jsou navrženy různé změny, které vychází ze zkušeností a praktických znalostí z reálné podnikové výroby. Při tvorbě návrhu se primárně vychází z výkresu součásti, který je uveden na výkresu 2024\_DP\_217110\_S01. V rámci experimentální části práce bude výroba průběžně odzkoušena na menších výrobních sériích. Návrh lze shrnout do několika bodů [7; 25; 26; 28]:

- Stupeň obtížnosti kování podle materiálu – obecně se rozlišují dvě hlavní skupiny, které jsou včetně hodnotících parametrů uvedeny v tabulce 3. Použitá ocel 12 020 obsahuje menší obsah uhlíku a legujících prvků (příloha 1). Pro navrhovanou výrobu je na základě sledovaných kritérií určena skupina M1 (příloha 2).

Tab. 3 Rozdělení skupin dle obtížnosti kování. [26]

Skupina	Obsah uhlíku [%]	Legující prvky (Mn, Ni, Cr, V, W, Mo) [hm.%]
M1	do 0,65	do 5
M2	nad 0,65	nad 5

- Zatřídění dle složitosti tvaru výkovku – provádí se na základě doporučení, které vychází z normy ČSN 42 9002. Podrobný postup určení je uveden příloze 6. Výsledné označení výkovku podle složitosti jeho tvaru je 5920-3. S ohledem na zjištěné označení budou rozměry kolmé k rázu zhotoveny v přesnosti IT5 a rovnoběžné s rázem v přesnosti IT6.

- Stupeň přesnosti – s ohledem na součást se jedná o standardní zápusťkový výkovek bez dodatečných nebo jiných zvláštních požadavků oproti obvyklé výrobě. Kvůli tomu je z uvedené nabídky do dalšího postupu zvolen stupeň F – běžný, viz příloha 2a.
- Ukazatel členitosti tvaru – parametr, který přihlíží na složitost členitých a tenkostěnných průřezů, které se na výkovku vyráběné spojky vyskytují. Slouží ke kompenzaci větších rozměrových variací součásti, které jsou ovlivněny například smršťením oceli 12 020, vyššími tvářecími silami lisu anebo opotřebením zápusťek. Pro rotační těleso kované spojky lze ukazatel vypočítat podle vztahu z normy ČSN EN 10 243-1 (2.1 a 2.2) [26]:

$$S = \frac{m_{\text{výk}}}{m_{\text{ot}}} = \frac{11,10}{20,04} = 0,553,$$

$$\text{kde: } m_{\text{ot}} = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} \cdot h \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 218^2}{4} \cdot 68,4 \cdot 7\,850 \cdot 10^{-9} = 20,04 \text{ kg,}$$

$m_{\text{výk}}$  – hmotnost výkovku je odhadnuta s ohledem na tvarové charakteristiky součásti a dle předpokládaných přídavků a úkosů. Predikce se provádí s pomocí softwaru Autodesk Inventor Professional 2024. Odhadovaná hmotnost odpovídá hodnotě  $m_{\text{výk}} = 11,10 \text{ kg}$ .

Výsledek poměru hmotností předpokládaného tvaru výkovku a jeho obalového tělesa přibližně odpovídá hodnotě 0,55. Dle tabulky 4 je zvolena odpovídající skupina S2.

Tab. 4 Skupiny ukazatele členitosti tvaru. [26]

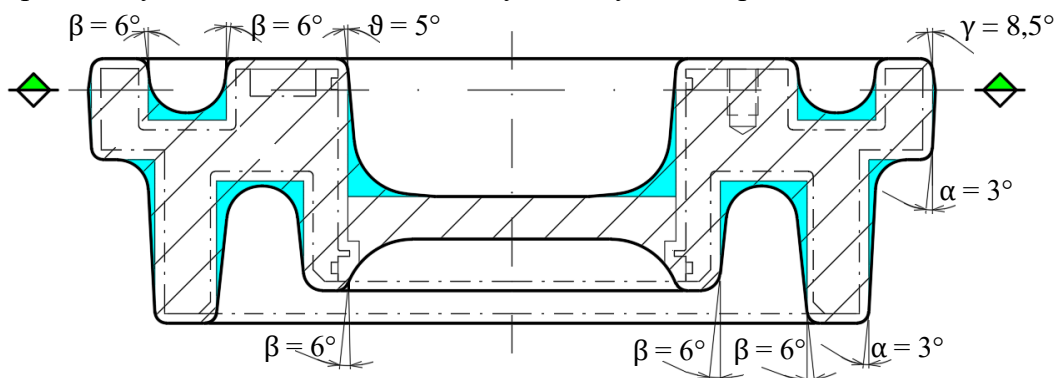
Skupina	S1	S2	S3	S4
Poměr [-]	0,63 až 1	0,32 až 0,63	0,16 až 0,32	do 0,16

- Dělicí plocha – je zvolena přímá a kolmá na hlavní osu souměrnosti dílce. Nachází se zhruba v jedné třetině ve směru rázu v horní části největšího průměru spojky (obr. 58). Hlavním důvodem zvoleného umístění je lepší tečení materiálu ve spodní zápusťce kvůli vyššímu umístění výronkové drážky. Jako mírným ale zanedbatelným nedostatkem se jeví vyšší riziko zhoršení kvality otřepu na střižné ploše po odstranění výronku.
- Úkosy – jsou stanoveny podle tabulky 5. Vzhledem ke zvolenému výrobnímu stroji se jedná o kategorii „lisy s vyhazovačem“. Pro vnější zkosení je zvolena maximální doporučená hodnota  $\alpha = 3^\circ$ . Pro vnitřní se horní mezní velikost  $5^\circ$  navýší o jeden stupeň nahoru a odpovídá hodnotě  $\beta = 6^\circ$ . Hlavním důvodem návrhů nebo následných úprav velikosti zkosení je snaha o zlepšení toku kovu v delších a užších oblastech členitějšího výkovku spojky. Vychází se ze zkušeností a poznatků z dlouhodobé výroby podniku.

Tab. 5 Úkosy – pro lis s vyhazovačem. [25]

	Vnější [°]	Vnitřní [°]
Zápusťkové výkovky se běžně vyrábějí s úkosy	3	7
Pro buchary a lisy bez vyhazovače	7	10
<b>Lisy s vyhazovačem</b>	<b>2 až 3</b>	<b>3 až 5</b>
Vodorovné kovací stroje	0 až 5	0 až 5

Z technologických důvodů jsou upraveny i některé další úkosy. Prvním z nich je zkosení ve středové oblasti, viz obr. 58. V daném místě je kvůli úspoře materiálu ponechán úhel  $\vartheta = 5^\circ$ . Vzhledem k velkému průměru otvoru se zde nepředpokládá riziko problému se zatékáním materiálu. Dalším důvodem je prostřížení díry v dokončovací operaci. Kvůli tomu zde nejsou kladeny příliš vysoké nároky na výslednou kvalitu povrchu, protože bude materiál odebrán. Druhou změnou je úkos  $\gamma = 8,5^\circ$ , který vznikl díky vyššímu umístění dělicí roviny. Velikost jeho úhlu je dle tabulky 5 vyšší, než doporučuje použitá norma ČSN 42 9030, ale z hlediska navrhované technologie je stále vyhovující. Změny jsou provedeny na základě zkušeností a zvyklostí výrobního podniku.



Obr. 58 Znáornění navržených úkosů na výkovku.

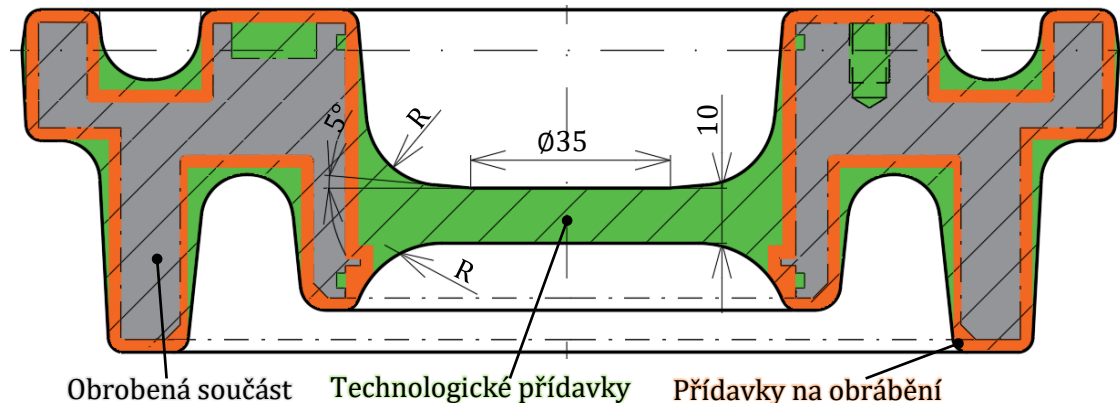
- Přídavky na obrábění – s ohledem na požadavky zákazníka jsou určeny podle německé normy DIN 7523 (příloha 7a) a jsou uvedeny v tabulce 6. Pro největší výšku 63,4 mm a maximální průměr 213 mm obrobene součásti se volí přídavek o velikosti 2,5 mm. S ohledem na charakteristiku a také konstrukční požadavky spojky se předpokládá její finální dokončení obráběním po celém povrchu. Proto jsou přídavky navrženy rovněž po celém povrchu dílce, respektive výkovku.

Tab. 6 Přídavky na obrábění dle DIN 7523 - max. výška 63,4 mm a max. průměr 213 mm. [28]

Největší průměr výrobku ve směru kolmo k rázu [mm]		Největší výška hotového výrobku [mm]					
		přes	63	160	250	400	1 000
		Do 63	160	250	400	1 000	2 500
přes	do	Přídavky na obrábění					
100	160	1,5	2	2,5	3	3,5	4
160	250	2	2,5	3	3,5	4	5
250	400	2,5	3	3,5	4	5	6

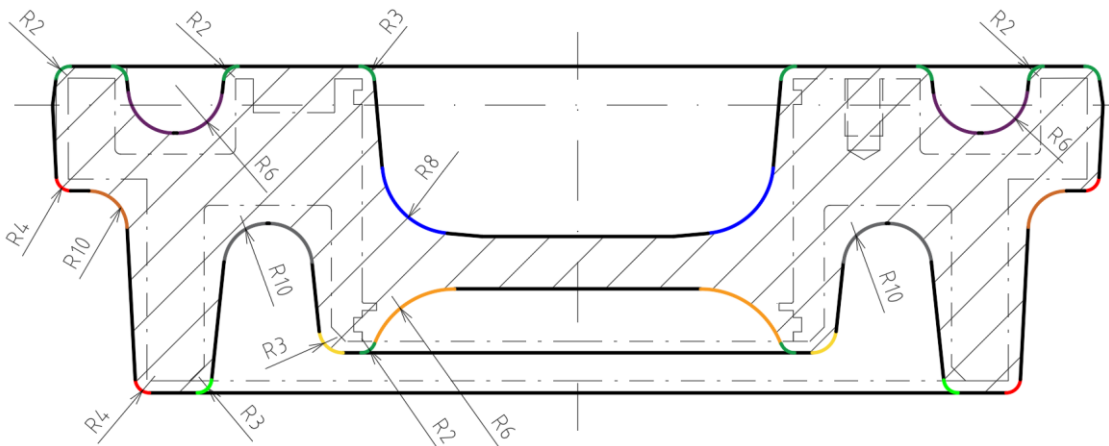
- Technologické přídavky – hotová součást není tvarově vhodná pro kování v zápustkách. Proto jsou navrženy přídavky do míst, které nelze nebo jdou jen velmi obtížně vykovat. Jedná se o kruhové vybrání  $3 \times \varnothing 17$  mm a díry pro závity  $3 \times M8$ . Dále je materiál přidán do navržených drážek o průměru 90 mm a také do hlubokého vybrání o výšce 37,1 mm. Poslední řešenou oblastí je středová díra  $\varnothing 84$  mm. Jedná se o velký otvor, pro který je zapotřebí navrhnout blánu. Lze ji stanovit podle přílohy 2b se znalostí maximální výšky a největšího průměru výkovku. Po přičtení zvolených přídavků na obrábění k rozměrům hotové součásti se jedná o hodnoty  $\varnothing D_v = 218$  mm a  $H_{max} = 68,4$  mm.

S ohledem na normu ČSN 42 9030 má mít blána tloušťku 15 mm, viz příloha 2b. Na základě praktických zkušeností z dlouholeté výroby firmy je ověřeno, že pro výkovky uvedených rozměrů technologicky vyhovují i výrazně tenčí blány. Hlavním benefitem při snížení její tloušťky je úspora materiálu a také její snadnější oddělení v dokončovací operaci. S tím souvisí nižší opotřebení dělicích nástrojů a potřeba menších střížných sil. Pro řešený výkovek je navržena kovací blána s tloušťkou  $s = 10$  mm. Z hlediska její geometrie má průměr  $d_s = 35$  mm a úhel zkosení  $\delta = 5^\circ$ , který se volí platí-li podmínka  $d - 1,25 \cdot R > 26$ , která je na základě následného ověření platná, viz  $85 - 1,25 \cdot 15 > 26$ , tedy  $66,25 > 26$ . Na obrázku 59 jsou následně znázorněny všechny navržené přídávky, tzn. technologické a na obrábění, společně s tvarem a rozměry kovací blány.



Obr. 59 Navržený tvar blány.

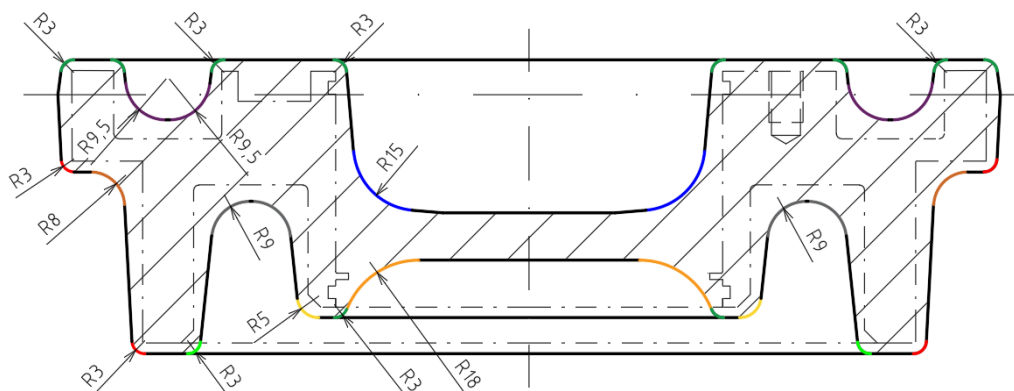
- Zaoblení hran a přechodů – na tvářeném výkovku musí být především kvůli zápustkám a lepšímu toku materiálu všechny hrany a přechody zaobleny. Prvotní návrh se inspiruje normou ČSN 42 9030. Postup určení poloměrů je uveden v příloze 8. Všechny zjištěné rozměry přechodů na výkovku jsou názorně zobrazeny obrázku 60.



Obr. 60 Schéma určených velikostí poloměrů – prvotní určení podle normy ČSN 42 9030.

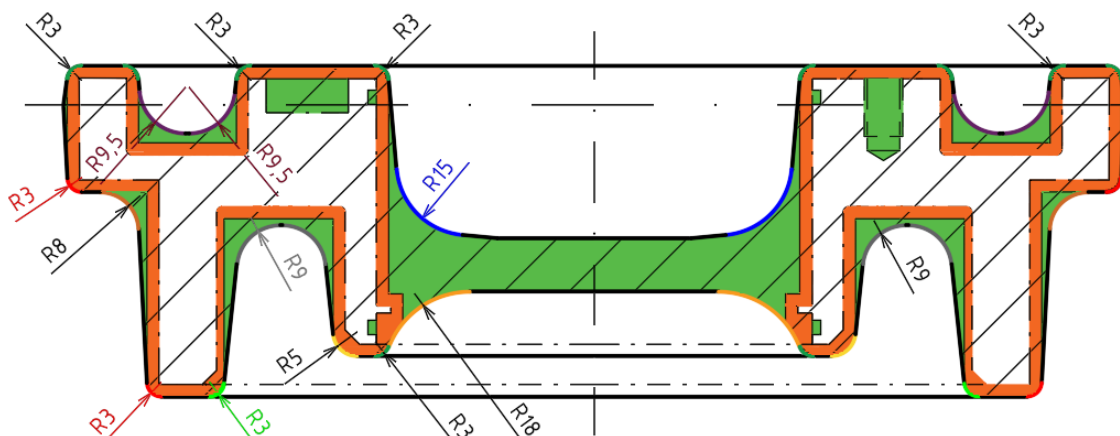
Problémem zhotoveného návrhu velikosti poloměrů je fakt, že se vychází a navazuje na postup podle normy ČSN 42 9030. Předchozím krokem bylo stanovení přídávku na obrábění, při kterém zmíněná norma stanovuje pro řešený dílec mírně vyšší hodnoty, viz příloha 7b. Dle doporučení ČSN EN 10243-1 se předepisuje rovněž o trochu větší přídavek, viz příloha 2a. Ve zpracovávaném návrhu výkovku byla pro určení velikosti přídávku na obrábění použita norma DIN 7528, která má hodnoty ze všech uvedených norem nejnižší. Jeho velikost odpovídá přídávku 2,5 mm. Například pro uvedenou hodnotu nelze s ohledem na doporučení ČSN 42 9030 zhotovit vnější zaoblení R4 tak, aby v daném místě zůstal zachován dostatečný přídavek na obrábění. [7; 26; 28; 51]

Dalšími důležitými faktory zvažovaných změn velikostí poloměrů jsou například vlivy na opotřebení nástrojů či různé technologické aspekty výroby, mezi které patří například zatékání materiálu s dostatečným vyplňováním rohů a dutin. S ohledem na tyto důvody jsou některé navržené poloměry upraveny. Všechny provedené konstrukční úpravy se nachází obrázku 61. Změny jsou provedeny také s ohledem na zvyklosti výrobní firmy.



Obr. 61 Schéma upravených poloměrů výkovku.

Na základě výše uvedených bodů je zhotoven model výkovku. Z programu Autodesk Inventor Professional je pro další postup vyčtena jeho hmotnost  $m_{\text{výk}} = 11,10 \text{ kg}$ . Na obrázku 62 jsou barevně vyobrazeny jednotlivé materiálové přídatky a další technologické náležitosti.



Obr. 62 Souhrnné zobrazení konstrukce výkovku s navrženými přídatky a poloměry.

Po návrhu tvaru výkovku se musí stanovit mezní úchylky. Všechny jsou určeny podle evropské normy ČSN EN 10243-1, viz příloha 2a. Vztahují se k jednotlivým rozměrům dílce a jedná se o přípustné odchylky od jejich jmenovité hodnoty. S ohledem na jejich charakteristiku se dělí na několik základních skupin [7; 26; 28]:

- První – jde o nejdůležitější kategorii mezních úchylek. Jejich stanovená velikost včetně všech náležitostí pro návrh se nachází v tabulce 7. Hodnoty platí pro vnější rozměry. Velikost úchylek pro vnitřní rozměry je nominálně stejná, ale s opačným znaménkem.

Tab. 7 Mezní úchylky skupiny 1 a vybrané parametry k jejich určení. [26]

Přesazení [mm]	Otřep/Sestřižení [mm]	Hmotnost [kg]	Obtížnost kování
1,2	1,4	10 až 20	M1
Ukazatel členitosti tvaru		Úchylky výšek	Úchylky průměrů
S2		+1,9 a -0,9	+2,4 a -1,2



- Druhá – skupina vymezující přípustné hodnoty pro tloušťky všech rozměrů a stopy po vyhazovačích, které budou s velkou pravděpodobností při výrobě použity. Postup jejich určení je znázorněn v příloze 2a a jsou totožné s úchytkami první kategorie, které jsou uvedeny v tabulce 7.
- Třetí – jedná se o určení mezních rozměrů pro přímot a rovinnost. Jejich stanovení je znázorněno v příloze 9a. Zvolený stupeň přesnosti je běžný – F. Pro největší průměr na výkovku  $D_v = 218$  mm poté odpovídá úchylka o velikosti 1 mm. Pro maximální výšku  $H_{\max} = 68,4$  mm pak hodnota 0,6 mm.

Další důležitou a velkou skupinou jsou ostatní mezní úchytky. Jejich určení je provedeno na základě normy ČSN EN 10 243-1 (příloha 3a), kam spadá několik podkategorií [7; 26; 28]:

- Zaoblení hran a přechodů – jejich velikosti jsou určeny dle tabulky 8, kde jsou uvedeny hodnoty pro vnitřní poloměry. Pro vnější pak platí obrácené hodnoty.

Tab. 8 Mezní úchytky zaoblení hran a přechodů pro R3 až R18. [26; 28]

Úchytky zaoblení hran a přechodů		
R [mm]	+	-
$R \leq 10$	50%	25%
$10 \leq R \leq 32$	40%	20%
$32 \leq R \leq 100$	32%	15%

V návrhu jsou použity velikosti zaoblení od 3 mm do 18 mm. Proto jsou řešeny pouze dvě skupiny úchylek (tabulka 8). V dalším kroku jsou pak provedeny vzorové výpočty pro vnější poloměr **r3** a vnitřní **R15**:

$$r_3 = \begin{pmatrix} +0,25 \\ -0,50 \end{pmatrix} \cdot r_3 = \begin{pmatrix} +0,25 \\ -0,50 \end{pmatrix} \cdot 3 = \begin{pmatrix} +0,75 \\ -1,5 \end{pmatrix} \text{ mm}, \quad (3.1)$$

$$R_{15} = \begin{pmatrix} +0,40 \\ -0,20 \end{pmatrix} \cdot R_{15} = \begin{pmatrix} +0,40 \\ -0,20 \end{pmatrix} \cdot 15 = \begin{pmatrix} +6,0 \\ -3,0 \end{pmatrix} \text{ mm}. \quad (3.2)$$

Úchytky pro vnější zaoblení **r3** odpovídají hodnotě +0,75 a -1,5 mm a pro vnitřní R3 velikosti +6,0 a -3,0 mm. Ostatní hodnoty pro další zaoblení včetně těch vzorových jsou souhrnně uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9 Vypočítané hodnoty poloměrů a mezních úchylek pro dílčí zaoblení hran a přechodů.

Poloměry [mm]	r3	r5	R3	R8	R9	R9,5	R15	R18
Úchytky [mm]	+0,75 -1,5	+1,25 -2,5	+1,5 -0,75	+4,0 -2,0	+4,5 -2,25	+4,75 -2,38	+6,0 -3,0	+6,8 -3,6

- Úchytky jehel/otřepů – vytvoření jehel, které vznikají při ostříhování nebo děrování se dovozuje a jsou schváleny odběratelem. Jejich rozsah se vztahuje k hmotnosti hotového výkovku, která se podle tabulky 10 nachází ve třetím řádku. Zde jsou také vyznačeny hodnoty odpovídající navrhovanému výkovku. Jejich umístění musí být podle normy ČSN EN 10 243-1 znázorněno na finálním výkresu výkovku, tj. po dokončení výroby, viz výkres 2024\_DP\_217110\_S03. Primárním důvodem je kontrolní požadavek pro konečné schválení odběratelem před samotnou výrobou.

Tab. 10 Určení velikosti úchylek jehel – hmotnost výkovku  $m_{\text{výk}} = 11,10$  kg. [26]

Úchylky jehel		
Hmotnost nad – do [kg]	Výška u [mm]	Šířka v [mm]
$m_{\text{výk}} \leq 1$	1	0,5
$1 < m_{\text{výk}} \leq 6$	1,6	0,8
$6 < m_{\text{výk}} \leq 40$	2,5	1,2
$40 < m_{\text{výk}} \leq 250$	4	2

- Tolerance povrchu – hodnotí velikost maximálních možných prohloubenin na výkovku po okujích nebo po úpravě povrchu tryskáním. Na obráběných plochách musí zůstat vždy nejméně polovina jmenovitého přídavku, který činí 2,5 mm. Pro neobráběné plochy jsou tolerance odlišné, avšak řešený výkovek se bude obrábět po celém svém povrchu.
- Úchylky ploch úkosů – v praxi se jim nepředepisují zvláštní tolerance. V případě nevyhovujícího určení jejich úhlu zkosení, například zjištěním ze simulací, je třeba se zákazníkem dohodnout úpravu, tak aby nedocházelo k silnému opotřebenosti zápustek.

Výsledná podoba schváleného návrhu výkovku, jenž obsahuje všechny potřebné náležitosti, je uvedena na výkrese 2024\_DP\_217110\_S02 a musí být před zahájením výroby schválena odběratelem. Zákazníkovi se předkládá výsledná dokumentace výkovku v dokončeném tudíž ostriženém stavu, viz výkres 2024\_DP\_217110\_S03. V příloze 9b se nachází tabulka se souhrnnými hodnotami všech stanovených přídavků, úchylek a tolerancí, které jsou pro výrobu výkovku navrženy.

### 3.2 Výronková drážka

Pro navrhovanou výrobu se předpokládá použití svislého kovacího lisu, pro které se používá otevřená výronková drážka. Z důvodu běžného zápustkového kování se pro následné výpočty a konstrukci volí nejpoužívanější a obyčejný – tvarový typ I. Analytický postup se inspirovuje normou ČSN 22 8306. Následná kontrola a úprava rozměrů bude provedena podle tabulky 11, která vychází ze znalosti síly použitého tvářecího stroje. Volba svislého kovacího lisu proběhla již na začátku celého návrhového postupu vzhledem k charakteristice dílce a strojnímu zařízení podniku. Na základě rozměrových parametrů navrženého výkovku a s ohledem na dlouholeté zkušenosti Zetor Kovárny se předpokládá velikost kovací síly v rozmezí 28 000 až 35 000 kN. V rámci návrhu se počítá s nejhorší možnou variantou, tudíž je pro výrobu zvolen lis s první bližší vyšší tvářecí silou, který firma vlastní. Odpovídá tomu lis LZK 4 000 se silou 40 000 kN.

Tab. 11 Parametry pro určení rozměrů výronkové drážky pro zvolený lis LZK 4 000. [25]

Síla lisu [kN]	$h_v$ [mm]	$b_m$ [mm]	$b_z$ [mm]	R [mm]
16 000	2,0 až 3	5 až 8	32	1,5 až 2,5
25 000	2,5 až 3	6 až 10	38	
31 500	2,5 až 4,5	6 až 11	40	2 až 3
40 000	3,5 až 5,5	7 až 12	42	

Primárními vstupními parametry pro následné výpočty jsou údaje o výkovku. Jeho průměr je  $D_v = 218$  mm a hmotnost  $m_{\text{výk}} = 11,10$  kg, která je pro vyšší přesnost získána na základě modelu v programu Autodesk Inventor Professional [52]. Výpočtové vztahy pro návrh drážky:

- Výška můstku se zjistí na základě vztahu (2.17):

$$h_v = 0,1725 \cdot m_{\text{výk}}^{0,16} \cdot D_v^{0,5} = 0,1725 \cdot 11,10^{0,16} \cdot 218^{0,5} = 3,74 \text{ mm.}$$

Výška můstku je zaokrouhlena na rozměr 3,8 mm. Kvůli její menší velikosti může dojít k velkému navýšení kovací síly. Vystává zde riziko jejího nadměrného zvětšení až nad kapacity zvoleného stroje – LZK 4 000. Na základě uvedených důvodů je výška můstku zvětšena o 1 mm. Zvolený přídavek bude mít pouze nepatrný vliv na další konstrukční výpočty drážky. Dále bude mít kladný dopad při zjišťování kovacích sil, u kterých se předpokládá jejich značné snížení. Naopak negativní vliv může mít na tečení materiálu v zápustkách, a to hlavně v poslední fázi při dokování. I přesto je navržena jeho výška s uvedeným přídavkem a odpovídá rozměru  $h_v = 4,8$  mm. Postup určení rozměru výšky můstku je proveden s ohledem na dlouhodobé zkušenosti podniku. Stanovený rozměr se podle tabulky 11 nachází v intervalu 3,5 až 5,5. V pozdější fázi návrhu výroby bude provedená volba ověřena pomocí simulačních softwarů a v případě potřeby lze upravit.

- Šířka můstku se vypočte podle vzorce (2.18):

$$b_m \leq 3 \cdot h_v \leq 3 \cdot 4,8,$$

$$b_m \leq 14,40 \text{ mm.}$$

Zjištěný rozměr 14,4 mm je dle tabulky 11 nevyhovující. Pro konstrukci je šířka můstku upravena na  $b_m = 10$  mm. Změna je provedena s ohledem na zvyklosti a také zkušenosti výrobního podniku. Upravený rozměr podle kritérií tabulky 11 již vyhovuje.

- Hloubka zásobníku se určí dosazením do (2.19):

$$n = 0,4 \cdot h_v + 2 = 0,4 \cdot 4,8 + 2 = 3,92 \text{ mm.}$$

Výsledná hloubka zásobníku je z konstrukčních a také výrobních důvodů zaokrouhlena na celé vyšší číslo  $n = 4$  mm.

- Výpočet poloměru přechodu dutiny do výronku se stanoví dle (2.20 a 2.21):

$$r = \frac{\sqrt{S_v}}{200} + 0,004 \cdot H_D = \frac{\sqrt{37\,325,3}}{200} + 0,004 \cdot 57,9 = 1,198 \text{ mm,}$$

$$\text{kde: } S_v = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 218^2}{4} = 37\,325,26 \text{ mm}^2,$$

Výsledek je zaokrouhlen na hodnotu 37 325,3 mm<sup>2</sup>.

$$H_D = H_{\text{max}} - \left( h_{\text{dr}} - \frac{h_v}{2} \right) \text{ [mm]}, \quad (3.3)$$

$$= 68,4 - \left( 8,1 + \frac{4,8}{2} \right) = 57,9 \text{ mm.}$$

Výška zápustkové dutiny k přechodu do výronkové drážky je 57,9 mm.

Pro konstrukci přechodu drážky je zvolen poloměr zaoblení hrany 1 mm. Důvodem volby nižší velikosti poloměru je hlavně menší průřez a kvalitnější střížná plocha, která vzniká při ostříhu výronku (menší otřep) nebo větší natlakování materiálu, který často dotéká v konečné dokovací operaci až v posledních milimetrech sevření zápustek.

Další velkou výhodou je menší opotřebením střížných nástrojů. Obzvláště jde o situace, kdy se ostříhuje chladnější výkovek. V tomto případě je nadbytečně velký průřez dělené plochy nežádoucí. Důvodem je vznik špatné kvality střížné hrany s velkými otřepy. Možnou nevýhodou návrhu příliš malého poloměru je jeho velké opotřebením v průběhu výroby. Tento problém se v průběhu výroby řeší jednoduchou opravou – navařováním s následným obrobením.

V době provádění oprav se do provozu standardně upíná další sada kovacíh nástrojů. Poloměr zaoblění přechodu do zásobníku se určí dosazením do vztahu (2.22):

$$R_p = \frac{h_v}{2} = \frac{4,8}{2} = 2,4 \text{ mm.}$$

Pro navrhovanou geometrii je výsledná hodnota zaokrouhlena na  $R_p = 2 \text{ mm}$ . Důvodem návrhu nižší hodnoty poloměru v oblasti přechodu do zásobníku je mírné zvýšení tlaku při kování, a to kvůli malému prodloužení šířky můstku – díky dané volbě zaoblění.

Délka můstku je v dokovací fázi výroby značně důležitá pro správné dotečení materiálu. Vzhledem k malé velikosti navrženého poloměru  $R_p$  dochází k jeho poměrně velkému opotřebení. Řešením je jednoduchá oprava, která spočívá v navaření kovu. Následným obrobením se dosáhne požadovaných rozměrů a přesností.

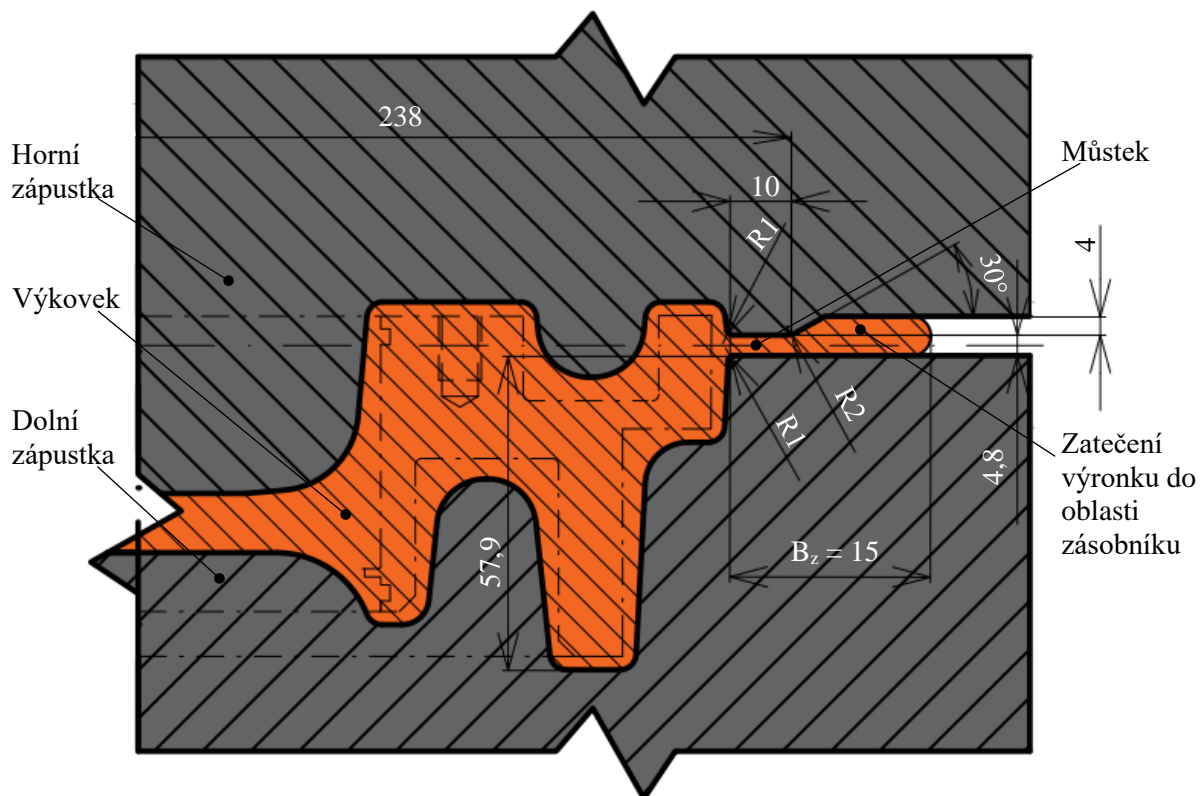
- Celková plocha výkovku s můstkem se pak určí vztahem (2.23 a 2.24):

$$S_c = \frac{(\pi \cdot D_{\text{výr}}^2)}{4} = \frac{(\pi \cdot 238^2)}{4} = 44\,488,09 \text{ mm}^2,$$

$$\text{kde: } D_{\text{výr}} = D_v + 2 \cdot b_m = 218 + 2 \cdot 10 = 238 \text{ mm.}$$

Výsledný průměr výkovku s můstkem má 238 mm. Jeho celková plocha poté odpovídá velikosti 44 488,1 mm<sup>2</sup>.

Pro větší přehlednost je navržena výronková drážka zobrazena na obrázku 63. Podle zvyklostí podniku se pro středně velké výkovky, u kterých se předpokládá kování na svislém klikovém lisu LZK 4 000, navrhuje míra zatečení kovu  $B_z = 15 \text{ mm}$ . Poddimenzování daného parametru by mohlo mít za důsledek nedotečení výkovku (materiálu) z důvodu nedostatku kovu. Naopak navržení příliš velké míry hodnota zatečení kovu  $B_z$  zapříčiní větší spotřebu materiálu, který se navrhuje při výpočtu polotovaru. Důsledkem je poté zhoršení ekonomičnosti výroby nebo vyšší opotřebenění zápustek, což je nežádoucí.



Obr. 63 Detail návrhu konstrukce výronkové drážky v řezu a včetně délky zatečení kovu.

### 3.3 Polotovar

Výpočet velikosti polotovaru vychází ze znalosti objemu výkovku, který byl pro vyšší přesnost zjištěn z programu Inventor Autodesk Professional 2024 –  $V_{\text{výk}} = 1\,420\,999,5 \text{ mm}^3$ . Vzhledem k neustálé platnosti zákona o zachování objemu se velikosti polotovaru a výkovku musí rovnat, avšak k němu se musí ještě připočíst objem výronku a opalu:

- Velikost výronku je určena dle vztahů (2.7, 2.8 a 2.9):

$$V_{\text{výr}} = o_v \cdot \left[ b_m \cdot h_v + \left( N + \frac{h_v}{2} \right) \cdot B_z \right] = 684,9 \cdot \left[ 10 \cdot 4,8 + \left( 8,8 + \frac{4,8}{2} \right) \cdot 15 \right] =$$

$$V_{\text{výr}} = 151\,218,68 \text{ mm}^3,$$

$$\text{kde: } o_v = \pi \cdot D_v = \pi \cdot 218 = 684,9 \text{ mm},$$

$$N = h_v + n = 4,8 + 4 = 8,8 \text{ mm},$$

$$B_z = 15 \text{ mm}; \text{ zvoleno na základě podnikových zkušeností.}$$

Pro další výpočty je výsledný objem výronku zaokrouhlen na  $151\,218,7 \text{ mm}^3$ .

- Objem opalu se stanoví vzorcem (2.10):

$$V_{\text{opl}} = k \cdot (V_{\text{výk}} \cdot V_{\text{výr}}) = 0,01 \cdot (1\,420\,999,5 \cdot 151\,218,7) = 15\,652,31 \text{ mm}^3,$$

kde:  $k = 0,01$ ; vzhledem k dostupnému zařízení firmy a charakteristice výkovku (rotační tvar, velikost) se předpokládá indukční ohřev polotovaru. Koeficient  $k$  je stanoven podle přílohy 10a.

Výsledná hodnota je pro další výpočty zaokrouhlena na  $V_{\text{opl}} = 15\,652,3 \text{ mm}^3$ .

- Celková velikost polotovaru se pak spočítá dle (2.6):

$$V_{\text{pol}} = V_{\text{výk}} + V_{\text{výr}} + V_{\text{opl}} = 1\,420\,999,5 + 151\,218,7 + 15\,652,3 =$$

$$= 1\,580\,883,73 \text{ mm}^3,$$

kde:  $V_{\text{výk}} = 1\,420\,999,5 \text{ mm}^3$ ; viz Inventor Autodesk Professional 2024.

Hledaný objem polotovaru má velikost  $1\,580\,883,73 \text{ mm}^3$ . Pro další postup je výsledek zaokrouhlen na  $V_{\text{pol}} = 1\,580\,884,7 \text{ mm}^3$ .

Pro výpočet rozměrů polotovaru se vychází ze znalosti pravidla petchování, tj. štíhlostní poměr. Jedná se o poměr průměru ku délce špalíku. Slouží pro ověření možného nekontrolovatelného vybočení polotovaru do strany z důvodu ztráty stability v počátku jeho petchování. Odvozené vzorce pro jednotlivé rozměry jsou:

- Výpočet průměr polotovaru (2.11):

$$D_o = 1,08 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{\text{pol}}}{\lambda}} = 1,08 \cdot \sqrt[3]{\frac{1\,580\,884,7}{2}} = 99,85 \text{ mm},$$

kde:  $\lambda = 2$ ; koeficient je zvolen jako ideální hodnota, která se pohybuje okolo středu z rozsahu petchovacího pravidla  $\lambda = (1,5 \div 2,8)$ .

Vypočtený výsledek se musí zaokrouhlit s ohledem na normalizované průměry tyčí od hutního dodavatele podniku. Zvolený průměr má hodnotu  $D_o = 100 \text{ mm}$ .

- Stanovení délky dle vztahu (2.12):

$$L_o = \frac{4 \cdot V_{\text{pol}}}{\pi \cdot D_o^2} = \frac{4 \cdot 1\,580\,883,73}{\pi \cdot 100^2} = 201,28 \text{ mm}.$$

Výsledná délka polotovaru je zaokrouhlena na rozměr  $L_o = 201 \text{ mm}$ . Volba menší délky polotovaru oproti výpočtu je hlavně z důvodu snížení nákladů na vstupní materiál, Důsledkem je celkové zlepšení ekonomičnosti výroby.



Vzhledem k přídávům, které se na polotovary běžně přidávají, například na opal nebo výronek, se vlivem takto malého zaokrouhlení nepřepokládá problém s nedostatkem materiálu pro bezproblémové vykování, tzv. dotečení, součásti.

Posledním krokem ke správnému návrhu je ověření štíhlostního poměru podle vzorce (2.13):

$$\lambda = \frac{L_o}{D_o} = \frac{201}{100} = 2,01.$$

Výsledek se nachází v intervalu pýchovacího pravidla od 1,5 do 2,8. Podmínka je splněna.

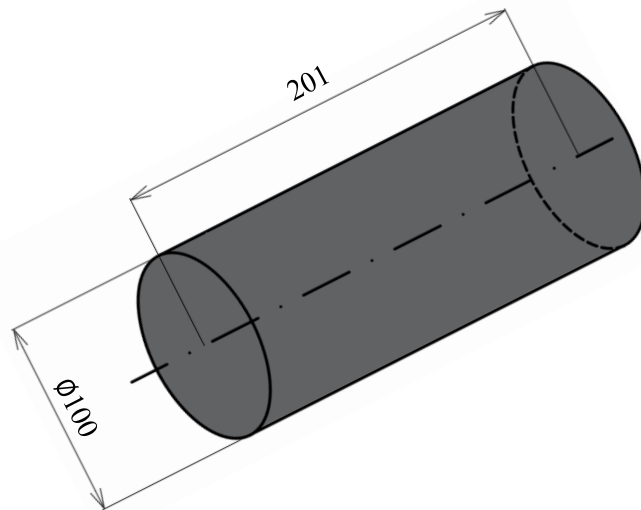
Dle uvedených výpočtů je pro výrobu navržen jako polotovar špalík o průměru 100 mm a délce 201 mm. Jeho hmotnost je pro přesnost určena softwarem Autodesk Inventor Professional 2024 na  $m_{pol} = 12,392$  kg. Shrnutí zjištěných výsledků a další technické specifikace jsou uvedeny v tabulce 12. Na dílně se polotovary běžně nachází v ocelových ohradových paletách, které jsou standardně označeny materiálovou průvodkou. Na ní se kvůli lepší identifikaci uvádí několik základních údajů, například číslo objednávky, součásti nebo tavby, dále rozměry, váha nebo počet kusů (příloha 10b). Ukázka navrženého polotovaru se nachází na obrázku 64.

Tab. 12 Podrobná specifikace polotovaru. [8; 10]

Materiál	Ocel 12 020	Průměr [mm]	100
Materiálová norma	ČSN 41 2020	Délka [mm]	201
Hutní provedení	Válcováno za tepla	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	7 854
Druh podle výroby	Uklidněná	Hmotnost [kg]	12,392
Ideální teplota kování [°C]	1 150	Objem [mm <sup>3</sup> ]	1 578 650,3



a) reálný stav



b) 3D model s rozměry

Obr. 64 Příklad ukázky studeného špalíku (polotovaru) včetně jeho modelu s rozměry.

### 3.3.1 Předkovací operace

Před zápusťkovým kováním se musí navržený polotovár nejprve vhodně zpracovat. Důvodem jsou výrobní a technologické podmínky zvolené technologie. Jednotlivé úkony jsou shrnuty v následujících bodech podle jejich zařazení ve výrobním procesu [13; 53; 54; 55]:

- Dělení – navrhovaný vstupní materiál se pořizuje ve formě plných tyčí o délce 6 metrů, která se určuje dle normalizovaných rozměrů na základě normy ČSN EN 10060. Dalším sledovaným parametrem je maximální přípustná kapacita použitého stroje, kterým je pásová pila Behringer HPB 413, viz obr. 65. Její vybrané technické parametry jsou uvedeny v tabulce 13. Zhotovení přířezů se realizuje v kooperaci s jiným podnikem.



Obr. 65 Pásová pila Behringer HPB 413 [55].

Tab. 13 Vybrané parametry dělicího zařízení Behringer HPB 413. [55]

Max. průměr [mm]	Max. délka [m]	Velikost série	Tolerance řezu
20 až 420	10	střední až velké	± 0,1

- Ohřev – zpracovávaným polotovarem je středně velký špalík. Proto lze zvolit indukční ohřev, který je ve firmě instalován do celé linky (obr. 66). Použité zařízení je kompaktní středofrekvenční indukční ohříváč KSO 1 200/1,2-C40, který má dvoustupňový ohřev a disponuje velkým rozsahem výkonu (příloha 11). První modul je předehřívací a druhý dohřívací. Díky tomu se sníží okujení a oduhlíčení ohřívané oceli ve srovnání s řešením pouze jednoho modulu. Čas ohřevu pro průchod cívkou zvoleným zařízením je navržen dle výpočtových vztahů s následným ověřením podle tabulky 14 [13; 53; 54]:

$$\begin{aligned}
 t_o &= \frac{l_c}{L_o} \cdot t_{pol} \text{ [s]}, \\
 &= \frac{4\,000}{201} \cdot 17,84 = 355,1 \text{ s},
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

kde:  $l_c$  – délka cívky zvoleného ohříváče [mm];  $l_c = 4\,000$  mm,

$t_{pol}$  – čas na ohřátí polotovaru [s],

$$\begin{aligned}
 t_{pol} &= m_{pol} \cdot t_{1kg} \cdot 1,2 \text{ [s]}, \\
 &= 12,392 \cdot 1,2 \cdot 1,2 = 17,84 \text{ s},
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

kde:  $t_{1kg}$  – čas na ohřátí 1 kg polotovaru dle zařízení [s],

$$\begin{aligned}
 t_{1kg} &= \frac{m_{1kg}}{m_{KI}} \cdot 3600 \text{ [s]}, \\
 &= \frac{1}{3000} \cdot 3600 = 1,2 \text{ s},
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

kde:  $m_{KI}$  – kapacita ohříváče [ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

Výsledný čas po zaokrouhlení odpovídá 355 sekundám. Následně se hodnota musí zkontrolovat s přibližnými hodnotami v tabulce 14. Výsledek je vyhovující.

Tab 14. Přibližné nastavení parametrů pro indukční ohřev – nízkouhlíkové oceli 12 020. [54]

Průměr [mm]	100			
Frekvence [Hz]	700	1 000	1 500	2 000
Čas [s]	365	410	460	510

Před konečným návrhem ohřívací linky se musejí ověřit různá kritéria zpracovávaného přířezu, které jsou určeny doporučením výrobce a jsou uvedeny v tabulce 15.

Tab. 15 Kontrolní parametry pro vybrané zařízení KSO 1 200/1,2-C40. [53; 54]

Délka [mm]	Průměr [mm]	Výstupní teplota [°C]	Materiál
$1,1 \cdot D_o$ až 500	80 až 160	max. 1 300	Magnetická ocel

Ověření minimální délky:

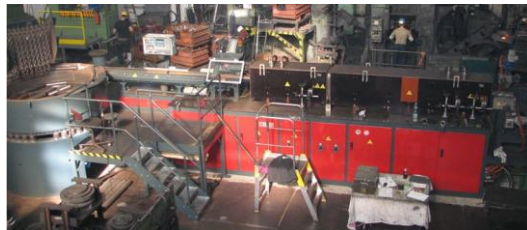
$$L_{KI} < L_o < D_o \text{ [mm]}, \quad (3.7)$$

$$110 < 201 < 500 \text{ mm},$$

$$\text{kde: } L_{KI} = 1,1 \cdot D_o \text{ [mm]}, \quad (3.8)$$

$$L_{KI} = 1,1 \cdot D_o = 1,1 \cdot 100 = 110 \text{ mm}.$$

Všechny výše kontrolované parametry jsou vyhovující.



a) ukázka v praxi



b) ukázka 3D modelu

Obr. 66 Ohřívací výrobní linka [53].

Vstupní mechanizace umožňuje plně automatické zakládání přířezů. Pro dostatečnou kapacitu a plynulý chod výroby se používá kruhový vibrační zásobník VZ 2 400 (příloha 11b). Dále je doplněn o výklopník palet VPN 2 000, který slouží k doplňování zásobníku z ohradových palet. Další technické parametry se nachází v příloze 11c. K dalšímu transportu ohřátých polotovarů z induktoru do strojů výrobní linky se na výstupu používá kladkový vytahovač. Pro následné přemístění špalíků do lisu je nainstalován dopravník s unášeči, který je vybaven třídícími klapkami pro možnost vyřazení nedohřátého nebo přehřátého materiálu. Pro kontrolní měření teplot polotovarů se používá bezdotykový pyrometr UPF IV. Jeho technické specifikace jsou uvedeny v příloze 11d. Všechna použitá zařízení jsou pro představu zobrazena na obrázku 67.



a) vibrační zásobník



b) výklopník



c) dopravník s unášeči



d) třídící klapky



e) pyrometr

Obr. 67 Použitá zařízení pro zajištění plynulejšího chodu výroby [53].



Při ohřevu polotovaru dojde k zvětšení jeho celkového objemu, který lze analyticky přibližně určit přepočtem jednotlivých rozměrů špalíku koeficientem z tabulky 16. Pro „běžné oceli“ je zvolena nejvyšší doporučená hodnota 1,3% (0,013). Přibližné rozměry ohřátého, respektive zvětšeného polotovaru jsou – výška  $H_{op} = 203,6$  mm a průměr  $D_{op} = 101,3$  mm. Jeho důležitost spočívá v použití pro následné simulace zápusťkového kování pomocí výpočetních softwarů nebo při návrhu nástrojů, například při konstrukci dutiny pro založení polotovaru.

Tab. 16 Hodnoty smrštění u jednotlivých materiálů – volba běžnou nízkouhlíkovou ocel 12 020. [25]

Materiál	Slitiny Al	Běžné oceli	Ložiskové oceli	Austenitické oceli
Smrštění [%]	0,6 až 1,0	1,0 až <b>1,3</b>	1,5	1,5 až 2,0

V rámci tvorby experimentu byly některé návrhy při vypracování průběžně ověřovány anebo jsou v práci pro názornost použity fotografie z jiné podnikové výroby, viz obr. 68. Na něm se nachází ohradová paleta se studenými nadělenými špalíky, které jsou připraveny na zavedení do ohřívací linky. Dále jsou zde zachyceny nedohřáté polotovary, které se běžně znovu zavádí do výrobní linky. Důvodem jejich vzniku může být například nevhodná manipulace (dlouhý manipulační čas, vypadnutí špalíku z kleští operátora lisu), porucha anebo počáteční spuštění indukčního ohříváče, ke kterému dochází například na začátku výroby.



a) nedohřáté polotovary



a) nadělené špalíky

Obr. 68 Ukázka nedohřátých polotovarů a nadělených špalíků.

V některých případech může při ohřevu špalíků v indukčním zařízení docházet k problémům se vzájemným ulpíváním polotovarů na jejich řezných plochách, například vlivem vysoké teploty v kombinaci s tlakem podávacího zařízení. Důsledkem může být jejich spojení, které je nežádoucí. V takových případech se před ohřevem musí zařadit potěr řezných ploch křídovou směsí, viz obr. 69. Jedná se o preventivní opatření proti slepení polotovarů.



a) směs s křídovým potěrem

Aplikační štětka

Potěr



b) aplikace potěru na polotovar

Aplikace potěru na řezné hraně

Polotovar

Obr. 69 Křídový potěr a jeho aplikace na řezné ploše špalíku.

### 3.4 Návrh kovacích operací s podporou simulací

Pro správný návrh výroby a její optimalizaci ve všech kovacích krocích jsou využity numerické simulace v softwaru Simufact Forming 16.0. Nejprve je důležité jejich správné nastavení. Musí se co nejvíce přiblížit reálnému procesu výroby. Vybraný výpočetní simulační model využívá k řešení metodu konečných prvků. Všechny geometrie jsou řešeny axisymetrií. Před začátkem tvorby simulací je zapotřebí zjistit konkrétní informace o materiálovém modelu zvolené oceli 12 020. Modely se nachází v databázi softwaru Simufact Forming 16.0 v několika variantách. Pro simulace je vybrán materiálový model s označením DB-Ck15-h4, který odpovídá tvářené oceli 12 020, viz příloha 1. Její měrná hmotnost odpovídá  $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Pro určení průběhů přirozených přetvárných odporů při tvářeni za tepla se v daném softwaru mohou použít různé modely, například HFM, Hensel-Spittel nebo GMT. Pro potřeby simulace je vybrán výpočetní model GMT (obr. 70), který se popisuje závislost mezi napětím a deformacemi v jejich celém rozsahu a rovněž se nachází v databázi softwaru. Jedná se o hlavní charakteristiku plastického chování materiálu. Křivky vyhodnocuje v závislosti na teplotě, deformaci nebo deformační rychlosti. Elastické vlastnosti jsou s ohledem na Hookův zákon charakterizovány Youngovým modulem pružnosti  $E = 210\,000\text{ MPa}$  a Poissonovým číslem  $\mu = 0,283$ . Další doplňující informace se nachází v příloze 12. Pro výpočet se využívá konstitutivní rovnice [56; 57]:

$$\sigma_p = C_1 \cdot e^{C_2 \cdot T} \cdot \varphi^{n_1 \cdot T + n_2} \cdot e^{\frac{I_1 \cdot T + I_2}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{m_1 \cdot T + m_2}, \quad (3.9)$$

kde:  $\sigma_p$  – přirozený přetvárný odpor materiálu [MPa],

$\varphi$  – logaritmičká deformace [-],

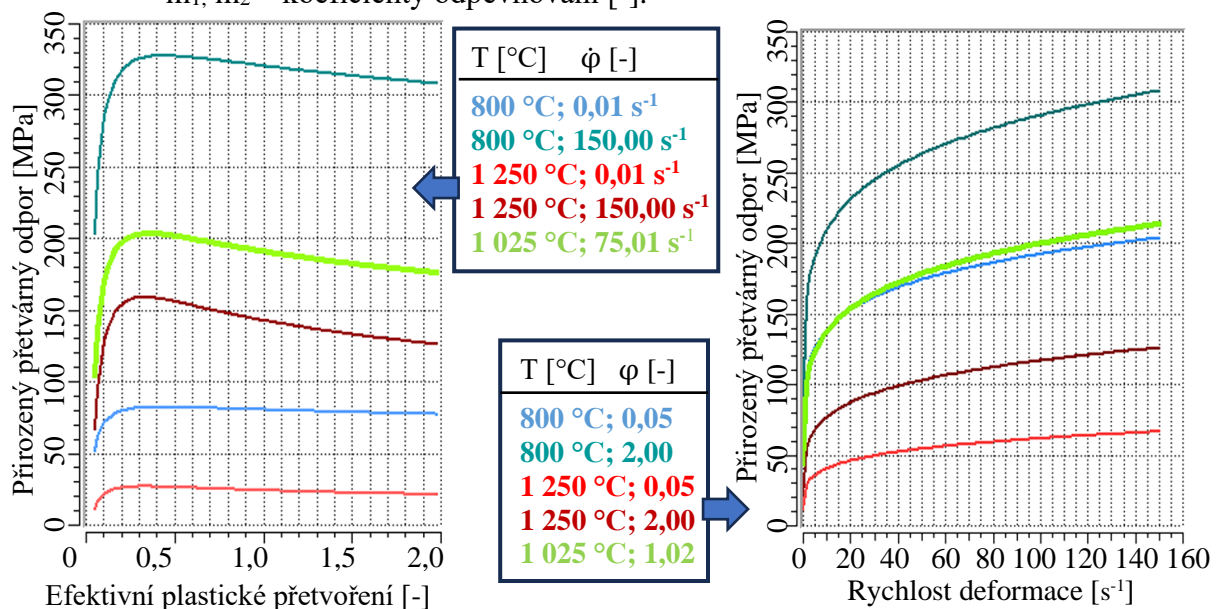
$\dot{\varphi}$  – rychlost deformace [ $\text{s}^{-1}$ ],

$T$  – teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$C_1, C_2, I_1, I_2$  – materiálová konstanta [-],

$n_{1,2}$  – koeficienty zpevnování [-],

$m_1, m_2$  – koeficienty odpevnování [-].



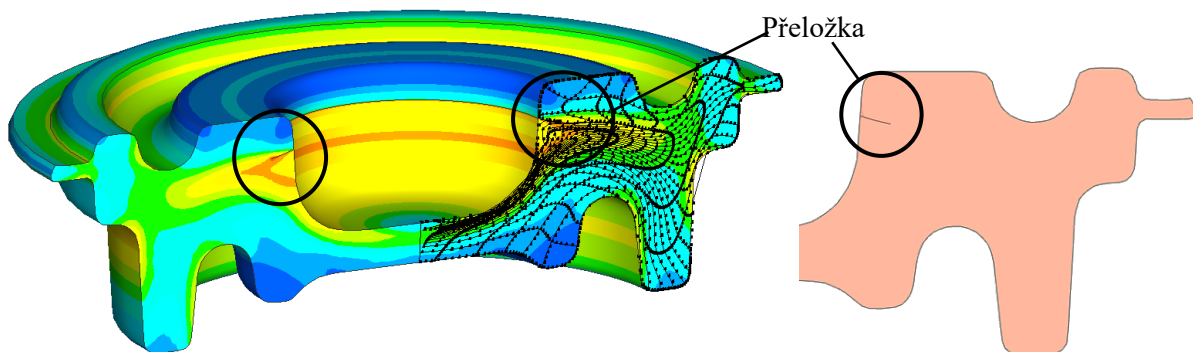
Obr. 70 Průběhy křivek přirozených přetvárných odporů pro model GMT [56].

Použité zápustky pro simulace jsou ideálně tuhé a zjednodušené, tzn. monolitní konstrukce. Vzhledem k teplotnímu zatížení jsou definovány se zahrnutím vedení tepla. Pro znázornění předpokládaného průběhu výroby se všemi výstupy, které simulace poskytují, například průběh napětí, teplot, tok materiálu, vznik vad apod., jsou zjednodušené modely dostačující. Určující jsou funkční plochy a tvary navržených geometrií použitých nástrojů.



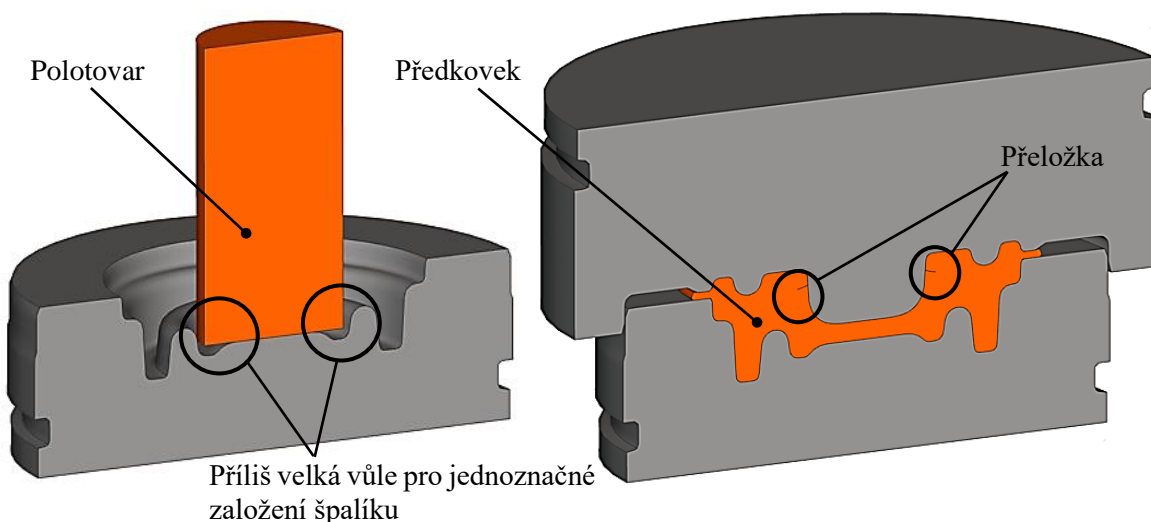
Z toho vyplývá značná důležitost vzájemné komplementace při návrhu jednotlivých kovacíh operací společně s jejich simulacemi, konstrukcí nebo optimalizací tvaru zápustek. Hlavním cílem je na základě simulací navrhnout ideální tvar tvářecích nástrojů anebo úpravu okrajových podmínek. Pro přesnější vyhodnocení a zahrnutí pasivních složek se musí definovat předeřev zápustek (příloha 12a) a také třecí složka, která je popsána adhezním modelem tření s faktorem  $m = 0,4$ . Všechny potřebné údaje použitých nástrojových materiálů jsou vybrány z dostupné databáze softwaru (příloha 12b). Detaily nastavení dalších parametrů se nachází v příloze 12c. Pro simulace se rozměry polotovaru definují v ohřátém stavu (příloha 13).

Pro vyráběnou součást je kvůli její tvarově složitější geometrii předběžně navržen postup ve třech kovacíh operacích. Z ekonomických a technologických důvodů je vhodné ověřit nutnost tříopeačního postupu. Proto jsou provedeny simulace pro výrobu s pouze dvěma výrobními kroky. Sleduje se při nich průběh a výsledek vykování předkovacího tvaru ze špalíku (obr. 71).



Obr. 71 Ověření nevykování ve dvou operacích.

Pro simulaci jsou použity geometrie nástrojů, které se předpokládají rovněž pro další simulační využití. Vzhledem k silnému předpokladu vzniku vad a problémů při dvou operačním procesu je takový nástroj pro ověření zcela dostačující. Ze stejného důvodu není zapotřebí uvažovat ani praktické a přesné založení špalíku pro operátora lisu. Podle výsledků z provedené simulace lze vidět kompletní dotečení výkovku, ale také vznik vady (přeložky) v oblasti okolo středového trnu. Vzhledem k charakteristice vzniklého přetvoření na předkovku je vysoký předpoklad pro vznik další vady, a to v těsné blízkosti pod ní. Mezi další nevýhodu se řadí méně vhodný tvar předkovku pro jednoznačné založení špalíku v reálné výrobě (obr. 72). Proto budou zavedeny tři kovací operace, při kterých dojde k postupnějšímu dosažení požadovaného tvaru a rovněž umožnění dosáhnout větší tvarové variability při řešení problému se zakládáním polotovarů do jednotlivých tvářecích zápustek.

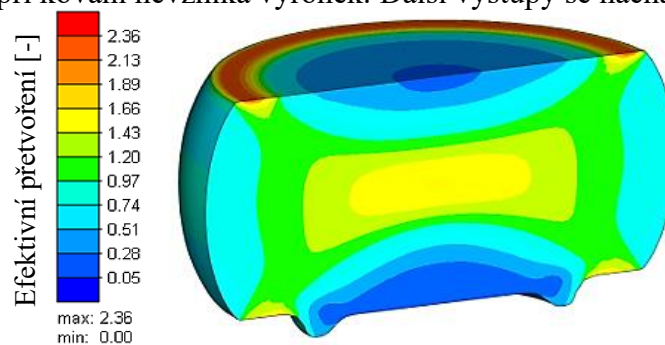


Obr. 72 Ověření nevykování ve dvou operacích – založení a výroba se vznikem vady.

### 3.4.1 První operace – pēchování

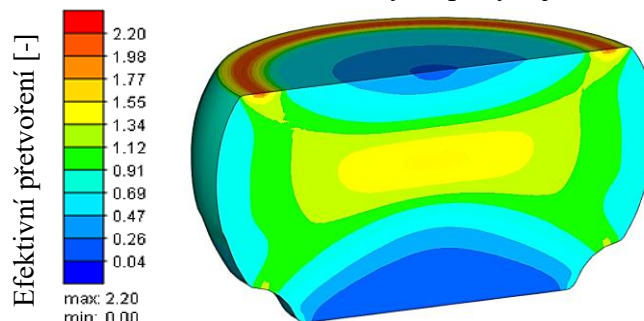
První kovacím krokem je předpēchování ohřátého ŧpalíku. Pro něho se preferují jednoduché výrobní tvary, s čímž souvisí snadná konstrukce zápustek. Důvodem jsou nižší výdaje na jejich zhotovení s důsledkem celkového zlepšení ekonomičnosti zakázky. Při jejich návrhu se musí brát v úvahu řada faktorů, například prvotní založení ŧpalíku či výsledný tvar napēchovaného výkovku a jeho umístění do následující operace. Pro tento účel bude použita přibližná geometrie nástrojů, u kterých se předpokládá použití pro druhou operaci (obr. 76). Níže jsou ve stručných bodech popsány navržené možnosti, ze kterých je zapotřebí vybrat vyhovující variantu:

- Varianta A – tvar výrobku (obr. 73) je pro první operaci z hlediska nástrojů jednoduchý. Pozice pro založení ohřátého ŧpalíku není příliš vhodná. Průběh a konečné přetvoření materiálu je vyhovující. Předkovek nevykazuje žádné vady. Velikost síly se pohybuje okolo 2,3 MN. Potřebná mechanická (přetvárná) práce tvářecího lisu odpovídá 190 kJ. Zvolená geometrie není příliš vhodná pro založení výkovku do další operace z důvodu jeho nízkého vycentrování. Vystává zde riziko nejednoznačného umístění. Výhodou je fakt, že při kování nevzniká výronek. Další výstupy se nachází v příloze 14.



Obr. 73 Výsledné přetvoření materiálu – varianta A.

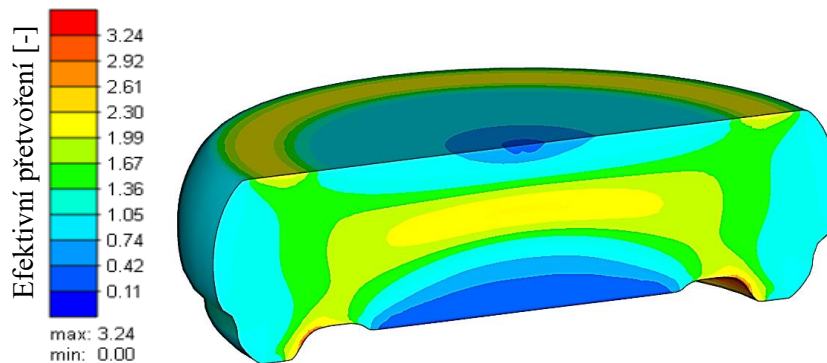
- Varianta B – jedná se o jednoduchou geometrii (obr. 74), která umožňuje vhodné založení ŧpalíku do nástroje. Kovací zápustky jsou jednoduché a účelné. Výsledné přetvoření je vyhovující. Součást nevykazuje vznik vad. Počáteční rozložení objemu kovu v zápustce je převážně středové, což je pro následující předkovací operaci výhodné. Založení do dalšího kroku je dostačující pro jednoznačné umístění napēchovaného předkovku, ale nevyhovuje s ohledem na stykové body v dutině spodní zápustky. Vystává zde riziko nadměrného opotřebení nebo poškození tenkého žebra nástroje, na kterém je předkovek primárně umístěn (příloha 15). Důvody jsou velké a nerovnoměrné tepelné ovlivnění anebo mechanické poškození vlivem vyšší váhy výkovku. Potřebná mechanická práce lisu odpovídá 170 kJ. Velikost tvářecí síly se pohybuje okolo 2,8 MN, viz příloha 15.



Obr. 74 Výsledné přetvoření materiálu – varianta B.

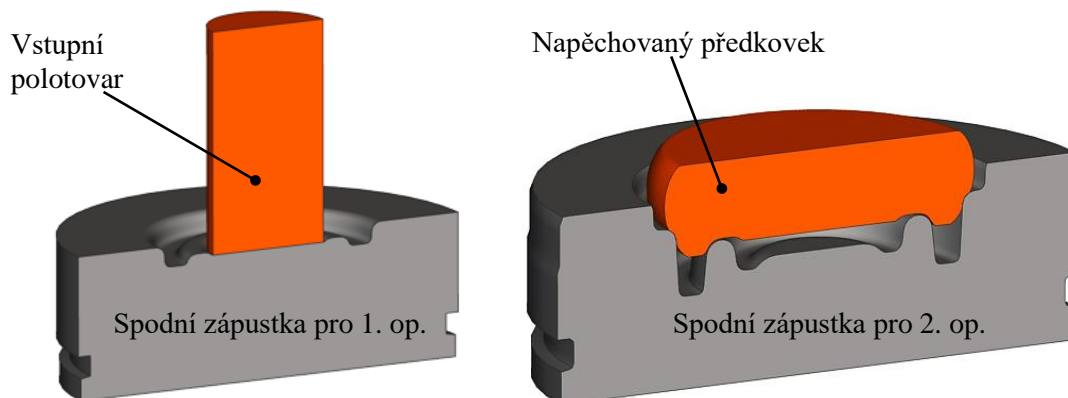
- Varianta C – navržená geometrie umožňuje vhodné založení ŧpalíku do zápustky pro první operaci. Horní zápustku tvoří pouze rovinná plocha a spodní poměrně jednoduchá tvarová geometrie, tudíž se jedná o jednoduché nástroje. Průběh a výsledné přetvoření kovu je vyhovující. Velikost potřebné síly dosahuje velikosti 4,3 MN. Mechanická práce odpovídá 270 kJ. Po napēchování se nevyskytují žádné vady.

Z hlediska návaznosti na druhou kovací operaci poskytuje vyhovující geometrii pro jednoznačné založení. Mírné nedotečení materiálu ve spodním rohu výkovku (obr. 75) je z výrobního hlediska akceptovatelné a pro případ přebytku oceli poskytuje dodatečný prostor pro další tok materiálu. S tím souvisí snížení rizika možného vzniku výronku, který je po první operaci nežádoucí. Další sledované výstupy jsou uvedeny v příloze 16.



Obr. 75 Výsledné přetvoření materiálu – varianta C.

Pro řešenou výrobu tvarově složitějšího dílce nejsou vhodné příliš vysoké polotovary vzhledem k vyššímu riziku vzniku přeložek. Pro první předkovací operaci je zvolena varianta C, která se z nabízených možností jeví jako nejvhodnější. Posuzování probíhalo s ohledem na několik různých parametrů, například geometrie nástrojů, tvar pro založení do první nebo druhé operace (obr. 76), průběh přetvoření s ohledem na potenciální vznik vad nebo rozložení kovu v nástroji v souvislosti s vhodným tečením materiálu. Kovací síla 4,3 MN je pro první operaci dostatečně nízká a potřebná mechanická práce 270 kJ je s ohledem na tvářecí lis LZK 4 000 vyhovující. V případě nevhodného průběhu toku kovu, vzniku vad či výskytu jiných problémů v navazující druhé předkovací operaci lze zvolený tvar zpětně upravit nebo úplně změnit.



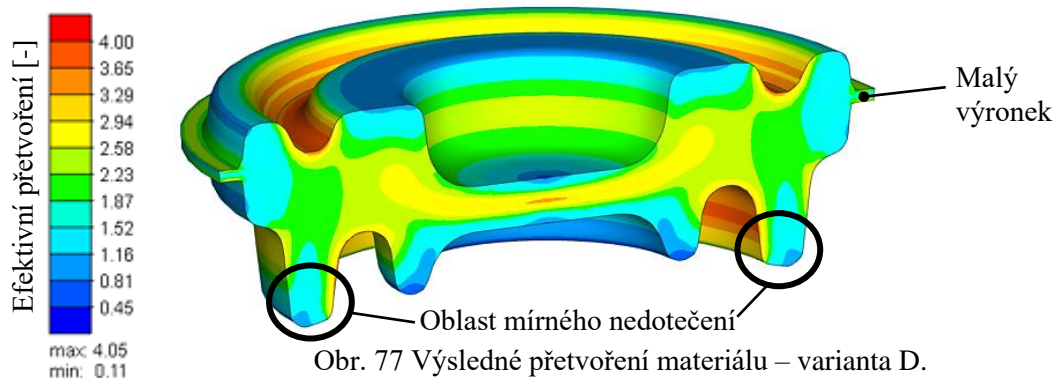
Obr. 76 Založení špalíku do spodní zápustky v 1. operaci a napěchovaného předkovku do 2. kroku.

### 3.4.2 Druhá operace – předkování

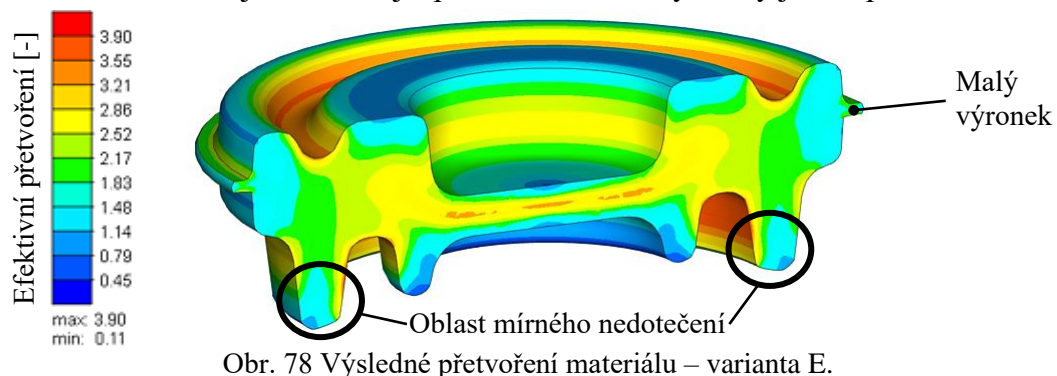
Jedná se o navazující kovací operaci na pěchování a jde o předvýrobu finálního tvaru výkovku s cílem přiblížit se k jeho konečné podobě. Musí se najít vhodná varianta pro všechny sledované faktory jako jsou například průběh přetvoření kovu, velikost kovací síly anebo způsob založení výkovku do poslední operace. Části nástroje, které jsou třeba k založení vybraného předkovku z první operace jsou pro všechny možnosti přibližně stejné a musí umožnit založení zvoleného polotovaru. Popis tří možných předkovacích variant, ze kterých se musí vybrat vhodná varianta:

- Varianta D – navržená geometrie je vhodná pro jednoznačné založení do třetí operace. Při simulaci nevznikají žádné vady. Předkovek není plně dotečený (obr. 77). Přetvoření materiálu je v průběhu výroby vyhovující. Hodnota potřebné kovací síly je 14,7 MN. Velikost mechanické práce odpovídá přibližně 138 kJ.

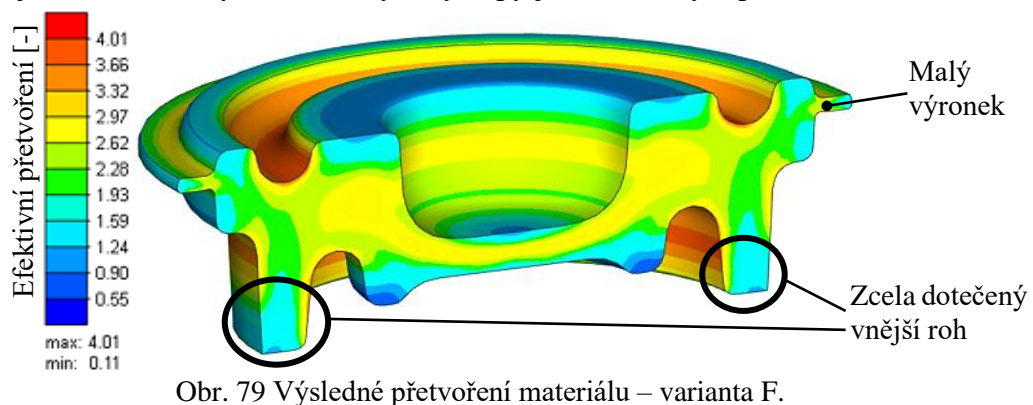
K největšímu ochlazení předkovku dochází okolo prostředního tenkého a nízkého žebra, kde se nepředpokládá problém zatékáním kovu. Vznik malého výronku po obvodu dílce není výrazným problémem. Naopak díky jeho umístění a geometrii může sloužit pro lepší založení do třetí operace. Další výstupy se nachází v příloze 17.



- Varianta E – předkovek má vyhovující tvar pro založení do následné operace. Při výrobě nedochází ke vzniku vad. Přetvoření materiálu je při celém průběhu bez problémové. Součást vykazuje mírné nedotečení ve spodním dlouhém žebrou (obr. 78). Potřebná síla dosahuje velikosti 14,3 MN a mechanická práce má hodnotu přibližně 142 kJ. Výhodou je malé ochlazení kovu v oblasti dlouhého spodního žebra. Zde se předpokládá největší problém se zatékáním materiálu, a tudíž se zde vyžaduje udržet vyšší teploty pro lepší tečení kovu a rovněž jeho snadnější přetvoření. Další výsledky jsou v příloze 18.

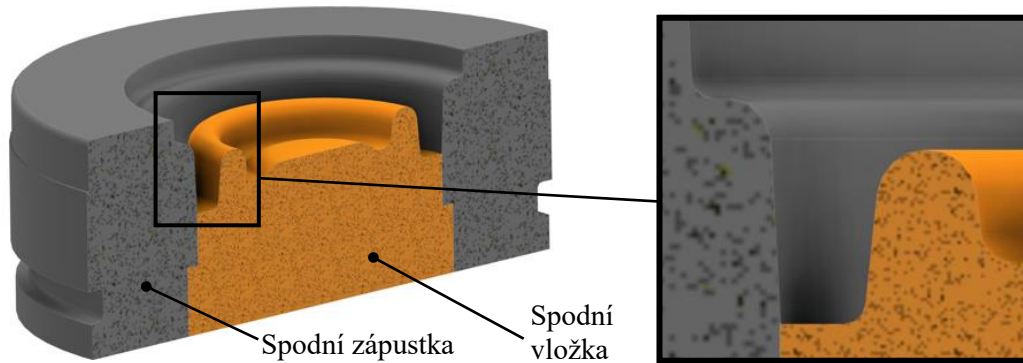


- Varianta F – zvolená geometrie umožňuje dobré založení předkovku do navazujícího kroku (obr. 79). Velikost úkosů je stejná jako na finálním výkovku. Poloměry přechodů jsou pro lepší tok materiálu mírně zvětšeny. Součást je zcela dotečená, bez vad a pouze s malým výronkem. Jeho vznik se oproti prvnímu kroku ve druhé operaci již očekává. Průběh a výsledné přetvoření vykazují vyhovující výsledky, a to platí i pro přemísťování kovu v průběhu simulace. Materiál nemá tendenci se překládat nebo se jinak nevhodně deformovat. Kovací síla dosahuje hodnoty 15,9 MN. Velikost mechanické práce se pohybuje okolo hodnoty 170 kJ. Zbývající výstupy jsou uvedeny v příloze 19.





Primárním cílem prováděného výrobního postupu je najít vhodnou kombinaci mezi navrženými kovacími operacemi a dosáhnout tak bezvadného výrobku s vyhovující výrobní technologií s ohledem na všechny sledované parametry. Proto bude volba hledaného tvaru předkovku pro druhou operaci, tj. geometrie nástrojů, provedena až na základě výsledků z dokovací operace. Pokud dojde ve třetím kroku k včasnému dotečení, nevzniknou žádné vady a budou vyhovující i další sledované faktory, tak potom není například mírné nedotečení ostrého rohu předkovku ve druhé operaci žádný problém. Ostrý přechod vzniká při plném dotečení v dolní části součásti z důvodu předpokládaného použití nástrojové vložky ve spodní středové oblasti nástroje, která bude dále navazovat na dlouhý úkos navržené zápustky, viz obr. 80.

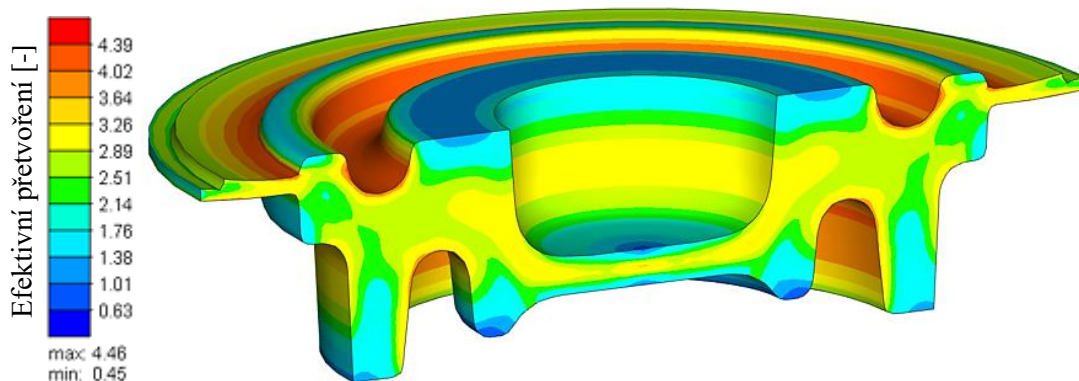


Obr. 80 Přibližná konstrukce nástrojů pro druhou operaci – detail ostrého přechodu.

### 3.4.3 Třetí operace – dokování

Posledním krokem je dokování součásti. Hlavním cílem je kalibrace konečného tvaru součásti, která je již z velké části vytvarována z předchozího kroku. Geometrie použitých nástrojů je jednoznačně definovaná výsledným tvarem teplého výkovku spojky. Zásadní vliv na průběh dokování má zhotovený předkovek z druhé operace. Důležitým výstupem ze třetí operace je včasné a kompletní dotečení výkovku. V ideálním případě k tomu musí dojít při simulacích v softwarovém prostředí pár milimetrů před dosednutím nástrojů. V reálném provozu má totiž na výrobu vliv mnohem více pasivních účinků, které působí proti tečení kovu. Cílem je získat takovou geometrii, při které vznikne dostatečná rezerva při dotékání materiálu. Stručný popis průběhů tří možných variant, ze kterých se musí vybrat nejlepší variantu:

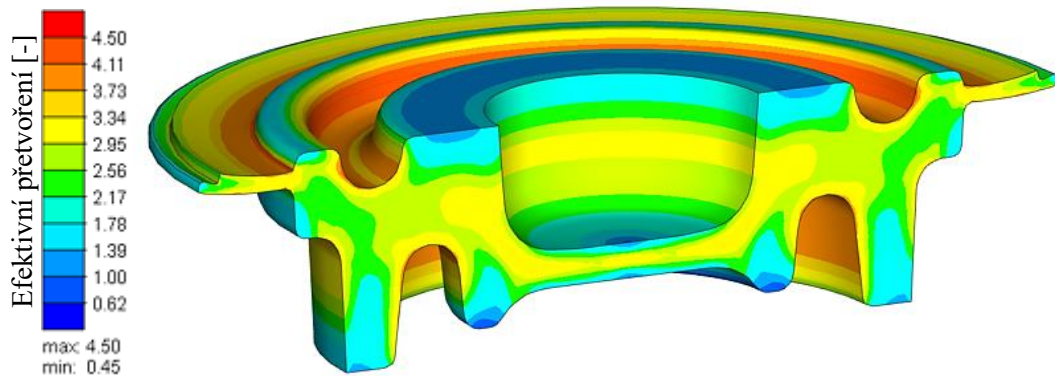
- Varianta G – navazuje na verzi předkování „D“. Geometrie pro dokování poskytuje výkovek bez vad s dobrým průběhem materiálových vláken či přetvoření, viz obr. 81. K dotečení došlo v celém objemu součásti 1,2 mm před dosednutím nástrojů do konečné polohy, což neposkytuje dostatečnou rezervu pro reálnou výrobu. V oblasti výronku se pohybují teploty až do 1 098 °C. S ohledem na jeho následné ostřížení se jde o výhodný stav. Velikost potřebné kovací síly se pohybuje okolo 32,4 MN. Mechanická práce odpovídá velikosti 125 kJ. Ostatní výsledky ze simulací jsou uvedeny v příloze 20.



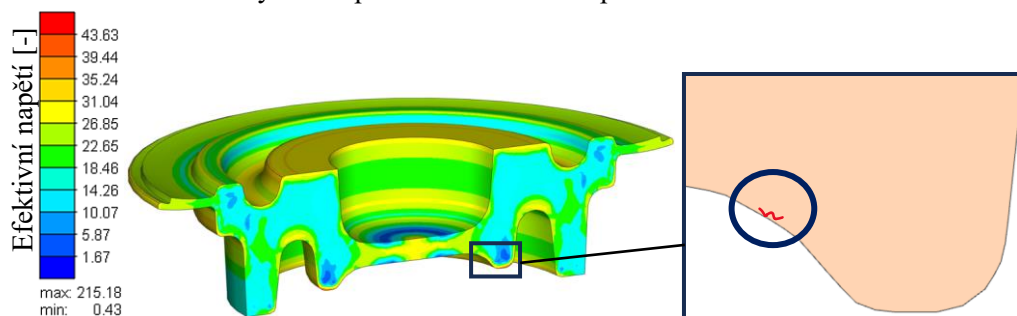
Obr. 81 Výsledné přetvoření materiálu při dokování – varianta G.



- Varianta H – navazuje na verzi předkování „E“. Z hlediska průběhu přetvoření se jedná o vyhovující geometrii (obr. 82). Přibližná teplota v oblasti výronku je pro následnou střížnou operaci dostatečně velká. K dotečení materiálu došlo v celém objemu výkovku 1,9 mm před konečným dosednutím nástrojů. Jde o spodní hranici potřebné rezervy pro praktickou výrobu. Velkým nedostatkem je vznik malé vady v oblasti přechodu ze spodní části středového žebra do kovací blány (obr. 83). Ačkoliv se jedná o místo, které bude ostříženo, tak vyvstává riziko vzniku vady v jeho těsné blízkosti. V takovém případě by se jednalo již o část výkovku, která nebude ostřížena, což není přípustné. Ke vzniku defektu vzniká v posledních milimetrech při závěrečném dotlaku zápustek. Potřebná tvářecí síla odpovídá velikosti 34,8 MN a mechanická práce přibližně hodnotě 124 kJ. Další výstupy z provedené simulace jsou uvedeny v příloze 21.

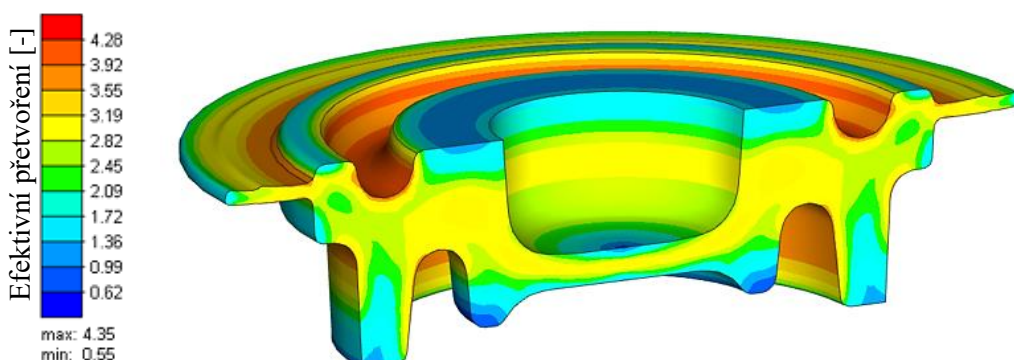


Obr. 82 Výsledné přetvoření materiálu při dokování – varianta H.



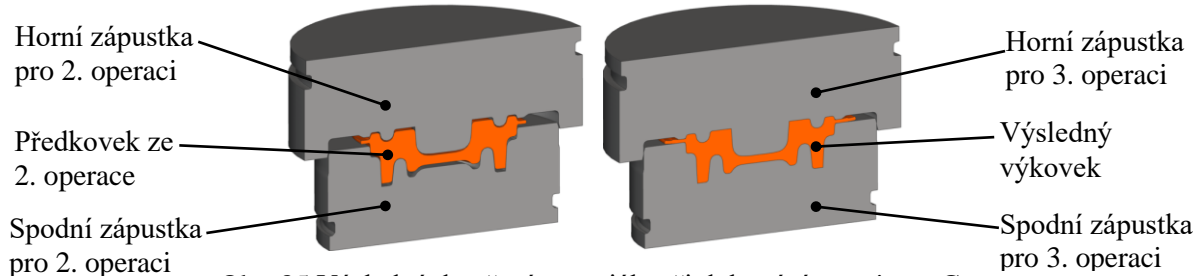
Obr. 83 Výsledné efektivní napětí ve výkovku při dokování a detail vzniku vady – varianta H.

- Varianta I – navazuje na předkovací verzi „F“. Navržená geometrie poskytuje dílec bez vad a s dobrým průběhem přetvoření materiálu (obr. 84). K dotečení kovu došlo v celém objemu 2,1 mm před konečným dosednutím nástrojů. Geometrie poskytuje dostatečnou rezervu v rámci dimenzování výrobního procesu pro reálný proces kování. Materiálová vlákna mají dobrý průběh. Kovací síla se pohybuje okolo hodnoty 32,2 MN. Velikost mechanické práce dosahuje velikosti 76 kJ. Teplota v oblasti výronku a blány je pro dokončovací operace vhodná. Další výstupy ze simulace se nachází v příloze 22.



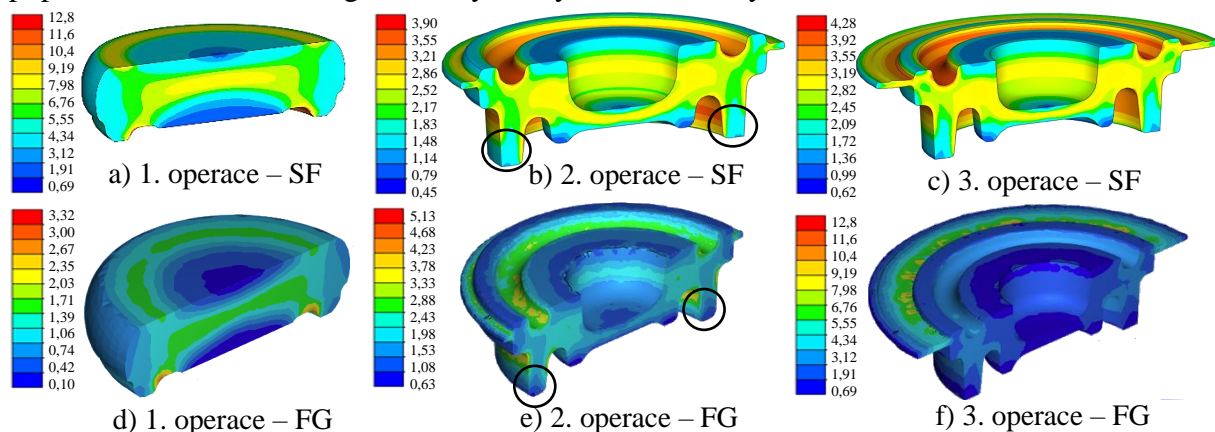
Obr. 84 Výsledné přetvoření materiálu při dokování – varianta I.

S ohledem na získané výsledky je pro dokovací operaci zvolena navržená varianta I. Vybraná geometrie je vyhovující s ohledem na jednoznačné založení předkovku do zápustek (obr. 85), přetvoření, tok materiálu nebo velikost kovací síly, která odpovídá 32,2 MN. Potřebná energie lisu je 76 kJ. Součást lze kovat na zvoleném lise LZK 4 000. Výkovek dotekl v celém objemu zhruba 2,1 mm před dosednutím nástrojů do konečné polohy, což zcela dostačuje a poskytuje dostatečnou výrobní rezervu. Během celého průběhu tváření nevznikly žádné vady.



Obr. 85 Výsledné dotečení materiálu při dokování – varianta G.

Na základě výsledků z dokovacího procesu výroby je pro druhou kovací operaci zvolena třetí varianta „F“, která předcházela vybrané verzi „I“ pro třetí operaci. Uvedená geometrie zajišťuje jednoznačné založení předkovku do zápustek v posledním kroku. Průběhu kování je vhodný s ohledem na přetvoření, tok materiálu nebo velikost kovací síly, která má hodnotu 15,9 MN. Potřebná mechanická práce lisu odpovídá 150 kJ. Na výkovku se nevyskytují žádné vady. Pro všechny tři vybrané kovací operace jsou pro porovnání provedeny simulace také v softwaru Forge. Pro něho platí téměř totožné nastavení vstupních parametrů a se blíží nadefinovanému popisu v Simufact Formingu 16.0 Výsledky ze všech tří výrobních se nachází na obrázku 86.



Obr. 86 Výsledky ze simulační softwarů Simufact Forming (SF) a Forge (FG).

Z výsledků lze vidět, že přetvoření dosahuje z celkového pohledu ve všech výkovecích přibližně stejných hodnot a rozložení. Lokální místa s hodnotami maximálních deformací jsou poměrně rozdílné, ale jedná se pouze o malé oblasti, což může být způsobeno výpočetními chybami nebo nadefinovanou sítí modelů. Dotečení oceli se pro první operaci neliší. Naopak ve druhé operaci lze spatřit rozdíl v dotečení spodní části dlouhého žebra. Ve verzi „b“ je ostře dotečené a ve variantě „e“ vzniklo malé zaoblení. Ve třetím kroku je dotečení kovu v celém objemu součásti úplné (příloha 23). Porovnání dílčích tvářecích sil se nachází v tabulce 17. Vzniklé rozdíly mohou být způsobeny mírnými odlišnostmi v přístupu a nadefinování materiálových parametrů z databázi programů, výpočetními odchylkami nebo při zahrnutí pasivních účinků.

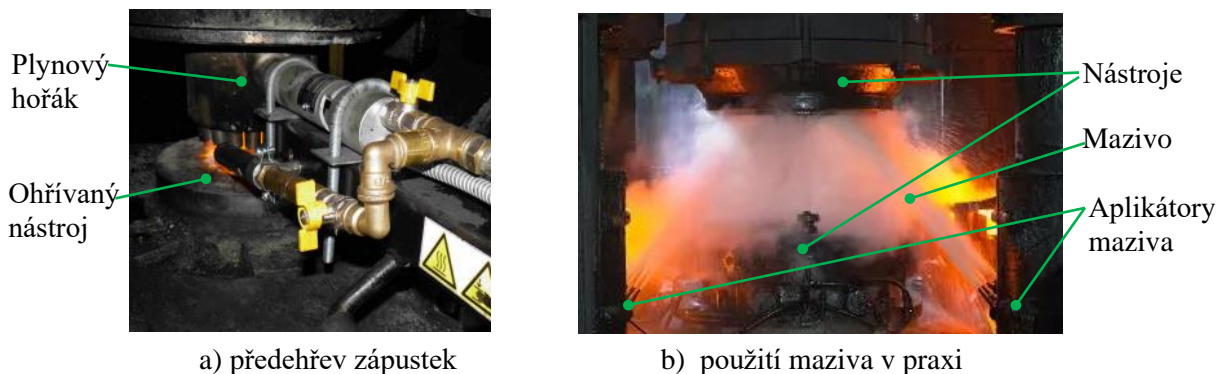
Tab. 17 Srovnání tvářecích sil ze simulačních softwarů – Simufact Forming 16.0 a Forge.

Software/Operace	Pěchování [MN]	Předkování [MN]	Dokování [MN]
Simufact Forming	4,4	15,9	32,2
Forge	4,0	13,5	30,7

### 3.5 Návrh zápustek

Část výpočtů pro návrh konstrukce zápustek je provedeno dle ČSN 22 8306. Výsledné rozměry jsou dále upraveny podnikovými normami. Z důvodu výroby rotačního výrobku jsou zvoleny nástroje s kruhovým průřezem. Jako konstrukční materiál je zvolena nástrojová nízkolegovaná Ni-Cr-Mo-V ocel 19 663, která se používá pro výrobu za tepla. Jde o vhodný materiál pro různě velké a tepelně namáhané zápustky i při velkých nárocích na houževnatost. Rovněž disponuje výbornými mechanickými vlastnosti. Po správném zakalení a popouštění dosahuje pevnosti až 1 400 MPa a tvrdosti  $46 \pm 1$  HRC [25; 58].

Běžně se zápustky z navrženého materiálu předehřívají na teploty v rozmezí 150 až 250 °C. Pěchovací nástroje použité v první operaci jsou z důvodu nižší tvarové složitosti předkovku předehřátý pouze přestupem tepla z ohřátého polotovaru. Jejich naměřená teplota se v průběhu výroby pohybuje okolo 100 °C. Výhodou je úspora energie a času. Ze zmíněných důvodů se nemusí ani mazat. Předkovací nástroje pro druhou operaci jsou předehřátý pouze na spodní teplotní hranici 150 °C. Oproti vyšším teplotám dojde k větší úspoře času nebo energie a pro běžný výrobní proces plně dostačuje. Rovněž se musí přihlídnout k faktu, že nástroje budou v průběhu kování dále ohřívány vlivem přestupu tepla z ohřátého materiálu. Pro třetí dokovací operaci je předehřev určen na 250 °C. Důvodem volby horní teplotní hranice jsou mnohem vyšší nároky na poslední kovací krok, například kvůli velkému přetvoření materiálu. Zápustky pro druhou a třetí operaci se již musí průběžně mazat vhodným mazivem. Pro řešenou výrobu se jedná o produkt Lubrodal F 442 (Fuchs). Jde se o grafitovou směs, která je mísitelná s vodou. Díky tomu ji lze aplikovat stříkacími systémy, které jsou velmi produktivní a účinné (obr. 87). Pro výrobu bude mísena s vodou v poměru 1:9. V případě potřeby lze použít poměr 1:5, který se používá na složitější dílce. Mazivo zajišťuje vynikající chladicí účinky, smáčivost a účinnost při vysokých teplotách. Hlavním benefitem je prodloužení životnosti nástrojů. [21; 58; 59]



a) předehřev zápustek

b) použití maziva v praxi

Obr. 87 Ukázka různých procesních aplikací v praxi. [59]

Všechny vnitřní rozměry dutin a tvarů zápustek vychází v jednotlivých operacích z velikosti teplých výkovků. Dutiny, které přesahují velikost 10 mm jsou zvětšeny o míru smrštění oceli 1,3 % určené podle tabulky 16. Zmíněné pravidlo pak neplatí pro rádiusy ani úkosy. Pro druhou a třetí kovací operaci je navržen bandážový typ zápustek, které zajistí vyšší přesnost výroby s minimálním přesazením výkovků. Pro kování se používá vrchní bandážování. Bandáže jsou navrženy pro upnutí do vybraného lisu LZK 4 000. Jejich velkou výhodou je univerzální použití pro další výrobu zápustkovým kováním na daném stroji. Proto se pro každou zakázku nemusí vyrábět kompletně nové tvarové zápustky, což je ekonomicky výhodnější. Určení minimálních vnějších rozměrů nástrojů jsou pro předkovací a dokovací nástroje [25]:

- Minimální průměr pro pěchovací nástroje:

$$D_{zp1} \geq D_v + 0,2 \cdot (D_v + H_D) + 5, \quad (3.10)$$

$$D_{zp1} \geq 218 + 0,2 \cdot (218 + 57,9) + 5,$$

$$D_{zp1} \geq 278,2 \text{ mm.}$$



Vnější průměr pýchovacích zápustek musí být větší nebo roven než 278,2 mm. Pro danou výrobu se z důvodu vyšší tuhosti nástroje a rovněž upínací systém zvoleného lisu stanovuje rozměr  $\varnothing 350$  mm.

- Minimální průměr pro druhou předkovací a třetí dokovací operaci se určí:

$$D_{zp23} \geq D_v + 0,4 \cdot (D_v + H_D) + 10, \quad (3.11)$$

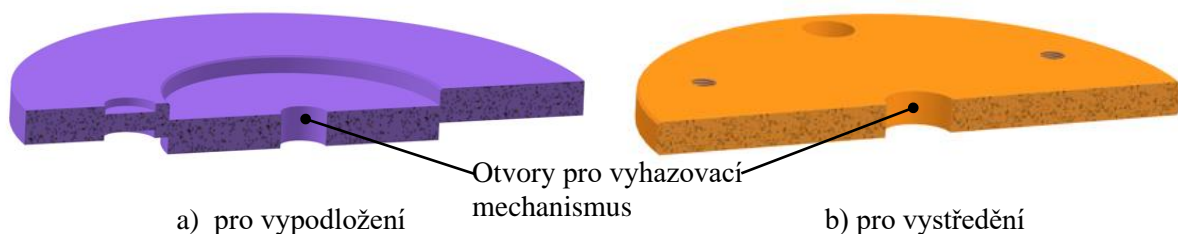
$$D_{zp23} \geq 218 + 0,4 \cdot (218 + 57,9) + 10,$$

$$D_{zp23} \geq 338,4 \text{ mm.}$$

Vnější průměr musí být větší nebo roven než 338,4 mm. Pro navrhovanou výrobu je pro spodní zápustky z důvodu vyšší tuhosti nástroje zvolen rozměr  $\varnothing 350$  mm. Vrchní část nástrojů se zvětší o rozměr bandáže, která dosahuje průměru 420 mm. Všechny rozměry jsou zvoleny s ohledem na parametry a upínací systém navrženého stroje.

Výšky kompletních sestav zápustek jsou navrženy a ověřeny podle konstrukce použitého lisu a podnikových norem. Při sevření stroje mohou dosahovat maximální výšky 260 mm. Zároveň se jedná o potřebnou výšku k upnutí nástrojů do lisu bez jejich dalšího podkládání. Uvedená podmínka je pro všechny operace splněna. Z praktického hlediska je maximální rozměr sevření pro všechny operace stanoven na 259 mm. Hlavním důvodem uvedeného snížení o 1 mm je možnost případného upravení a doladění kování nebo upnutí při prototypové výrobě. Výšky pro pýchovací, předkovací a dokovací nástrojové sestavy se nachází ve výkresové dokumentaci.

Zápustky pro první a druhou operaci jsou záměrně nižší a do vhodné výšky se umísťují pomocí podložek (obr. 88). Hlavním důvodem je lepší možnost oprav a větší variability při výškovém nastavování nástrojových sestav do ideálního kovacího stavu. Optimální poloha se předem určuje dle výpočtů a simulací, ale v reálném provozu se konečné nastavení provádí na základě zkušebních výkovek podle jejich dotečení, velikosti výronku a dalších ukazatelů. Zápustková sestava pro dokončovací operaci se konstruuje bez potřeby vypodložení a pouze se vystředuje.



Obr. 88 Univerzální středové podložky pro vypodložení (vlevo) a pro vystředění (vpravo) v řezu.

Tvar a rozměry výronkové drážky jsou navrženy dle kapitoly 3.2. Její základní parametry jsou rozměry můstku, který má výšku 4,8 mm a šířku 10 mm. Pro uvažovanou výrobu je zvoleno nucené vyhazování výkovek středovými vyhazovači. Důvodem je riziko ulpívání výrobků v horní nebo dolní dutině zápustky při procesu kování. Proto jsou vyhazovače umístěny ve vrchní i spodní části. Dalším důvodem jejich užití je zvýšení životnosti zápustek. Jejich použití se volí pouze pro druhou a třetí operaci, protože zde dochází k velkému přetvoření a tvarování součásti, tudíž se zde předpokládá větší problém s jejich ulpíváním v nástrojích.

V prvním kroku se předpokládá, že při pýchování špalíku dojde k malému přetvoření a snadné změně tvaru. S tím souvisí i menší silové zatížení. Proto není potřeba navrhovat vyhazovače hned pro první operaci a předkovek bude vyjímán z dutiny nástroje operátorem lisu kovářskými kleštěmi. Pozitivním důsledkem jsou nižší výrobní náklady na zápustky.

Navržené vyhazovače jsou kolíkové (obr. 89) a jsou vyráběny z nástrojové oceli 19 552, která je vhodná pro práci za tepla. Z ekonomického hlediska se jedná o vhodnější materiál oproti zápustkové oceli 19 663, která je použita pro většinu nástrojů zaváděné výroby. Požadavky na drsnost povrchu jejich dílčích částí se nachází v tabulce 18.

Tab. 18 Hodnoty povrchového opracování kolíkových vyhazovačů. [25]

Plochy	Vodící plocha	Činná část	Dosedací plocha	Ostatní
Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,8 až 1,6	0,8 až 1,6	1,6 až 3,2	12,5

Zvolené rozměry všech těles vyhazovačů včetně otvorů pro jejich umístění, respektive činnost, jsou navrženy s ohledem na zkušenosti výrobního podniku společně se zahrnutím doporučení dle norem ČSN 22 8306. Návrh konstrukčních výpočtů je vzorově proveden pouze pro spodní vyhazovač ve třetí dokovací operaci, na kterou jsou kladeny největší výrobní nároky [25]:

- Průměr hlavy paty:

$$D_k = \sqrt{2 \cdot d_k^2 + d_v} \text{ [mm]}, \quad (3.12)$$

$$= \sqrt{2 \cdot d_k^2 + d_v} = \sqrt{2 \cdot 50^2 + 24,5} = 70,88 \text{ mm},$$

kde:  $d_{kv}$  – průměr vyhazovače [mm]; zvolen průměr  $d_{kv} = 50$  mm,  
 $d_v$  – průměr otvoru pro táhlo [mm]; určen průměr  $d_v = 24,5$  mm.

Výsledek hledaného průměru odpovídá velikosti 70,88 mm. Vypočítaná hodnota je dále zaokrouhlena na konstrukční rozměr  $D_k = 70$  mm.

- Konstrukční velikost průměru tělesa vyhazovače:

$$d_{kv'} = d_{kv} - \Delta_{tl} \text{ [mm]}, \quad (3.13)$$

$$= d_{kv} - \Delta_{tl} = 50 - 0,05 = 49,95 \text{ mm},$$

kde:  $\Delta_{tl}$  – vůle vedení vyhazovacího systému [mm]; určena vůle  $\Delta_{tl} = 0,05$  mm.

Rozměr díry pro těleso vyhazovače odpovídá hodnotě 49,95 mm.

- Průměr díry pro vyhazovací kolík:

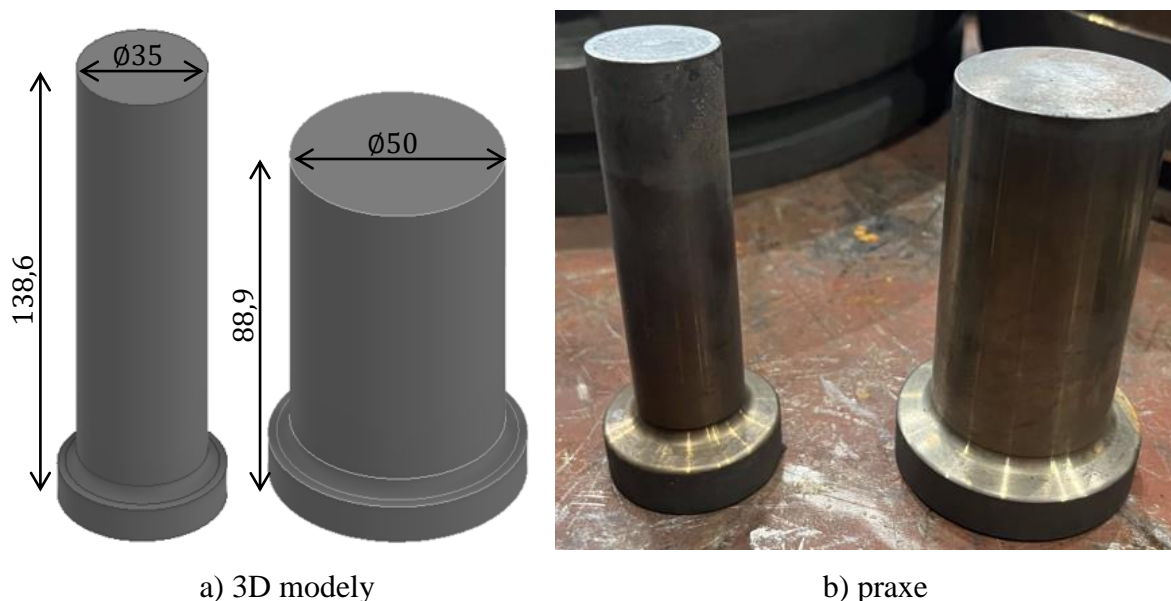
$$d_k = d_{kv} + \Delta_d \text{ [mm]}, \quad (3.14)$$

$$= d_{kv} + \Delta_d = 50 + 0,1 = 50,1 \text{ mm},$$

kde:  $\Delta_d$  – vůle v otvoru pro vyhazovací kolík [mm]; stanovena vůle  $\Delta_d = 0,1$  mm.

Velikost díry pro těleso vyhazovače odpovídá rozměru 50,1 mm.

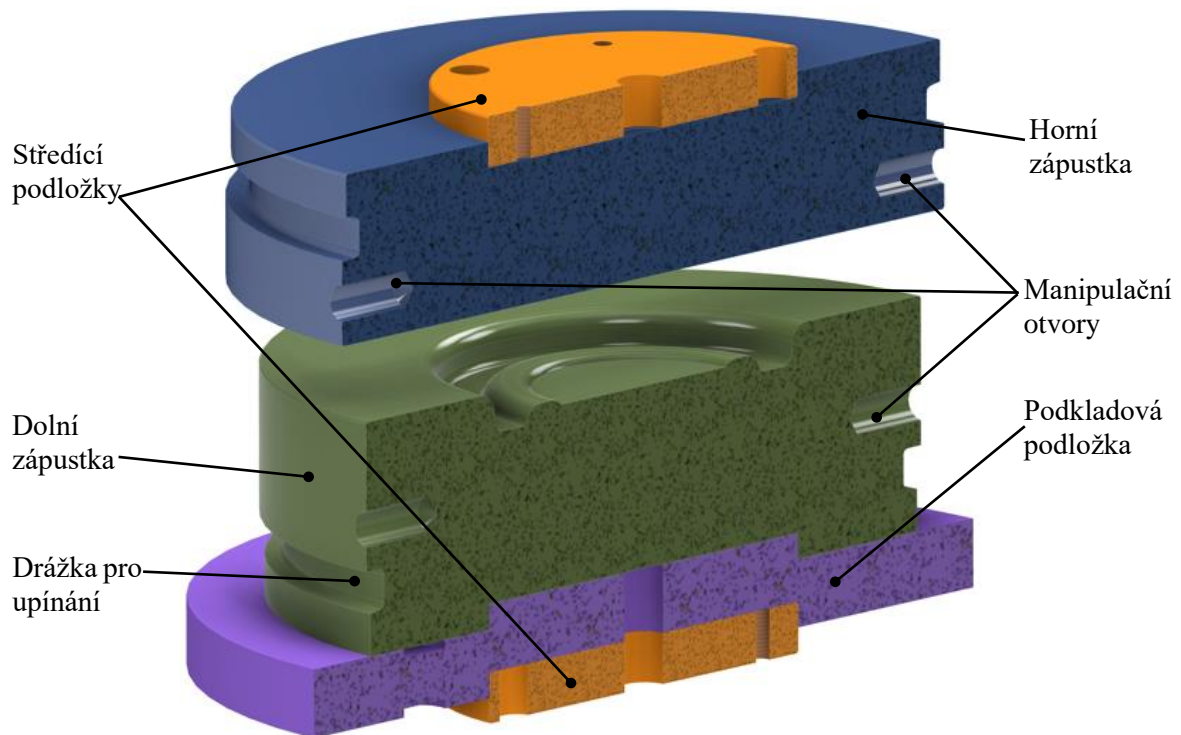
Výsledné podoby a rozměry vyhazovačů pro třetí operaci jsou zobrazeny na obrázku 89.



Obr. 89 Vyhazovače pro třetí operaci.

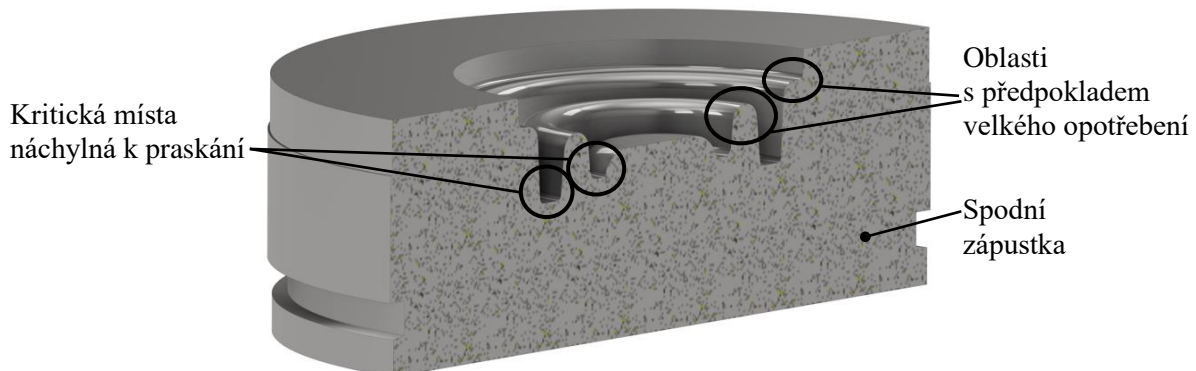


Pro první operaci jsou vzhledem ke snadnému tvaru, nižším nárokům na rozměrovou přesnost a kvalitu výkovků po pēchování navrženy obě zápustky monolitní, viz obr. 90. S ohledem na předpokládané nízké kovací síly, malé pētvoření a pēměny tvaru nebo jednoduché geometrie nástrojů zde nevyvstává takové riziko k jejich poškozování nebo nadměrnému opotřebení, které by mohlo způsobovat větší problémy do dalších kovacíh kroků. Velkou výhodou je snížení jejich počátečních pořizovacích nákladů nebo snadná vyrobiteľnost zápustek. Pro horní nástroj lze použít univerzální rovinnou zápustku. Spodní část se musí pro zaváděnou výrobu originálně vyrobít. Ve druhé a třetí operaci se kladou mnohem vyšší nároky na kvalitu a přesnost kování. Velký rozdíl oproti prvotnímu pēchování spočívá hlavně ve větší složitosti tvarů před finálního předkovicu a hotového výkovku, které jsou velmi členité. Proto jsou pro dutiny zápustek v obou operacích použity vložky. Dalšími důvody využití vložek jsou například snazší obnova tvaru nástrojů, kvalitnější tepelné zpracování a provedení povrchových úprav či vhodnější rozložení působícího napětí v zápustkách.



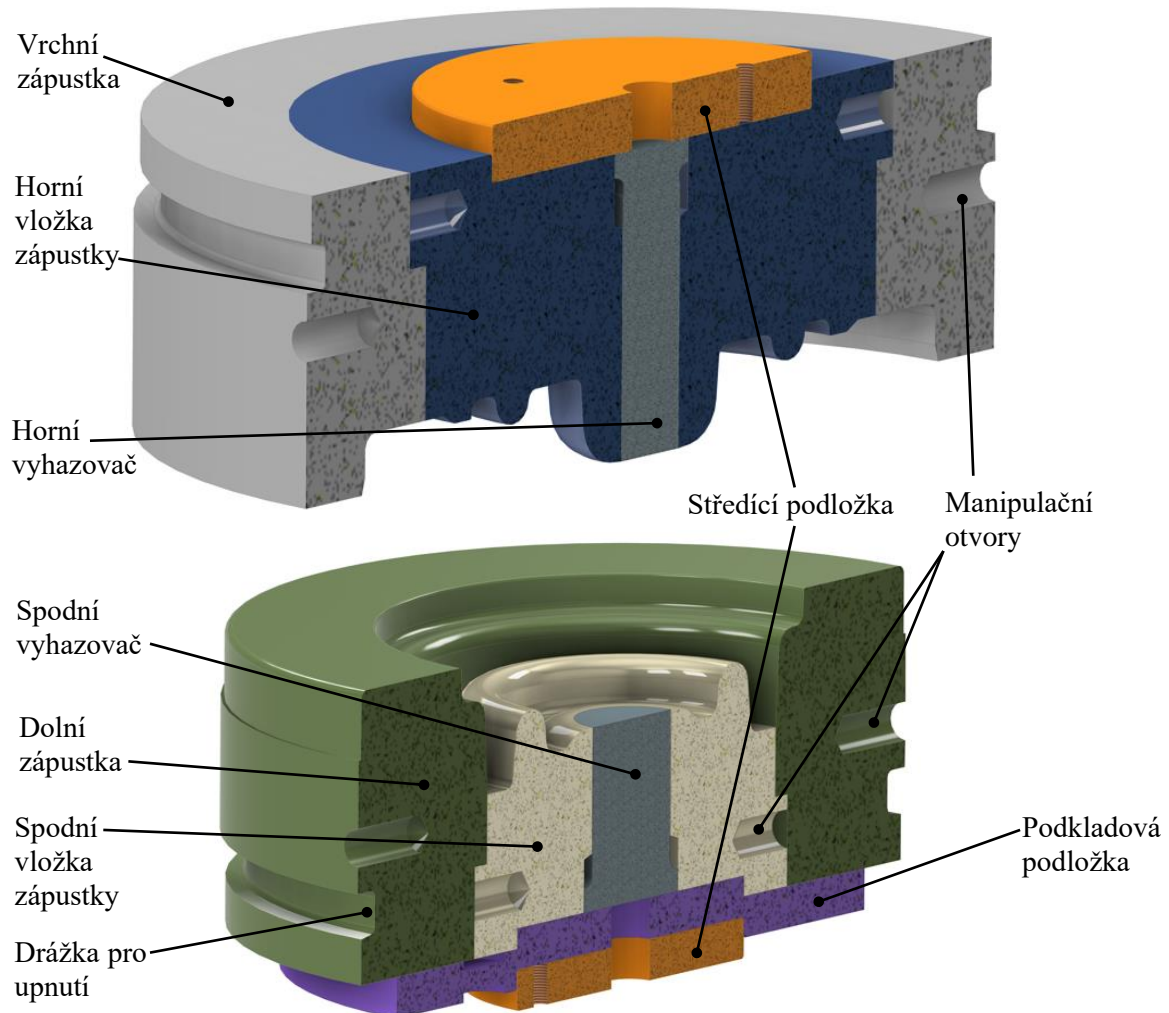
Obr. 90 Nástrojová sestava pro první operaci.

V případně absence nástrojových vložek za předpokladu použití tvarových výrazně složitějších monolitních nástrojů zde vyvstává velké riziko jejich prasknutí. Jedná se o důsledek velkého napětového zatížení při cyklickém namáhání zápustek. Významná kritická místa jsou dlouhé výčnělky a úzké nebo hluboké dutiny v kombinaci s malými poloměry, viz obr. 91.



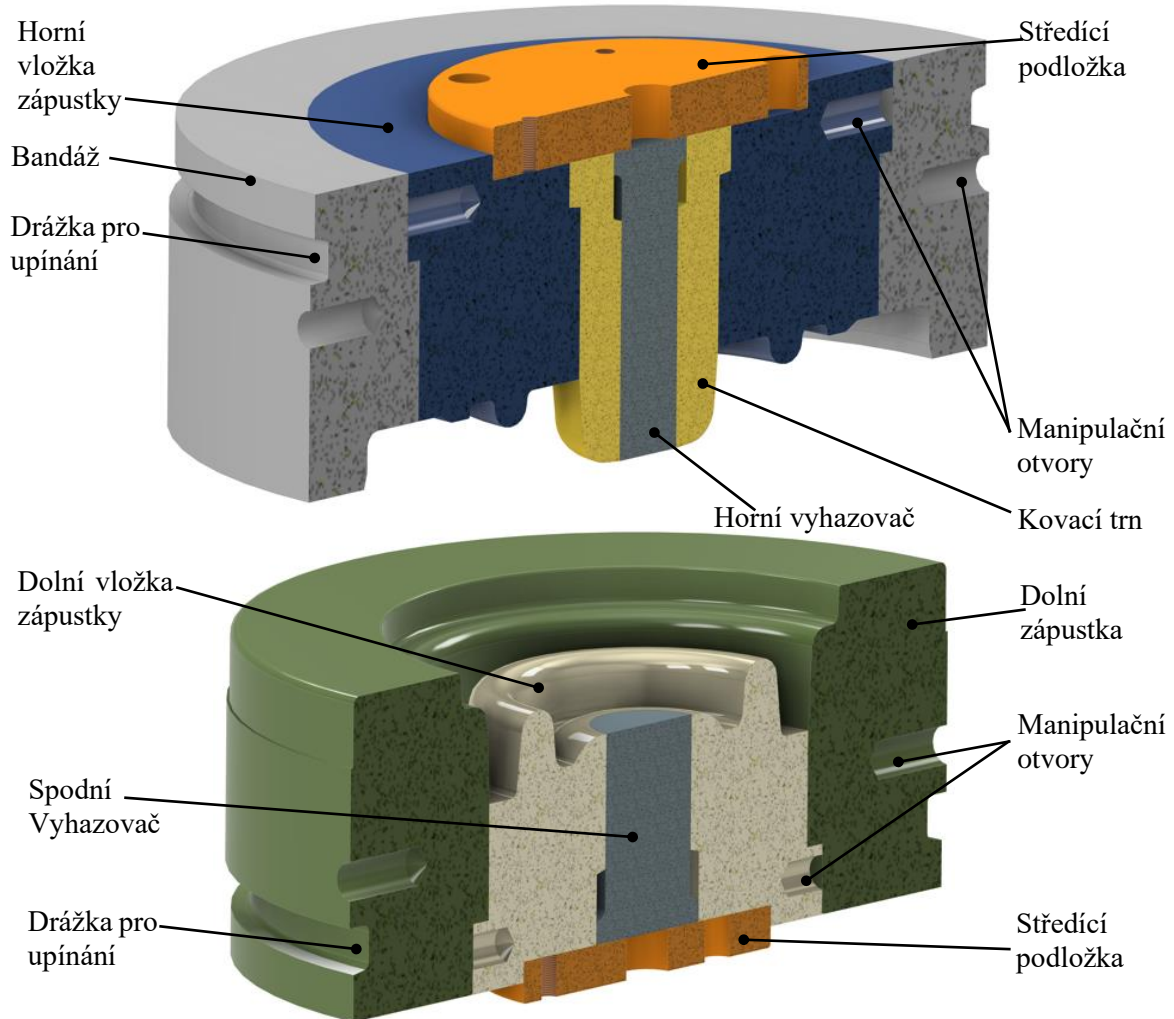
Obr. 91 Možná kritická místa porušení v případě použití monolitních zápustek pro složité tvary.

Pro předkovací operaci jsou použity pouze dvě vložky, viz obr. 92. V horní části kopíruje daný tvar celou plochu výkovku a přechází až do oblasti výronkové drážky. Vzhledem k tomu, že se jedná teprve o druhý kovací krok, tak není potřeba vložkovat středový kovací trn. Nejsou zde kladeny tak vysoké nároky na přesnost a obnovu rozměrů nástrojů jako u posledního dokování. Navíc se jedná o jednodušší a levnější provedení, například s ohledem na vyrobiteľnost, tepelné a povrchové zpracování nebo z hlediska smontovatelnosti nástrojů.



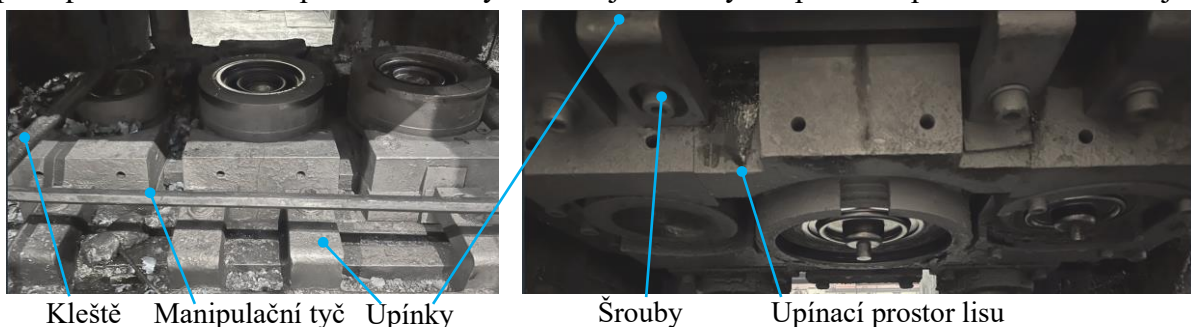
Obr. 92 Otevřená sestava předkovací nástroje – druhá operace.

V navrhované konstrukci pro dokovací operaci, viz obr. 93, nahrazují použité vložky částečné tvary dutin především v místech, kde dochází k nadměrnému namáhání a opotřebení zápustek. Ve vrchní zápustce se nacházejí dvě vložky. První z nich je středový trn s vyhazovačem, pro který je zhotovena pracovní dutina. Proti vypadnutí směrem dolů se trn opatřuje kruhovým rozšířením. Druhou je tvarová vložka, která kopíruje většinu tvaru horní části výkovku včetně výronkové drážky. Následně na ni plynule navazuje univerzální bandáž, ve které je uchycena díky jejímu kruhovému rozšíření. Zajištění obou nástrojů proti rázům směrem nahoru se realizuje pomocí beranu lisu a rotačních středících podložek, které rovněž slouží pro vystředění nástrojů. Ve spodní části nástroje se nachází pouze jedna vložka se středovým vyhazovačem, pro který se také zhotovuje příslušná dutina s prostorem pro jeho pohyb směrem nahoru. Její tvar kopíruje většinu spodní kontury výkovku. Proti nežádoucímu pohybu a pro lepší ukotvení se zajišťuje kruhovým rozšířením. Její spodní část je usazena na podložce a stole lisu. Pro účely zaváděné výroby na ni navazuje originálně zhotovená bandáž, která slouží k dalšímu tvarování výkovku. Celý spodní díl je vycentrován rotační středící podložkou, která se polovinou své výšky ukotvuje ke stolu lisu stejně jako v případě horního nástroje k beranu.



Obr. 93 Otevřená sestava dokovacího nástroje – třetí operace.

Zápustky jsou ve stroji zajištěny pomocí čepů, příložek nebo kruhových segmentů, pro které je zhotoveno boční tvarové vybrání (obr. 93). Dále jsou upevněny šrouby a upínkami ke stolu lisu. Příklad možného upnutí nástrojových sestav v použitém tvářecím lisu LZK 4 000 je zachycen na obrázku 94. Lze na něm rovněž spatřit manipulační tyč, která slouží operátorovi k značnému usnadnění práce při přemísťování těžkého kovaného materiálu. Jedná se o pákový princip práce. Všechny požadavky na povrchové opracování nástrojů, například zápustek anebo vložek jsou uvedeny ve výkresové dokumentaci všech nástrojů. Předběžné návrhy 3D modelů navržených nástrojů usazených vedle sebe se nachází v příloze 24a. V příloze 24b je uveden technologický postup z hlediska tvarů předkovků a výkovků v jednotlivých operacích pro navržené nástroje.



Obr. 94 Příklad upnutí spodních (vlevo) a horních (vpravo) částí nástrojů pro lis LZK 4 000.



### 3.6 Výpočty sil

Pro ověření správnosti předchozí volby stroje LZK 4 000 se musí vypočíst kovací síla. Jeho určení proběhlo s ohledem na zkušenosti z výrobního podniku společně se zahrnutím složitosti tvaru obrobku, tedy výkovku. Jedná se o důležitou součást navrhované výroby. Pro následující analytické výpočty se nejprve musí pro tvářenou ocel 12 020 zvolit základní vstupní parametry. Z nabízeného rozsahu kovacích teplot se kvůli výrobní bezpečnosti volí spodní mezní hodnota 1 050 °C. Z dostupných podkladů je pro stanovenou kovací teplotu zvolen přirozený přetvárný odpor materiálu, který má přibližnou velikost 90 MPa. Volba součinitele  $C_o$  probíhá s ohledem na předpokládanou hmotnost neostříženého výkovku, viz váha vstupního polotovaru 12,392 kg a odhadu teploty výronku, která se podle odhadu pohybuje v intervalu 850 až 950 °C. Z daného rozsahu je zvolena střední hodnota součinitele je  $C_o = 3,5$  – viz tabulka 19. Pro další výpočty je zvolena dolní hranice teploty výronku 850 °C.

Tab. 19 Vstupní parametry pro výpočty tvářecích sil;  $m_{vyk} = 11,10$  kg. [10; 25; 28]

Materiál	Rozsah kovacích teplot [°C]	Přetvárný odpor $\sigma_p$ [MPa]
ocel 12 020	<b>1 050 až 1 150</b>	90
Rozsah hmotnosti výkovku [kg]	Interval teploty výronku [°C]	Součinitel $C_o$ pro oceli [-]
10 až 25	<b>850 až 950</b>	4,0 až 3,0

Jednotlivé výpočty analytických metod pro zjištění kovací síly dle:

- Brjuchanova a Rebelského – určí se dosazením do (2.24):

$$\begin{aligned}
 F_{KBR} &= 8 \cdot (1 - 0,001 \cdot D_v) \cdot \left(1,1 + \frac{20}{D_v}\right)^2 \cdot \sigma_p \cdot S_v = \\
 &= 8 \cdot (1 - 0,001 \cdot 218) \cdot \left(1,1 + \frac{20}{218}\right)^2 \cdot 90 \cdot 37\,325,26 = 29\,847\,463,13 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Výsledná kovací síla po převodu jednotek má velikost  $F_{KBR} = 29,9$  MN.

- Storoževa – stanovení podle vzorce (2.26):

$$\begin{aligned}
 F_{KS} &= \sigma_p \cdot \left\{ \left(1,5 + \frac{b_m}{2 \cdot h_v}\right) \cdot S_{výr} + \left[1,25 \cdot \left(\ln \frac{D_v}{h_v} + 2 \cdot \frac{h_v}{D_v}\right) + \frac{b_m}{h_v} - 0,375\right] \cdot S_v \right\} = \\
 &= 90 \cdot \left\{ \left(1,5 + \frac{10}{2 \cdot 4,8}\right) \cdot 45\,122,7 + \left[1,25 \cdot \left(\ln \frac{218}{4,8} + 2 \cdot \frac{4,8}{218}\right) + \frac{10}{4,8} - 0,375\right] \cdot 37\,325,26 \right\} = 26\,082\,157,19 \text{ N.}
 \end{aligned}$$

Velikosti hledané síly po převodu jednotek odpovídá hodnotě 26,0 MN.

- Tomlenova – se určí sečtením normálové  $F_N$  a tečné  $F_T$  síly (2.27, 2.28 a 2.29):

$$F_{KT} = F_N + F_T = 29\,841\,995 + 34\,399 = 29\,876\,393 \text{ N}$$

$$\text{kde: } F_N = 2 \cdot \pi \cdot \sum_{j=1}^n S_j \cdot r_j = 2 \cdot \pi \cdot 4\,749\,500,98 = 29\,841\,994,77 \text{ N,}$$

$$\text{kde: } \sum_{j=1}^n S_{ji} \cdot \Delta r_{ji}; \text{ výsledek je } 4\,749\,500,98 \text{ mm}^2 \text{ (příloha 25),}$$

$$F_T = \pi \cdot f \cdot \sigma_p \cdot \sum_{j=1}^n D_{ji} \cdot \Delta z_{ji} = \pi \cdot 0,4 \cdot 90 \cdot 27\,373,8 = 34\,398,93 \text{ N,}$$

$$\text{kde: } \sum_{j=1}^n D_{ji} \cdot \Delta z_{ji}; \text{ kde výsledek je } 27\,373,8 \text{ mm}^2 \text{ (příloha 25).}$$

Výsledky normálové a tečné síly jsou pro další výpočty zaokrouhleny na  $F_N = 29\,841\,995\text{ N}$  a  $F_T = 34\,399\text{ N}$ .

Výsledná dokovací síla má na základě analytického přístupu podle Tomlenova velikost  $F_{KT} = 29\,876\,393\text{ N}$ . Po převodu jednotek a zaokrouhlení odpovídá hodnotě 29,9 MN.

Vstupním parametrem pro výpočty dílčích ploch pod křivkami normálového napětí je znalost počátečního napětí v nulovém průřezu tvářeného výkovku  $\sigma_{d0}$ . Jeho velikost pak závisí na hodnotě přirozeného přetvárného odporu, který zahrnuje vliv teploty materiálu ve výronku, pro kterou je stanovena velikost  $850\text{ °C}$ , viz tabulka 19 (2.30):

$$\sigma_{d0} = (1 + 0,73 \cdot f) \cdot \sigma'_p = (1 + 0,73 \cdot 0,40) \cdot 315 = 406,98\text{ MPa.}$$

kde:  $f = 0,40$ ; určena střední hodnota součinitele tření z intervalu 0,35 až 0,45,

$$\sigma'_p = C_o \cdot \sigma_p = 3,5 \cdot 90 = 315\text{ MPa,}$$

kde:  $C_o = 3,5$ ; určeno s ohledem na parametry výkovku (tabulka 19).

Velikost přirozeného přetvárného odporu odpovídá 315 MPa.

Hodnota napětí v nulovém průřezu odpovídá 406,98 MPa. Pro zvýšení přesnosti jsou další výsledky zaokrouhleny na dvě desetinná místa. V dalších výpočtech se nadále pokračuje postupně podle parametrů v jednotlivých průřezích výkovku (příloha 25). Pro ně jsou odvozeny následující analytické vztahy (2.32):

$$\sigma_{d1} = \sigma_{d0} + \sigma_p \cdot \frac{\Delta r_1}{z_1} = 406,68 + 90 \cdot \frac{10}{4,8} = 594,48\text{ MPa,}$$

$$\sigma_{d2} = \sigma_{d1} + \sigma_p \cdot \frac{\Delta r_2}{z_2} = 594,48 + 90 \cdot \frac{16,5}{26,1} = 651,38\text{ MPa,}$$

$$\sigma_{d3} = \sigma_{d2} + \sigma_p \cdot \frac{\Delta r_3}{z_3} = 651,38 + 90 \cdot \frac{17}{54,4} = 679,50\text{ MPa,}$$

$$\sigma_{d4} = \sigma_{d3} + \sigma_p \cdot \frac{\Delta r_4}{z_4} = 679,50 + 90 \cdot \frac{21,5}{32,9} = 738,32\text{ MPa,}$$

$$\sigma_{d5} = \sigma_{d4} + \sigma_p \cdot \frac{\Delta r_5}{z_5} = 738,32 + 90 \cdot \frac{11,5}{60} = 755,57\text{ MPa,}$$

$$\sigma_{d6} = \sigma_{d5} + \sigma_p \cdot \frac{\Delta r_6}{z_6} = 755,57 + 90 \cdot \frac{42,5}{15} = 1\,138,07\text{ MPa.}$$

Grafická podoba průběhu napětí v jednotlivých průřezích a rozdělení těchto oblastí na dílčí geometrické plochy se nachází v příloze 25.

Dalším krokem pro určení normálové složky síly  $F_N$  je výpočet obsahu jednotlivých ploch pod zjištěnými křivkami napětí. Poté se musí provést jejich součin se vzdáleností těžiště daných ploch od středové osy výkovku. Koncovým výstupem je souhrnný součet zjištěných hodnot. Všechny zjištěné výsledky se nachází příloze 25 a vzorové výpočty pro první řádky jednotlivých ploch jsou následující:

- Obdélníková oblast – názorný výpočet obsahu  $S_{10}$ , vzdálenosti těžiště od středové rotační osy  $r_{10}$  a jejich součinu pro první řádek dle (2.33 a 2.34):

$$S_{10} = \sigma_{dj} \cdot \Delta r_j = 406,98 \cdot 10 = 4\,069,80\text{ mm}^2,$$

$$r_{10} = \frac{\Delta r_j}{2} + \sum \Delta r_i = \frac{10}{2} + \sum 16,5 + 17 + 21,5 + 11,5 + 42,5 = 114,00\text{ mm,}$$

$$S_{10} \cdot r_{10} = 4\,069,80 \cdot 114 = 463\,957,20\text{ mm}^3.$$

Výsledek hledaného součinu má pro další výpočty hodnotu  $463\,957,20\text{ mm}^3$ .



- Trojúhelníková oblast – vzorový výpočet obsahu  $S_{1t}$ , vzdálenosti těžiště od středové rotační osy  $r_{1t}$  a jejich součinu pro první řádek dle (2.34 a 2.35):

$$S_{1t} = \frac{\sigma_{d0+1} - \sigma_{d0}}{2} \cdot \Delta r_j = \frac{594,48 - 406,98}{2} \cdot 10 = 937,50 \text{ mm}^2.$$

Obsah počítané plochy se rovná 937,50 mm<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned} r_{1t} &= \frac{\Delta r_1}{3} + \sum \Delta r_i, \\ &= \frac{10}{3} + \sum 16,5 + 17 + 21,5 + 11,5 + 42,5 = 112,33 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Těžiště dané plochy se nachází ve vzdálenosti 112,33 mm od středové osy výkovku. Následně jsou zjištěné hodnoty vynásobeny:

$$S_{1t} \cdot r_{1t} = 937,50 \cdot 112,33 = 105\,312,50 \text{ mm}^3.$$

Výsledek součinu odpovídá 105 312,50 mm<sup>3</sup>.

Pro výpočet tečné složky kovací síly  $F_T$  se nejprve musí z konstrukce výkovku vyčíst několik rozměrů. Potom lze přistoupit k vzorovému výpočtu, který je proveden pouze pro první řádek, viz příloha 25:

$$D_1 \cdot \Delta z_1 \text{ [mm]}, \quad (3.15)$$

$$D_1 \cdot \Delta z_1 = 238 \cdot 15,6 = 3\,712,8 \text{ mm}^2.$$

Výsledek součinu je 3 712,8 mm<sup>2</sup>. Další výstupy jsou uvedeny v příloze 25.

Hodnoty všech zjištěných sil se nachází v souhrnné tabulce 20. Při jejich vzájemném srovnání lze pozorovat různě velké rozdíly, které jsou pravděpodobně způsobeny odlišnými přístupy jednotlivých autorů nebo softwarů. Největší nárůst tvářecí síly je zjištěn při výpočtu simulačním softwarem Simufact Forming 16.0. Možnými příčinami vyššího nárůstu může být rozdíl při zahrnutí pasivních účinků, nerovnoměrného chladnutí nebo rozložení teplot ve výkovku. Vliv může mít rovněž větší složitost tvaru výkovku, protože při simulaci dochází k značnému nárůstu síly ve finální fázi při dokování dlouhého a rovněž úzkého žebra součásti. Tvářecí síla se zde výrazně navyšuje a dosahuje maximální hodnoty, viz příloha 22. Ze stejných důvodů může být způsoben rozdíl mezi použitými simulačními softwary, který činí zhruba 1,5 MN.

Tab. 20 Porovnání jednotlivých tvářecích sil podle různých výpočetních metod.

Typ výpočtu dle přístupu	Brjuchanov a Rebelský	Storožev	Tomlenov	Simufact Forming 16.0	Forge
[MN]	29,9	26,0	29,9	<b>32,2</b>	30,7

Pro výslednou kovací sílu  $F_{Kc}$  se standardně bere v úvahu největší dosažená hodnota. Na základě výsledků jde o sílu, která byla zjištěna simulacemi v softwaru Simufact Forming 16.0, tj.  $F_{KSF} = 32,2$  MN. V rámci prováděného experimentu bude při zkušební výrobě odzkoušena síla, která byla zjištěna softwarem Forge, tj.  $F_{KFG} = 30,7$  MN. Její velikost se blíží výsledkům zjištěným podle analytického přístupu podle Tomlenova a Brjuchanov – Rebelského. Pokud se ve zkušební sérii ověří bezproblémová výroba s nižší silou, tj.  $F_{KFG}$ , než je maximální zjištěná  $F_{KSF}$ , tak bude následně zavedena i pro vykování celé výrobní série. Hlavní výhodou při použití nižších sil je menší opotřebení nástrojů a strojů nebo nižší energetická spotřeba zařízení.

### 3.6.1 Ověření volby lisu

Pro zaváděnou výrobu byl zvolen svislý klikový kovací lis LZK 4 000 (obr. 95). Zcela zásadní je fakt, že podnik zařízením disponuje. Provedená volba se musí ověřit s výsledkem výpočtu potřebné síly pro poslední dokovací operaci, která je zpravidla největší. Pro ověření správného nadimenzování stroje se bere v úvahu největší zjištěná síla včetně zahrnutí bezpečnosti:

$$\begin{aligned} F_{LZK4} \cdot 0,85 &> F_{KSF} \text{ [MN]}, \\ 40 \cdot 0,85 &> 32,2, \\ 34 &> 32,2 \text{ MN}, \end{aligned} \quad (3.16.)$$

kde:  $F_{LZK4}$  – jmenovitá síla lisu [MN];  $F_{LZK4} = 40$  MN, viz příloha 26a.

Velikost stanovené kovací síly  $F_{KC}$  včetně zahrnutí 15 % míry bezpečnosti vyhovuje. Dalším sledovaným parametrem je kapacita mechanické práce tvářecího lisu při kontinuálním chodu výroby. Celková energie pro výrobu výkovku musí být menší než celková práce zařízení. Tento parametr je s ohledem na výrobní postup splněn. Vzhledem k ruční manipulaci s materiálem se výrazně snižuje riziko nedostatku energie kvůli vzniku menších prodlev při manipulaci s ocelí. Další technické specifikace stroje se nachází v příloze 26a.



Nahřívání dokovací zápustky plynovým hořákem při pauze

Obr. 95 Ukázka lisu LZK 4 000 včetně nahřívání upnutých nástrojů.

### 3.7 Dokončovací operace

Po vykování součásti na požadovaný tvar se musí provést několik nezbytných dokončujících operací. Zákazníkům se expedují výkovky ve stavu ostříženém, vyděrovaném a otryskaném. Pro lepší mechanické vlastnosti se doporučuje zařadit tepelné zpracování, tj. žíhání na snížení pnutí nebo normalizační. Zvolené dokončující operace pro zaváděnou výrobu jsou následující:

- Ostřížení – oddělení výronku po celém obvodu výkovku. Pro výpočet se používá průměr teplého výkovku, tzn. výronku a určí se dosažením do vztahů (2.36, 2.37 a 2.38):

$$F_{SV} = 1,7 \cdot \tau_s \cdot o_v \cdot 2 \cdot h_v = 1,7 \cdot 84 \cdot 747,7 \cdot 2 \cdot 4,8 = 1\,038\,331,93 \text{ N},$$

$$\text{kde: } o_v = D_{v\acute{y}r} \cdot \pi \cdot 1,013 = 238 \cdot \pi \cdot 1,013 = 757,5 \text{ mm},$$

$$\text{kde: } D_{v\acute{y}r} \text{ – průměr výronku; } D_{v\acute{y}r} = 238 \text{ mm},$$

$$\tau_s = 0,8 \cdot R_m = 0,8 \cdot 105 = 84 \text{ MPa},$$

$$\text{kde: } R_m = 105 \text{ MPa; určeno pro dolní mez teploty výronku } 850 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Výsledek výpočtu obvodu výronku odpovídá hodnotě 757,5 mm.

Výsledná síla na ostřížení výronku odpovídá po převodu jednotek 1,04 MN.

- Děrování – jedná se o prostřížení středové blány výkovku o průměru 85 mm a tloušťce 10 mm, viz 2024\_DP\_217110\_S02. Jde o středový průchozí otvor obrobenej součásti, která se uvádí na výkrese 2024\_DP\_217110\_S01. Proto se musí provést řada výpočtů, které vedou ke zjištění střížných sil pro následnou volbu tvářecího lisu (2.39 a 2.40):

$$F_{SS} = 1,7 \cdot \tau_s \cdot o_s \cdot s = 1,7 \cdot 84 \cdot 248,19 \cdot 10 = 354\,409,35 \text{ N},$$

$$\text{kde: } o_s = d_{ps} \cdot \pi = 79 \cdot \pi = 248,19 \text{ mm},$$

kde:  $d_{ps} = 79 \text{ mm}$ ; rozměr je určen z výkresu prostříženého výkovku, viz 2024\_DP\_217110\_S03,

$s = 10 \text{ mm}$ ; stanoveno podle výkresu výkovku.

Obvod blány má 248,19 mm. Síla na prostřížení blány je po převodu jednotek 0,35 MN.

- Celková střížná síla – pro ni se musí zahrnout bezpečnostní koeficient, který činí 25 %. Uvedené operace jsou navrženy jednotlivě ve dvou navazujících krocích. Vzhledem ke stanovenému výrobnímu postupu se pro celkovou střížnou sílu uvažuje ta větší z nich:

$$F_{SC} = 1,25 \cdot F_{Sv} \text{ [N]}, \quad (3.17)$$

$$= 1,25 \cdot 1,04 = 1\,297\,914,91 \text{ N},$$

$$\text{kde: } F_{SS} < F_{Sv} \text{ [MN]}, \quad (3.18)$$

$$0,35 < 1,04 \text{ MN}.$$

Větší síla vychází na ostřížení výronku.

Minimální potřebná střížná síla dosahuje po převodu a zaokrouhlení jednotek velikosti 1,3 MN. Pro vypočítanou hodnotu je zvolen vyhovující lis, kterým podnik disponuje. Jedná se o zařízení od firmy Žďas – LKOA 200 (obr. 96). Jeho podrobné technické údaje jsou uvedeny v příloze 26b. Pro snadnou a rychlou logistiku výkovku se nachází v těsné blízkosti hned za kovací lisem, viz obr. 97.



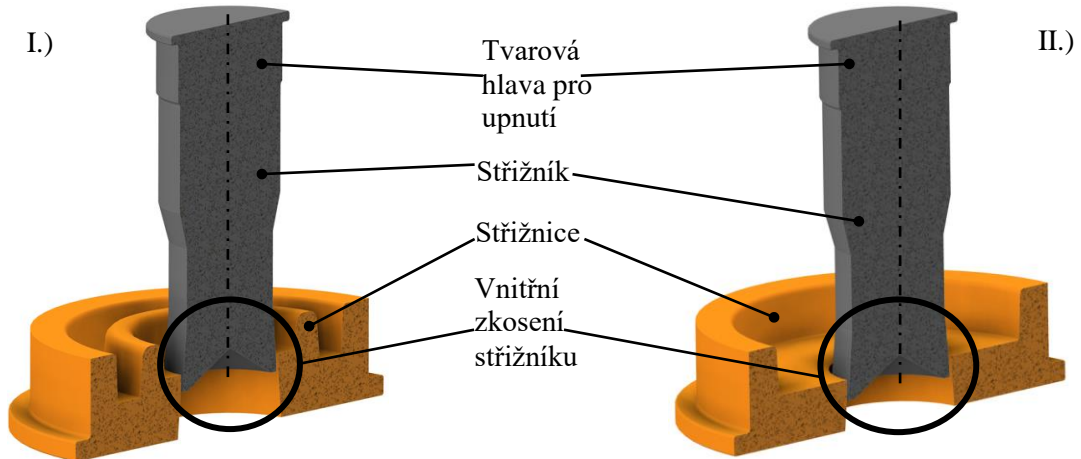
Obr. 96 Střížný lis LKOA 200.

Obr. 97 Vzájemná pozice kovacího a střížného lisu.

Transport výkovku od kovacího lisu ke střížnému je realizován dvěma pásovými dopravníky. Pro odstříhnutí blány jsou zvažovány dvě konstrukční provedení střížnic, viz obr. 98. Vzhledem k větší stabilitě ohřátého výkovku a tím i snížení rizika jeho zdeformování je zvolena konstrukční varianta I. Jedná se o mírně složitější geometrii. Její výkresová dokumentace se nachází na výkrese 2024\_DP\_217110\_S41.



Menší nevýhodou je její větší tvarová složitost, což se může negativně projevit vyššími náklady na materiál nebo výrobu. Střížník má jednoznačně definovaný průměr dle požadovaného otvoru díry. Díky vnitřnímu zkosení střížné hrany dojde ke zmenšení ořepu, a rovněž ke snížení deformace ostříhávaného výkovku při delší střížné dráze nástroje. Jeho konstrukční zpracování se nachází na výkrese 2024\_DP\_217110\_S42. Pro zajištění vyšší přesnosti stříhu se používá jednoduchá vodící deska, viz obr. 99.



Obr. 98 Návrhy střížných nástrojů pro děrování – varianta I (vlevo) a varianta II (vpravo).

Pro ostřížení výronku je navržena jednoduchá nástrojová sestava, viz obr. 99. Průměr střížné hrany ostříhovadla se navrhuje na základě rozměrů teplého výkovku. Činnost střížných operací je rozdělena do dvou kroků. V prvním se vyděruje středová blána a ve druhém následně dojde k oddělení výronku. Vzniklý odpad se umísťuje do kovových ohradových palet (obr. 100). Odstříhnutý výkovek propadne skrze nástroj dolů a jeho postrčením se skluzem dopraví do další ohradové palety. Manipulační činnost provádí obsluha lisu. Všechny střížné nástroje se nachází v příloze 27.



Obr. 99 Model návrhu střížného nástroje pro ostřížení a ukázka upnutí střížných nástrojů.



a) odpad – výronky (vlevo) a blány (vpravo).

b) ostřížené výkovky.

Obr. 100 Uložení vzniklého odpadu a výkovků v ohradových paletách po střížných operacích.

- Tepelné zpracování – pro zpracováváný návrh výroby není zadavatelem stanoveno. Ve výkresové dokumentaci se doporučuje zařadit žihání na snížení pnutí, které při výrobě vzniká. Zadavatel si bude uvedené tepelné zpracování realizovat individuálně. Rovněž se doporučuje provést normalizační žihání výkovků. Výhodou zpracovaných součástí tímto způsobem je zjemnění materiálového zrna, vytvoření rovnoměrné struktury anebo dosažení stejnoměrných mechanických vlastností [7; 12].
- Otryskání – zavádí se vždy pro konečné začištění výkovků od vzniklých okují, nečistot a tenkých otřepů. Použité tryskací médium jsou ocelové broky. Zvolené zařízení je pásový bubnový tryskací stroj PT 500B a výrobní společnost ním disponuje (obr. 101). Jeho technické parametry jsou uvedeny v příloze 26. Pro uvedené zařízení se navrhuje vsázka podle jednoduchého výpočetního vztahu [7, 12]:

$$N_{\text{výk}} = \frac{1\,200}{m_{\text{výk}}} = [\text{ks}], \quad (3.19)$$

$$= \frac{1\,200}{10,65} = 112,67 \text{ kusů},$$

kde:  $m_{\text{výk}} = 10,65 \text{ kg}$ .

Získaný výsledek se v případě 100 a více kusů vždy zaokrouhluje dolů na celé desítky dílců. Navržená vsázka pro pásový tryskač PT 500B čítá 110 kusů. Doba jednoho cyklu je s ohledem na složitost výkovků stanovena na 15 minut.



a) ukázka za klidu stroje    b) ukázka za chodu stroje    c) tryskací médium

Obr. 101 Bubnové tryskací zařízení.

- Kontrola výkovků – posledním krokem před samotnou expedicí zakázky je provedení výstupního ověření kvality zhotovených výrobků. Provádí rozměrová a tvarová kontrola pomocí běžných měřících nástrojů (posuvná měřidla, šablony nebo speciální přípravky), detekce povrchových vad magnetopráškovou metodou na defektoskopickém zařízení nebo měření tvrdosti pomocí tvrdoměrů (např. HPO 3000 BRINELL). Pro orientační vyhodnocení krystalické struktury či chemického složení se využívá magnetoinduktivní způsob, pro který je k dispozici přístroj Magnatest D 3.623 (obr. 102). [6; 7]



a) magnetoprášková metoda

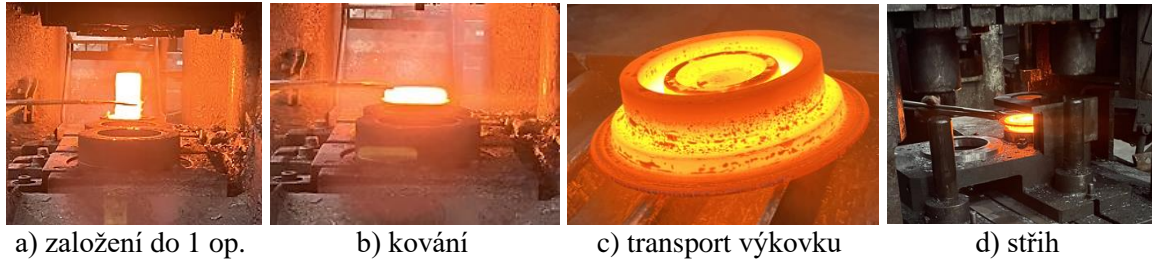
b) magnetoinduktivní zařízení

Obr. 102 Ukázka zařízení pro výstupní kontrolu výkovků [60; 61]



### 3.8 Zkušební výroba a verifikace numerických simulací

Před zahájením kování ověřovací série lze na základě výše provedeného návrhu přistoupit k vypracování souhrnného technologického postupu zhotovení, který slouží pro jednoduchou orientaci a ucelené zdokumentování celého výrobního procesu, viz příloha 28. Zkušební výroba proběhla pouze pro pár desítek kusů (obr. 103).



Obr. 103 Zdokumentování vybraných výrobních operací.

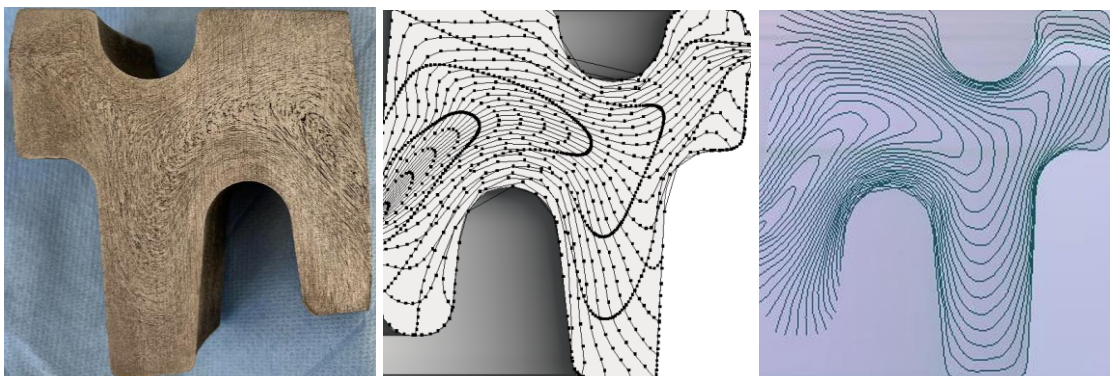
Při kování zkušební série byly ověřovány dvě tvářecí síly –  $F_{KSF} = 32,4$  MN a  $F_{KFG} = 30,7$  MN. S ohledem na vyhovující výsledky je pro celou výrobní sérii zvolena síla  $F_{KFG} = 30,7$  MN. Dále se provádí celá řada kontrolních činností, které probíhají na úseku technické kvality. Dílčí výstupy z provedených kontrol jsou stručně uvedeny v následujících bodech:

- Vizualní kontrola – jedná se o nedestruktivní analýzu výkovku. Sleduje se při ní hlavně tvarová shoda (dotečení materiálu apod.) nebo viditelné poškození, viz obr. 104.



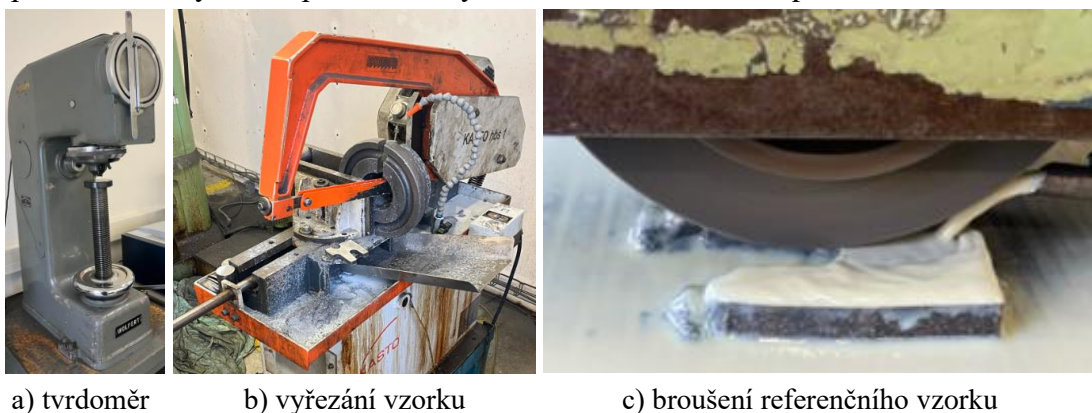
Obr. 104 Vizualní kontrola výkovku.

- Makrografické prověření – jedná se o destruktivní analýzu, při které se musí výkovek rozříznout. Následně se řezná plocha vybrousí a ponoří na několik hodin do solného 33% roztoku HCl, který se ředí s vodou v poměru 1:1. Pro urychlení chemické reakce se v průběhu doporučuje udržovat teplotu roztoku okolo 40 až 50 °C. Na vybroušeném a naleptaném povrchu lze vidět materiálová vlákna. Porovnání výsledků s numerickými simulacemi se nachází na obrázku 105 (pouze finální výkovek). Ze získaných výstupů lze konstatovat, že se výsledky ze simulací přibližně shodují s reálným stavem.



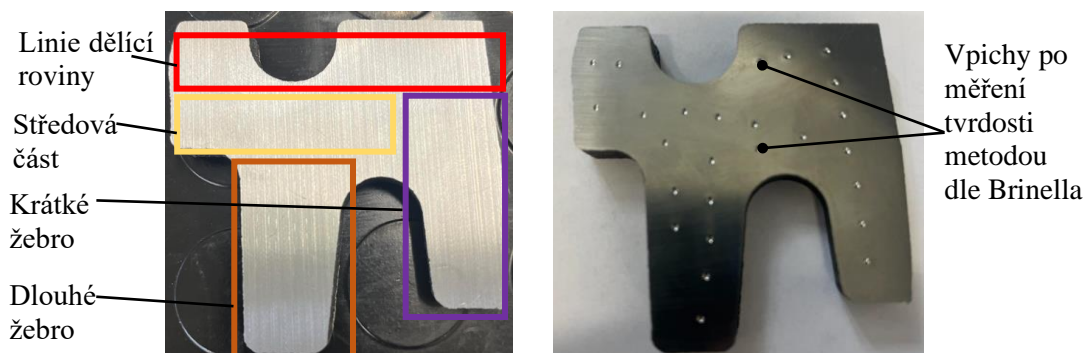
Obr. 105 Materiálová vlákna ze třetí operace – reálný stav a simulace Simufact a Forge.

- Měření tvrdosti – se provádí na vhodně připraveném vzorku anebo sledovaných částech výkovku. V podniku se provádí dostupným dílenským tvrdoměrem HPO 3000 Brinell (obr. 106). V rámci přípravných operací se z výkovku musí nejprve vhodným způsobem vypreparovat referenční vzorek (obr. 107). Měřený povrch se musí následně vhodným způsobem nachystat, například běžným broušením a leštěním povrchu.



Obr. 106 Měření tvrdosti dle Brinella včetně přípravných operací.

Postup přípravy a měření se provádí na základě všech doporučení pro měření tvrdosti podle Brinella, které se uvádí v normě ČSN EN ISO 6506-1 a jejich dodatcích 2, 3 a 4. Před zahájením měření se musí provést kontrola. Při ní se ověřuje způsobilost použitého zařízení pro zvolené parametry pro předpokládanou průměrnou velikost tvrdosti oceli, tj. 140 HBW 2,5/187,5. Její výsledek vyhovuje. V rámci měření tvrdosti výkovku bylo vyhodnoceno 25 vpichů, viz tabulka 21 (příloha 29). Jeho průměrná tvrdost odpovídá 130,8 HBW. S ohledem na předepsané požadavky pro tvářenou ocel 12 020 je stanoven interval s minimální spodní hranicí tvrdosti 120 HBW a maximálním horním limitem 150 HBW. Podle zjištěných výstupů lze zkoušku označit za vyhovující.



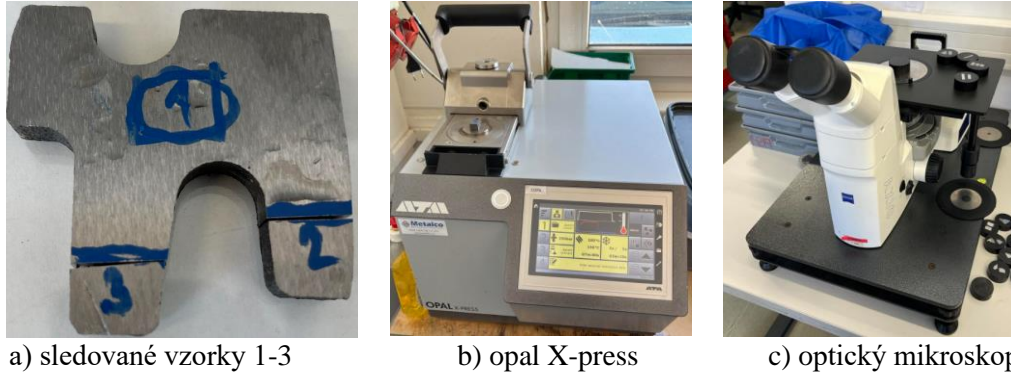
Obr. 107 Vybroušený vzorek (vlevo) a vyleštěný vzorek s provedeným měřením (vpravo).

Tab. 21 Orientační ukázka některých záznamů z měření tvrdosti.

Přibližná oblast	Tvrdost [HBW]					Průměr [HBW]
Dlouhé žebro	127	129	129	135	135	131
Krátké žebro	133	131	135	129	129	131,4
Linie dělicí roviny	131	125	131	125	131	128,6
Středová část	133	131	133	129	131	131
Průměrná tvrdost celého výkovku [HBW]			130,8			

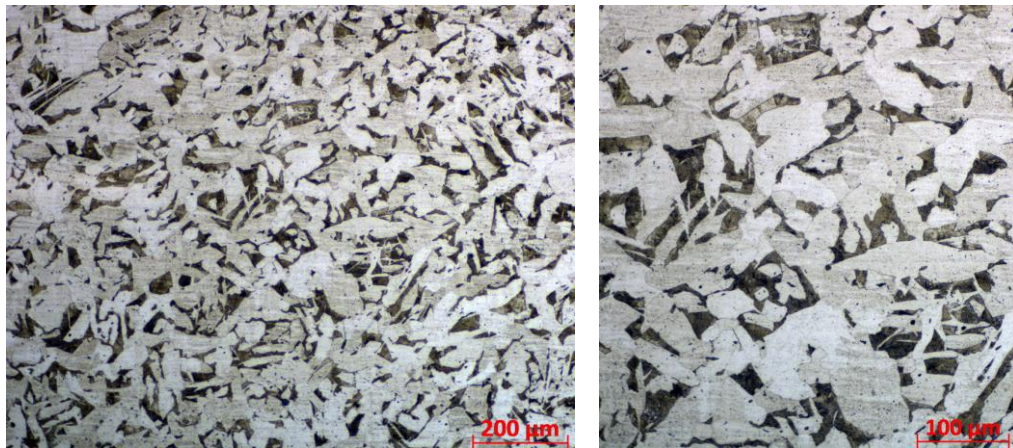


- Zhodnocení mikrostruktury – pro uvedenou kontrolu se musí vypreparovat tři sledované oblasti. S ohledem na to se musí vyříznout části materiálu z vybroušeného referenčního vzorku, které jsou následně v zařízení Opal X-press zalisovány do pryžové směsi, viz obr. 108. Dalšími přípravnými kroky je standardní broušení a leštění. Na závěr jsou všechny vzorky mírně naleptány roztokem Nital, který obsahuje líh, vodu a kyselinu dusičnou, která se běžně ředí na 3 až 4% roztok. Důvodem pečlivé přípravy je následné vyhodnocování v optickém mikroskopu. Jedná se pouze o stručný popis výroby vzorku. Další obrazové materiály z kontroly se nachází v příloze 30.



Obr. 108 Vzorky a zařízení pro vyhodnocení mikrostruktury.

Výroba výkovku probíhala v teplotním intervalu od min. 1 050 až po max. 1 150 °C s následným volným ochlazováním na vzduchu v bedně. První vyhodnocovanou oblastí je jádro, tj. vzorek 1 (příloha 30a), na kterém lze pozorovat rovnoměrné rozložení uhlíku a rovněž mírný a lokální vznik Widmanstättenovy struktury, viz obr. 109.



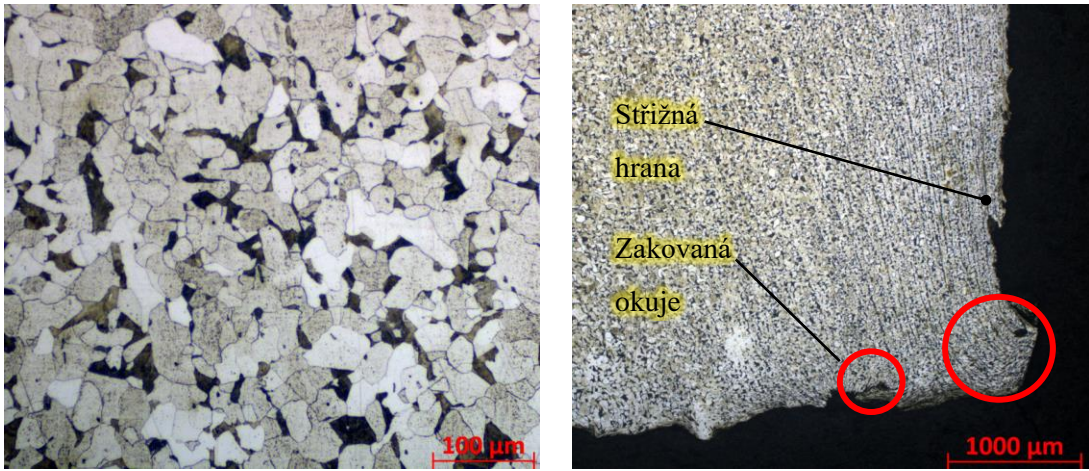
Obr. 109 Mikrostruktura vzorku 1 (jádro výkovku) – zvětšení 100x (vlevo) a 200x (vpravo).

Další sledovanou oblastí je vnitřní žebro výkovku, tj. vzorek 2. Rozložení uhlíku je zde rovnoměrné (obr. 110) a okraje žebra nejsou oduhličené. Ve spodní oblasti lze spatřit zakování okuje, viz obr. 110. Jde o podpovrchovou část výkovku, která bude obrobena, tudíž se nejedná o vadu. Na konci střížné hrany se nachází malý otřep, který vznikl při děrování a rovněž se nejedná o defekt, ale o běžný jev, ke kterému při dané výrobě běžně dochází. Další obrazové detaily se nachází v příloze 30b.

Poslední zkoumanou oblastí je vnější žebro dílce, tj. vzorek 3. Ve středové oblasti žebra je uhlík rozložen rovnoměrně. Naopak po obvodu celé sledované oblasti je vidět mírné oduhličení, viz obr. 111. K němu pravděpodobně dochází buďto při chladnutí výkovku na vzduchu nebo může být způsobeno již při výrobě hutních polotovárů, což standardně probíhá bez ochranné atmosféry. Nejedná se o defekt, protože se oduhličení nachází v oblasti přídavků, které budou později obrobena. V žebro lokálně dochází k mírnému vzniku Widmanstättenovy struktury.



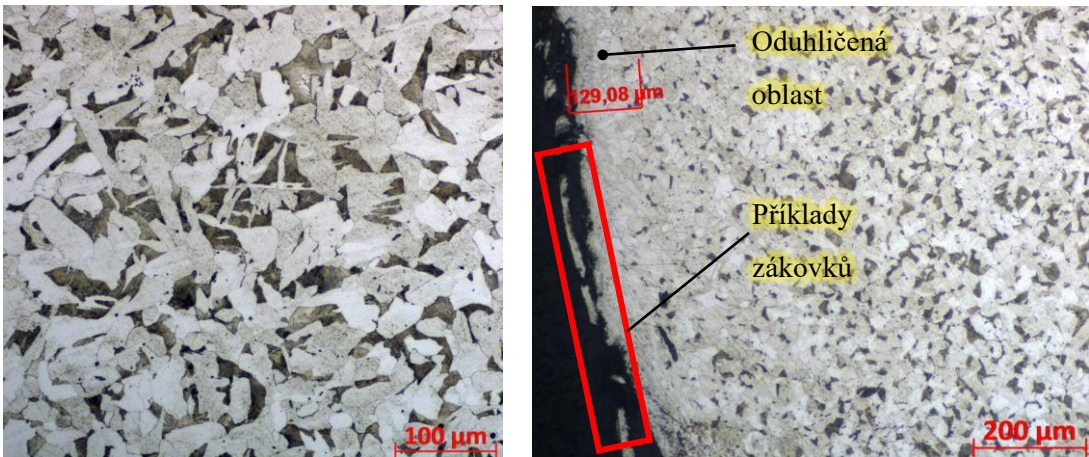
Jsou zde rovněž zachyceny typické avšak přípustné defekty (zákovky apod.), ke kterým dochází při kování a běžně se nachází po obvodu výkovku, viz obr. 111. Vyskytují se v oblasti, která bude později obrobena. Další doplňující snímky se nachází v příloze 30c.



a) rovnoměrné rozložení uhlíku

b) zakovaná okuje a vzhled střižné hrany

Obr. 110 Mikrostruktura vzorku 2 (vnitřní žebro) – zvětšení 200x (vlevo) a 25x (vpravo).

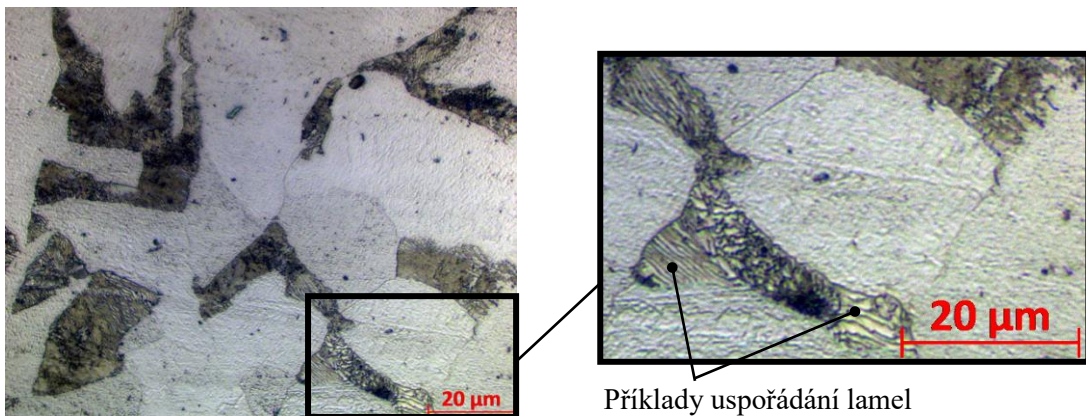


a) struktura vzorku 3

b) ukázka oduhličené oblasti a typických zákovků

Obr. 111 Mikrostruktura vzorku 3 (vnější žebro) – zvětšení 200x (vlevo) a 100x (vpravo).

S ohledem na zpracovávanou ocel 12 020 a zvolenou výrobní technologii má výkovek v celém objemu feriticko-perlitickou strukturu, a to s lamelárním perlitem, viz obr. 112. Widmanstättenova struktura, která se vyskytuje v oblastech silně přehřáté oceli, snižuje mechanické vlastnosti dílců. Pro její odstranění se doporučuje zařazení normalizačního žihání, při kterém dojde k překrystalizaci, bez které ji nelze odstranit.



Příklady uspořádání lamel

Obr. 112 Ukázka feriticko-perlitické struktury výkovku s lamelárním perlitem (1 000x)



- Kontrola chemického složení – se provádí pomocí spektrometrie (obr. 113). Vzhledem k použitému zařízení Q2 ION se realizuje opticko-emisním principem. Hlavní význam a uplatnění této kontroly je spíše při přejímce a vstupní inspekci hutních polotovarů. Pro případ navrhované výroby se měření provádí pouze pro ověření správnosti tvářeného materiálu z důvodu požadavku zákazníka na výstupní kontrolní test. V praxi může dojít třeba k záměně oceli, například při výrobě shodných výrobků z rozdílných materiálů anebo kvůli chybnému označení polotovarů. Výhodou použitého zařízení jsou nižší pořizovací náklady, rychlost nebo přesnost. Před měřením se běžně provádí kalibrace zařízení podle doporučení a návodu výrobce použitého spektrometru. Referenční vzorek se před kontrolou musí nejprve vybrousit. Měření prokazuje přibližné chemické složení použité oceli 12 020 a výsledek se uvádí v tabulce 22. Při srovnání výsledků s ohledem na použité materiálové normy tvářené oceli lze zkoušku považovat za vyhovující.

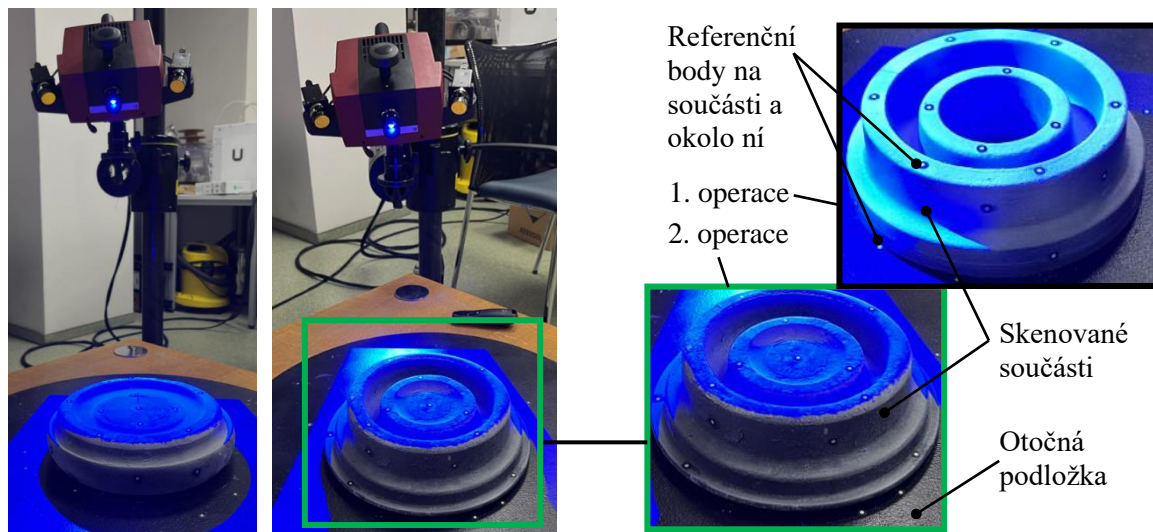
Tab. 22 Chemické složení oceli 12 020 po vykování – měřeno spektrometricky.

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Sn
%	0,16	0,18	0,54	0,007	0,02	0,14	0,03	0,12	0,15	0,04	0,01



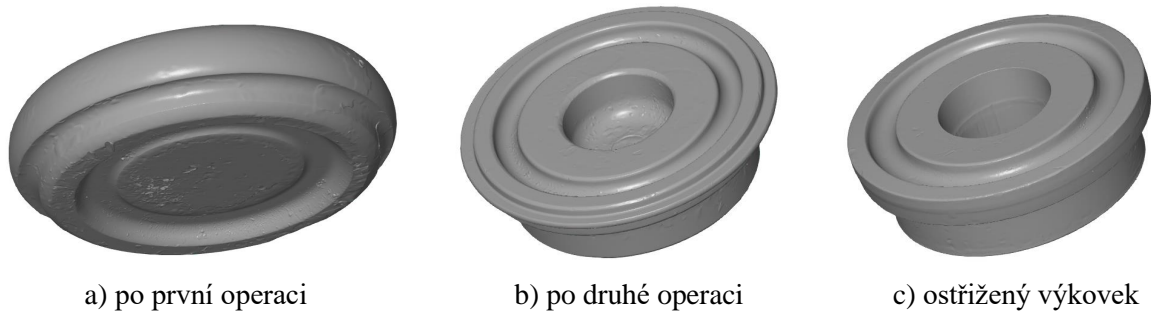
Obr. 113 Jednoduchá kontrola chemického složení – spektrometrie.

V rámci postprocesingu navrhované výroby lze přistoupit k ověření přesnosti provedených simulací. Prvotní kontrola probíhá jednoduchým vizuálním porovnáním simulačních modelů s reálným stavem součástí. Dalším způsobem je srovnání fyzických výrobků s 3D CAD modely ochlazených výkovek. Z nich se vycházelo při návrhu nástrojů (před zahrnutím zvětšení kvůli smrštění oceli). Proto se musí výkovky nejprve naskenovat, viz obr. 114. Vzhledem k velkému rozsahu problematiky skenování bude v následujícím textu pouze velmi stručně shrnut postup práce při skenování výkovek pro řešenou výrobu.

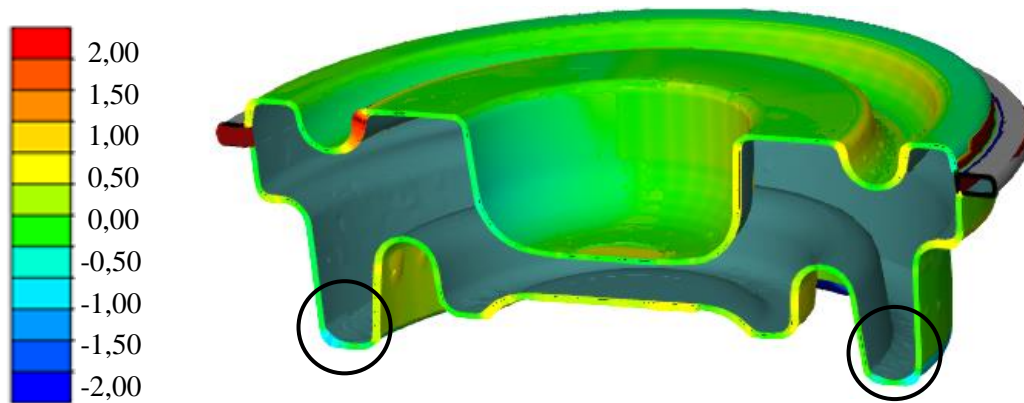


Obr. 114 Praktické skenování výkovek a jejich ukázky v detailu.

Prvním krokem je nanesení křídové vrstvy na všechny výrobky. Hlavním cílem je dosažení co nejmenší světelné odrazivosti povrchů dílců při jejich snímání. Následně se musí povrch a také blízké okolí pokrýt referenčními body. Pomocí nich si skenovací zařízení určuje a vypočítává polohu jednotlivých bodů. Na základě toho dále spojuje a tvoří ucelený povrch snímaného dílce z jednotlivých snímků, které se musí částečně překrývat. Práce skeneru pak vychází z principu triangulační metody kamer (2 kamery a 1 projektor). Použité zařízení se nazývá ATOS Compact (obr. 114). Měření probíhalo v laboratoři VUT v Brně na Fakultě strojního inženýrství. Získané výstupy se musí následně převést do elektronické podoby, tj. formát stl. Další úpravy včetně vyhodnocení výsledků jsou provedeny v softwaru GOM Inspect. Pro potřeby skenování jsou použity výkovky ze zkušební seřizovací série (obr. 115), které jsou proloženy modely ideálních chladných výkovek ze softwaru Autodesk Inventor Professional 2024 (obr. 116). [62; 63]



Obr. 115 Skeny výkovek po jednotlivých operacích.



Obr. 116 Proložený naskenovaný reálný výkovek 3D modelem – po druhé operaci.

Výkovek ze druhé operace je z celkového pohledu dobře dotečený. Ve spodní části dlouhého vnějšího žebra lze pozorovat jeho mírné nedotečení. Tento jev se vyskytoval také v simulacích, které byly vytvořeny v programu Forge. V rámci 3D modelu nebyl uvažován výronek. Z tohoto důvodu se zde nachází maximální odchylka. Mírný přebytek materiálu se vyskytuje v levé části horní kruhové drážky. Jedním z důvodů této odchylky může být třeba opotřebení anebo špatné seřízení nástroje (zkušební výroba). Další obrazové výsledky se nachází v příloze 31.

Nežádoucím a běžným doprovodným jevem každého výrobního procesu je opotřebení nástrojů. Na obrázku 117 jsou zachyceny vybrané nástroje a jejich stav po vykování první zkušební série, která čítala 50 kusů a následně po vykování 2 000 součástí. Další fotografie jsou v příloze 32.



a) vrchní část nástroje po 50 kusech – 2op.      b) vrchní část nástroje po 2000 kusech – 2op.

Obr. 117 Stav nástrojů po 50 a 2 000 vykováných součástech.

## ZÁVĚR

Řešenou součástí je tělo spojky, která je konstrukční součástí elektromagnetických systémů pro moderní chladicí zařízení a nachází se na hnací hřídeli v kompresorech dopravních prostředků. Výrobní série činí 80 000 kusů za rok. Jde o tvarově mírně složitější součást, která má největší průměr 213 mm a maximální výšku 63,4 mm. Na součásti se nachází různá tvarová vybraní, drážkování nebo středový otvor o průměru 84 mm. Zvolený materiál pro výrobu je ocel 12 020, která disponuje dobrou obrobiteľnosťou, tváriteľnosťou a je vhodná pro tepelné a chemicko-tepelné zpracování. Běžně se používá pro méně namáhané cementované strojní díly středních rozměrů.

Pro zhotovení součásti bylo posuzováno několik výrobních variant. Jejich hodnocení probíhalo na základě několika faktorů, například požadavky na rozměrovou přesnost, počet tvářených dílců nebo ekonomika a hospodárnosť výroby. S ohledem na posuzované parametry byla jako nejvhodnější výrobní technologie zvolena metoda – zápuťkové kování za tepla.

V prvním kroku byla úspěšně ověřena technologičnost a vyrobiteľnosť řešené součástky. Dále byl zhotoven návrh výkovku s potřebnými přídávky. Na základě něhož byl předběžně navržen výrobní lis LZK 4 000 a rovněž vhodná konstrukce výronkové drážky. S ohledem na drážku a objem navrženého výkovku byl proveden výpočet rozměrů vstupního polotovaru, kterým je špalík o průměru 100 mm a výšce 201 mm. Dále byly navrženy dvě předkovací operace – dělení polotovaru a jeho ohřev, a to včetně jejich potřebných parametrů a strojů.

V další fázi návrhu byly s pomocí simulačních softwarů zvoleny tři kovací operace – pēchování, předkování a dokování. Výsledky z použitých simulačních softwarů Simufact Forming 16.0 a Forge se ve většině objemu dílčích předkovků a výkovků zásadním způsobem nelišily. Větší odlišnosti byly zaznamenány pouze v malých lokálních oblastech. Mírná tvarová odchylka byla zjištěna ve druhé operaci, která však neměla vliv na tvarový výsledek ve třetí dokovací operaci. Dále byly pro všechny kovací operace navrženy potřebné výrobní nástroje.

Dle různých přístupů byly zjištěny potřebné kovací síly. Maximální hodnota  $F_{KSF} = 32,2$  MN byla zjištěna softwarem Simufact Forming 16.0. Oproti výsledkům z Forge  $F_{KFG} = 30,7$  MN se lišila o 1,5 MN, tj. přibližně 5 %. Nejvyšší síla podle analytického výpočtu byla  $F_{KT} = 29,9$  MN, která se oproti  $F_{KSF}$  lišila zhruba o 8 %. Použitá kovací síla byla po experimentálním ověření ve zkušební sérii stanovena na velikost  $F_{KFG} = 30,7$  MN. Na základě toho byla ověřena správná volba lisu LZK 4 000. Dokončení výkovku spojky bylo navrženo ve dvou střižných operacích. Na základě toho byly vypočteny potřebné tvářecí síly na odstříhnutí a proděrování výkovku. Pro celkovou střižnou sílu byla stanovena hodnota 1,3 MN. Pro všechny střižné operace byl zvolen stroj LKOA 200. Pro konečné začíštění výkovků bylo navrženo jejich otryskání, které bude probíhat ve stroji PT 500B. Jako tryskací prostředek byly zvoleny ocelové broky.

Ze zjištěných výstupů byl zhotoven technologický výrobní postup. V průběhu výroby zkušební série bylo v rámci ověření výrobní kvality výkovků provedeno několik kontrolních operací, například vizuální, makro nebo mikrografické zkoušení. Byla zjištěna tvrdost výkovku v řezu o průměrné hodnotě 130,8 HBW. Rovněž byla sledována detailní mikrostruktura součásti. Ve vybraných vzorcích výkovku byla nalezena feriticko-perlitická struktura s lamelárním perlitem s mírným a lokálním výskytem Widmanstättenovy struktury. Na základě toho bylo doporučeno zařadit normalizační žihání. Dále bylo spektrometrickou metodou zjištěno vyhovující chemické složení dokončených výkovků. Všechny provedené kontrolní operace byly vyhodnoceny jako vyhovující. Poslední činností bylo porovnání reálných výkovků z jednotlivých operací pomocí reverzního inženýrství. Byly zjištěny různé rozměrové odchylky od ideálních 3D modelů. Na základě výsledků bylo potvrzeno mírné nedotečení spodní části vnějšího žebra ve druhé operaci. Původní predikce nedotečení vzešla z výsledků simulací z softwaru Forge.

V rámci diplomové práce byl navrhnout funkční výrobní postup včetně všech technologických a konstrukčních podkladů pro výrobu těla spojky.



---

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
  2. DRASTÍK, František. *Kovářství: zákl. učivo pro výcvik kovářů v praxi a pomůcka k odbornému školení dorostu*. 3.doplň. vyd. Praha: SNTL, 1971, 116 s.
  3. *Manufacturing guide – processes*. Online. Manufacturing guide. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/search/process>. [cit. 2024-05-24]
  4. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2006. 217 s. ISBN 80-214-2374-9
  5. *IndiaMart – Steel Hot Forging Parts For Automobile Industry*. Online. IndiaMART. 1996. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/hot-forging-parts-2849910376555.html>. [cit. 2024-05-24].
  6. *ZETOR KOVÁRNA – Produkty pro zemědělské stroje*. Online. ZETOR KOVÁRNA s.r.o. 2024. Dostupné z: <https://www.zetorkovarna.cz/vykovky>. [cit. 2024-05-24].
  7. *ZETOR KOVÁRNA – Interní technologické normy*. ZETOR KOVÁRNA s.r.o. 2024
  8. ČSN 41 2020. *Ocel 12 020*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1989.
  9. *Sessika products*. Online. Sessika Industry c.o. Dostupné z: [www.sessika.com](http://www.sessika.com). [cit. 2024-05-24].
  10. *Hutní výrobky z konstrukčních ocelí – oceli k cementování*. Online. Bohdan Bolzano s.r.o. Dostupné z: <https://tpbolzano.cz/hutni-vyrobky-z-konstrukcnich-oceli/>. [cit. 2024-05-24].
  11. *Kendrion – Drive Components & Clutches for automotive applications*. Online. Kendrion N.V. Dostupné z: <https://www.kendrion.com/en/products/drive-components-clutches>. [cit. 2024-05-24].
  12. SUCHOPÁREK, Rudolf. *Základy zápusťkového kování oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956, 379 s.
  13. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 246 s. :il. ISBN 978-80-227-3242-0.
  14. ČADA, Radek. *Technologie I: studijní opora*. Online. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2024-05-24]. ISBN 978-80-261-0449-0. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archived/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>
  15. *Manufacturing guide – metal and sand casting service*. Online. Manufacturing guide. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/sand-casting>. [cit. 2024-05-24].
  16. *IndiaMart – metal sand casting service*. Online. IndiaMART. 1996. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/PRODDetail/METAL-SAND-CASTING-SERVICE-25903500533.HTML>. [cit. 2024-05-24].
  17. *3D Printing First Layer Ripple Problems: Exploring Solutions*. Online. AnkerMake. Dostupné z: <https://www.ankermake.com/blogs/printing-tips/3d-print-first-layer-ripples>. [cit. 2024-05-24].
-



- 
18. Mrňa, Libor. Speciální technologie svařování HSV. *Přednáška: Speciální metody svařování 3D tisk*. Brno, 2022 [cit. 2024-05-24].
  19. *Manufacturing guide – fused deposition modeling*. Online. Manufacturing guide. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>. [cit. 2024-05-24].
  20. *CNC Machining*. Online. HLH Rapid. Dostupné z: <https://hlhrapid.com/blog/creating-a-metal-prototype-what-are-my-options/>. [cit. 2024-05-24].
  21. HAŠEK, Vladimír. *Kování*. Praha: SNTL, 1980, 730 s.
  22. *Technical preparation of production*. Online. HKS Forge. Dostupné z: <https://www.hksforge.sk/en/produkty>. [cit. 2024-05-24].
  23. *Svislé kovací lisy LZK*. Šmeral Brno a.s. Online. Brno [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.smeral.cz/cs/product/10/lzk-4000-b>
  24. HLAVATÝ, Ivo a Jiří HRUBÝ. *Technologičnost konstrukcí: učební text*. Online. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2772-8.
  25. ČSN 22 8306. *Zápusťky pro svislé kovací stroje: Technické požadavky na konstrukci*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1990, 39 s.
  26. ČSN EN 10 243-1. *Ocelové zápusťkové výkovky – mezní úchylky rozměrů – část 1: výkovky kované na bucharech a svislých kovacích lisech*. Praha. Květen 2003
  27. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření II. 1*. Brno: Univerzita obrany, 2008.
  28. ČSN 42 9030. *Výkovky ocelové zápusťkové. Příkladky na obrábění, mezní úchylky rozměrů a tvarů*. Praha: Český normalizační institut, 1987.
  29. GAJDOŠ, František. *Technologie tváření kovů*. Online. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/5te\\_technologie\\_vyroby\\_I\\_tvareni\\_gajdos.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/5te_technologie_vyroby_I_tvareni_gajdos.pdf)
  30. ČERMÁK, Jan. *Podklady pro předmět projekt 2 - část kování*. Online. Praha: ČVUT, 2004 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: [https://members.marticonet.sk/jkuba/Prierezoblas%C5%A5ou/zaklady\\_konstrukce\\_zapustek.pdf](https://members.marticonet.sk/jkuba/Prierezoblas%C5%A5ou/zaklady_konstrukce_zapustek.pdf)
  31. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření I. 1*. Brno: Univerzita obrany, 2008.
  32. *Increase die life with lubes and coatings*. Online. Foremag. Dostupné z: <https://www.forgemag.com/articles/84993-increase-die-life-with-lubes-and-coatings>. [cit. 2024-05-24].
  33. *Mineralogické a genetické typy železných rud*. Online. Stará huť. Dostupné z: <http://www.starahut.com/node/7#sthash.aFDZ4EeO.dpbs>. [cit. 2024-05-24].
  34. *Hutní průmysl – ostřík okují*. Online. SAS Třinec. 1885. Dostupné z: <https://sas-trinec.cz/service/hutni-prumysl/>. [cit. 2024-05-24].
  35. *InductoForge® Induction Forging System – Inductoheat 3D Animation*. Online. Inductoheat group. 2024. Dostupné z: <https://www.inductoheatgroup.com/inductoforge-induction-forging-system-inductoheat-3d-animation/>. [cit. 2024-05-24].
-

- 
36. *Chamber furnace forgings*. Online. Tenova S.p.A. Dostupné z: <https://tenova.com/technologies/chamber-furnace-forgings>. [cit. 2024-05-24].
  37. *Ciclo Stampaggio Acciaio a caldo*. Online. Fim Forging. 2023. Dostupné z: <https://www.fimforging.com/ciclo-stampaggio-acciaio-a-caldo/>. [cit. 2024-05-24].
  38. HAWRYLUK, Marek; WIDOMSKI, Pawel; KASZUBA, Marczin a KRAWCZYK, Jakub. Development of New Preheating Methods for Hot Forging Tools Based on Industrial Case Studies and Numerical Modeling. Online. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS*. 2020, roč. 2020, č. 51A. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-020-05893-z>. [cit. 2024-05-24].
  39. BEHRENS, Bernd-Arno; HUSKIC, Aziz; ROSENBUSCH, Daniel; PEDDINGHAUS, Juliu; SIEGMUND, Martin et al. Design, Characterisation and Numerical Investigations of Additively Manufactured H10 Hybrid-Forging Dies with Conformal Cooling Channels. Online. Roč. 2022, č. 1063. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/7/1063>. [cit. 2024-05-24].
  40. ASNAF, Nader. Tool and Die Making, Surface Treatment, and Repair by Laser-based Additive Processes. Online. *Berg Huettenmaenn Monatsh*. 2021, s. 12. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-021-01113-2>. [cit. 2024-05-24].
  41. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0401-9.
  42. *Tumble Blast Wheel Polishing Tumblers*. Online. Wheelabrator group s.r.o. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/cs-cz/equipment/wheelblast-machines/batch-type-tumbleblast-machines/mb-batch-type-tumbleblast-machine>. [cit. 2024-05-24].
  43. *Closed die forging*. Manufacturing guide. Online. Stockholm, [cit. 2024-05-24] Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/closed-die-forging>
  44. JULIŠ, Martin. Strojírenské materiály a tepelné zpracování. Přednáška: *Tepelné zpracování ocelí*. Vysoké učení technické. Brno, 2023.
  45. ČECHURA, Milan; HLAVÁČ, Jan a STANĚK, Jiří. *Konstrukce tvářecích strojů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN 978-80-261-0513-8.
  46. VAVŘÍK, Ivan; BLECHA, Petr a HAMPL, Josef. *Obráběcí stroje. Syllabus přednášek pro distanční studium*. Vysoké učení technické v Brně, 2002.
  47. ŘIHÁČEK, Jan. *Syllabus k předmětu počítačová podpora technologie* [online]. Brno, 2015 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/dpp\\_hpt\\_pocitacova\\_podpora\\_tvareni.zip](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/dpp_hpt_pocitacova_podpora_tvareni.zip)
  48. ŘIHÁČEK, Jan. *Cvičení a přednášky z předmětu počítačová technologie* [online]. Brno, 2023 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz/course/view.php?id=260621>
  49. TATÍČEK, František, Tomáš PILVOUSEK a Martin KUBELKA. Akademie tváření: *Počítačová podpora v technologických procesech*. In: MM Průmyslové spektrum. Online. 2011. [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademietvareni-pocitacova-podpora-v-technologickych-procesech.html>
  50. ŘIHÁČEK, Jan. Přednáška z předmětu Simulace technologických procesů: *Metoda konečných objemů*. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24].
-

- 
51. DIN 7523. *Přídavky na obrábění pro ocelové výkovky*. Technická norma.
  52. *Autodesk Inventor Professional 2024*. Online. Autodesk. 2024. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>. [cit. 2024-05-24].
  53. *Produkty pro indukční ohřev*. Online. Robotherm spol. s.r.o. 2022. Dostupné z: <https://www.roboterm.cz/CZ/INDUKCE/PRODUKTY/>. [cit. 2024-05-24].
  54. *Optimální indukční ohřívací proces pro tváření*. Online. Robotherm spol. s.r.o. 2022. Dostupné z: <https://www.roboterm.cz/cz/indukce/o-indukci/optimalni-indukcni-ohrivaci-proces-pro-tvareni>. [cit. 2024-05-24].
  55. *Dělení materiálu*. Online. AC Steel a.s. Dostupné z: <https://www.acsteel.cz/sluzby/deleni-materialu/index.html>. [cit. 2024-05-24].
  56. *Simufact Forming 16.0*. Online. Hexagon. 2024. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/simufact-forming>. [cit. 2024-05-24].
  57. *Forge software*. Online. Transvalor. 2024. Dostupné z: <https://www.transvalor.com/en/forge>. [cit. 2024-05-24].
  58. ČSN 41 9663. Ocel 19 663. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1989.
  59. *Metal Processing Lubricants*. Online. Fuchs group. Dostupné z: <https://www.fuchs.com/de/en/products/lubricants-and-services/metal-processing-lubricants/forming-lubricants/#forming-lubricants>. [cit. 2024-05-24].
  60. *BASISWISSEN ZUR MAGNETPULVERRISSPRÜFUNG*. Online. Karl Deutsch. Dostupné z: <https://www.karldeutsch.de/ZFP-WISSEN/BASISWISSEN/BASISWISSEN-ZUR-MAGNETPULVERRISSPRUEFUNG/>. [cit. 2024-05-24].
  61. *MAGNATEST D 3.623*. Online. Foerster Holding GmbH. 2024. Dostupné z: <https://www.foerstergroup.cz/de/cze/produkte/magnatest-d-3623/>. [cit. 2024-05-24].
  62. ZOUHAR, Jan. Přednáška z předmětu Počítačové modelování a rapid prototyping: *Skener ATOS COMPACT*. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24].
  63. *Zeiss – Průmyslová metrologie*. Online. Carl Zeiss spol. s r.o. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/software/quality-suite.html>. [cit. 2024-05-24].
  64. ČSN 42 9002. Rozdělení zápusťkových výkovků podle složitosti tvaru. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1989.
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
$A_j$	Práce lisu	[J]
$A_5$	Tažnost	[%]
$a$	Rozměr otřepu	[mm]
$a_t$	Součinitel teplotní vodivosti	[m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> ]
$B$	Šířka jednotlivých částí výkovku	[mm]
$B_{max}$	Maximální šířka výkovku	[mm]
$B_s$	Bainit start	[-]
$B_f$	Bainit finish	[-]
$B_z$	Délka zatečení kovu	[mm]
$b_m$	Šířka můstku	[mm]
$C_o$	Souhrnný koeficient	[-]
$C_{1,2}$	Materiálová konstanta	[-]
$D_j$	Vzdálenost těžiště jednotlivých ploch	[mm]
$D_k$	Průměr hlavy paty vyhazovače	[mm]
DKT	Dolní kovací teplota	[°C]
$D_o$	Průměr polotovaru	[mm]
$D_{op}$	Průměr ohřátého polotovaru	[mm]
DU	Dolní úvrat' lisu	[°]
$D_v$	Maximální průměr výkovku	[mm]
$D_{výr}$	Průměr výronku	[mm]
$D_{zp1}$	Minimální průměr pro pēchovací nástroje	[mm]
$D_{zp23}$	Minimální průměr pro předkovací a dokovací nástroje	[mm]
$d_o$	Velikost otvoru výkovku	[mm]
$d_k$	Průměr díry vyhazovače	[mm]
$d'_k$	Průměr dříku vyhazovače	[mm]
$d_{kv}$	Průměr kolíku vyhazovače	[mm]
$d_{kv'}$	Konstrukční velikost průměru tělesa vyhazovače	[mm]
$d_s$	Průměr prolisu blány	[mm]
$d_{ps}$	Průměr prostřižené blány	[mm]
$d_v$	Průměr otvoru pro táhlo	[mm]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
$F$	Tvářecí síla	[N]
$F_{KBR}$	Kovací síla dle Brjuchanova a Rebelského	[N]
$F_{KC}$	Výsledná kovací síla	[N]
$F_{KFG}$	Kovací síla dle Forge	[N]
$F_{KS}$	Kovací síla dle Storoževa	[N]
$F_{KSF}$	Kovací síla dle Simufact Formingu 16.0.	[N]
$F_{KT}$	Kovací síla dle Tomlenova	[N]
$F_L$	Lámací síla	[N]
$F_{LZK4}$	Maximální jmenovitá tvářecí síla pro lis LZK 4 000	[N]
$F_N$	Normálová síla	[N]
$F_p$	Přidrřzovací síla	[N]
$F_s$	Střižná síla	[N]
$F_{SC}$	Celková střižná síla	[N]
$F_{Ss}$	Síla na prostřižení blány	[N]
$F_{Svýr}$	Střižná síla na ostřižení výronku	[N]
$F_{st}$	Ferit start	[-]



**Symbols**

Označení	Legenda	Jednotka
$F_{Sv}$	Síla na odstřížení výronku	[N]
$F_T$	Tečná síla	[N]
$F_0$	Počáteční síla	[N]
$f$	Součinitel tření	[-]
$g$	Dolní míra přesazení	[mm]
$g_s$	Velikost sestřížení	[mm]
$H$	Výška jednotlivých částí na výkovku	[mm]
$H_D$	Výška odsazení dolní hrany můstku od spodní dutiny zápustky	[mm]
$H_{KT}$	Horní kovací teplota	[°C]
$H_{max}$	Maximální výška výkovku	[mm]
$H_{op}$	Výška ohřátého polotovaru	[mm]
$H_{pdl}$	Pracovní dráha lisu	[mm]
$H_U$	Horní úvrat' lisu	[°]
$h$	Výška zahloubení na výkovku	[mm]
$h_{dr}$	Výška horní části výkovku nad dělicí rovinou	[mm]
$h_s$	Výška stěny nebo žebra na výkovku	[mm]
$h_v$	Výška můstku	[mm]
$h_{vrub}$	Výška vrubu	[mm]
$I_{1,2}$	Materiálová konstanta	[-]
$k$	Koeficient pro indukční ohřev	[-]
$k_s$	Tvarový součinitel	[-]
$L_{KI}$	Ověření minimální délky polotovaru	[mm]
$L_o$	Délka polotovaru	[mm]
$L_{max}$	Největší délka výkovku ve směru kolmo k rázu	[mm]
$l_c$	Délka cívky induktoru	[mm]
$M$	Moment síly	[Nm]
$M_s$	Martenzit finish	[-]
$M1$	První skupina stupně obtížnosti kování podle materiálu	[-]
$M2$	Druhá skupina stupně obtížnosti kování podle materiálu	[-]
$m$	Třecí faktor	[-]
$m_{KI}$	Kapacita ohříváče	[kg·h <sup>-1</sup> ]
$m_{ot}$	Hmotnost obalového tělesa	[kg]
$m_{pol}$	Hmotnost polotovaru	[kg]
$m_{výk}$	Hmotnost výkovku	[kg]
$m_{1,2}$	Koeficient odpevňování	[-]
$N$	Výška zásobníku	[mm]
$N_{výk}$	Počet výkovku pro tryskač	[ks]
$n$	Výška zvětšení zásobníku	[mm]
$n_{1,2}$	Koeficient zpevňování	[-]
$o_s$	Obvod blány	[mm]
$o_{bv}$	Obvod výkovku bez výronku	[mm]
$o_v$	Obvod výronku	[mm]
$P_s$	Perlit start	[-]
$P_f$	Perlit finish	[-]
$p$	Horní míra přesazení	[mm]
$R$	Vnitřní poloměr zaoblení	[mm]
$R_a$	Drsnost povrchu	[μm]
$Re$	Mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti	[MPa]

**Symbols**

Označení	Legenda	Jednotka
$R_p$	Poloměr zaoblení přechodu do zásobníku	[mm]
$r$	Vnější poloměr zaoblení	[mm]
$r_j$	Vzdálenost těžiště jednotlivých ploch	[mm]
$S$	Ukazatel členitosti tvaru	[-]
$S_c$	Celková plocha výkovku s můstkem	[mm <sup>2</sup> ]
$S_j$	Dílní plochy v úsecích $\Delta r_j$ pod křivkou deformačních odporů	[mm <sup>2</sup> ]
$S_v$	Obsah průmětu výkovku v dělicí rovině	[mm <sup>3</sup> ]
$S_{výr}$	Plocha výronku	[mm <sup>2</sup> ]
$s$	Tloušťka blány	[mm]
$s_{max}$	Maximální tloušťka blány	[mm]
$s_{min}$	Minimální tloušťka blány	[mm]
$s_{mts}$	Minimální tloušťka stěn	[mm]
$s_{nzv}$	Tloušťka blány pro nízké výkovky	[mm]
$T$	Teplota	[°C]
$t$	Tloušťka tělesa	[mm]
$t_{sm}$	Střížná mezera	[mm]
$t_o$	Čas na průchod polotovaru cívkou	[s]
$t_{pol}$	Čas na ohřátí polotovaru	[s]
$t_{1kg}$	Čas na ohřátí 1kg polotovaru dle zařízení	[s]
$u$	Úchylka výšky jehly	[mm]
$V_{opl}$	Objem opalu	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{pol}$	Objem polotovaru	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{výk}$	Objem výkovku	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{výr}$	Objem výronku	[mm <sup>3</sup> ]
$v$	Úchylka šířka jehly	[mm]
$v_o$	Přípustná rychlost ohřevu	[K·h <sup>-1</sup> ]
$Z$	Kontrakce	[%]
$z_j$	Výška průřezu výkovku	[mm]

**Symbols**

Označení	Legenda	Jednotka
$\alpha$	Úhel alfa	[°]
$\alpha_t$	Teplotní délková roztažnost	[K <sup>-1</sup> ]
$\beta$	Úhel zkosení beta	[°]
$\gamma$	Úhel zkosení gama	[°]
$\Delta$	Vyhazovací vůle	[mm]
$\Delta_d$	Vůle v díře pro vyhazovací kolík	[mm]
$\Delta T$	Přípustný teplotní rozdíl v ohřívaném tělese	[K]
$\Delta T_{\text{jádro}}$	Změna teploty jádra	[°C]
$\Delta T_{\text{povrch}}$	Změna teploty povrchu	[°C]
$\Delta T_{\text{rozdíl}}$	Teplotní rozdíl	[°C]
$\Delta T_{\text{zařízení}}$	Změna teploty zařízení	[°C]
$\Delta r_j$	Změna délky plochy řešeného průřezu	[mm]
$\Delta_{\text{tl}}$	Vůle ve vedení vyhazovacího systému	[mm]
$\Delta z_j$	Výška plochy výkovku v horní zápustce	[mm]
$\delta$	Úhel zkosení přechodu blány delta	[°]
$\lambda$	Štíhlostní poměr	[-]
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$\rho$	Měrná hmotnost oceli	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma_d$	Deformační odpor	[MPa]
$\sigma_m$	Dovolené napětí	[MPa]
$\sigma_p$	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_p'$	Přirozený přetvárný odpor se zahrnutím poklesu teploty	[MPa]
$\vartheta$	Úhel zkosení théta	[°]
$\tau_s$	Mez pevnosti ve střihu	[MPa]
$\tau_f$	Smyková napětí	[MPa]
$\varphi$	Logaritmičká deformace	[-]
$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]

---

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Materiálový list oceli 12 020
Příloha 2	Podklady pro návrh výkovku – přídavky, úchytky, přesnost, blána
Příloha 3	Podklady pro návrh výkovku – zaoblení, hrany, úchytky, úkosy
Příloha 4	Nomogram – výronková drážka
Příloha 5	Vliv natočení kliky na různé parametry beranu
Příloha 6	Označení/rozdělení výkovku
Příloha 7	Různé přídavky na obrábění
Příloha 8	Určení velikosti poloměrů
Příloha 9	Určení další parametrů výkovku včetně tabulky se základními informacemi
Příloha 10	Koeficient pro ohřev materiálu a materiálová průvodka zakázky
Příloha 11	Zařízení pro ohřev materiálu a jeho manipulaci.
Příloha 12	Informace z nastavení simulačního prostředí – Simufact Forming 16.0.
Příloha 13	Doplňující informace pro použitý polotovár
Příloha 14	Doplňující informace k simulacím první operace (pěchování) pro variantu A
Příloha 15	Doplňující informace k simulacím první operace (pěchování) pro variantu B
Příloha 16	Doplňující informace k simulacím první operace (pěchování) pro variantu C
Příloha 17	Doplňující informace k simulacím druhé operace (předkování) pro variantu D
Příloha 18	Doplňující informace k simulacím druhé operace (předkování) pro variantu E
Příloha 19	Doplňující informace k simulacím druhé operace (předkování) pro variantu F
Příloha 20	Doplňující informace k simulacím třetí operace (dokování) pro variantu G
Příloha 21	Doplňující informace k simulacím třetí operace (dokování) pro variantu H
Příloha 22	Doplňující informace k simulacím třetí operace (dokování) pro variantu I
Příloha 23	Doplňující informace k simulacím – porovnání vybraných výsledků
Příloha 24	Ukázka všech nástrojových sestava – 3D model
Příloha 25	Výpočetní a výsledkové dodatky pro výpočet kovací síly dle Tomlenova
Příloha 26	Technické specifikace pro strojní zařízení
Příloha 27	Schéma upnutí střižných nástrojů včetně jejich fotodokumentace
Příloha 28	Předběžný technologický postup výroby spojky
Příloha 29	Doplňující informace a fotodokumentace k měření tvrdosti dle Brinella
Příloha 30	Obrazové materiály pro mikrostrukturní analýzu
Příloha 31	Obrazové materiály výsledků z reverzního inženýrství
Příloha 32	Obrazové materiály pro ukázkou opotřebení nástrojů



---

**SEZNAM VÝKRESŮ**

SPOJKA	2024_DP_217110_S01
VÝKOVEK SPOJKY	2024_DP_217110_S02
OSTŘIŽENÝ VÝKOVEK SPOJKY	2024_DP_217110_S03
TEPLÝ VÝKOVEK	2024_DP_217110_S04
VÝKRES SESTAVY 1.op.	2024_DP_217110_S11
DOLNÍ ZÁPUSTKA 1.op.	2024_DP_217110_S12
HORNÍ ZÁPUSTKA 1.op.	2024_DP_217110_S13
KUSOVNÍK 1.op.	2024_DP_217110_S14
VÝKRES SESTAVY 2.op.	2024_DP_217110_S21
DOLNÍ ZÁPUSTKA 2.op.	2024_DP_217110_S22
HORNÍ VLOŽKA 2.op.	2024_DP_217110_S23
HORNÍ ZÁPUSTKA 2.op.	2024_DP_217110_S24
SPODNÍ VLOŽKA 2.op.	2024_DP_217110_S25
SPODNÍ VYHAZOVAČ 2.op.	2024_DP_217110_S26
HORNÍ VYHAZOVAČ 2.op.	2024_DP_217110_S27
KUSOVNÍK 2.op.	2024_DP_217110_S28
DOKOVACÍ SESTAVA 3.op.	2024_DP_217110_S31
DOLNÍ ZÁPUSTKA 3.op.	2024_DP_217110_S32
HORNÍ ZÁPUSTKA 3.op.	2024_DP_217110_S33
HORNÍ ZÁPUSTKA 3.op.	2024_DP_217110_S34
SPODNÍ VLOŽKA 3.op.	2024_DP_217110_S35
HORNÍ TRN 3.op.	2024_DP_217110_S36
SPODNÍ VYHAZOVAČ 3.op.	2024_DP_217110_S37
HORNÍ VYHAZOVAČ 3.op.	2024_DP_217110_S38
KUSOVNÍK 3.op.	2024_DP_217110_S39
STŘIŽNICE – DĚROVÁNÍ	2024_DP_217110_S41
STŘIŽNÍK – DĚROVÁNÍ	2024_DP_217110_S42
STŘIŽNICE – OSTŘIH	2024_DP_217110_S51
STŘIŽNÍK – OSTŘIH	2024_DP_217110_S52

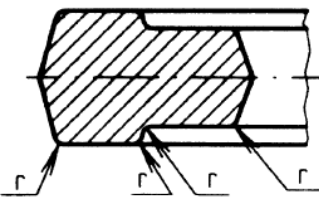
Skupina ocelí podle ČSN 42 0074		k chemicko-tepelnému zpracování							
Chemické složení (rozbor tavby)	%	C	Mn	Si	Cr <sup>1)</sup>	Ni <sup>1)</sup>	Cu	P	S
		0,13 až 0,20	0,60 až 0,90	0,15 až 0,40	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040

Výrobek		tyče				Vlastnosti, které nejsou předmětem zkoušení při kontrole jakosti Informativní hodnoty			
Provedení	válcováno za tepla nebo kováno <sup>3)</sup>				Teploty přeměn	°C	Ac <sub>3</sub> ≈ 840		
Povrch	okujený				Doporučené teploty pro tváření a tepelné zpracování				
Rozměrová norma	ČSN 42 5510 ČSN 42 5520 ČSN 42 5522 ČSN 42 5530	ON 42 5511 ON 42 5521 ON 42 5525 ON 42 5531	Způsob		Teplota °C	Postup			
			Kování	volné	1150 až 750	výkovky pomalu ochlazovat			
v zápustce	1150								
Technické dodací předpisy	ČSN 42 0220	ON 42 0216	Normalizační žhání		880 až 920	ochlazovat na vzduchu			
Označení materiálu a stavu	12 020.0	12 020.1	12 020.4 <sup>4)</sup>		Žhání na měkko	680 až 720	prodleva na teplotě cca 4 hodiny, potom ochlazovat v peci		
Stav	tepelně nezpracovaný	normalizačně žháný	kalený						
Průměr nebo tloušťka	mm	–	nad 25 <sup>5)</sup> do 100	16 <sup>6)</sup>	30 <sup>7)</sup>	Cementování	v plynu	900 až 930	ochlazovat na vzduchu, v ochlazovací jednotce
Nejnižší mez kluzu R <sub>e</sub> nebo mez R <sub>p</sub> 0,2	MPa	–	225	350	300		v prášku	860 až 900	ochlazovat v cementační krabici nebo na vzduchu
Pevnost v tahu R <sub>m</sub>	MPa	–	min. 390	550 až 900	500 až 750	v solné lázni	890 až 910	ochlazovat na vzduchu	
Nejnižší tažnost A <sub>5</sub>	%	–	26	12	14	Kalení		780 až 810	ochlazovat ve vodě (u jednoduchých součástí je možné přímé kalení z cementační teploty)
Nejnižší kontrakce Z	%	–	55	30	40		Popouštění	150 až 200	ochlazovat na vzduchu
Nejnižší vrubová houževnatost KCU 3	J · cm <sup>-2</sup>	–	–	60	90	Kalení zkušební vzorku		880 až 910	ochlazovat ve vodě
Tvrdość podle Brinella HB		max. 169	inf. min. 111	inf. 157–256	inf. 143–214	Charakteristika oceli a vhodnost použití	Ocel k cementování se střední pevností v jádře po kalení. Méně namáhané strojní součásti silničních motorových vozidel určené k cementování se střední pevností v jádře po kalení; např. méně namáhaná ozubená kola, vačkové hřídele, vložky, větší řetězová kola, pouzdra, vodítka apod. Záchytné zvony a trny pro naftový průmysl. Ve stavu žháném na háky jeřábů, výtahů apod. Součásti k cementování lisované z plechu. Ocel není vhodná ke galvanickému pokovování.		
Tvrdość cementované vrstvy po kalení (inf.)	podle Vickersse HV podle Rockwella HRC		725±65	60±3					
Svařitelnost podle ČSN 05 1310	zaručená <sup>8)</sup>								

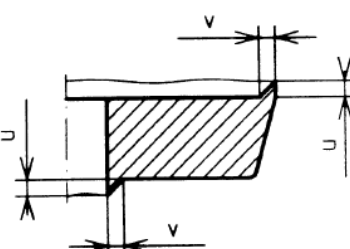


Podklady pro návrh výkovku – zaoblení, hrany, úchyly, úkosy [25; 26; 28].

a) Úchyly zaoblení, přechodu hran a jehel dle ČSN EN 10 243-1 a ČSN 42 9030. [26; 28]

Úchyly zaoblení přechodů a hran		
$r$ (mm)	+	-
$r \leq 10$	50 %	25 %
$10 < r \leq 32$	40 %	20 %
		

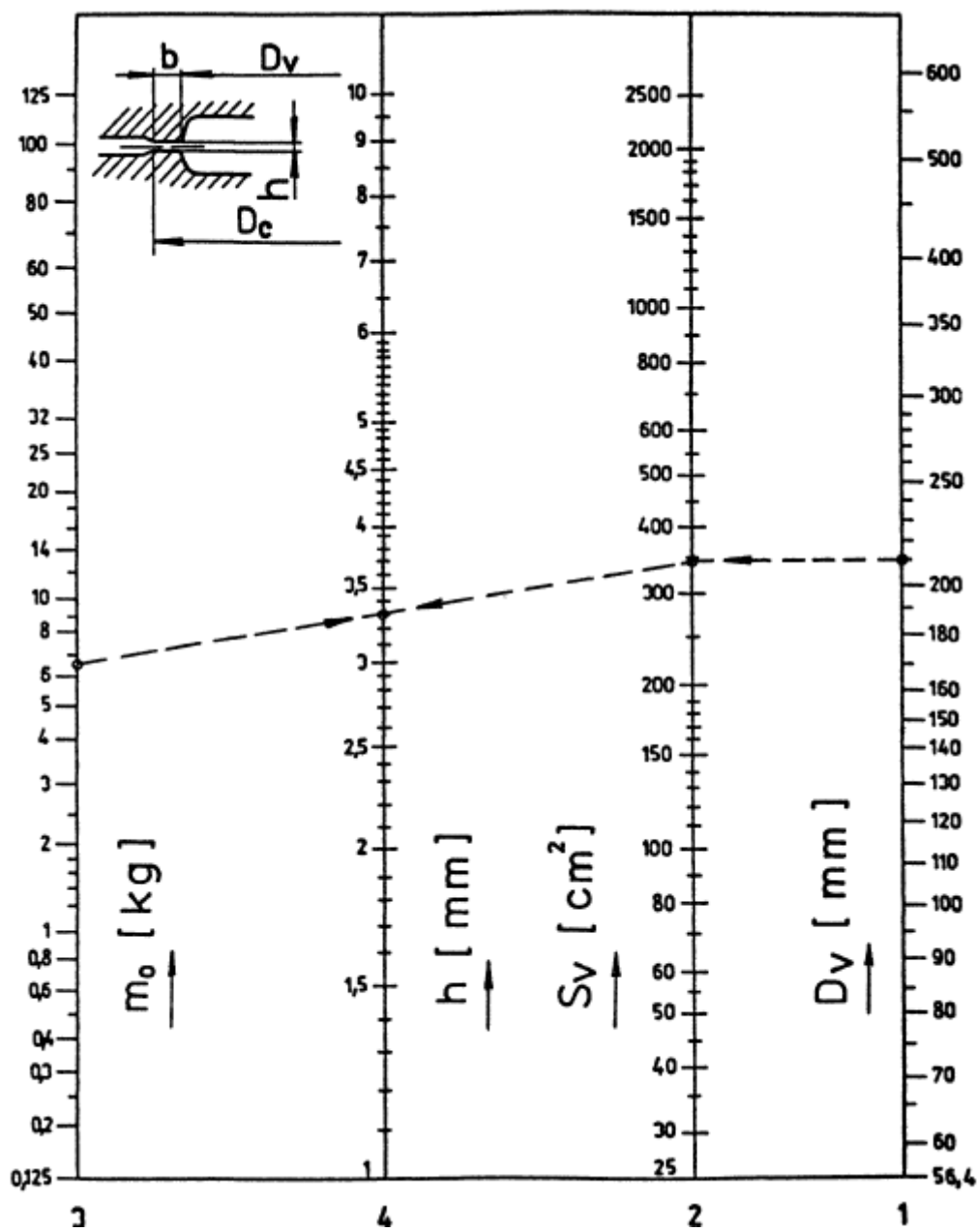
Úchyly jehel		
Hmotnost (kg) nad - do	$u$ mm	$v$ mm
$6 < m \leq 40$	2,5	1,2
		

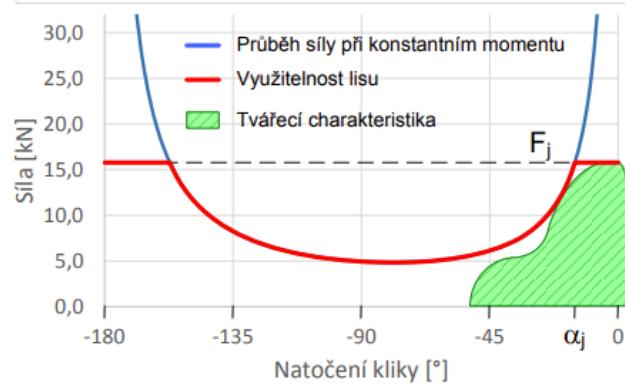
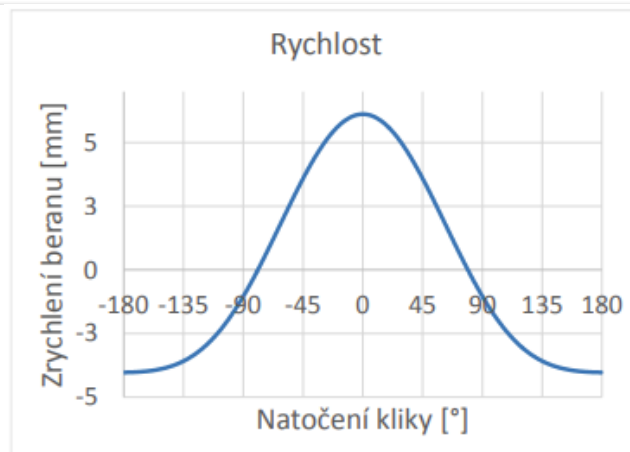
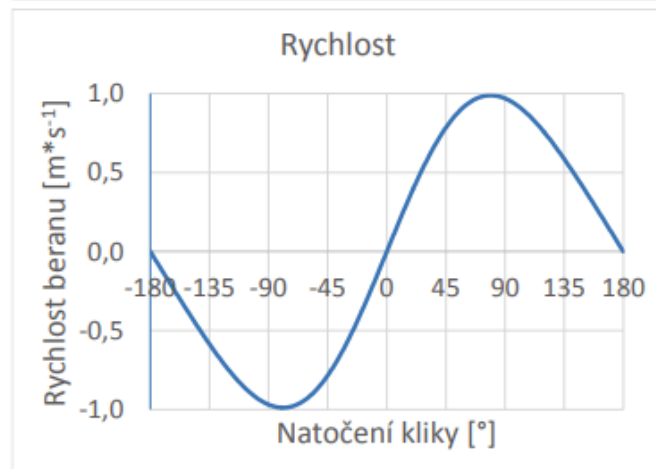
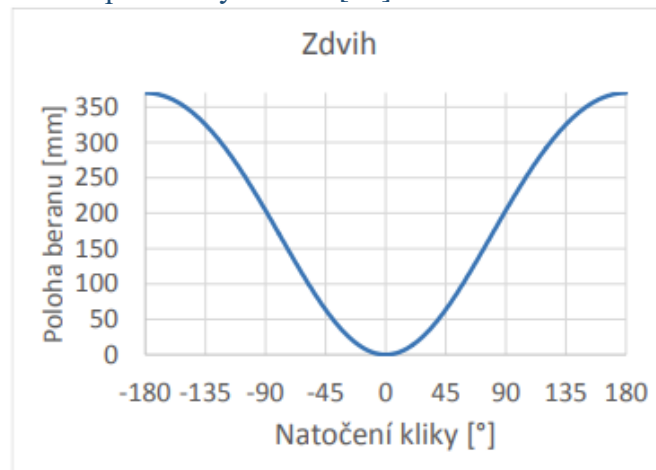
Výška (hloubka) $h$		Poloměry zaoblení hran a přechodů při poměru					
		$\frac{h}{f}$ do 2		$\frac{h}{f}$ přes 2 do 4		$\frac{h}{f}$ přes 4	
přes	do	$r$	$R$	$r$	$R$	$r$	$R$
	25	2	6	2	8	3	10
25	40	3	8	3	10	4	12
40	63	4	10	4	12	5	20
63	100	5	12	6	20	8	25
100	160	8	20	8	25	16	40
160	250	12	30	16	45	25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

b) Hodnoty úkosů výkovků dle ČSN 42 9030 [25].

	vnější	vnitřní
– lisý s vyhažovačem	2° až 3°	3° až 5°







Označení/rozdělení výkovku [14; 64].

Označení výkovku: **5920-3**

XXXX.X



### Tvarový druh

- 4 – výkovky kruhového průřezu plné
- 5 – výkovky kruhového průřezu duté
- 6 – výkovky hranolovitých průřezů plné i duté
- 7 – výkovky kombinovaných tvarů plné i duté
- 8 – výkovky s ohnutou osou
- 9 – výkovky složitých tvarů s přímou dělicí plochou
- 0 – výkovky s lomenou dělicí plochou

### Tvarová třída

Výkovky tvarového druhu 4 až 8:

- 1 – konstantní průřez
- 2 – kuželovité (jehlanovité, klínovité)
- 3 – jednostranně osazené
- 4 – oboustranně osazené
- 5 – osazené s kuzelem (jehlanem, klínem)
- 6 – prosazené
- 7 – kombinované
- 8 – kombinované s kuzelem
- 9 – členité (u tvarového druhu 8 – výkovky háků)
- 0 – neobsazeno

### Tvarová skupina

- 1 –  $H_v \leq D_v$  a  $H_v \leq 2b_v$
- 2 –  $H_v \leq D_v$  a  $H_v > 2b_v$
- 3 –  $H_v > D_v$
- 5 –  $D_v$  – koule

kde:  $H_v$  – největší výška výkovku ve směru rázu [mm],

$D_v$  – největší šířka výkovku ve směru kolmo k rázu [mm],

$b_v$  – nejmenší výška výkovku ve směru rázu, nejmenší tloušťka blány nebo dna výkovku [mm].

### Tvarová podskupina

- 1 – přesah v poměru L:B ( $D_v$ ) nebo H:B ( $D_v$ )
- 2 – přesah v poměru H:H1 ( $D_v:D_1$ )
- 3 – přesah v poměru B:B<sub>1</sub>
- 4 – přesah v poměru F:F<sub>1</sub>
- 5 – přesah v hloubce dutiny h:d nebo úhlu listů lopatek  $\beta$
- 6 – přesah v tloušťce dna nebo blány H<sub>1</sub>
- 7 – přesah v tloušťce stěny s nebo velikosti rozvidlení l:b
- 8 – přesah zaoblení přechodů a hran R, r
- 9 – kombinace několika přesahů
- 0 – bez přesahu

### Technologické hledisko

- 1 – výkovky s dělicí plochou ve směru hlavní osy souměrné
- 2 – výkovky s dělicí plochou ve směru hlavní osy nesouměrné
- 3 – výkovky s dělicí plochou kolmou na hlavní osu souměrné
- 4 – výkovky s dělicí plochou kolmou na hlavní osu nesouměrné
- 5 – výkovky s dělicí plochou kolmou na hlavní osu s ozubením
- 6 – výkovky zhotovené na vodorovných kovacích lisech souměrné
- 7 – výkovky zhotovené na vodorovných kovacích lisech nesouměrné
- 8 – výkovky zhotovené na vodorovných kovacích lisech s ozubením
- 9 – výkovky s více dělicími plochami
- 0 – neobsazeno







Určení další parametrů výkovku včetně tabulky se základními [26].

- a) Určení úchylek přímosti, rovinnosti a roztečí dle ČSN EN 10 243-1. [26]  
- pro výšku 68,4 mm a průměr 218 mm

Úchylky přímosti a rovinnosti				
Jmenovité rozměry				
Nad - do	0 100		200 250	
Úchylky				
Stupeň	F 0,6 E 0,4		1,0 0,6	
Rozsah úchylek roztečí				
Jmenovité rozměry				
Nad - do	0 100		200 250	
Úchylky				
Stupeň	F $0,6 \pm 0,3$ E $0,5 \pm 0,25$		$1,2 \pm 0,6$ $1,0 \pm 0,5$	

- b) Souhrnné hodnoty pro všechny stanovené přídavky, úchylky, tolerance a to včetně dalších doplňujících informací k návrhu výkovku.

ÚCHYLKY DLE ČSN EN 10243-1				
HMOTNOST VÝKOVKU	HMOTNOST OBALOVÉHO TĚLESA	UKAZATEL ČLENITOSTI TVARU	STUPEŇ OBTÍŽNOSTI KOVÁNÍ OCELI	STUPEŇ PŘESNOSTI
11,1 KG	20,04 KG	SKUPINA S2	SKUPINA M1	F
ROZMĚR	ÚCHYLKY	ROZMĚR	ÚCHYLKY	
DĚLKA	-	JEHLA	VÝŠKA	2,5
			ŠÍŘKA	1,2
ŠÍŘKA/PRŮMĚR	+2,4 -1,2	VÝRONEK	VÝŠKA	-
			ŠÍŘKA	-
VÝŠKA	+1,9 -0,9	ZVLÁŠTNÍ ÚCHYLKY		NE
TLOUŠŤKA/PRŮMĚR	+1,9 -0,9	ZAOBLENÍ PŘECHODŮ A HRAN PODLE TABULKY 6: $R < 10 = +0,5 \times R$ a $-0,25 \times R$ ; $10 < R < 32 = +0,4 \times R$ a $-0,2 \times R$		
PŘESAZENÍ	1,2			
OTŘEÚ, HLoubKA ÚKOSU	1,4	HLOUBKA POVRCHOVÝCH VAD PODLE 5.2.4.3		
ROVINNOST, PŘÍMOST	1,0	OBRÁBĚNÉ PLOCHY 1.3:		NEOBRÁBĚNÉ PLOCHY -
1.) PRO VNÍTRNÍ ROZMĚRY SE VYMĚNÍ NAVZÁJEM ČÍSELNÉ HODNOTY ÚCHYLEK + A -				
2.) PŘÍDAVNĚ K OSTATNÍM ROZMĚRŮM				

Koeficient pro ohřev materiálu a materiálová průvodka zakázky.

a) Určení koeficientu  $k$  pro ohřev materiálu [27; 31].

$V_{\text{opalu}} = (0,025 \text{ až } 0,030) V_{\text{výkovku}}$  pro plynový ohřev

$V_{\text{opalu}} = (0,010 \text{ až } 0,015) V_{\text{výkovku}}$  pro el. odporový ohřev

$V_{\text{opalu}} = (0,005 \text{ až } 0,010) V_{\text{výkovku}}$  pro el. indukční ohřev

- $k = 0,01$  pro elektrický indukční ohřev

b) Materiálová průvodka zakázky.

Průvodka materiálu	
Odběratel:	Zetor Kovárna
Objednávka č.:	ZK 11/234
Číslo dílce:	TS-0714
Průměr polotovaru [mm]:	100
Délka jednoho kusu [mm]:	201
Váha kusu [kg]:	13,392
Tavba č.:	231 345
Počet kusů [ks]:	115
Datum:	20.1.2024
Kontroloval/podpis:	XY

## Příloha 11

## Zařízení pro ohřev materiálu a jeho manipulaci [53].

## a) Středofrekvenční indukční ohřivač KSO 1 200/1,2-C40.

## Základní technické parametry KSO 1200/1,2-C40

Ohříváný materiál	magnetická ocel	
Rozměry přířezů	Ø D [mm]	55 - 120
	délka l [mm]	1,4D - 400
Maximální ohřáté množství [kg/h]	2750	
Výstupní teplota ohříváných přířezů [°C]	max. 1250	
<i>Jmenovité vstupní hodnoty (silové obvody)</i>		
Příkon [kVA]	1450	
Vstupní napětí z oddělovacího transformátoru [V]	3 x 625	
Frekvence [Hz]	50	
<i>Jmenovité vstupní hodnoty (pomocné obvody)</i>		
Příkon [kVA]	25	
Vstupní napětí [V]	3 x 400	
Frekvence [Hz]	50	
<i>Jmenovité výstupní hodnoty silových obvodů</i>		
Výkon [kW]	1200	
Frekvence [kHz]	0,4 - 1,2	
Výstupní napětí [V]	900	

## b) Kruhový vibrační zásobník VZ 2 400.

Typ		VZ 1300	VZ 1800	VZ 2400
Vnější průměr	[mm]	1320	1800	2400
Průměr přířezů	[mm]	15 - 80	20 - 120	40 - 160
Max. délka přířezů	[mm]	400	550	650
Min. poměr délky a průměru		1,3	1,3	1,3
Max. podávací rychlost	[mm/s]	80	80	80
Příkon	[kW]	3	4,4	8,6
Jmenovité otáčky	[ot/min]	1000	1000	1000
Max. doporučená hmotnost zásoby	[kg]	600	1000	1800
Hmotnost prázdného zásobníku	[kg]	1700	3700	6800

## c) Výklopník palet VPN 2 000.

Použití	vysypávání přířezů z přepravní palety do <b>vibračního zásobníku</b>
Nosnost	2000 kg
Výkon	4 kW
Zakládací výška	310 mm
Výška výstupu	1720 mm
Zakládání	vysokozdvíhým vozíkem, ručním paletovým vozíkem
Mechanismus	otočný
Úhel otočení	142°
Pohon	hydraulický
Rozměry palety (š x h x v)	1600 x 650 x 500 mm

## d) Pyrometr UPF IV.

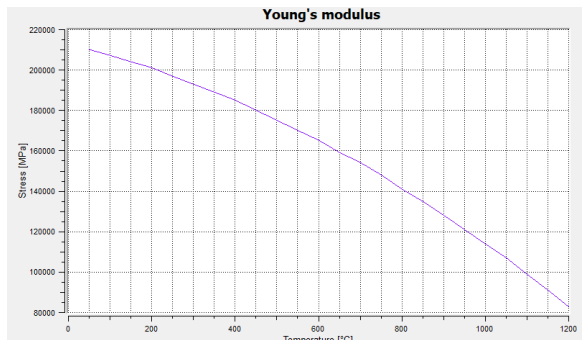
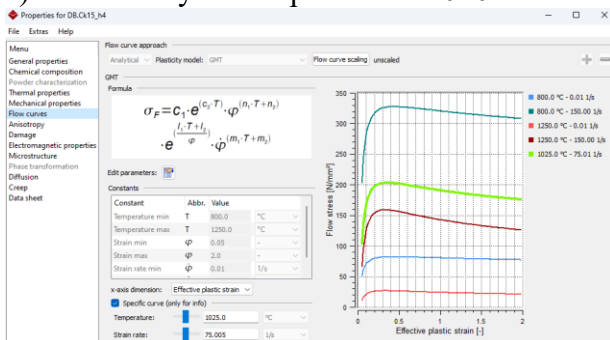
## Technické parametry pyrometru UPF IV

UPF IV		1000	1200	1300	1400
Jmenovitá teplota pro	ε = 1 [°C]	1000	1200	1300	1400
Rozsah měření	ε = 1 [°C]	700 - 1000	800 - 1200	800 - 1300	900 - 1400
Jmenovitá zaměřovací vzdálenost	L [m]	0,5 nebo 1,0			
Průměr zaměřovacího bodu D	L=0,5m [mm]	7	4,7	3,6	3,6
	L=1,0m [mm]	17	11,2	8,5	8,5
Rozsah zaměřovací vzdálenosti	[%]	± 50	± 30	± 25	± 25
Výstupní napětí U <sub>N</sub>	[V]	0 - 10			
Minimální zatěžovací odpor R	[Ω]	500			
Tabulka výstupních napětí	č.v.	4-909/005			
Reprodukovatelná přesnost měření	[%]	1			
Spektrální citlivost	[μm]	0,8 - 1,1			
Rychlost reakce na skokovou změnu teploty	[ms]	100			
Provozní teplota	-reálná [°C]	45			
	-max. [°C]	55			
Napájecí napětí U <sub>N</sub>	[VDC]	22 - 27			
Odběr naprázdno při U <sub>N</sub> =24VDC	[mA]	< 16			
Hmotnost	L=0,5m [kg]	0,45			
	L=1,0m [kg]	0,4			
Rozměry Ø x 1	L=0,5m [mm]	Ø40 x 321			
	L=1,0m [mm]	Ø40 x 284			

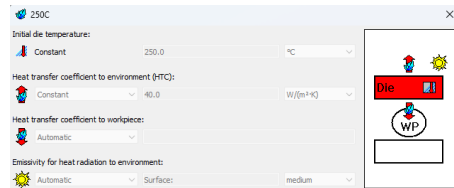
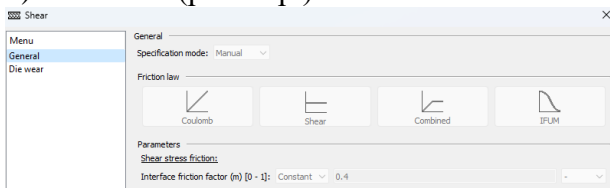


Informace z nastavení simulačního prostředí – Simufact Forming 16.0.

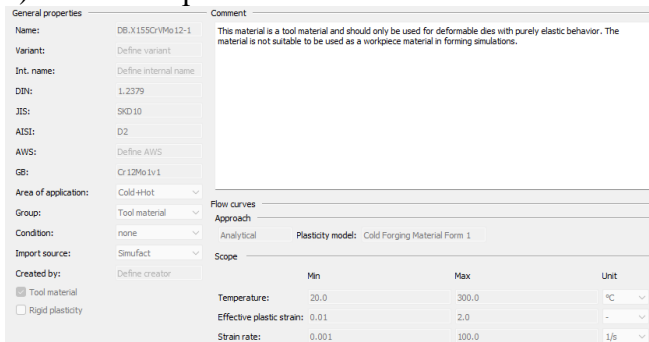
a) Materiálový model pro ocel 12 020



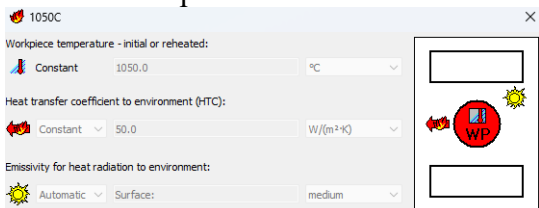
b) Předehřev (pro 3.op.) a tření



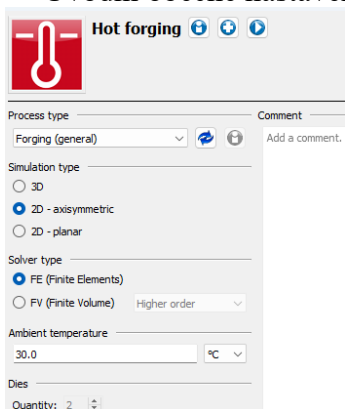
c) Materiál zápustek



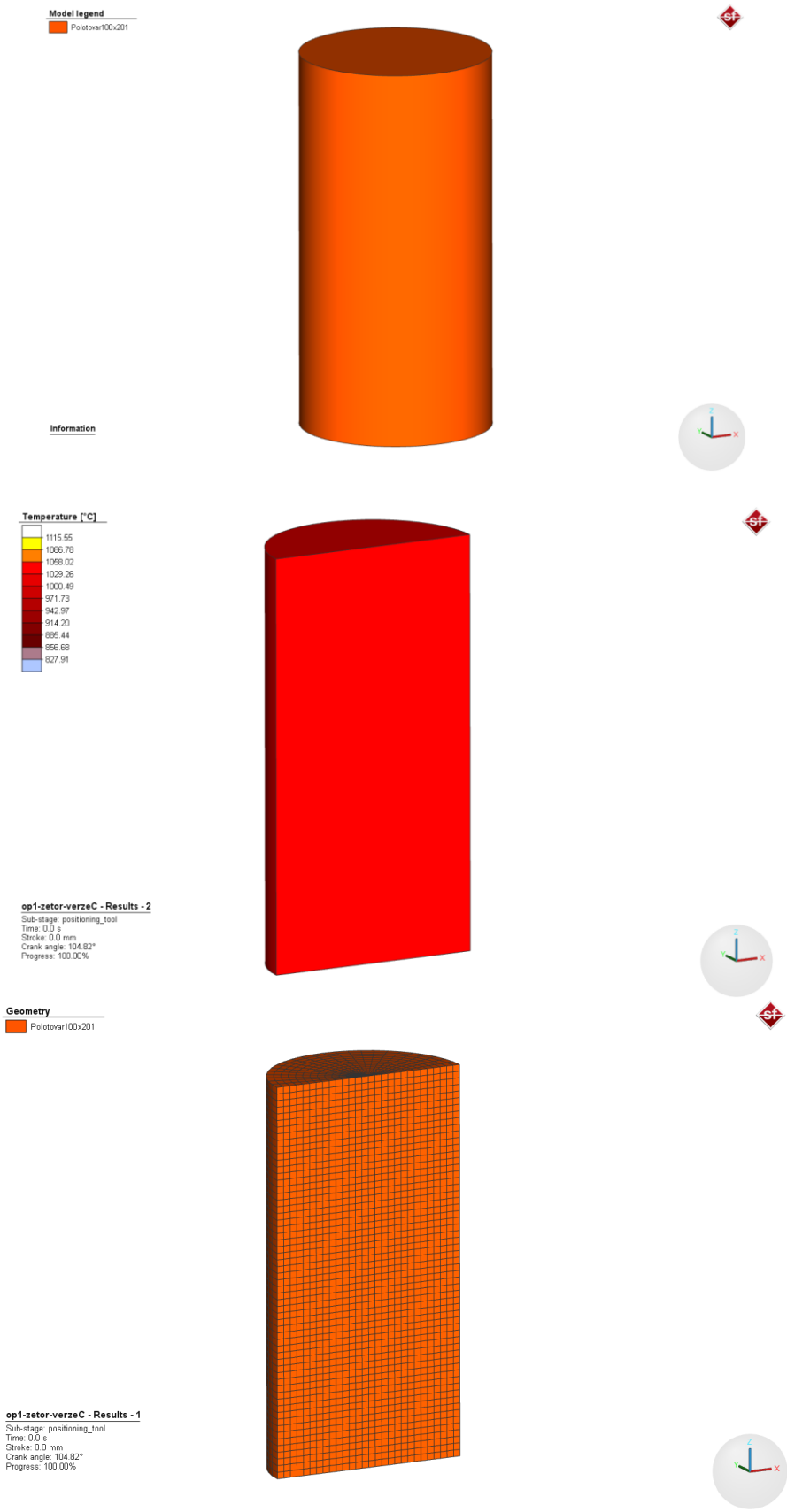
Předehřev polotovaru



Úvodní obecné nastavení

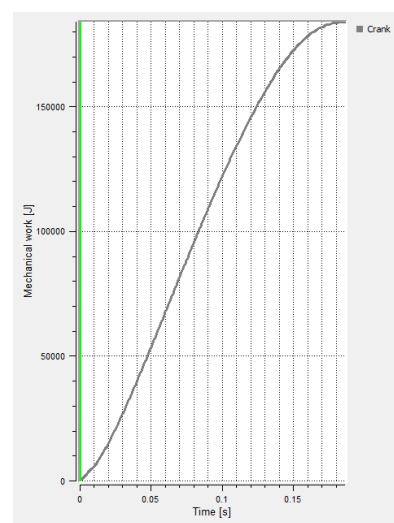
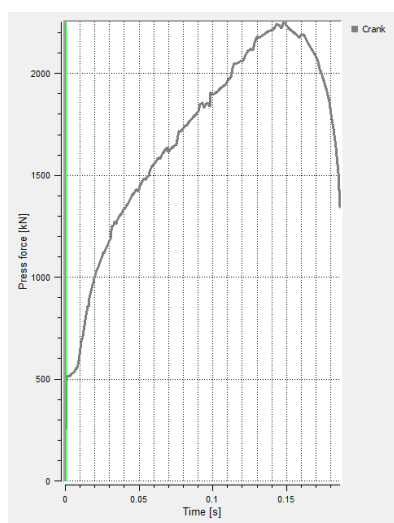
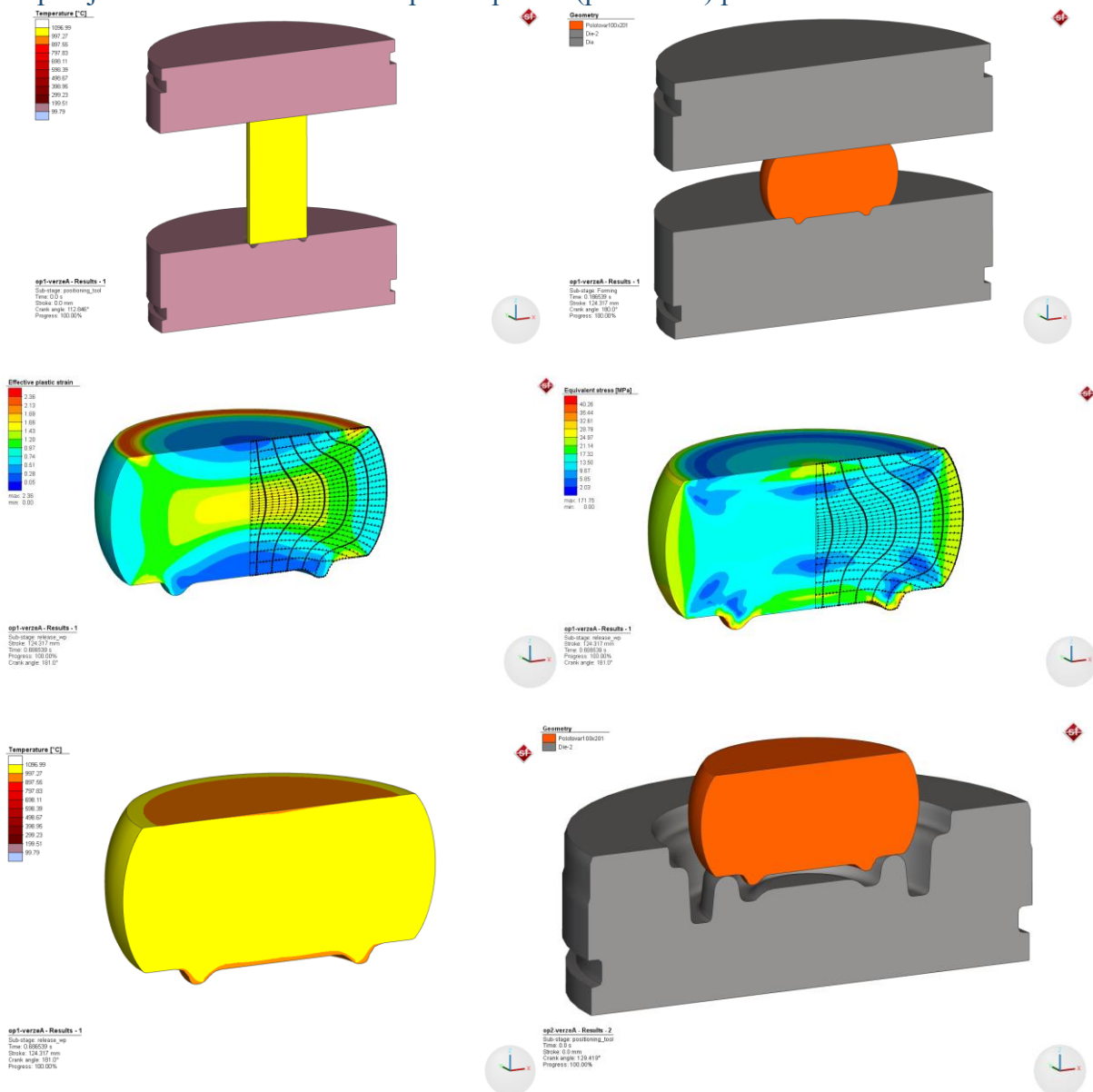


Příloha 13  
Doplňující informace pro použitý polotovar.  
Studený špalík Ø100-201 mm; Ohřátý polotovar – Ø101,3-203,6 mm



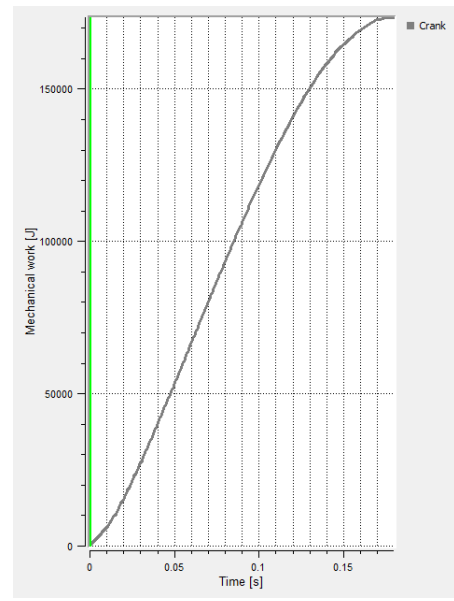
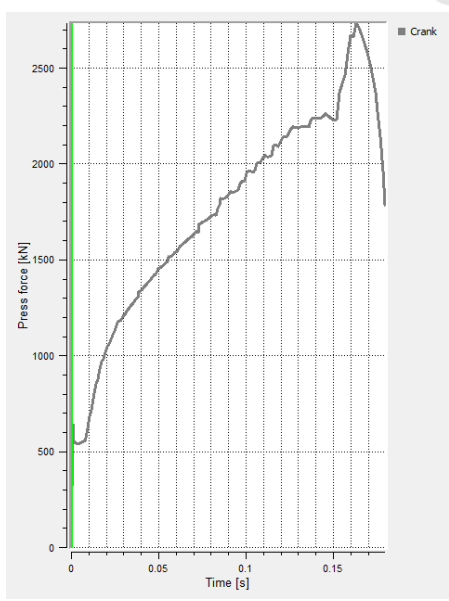
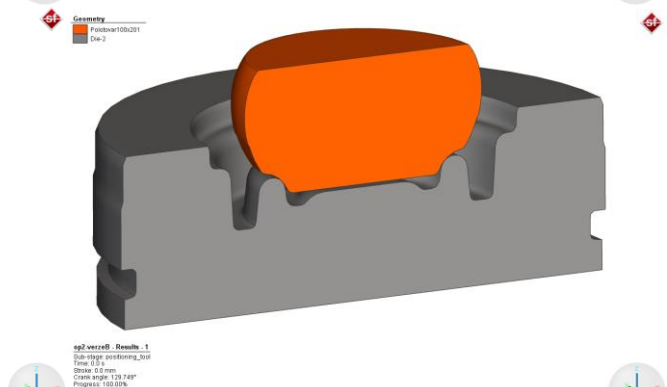
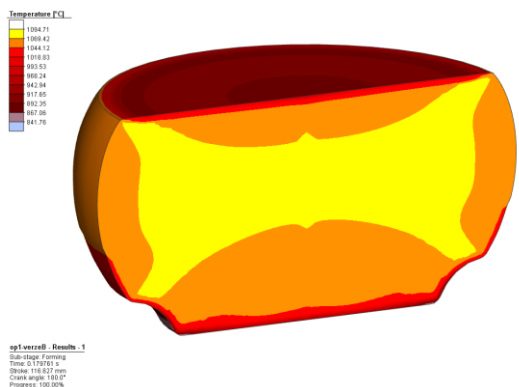
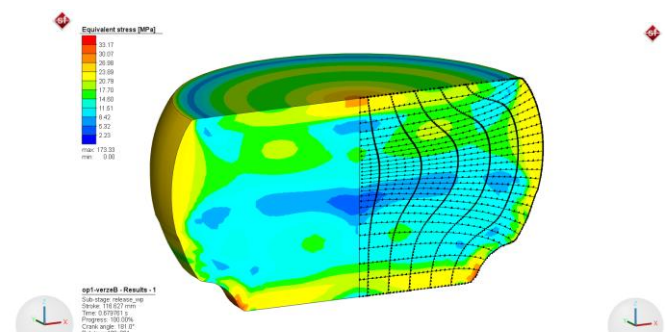
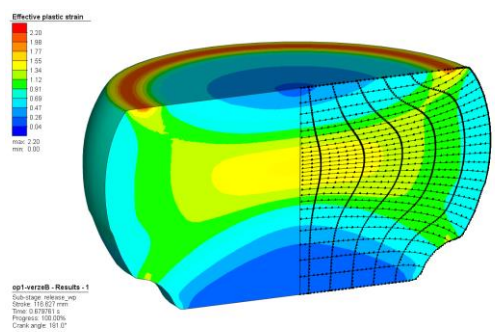
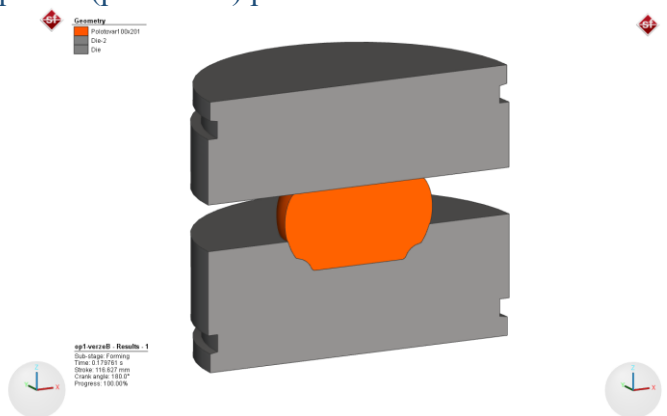
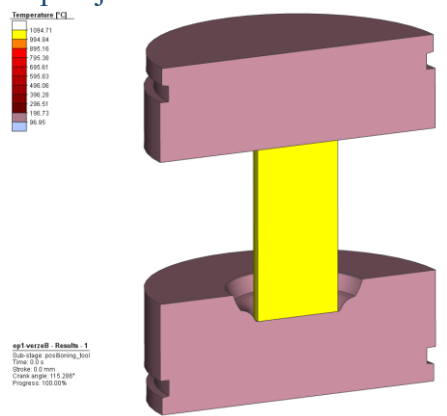
# Příloha 14

## Doplňující informace k simulacím první operace (pěchování) pro variantu A.



# Příloha 15

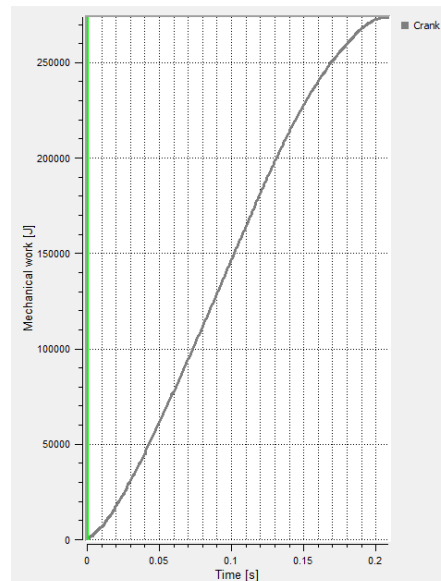
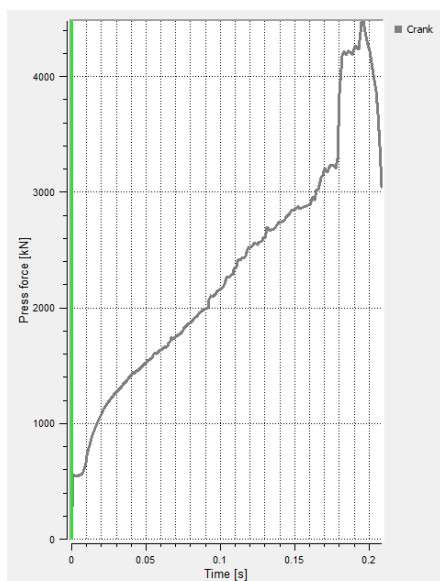
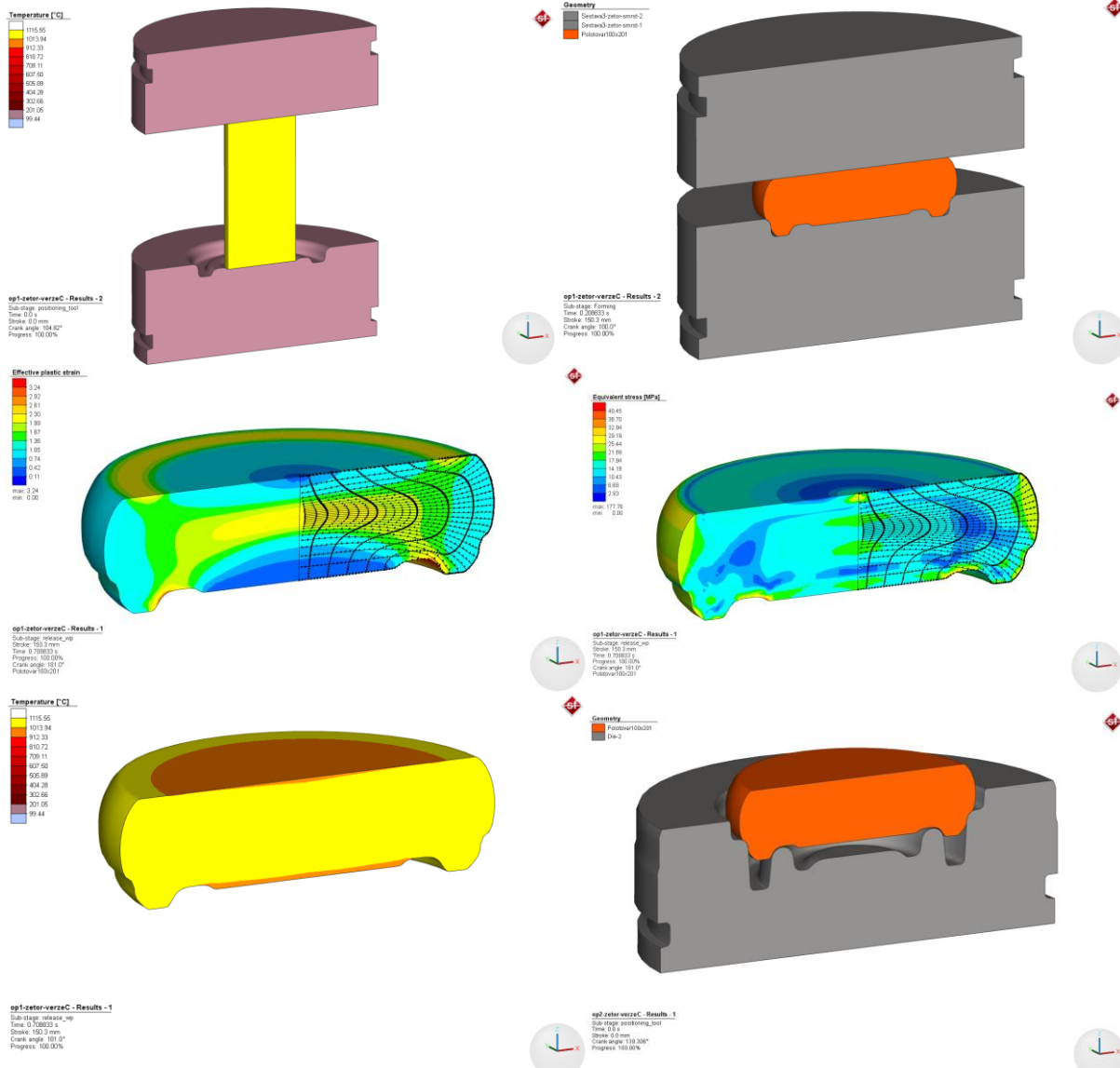
## Doplňující informace k simulacím první operace (pěchování) pro variantu B.





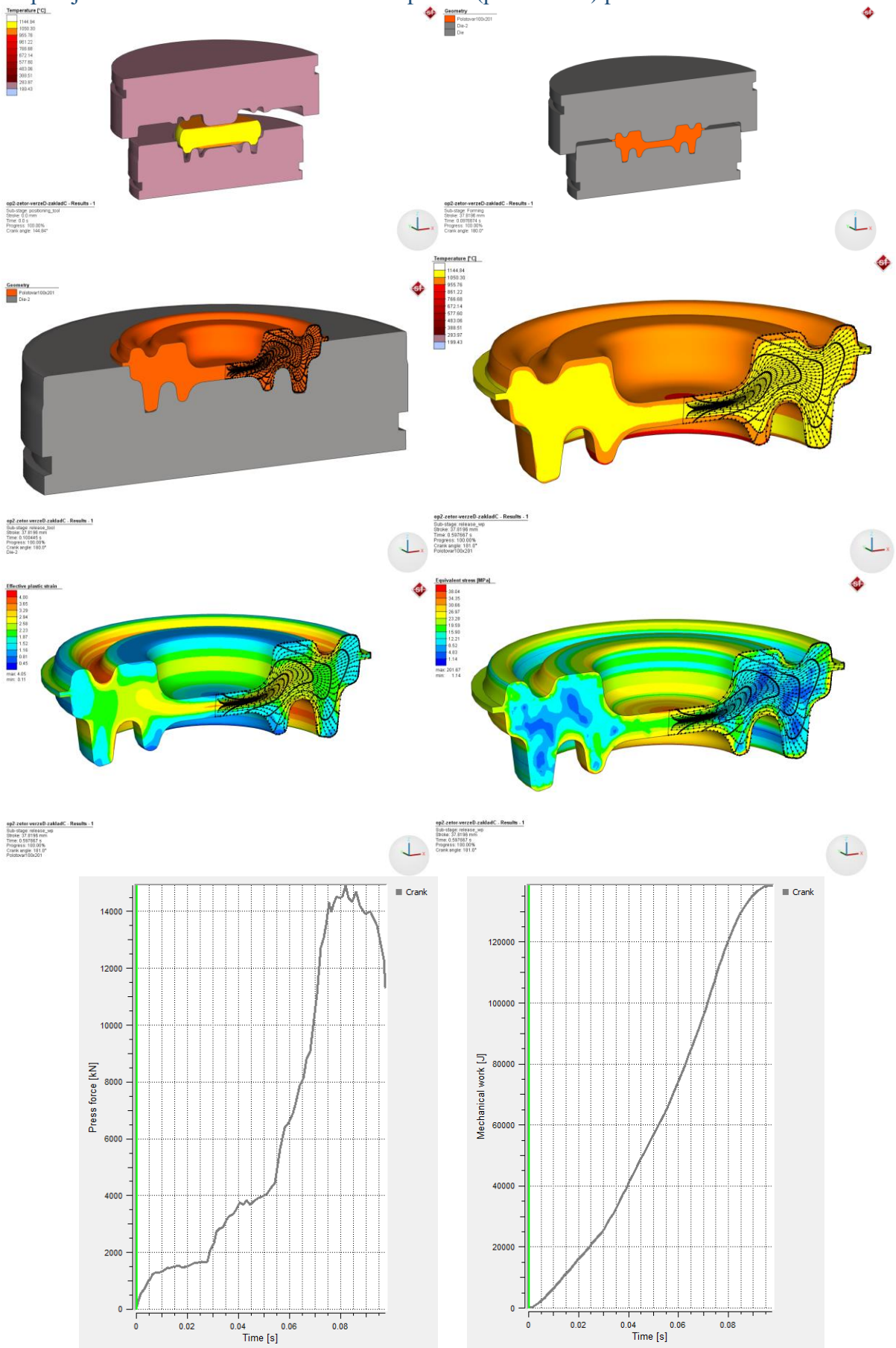
# Příloha 16

## Doplňující informace k simulacím první operace (pěchování) pro variantu C.



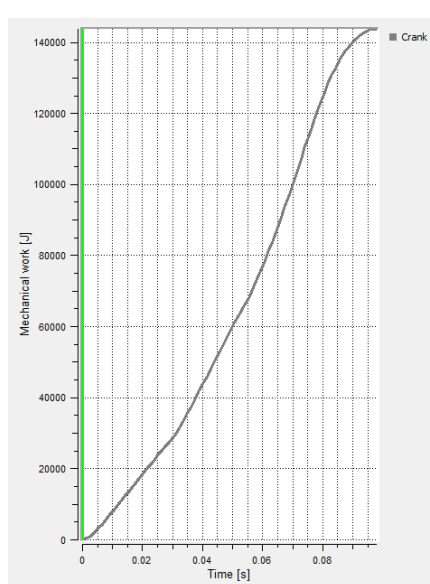
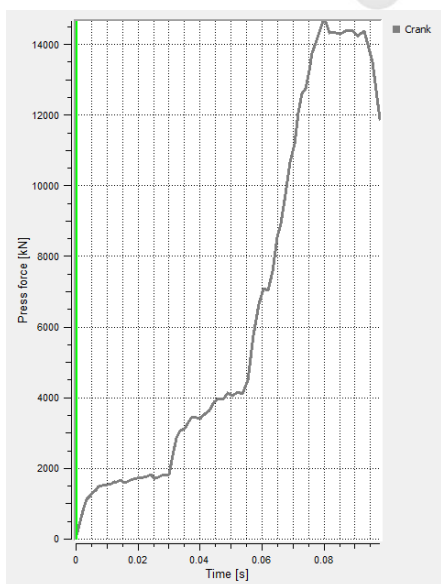
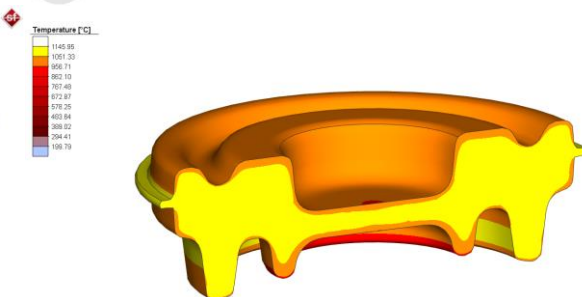
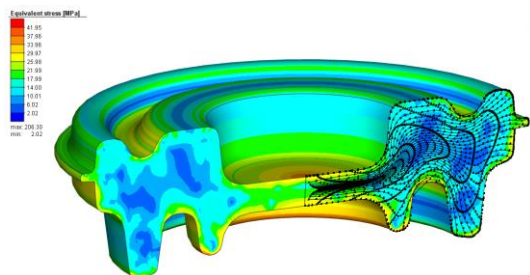
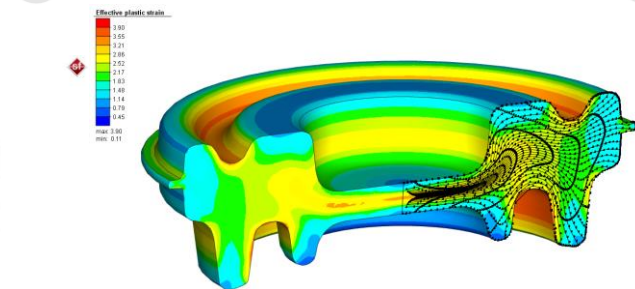
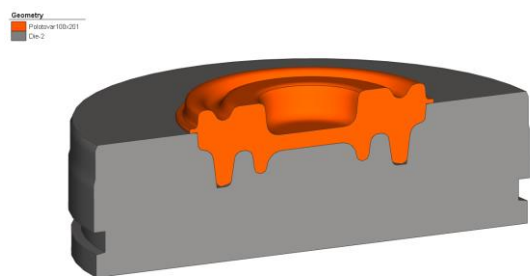
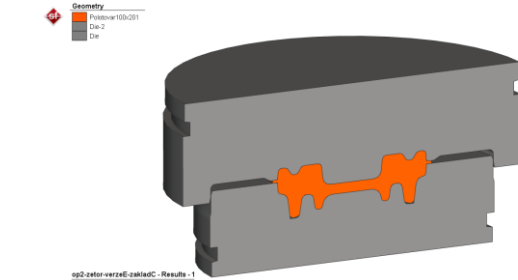
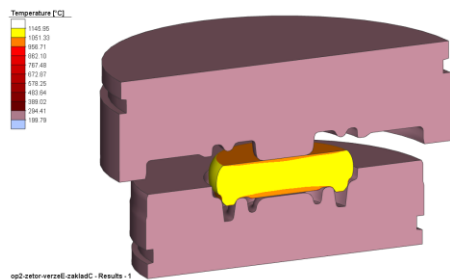
# Příloha 17

## Doplňující informace k simulacím druhá operace (předkování) pro variantu D.

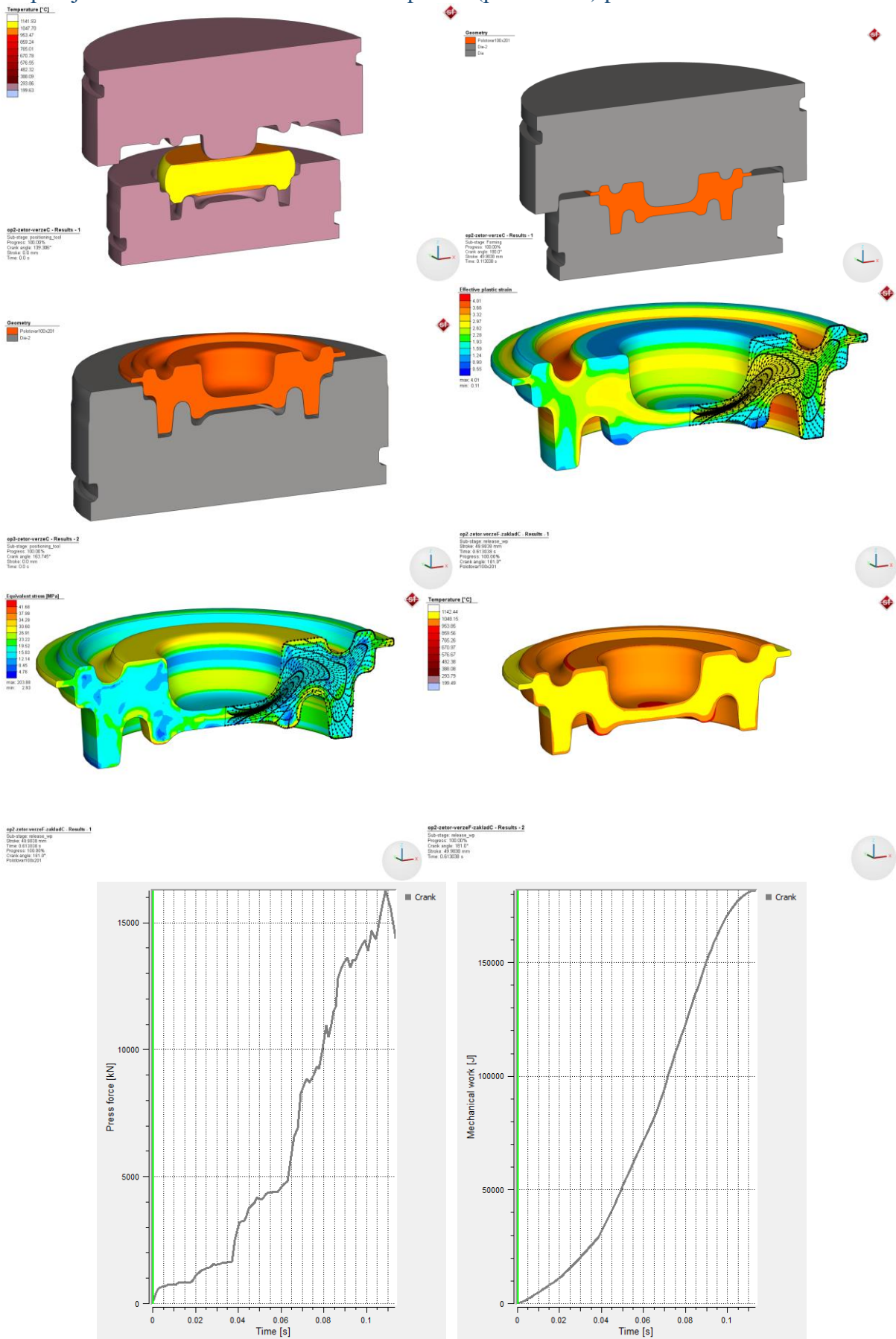


# Příloha 18

## Doplňující informace k simulacím druhá operace (předkování) pro variantu E.

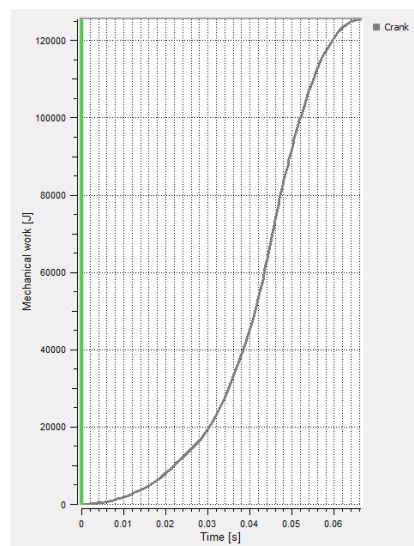
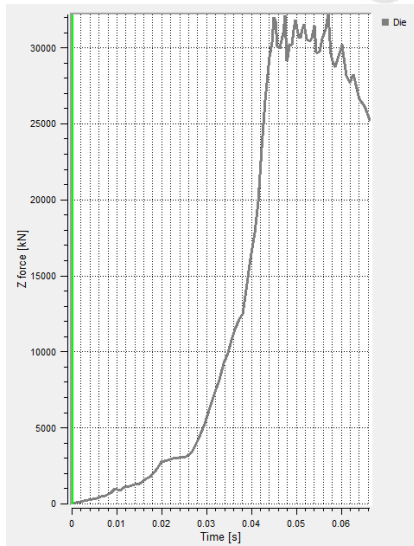
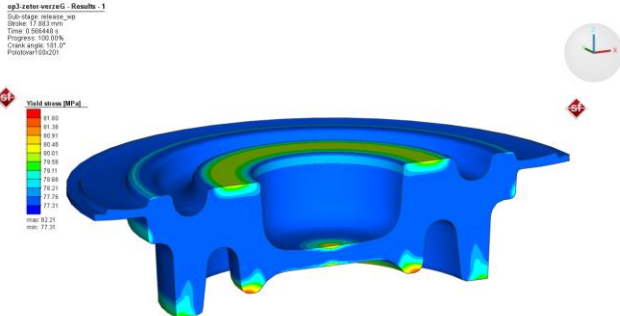
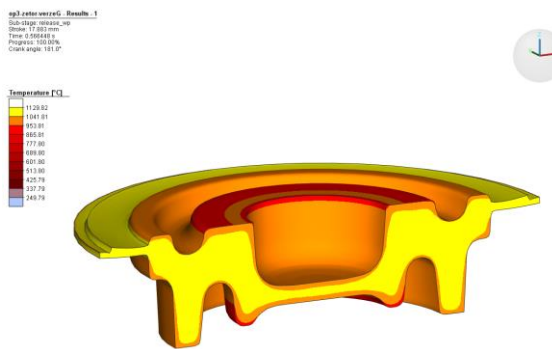
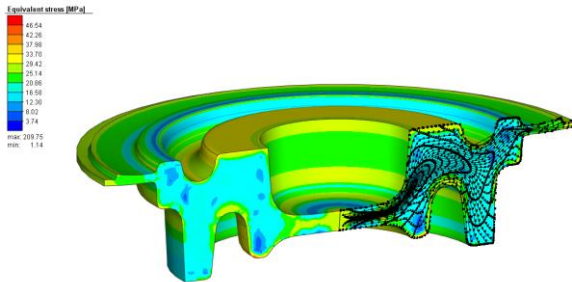
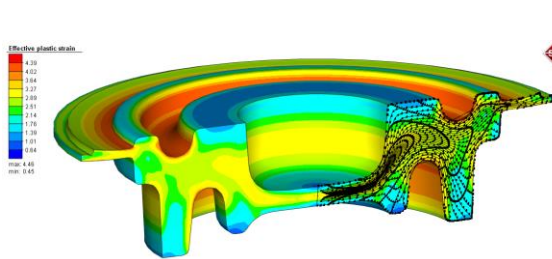
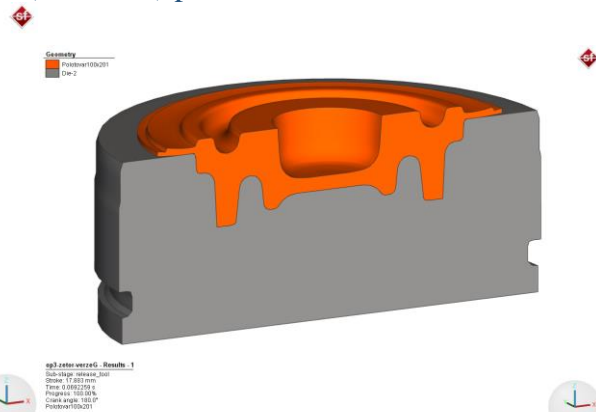
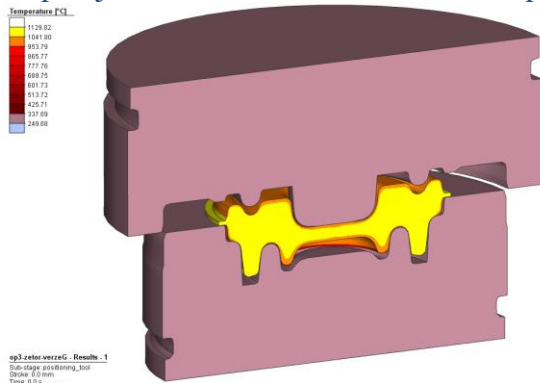


Doplňující informace k simulacím druhá operace (předkování) pro variantu F.



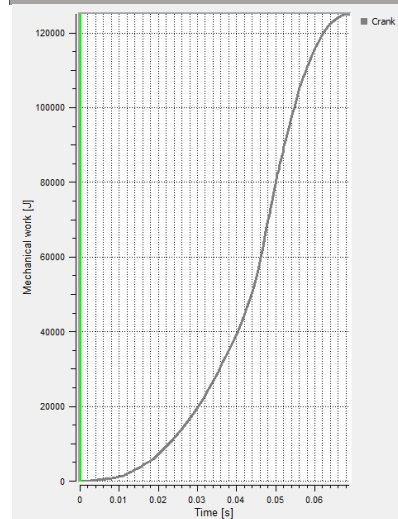
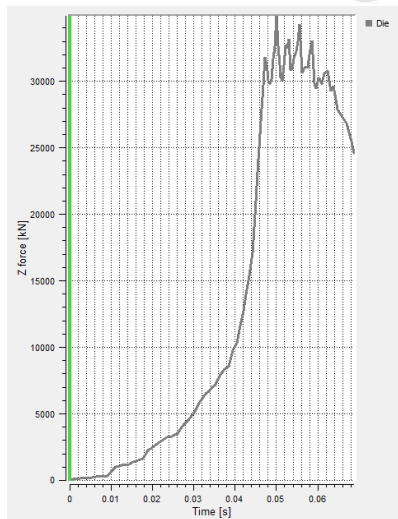
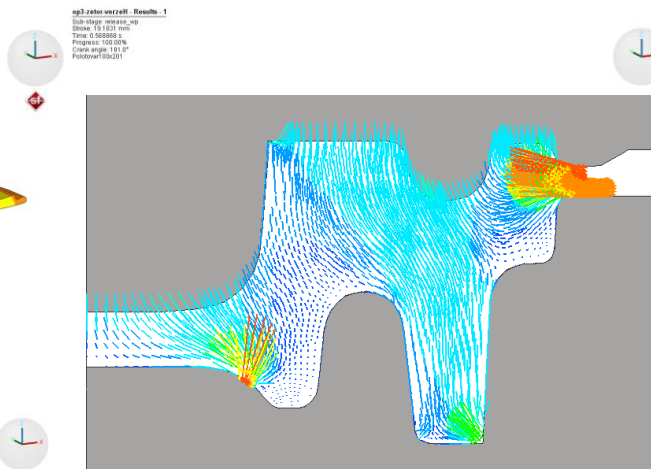
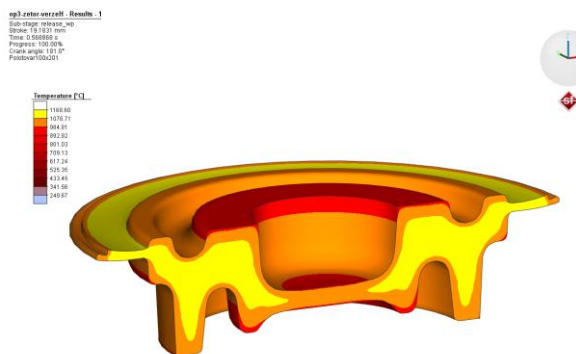
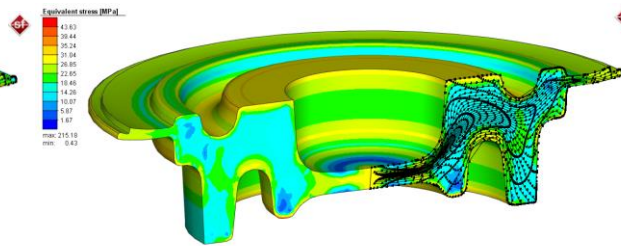
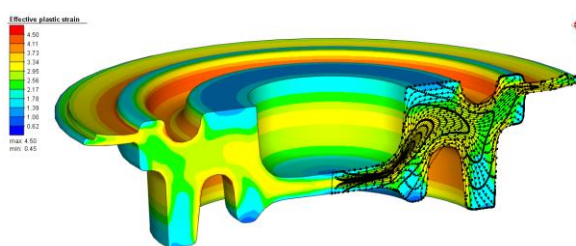
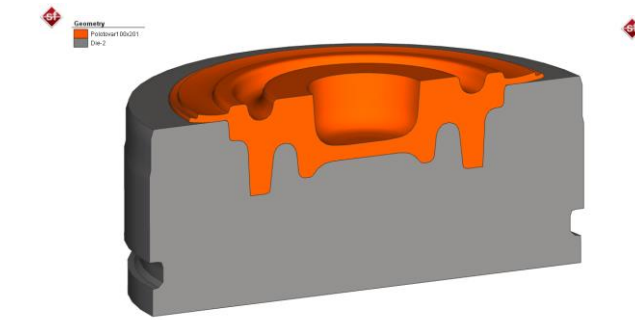
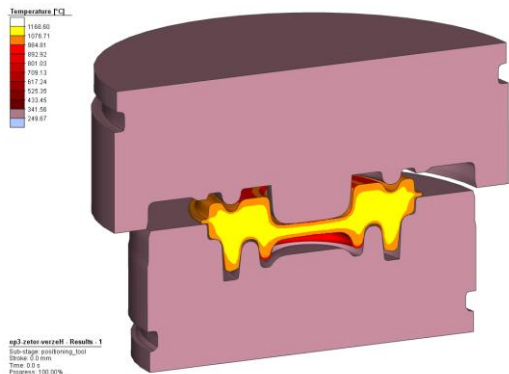


Doplňující informace k simulacím třetí operace (dokování) pro variantu G.



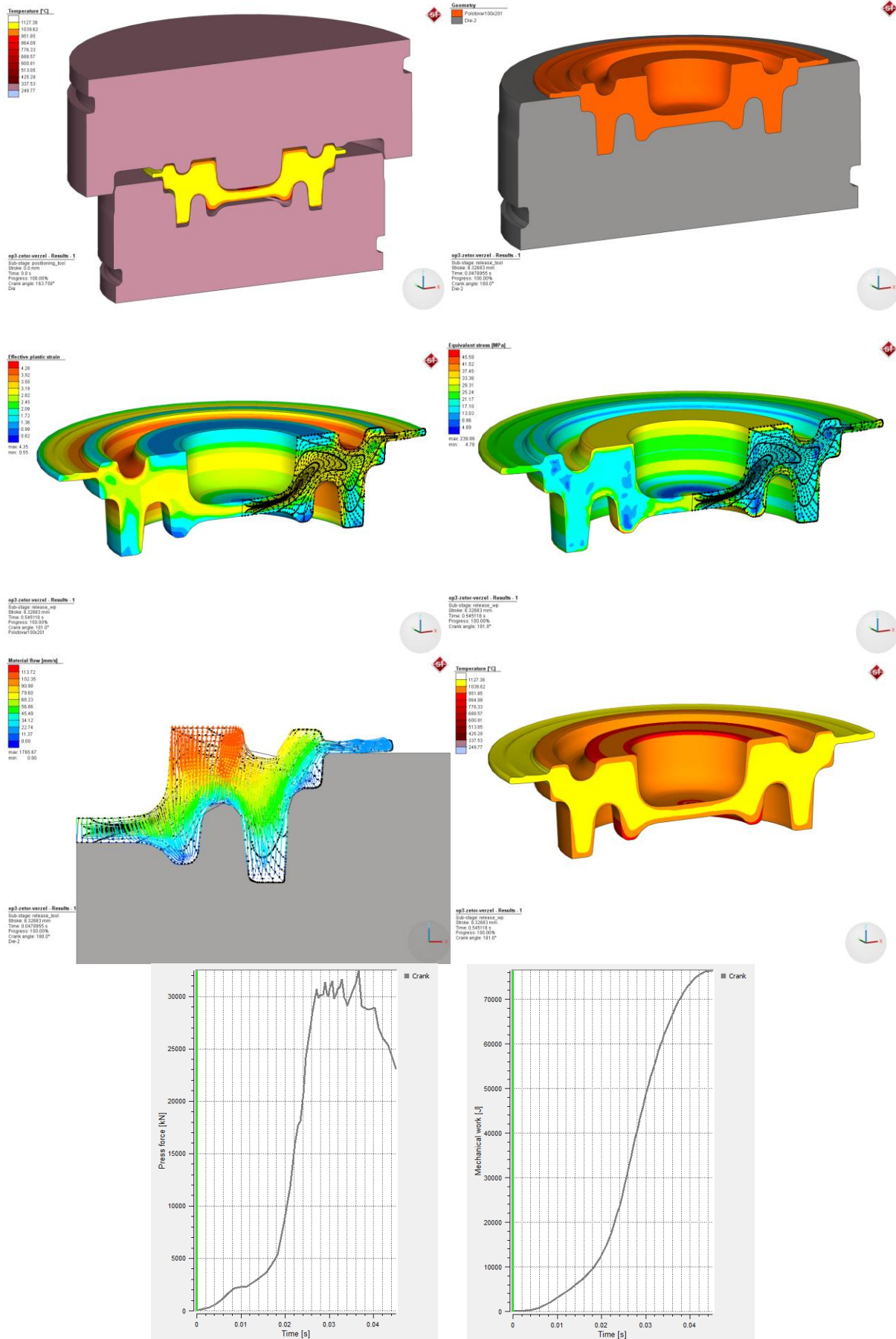
# Príloha 21

## Doplňujúce informácie k simuláciám tretí operácie (dokovaniu) pre variantu H.



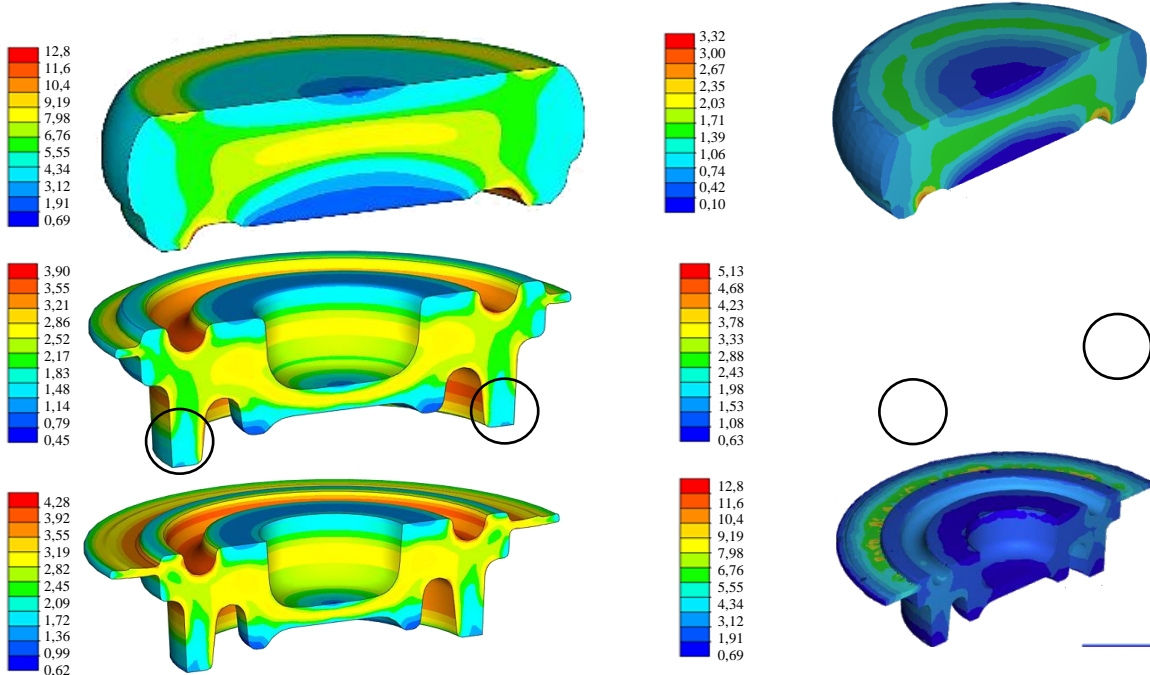
# Příloha 22

## Doplňující informace k simulacím třetí operace (dokování) pro variantu I.





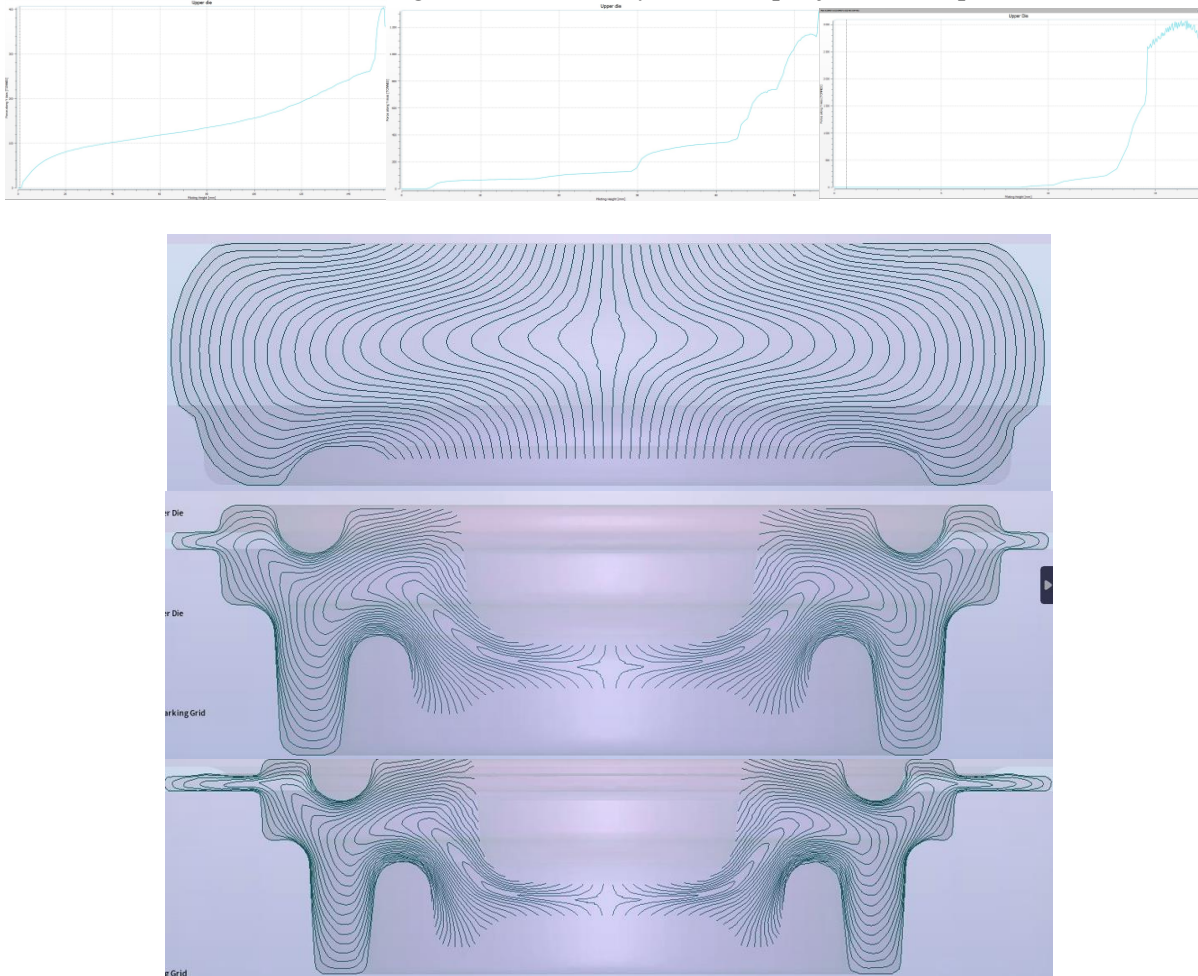
Doplňující informace k simulacím – porovnání vybraných výsledků z použitých simulačních softwarů Forge a Simufact Forming 16.0. pro jednotlivé operace.



a) Simufact Forming 16.0. operace 1.,2. a 3.

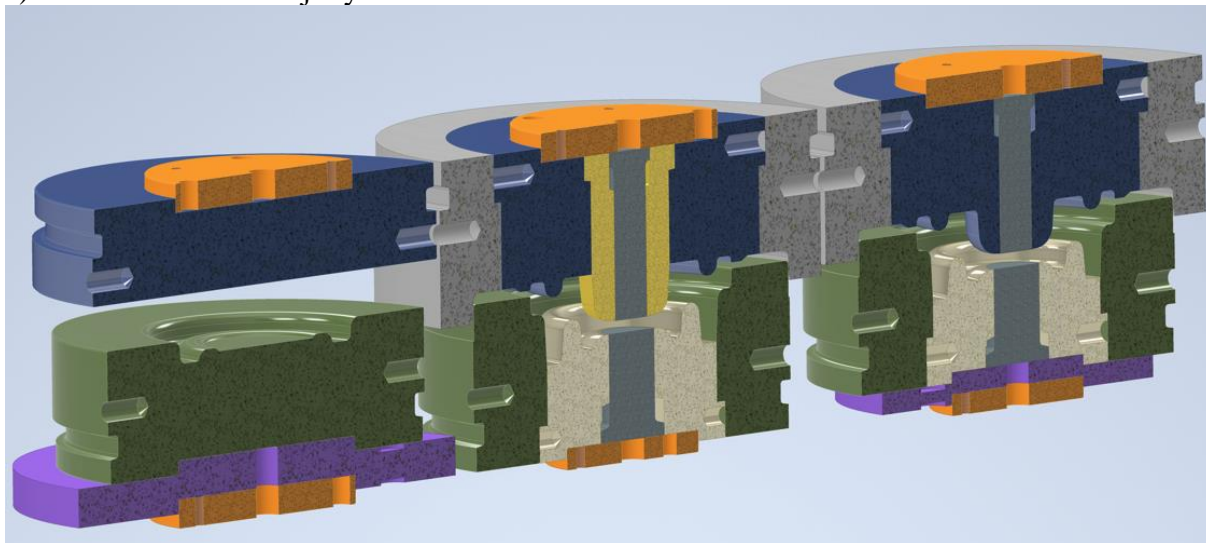
b) Forge 16.0. operace 1.,2. a 3.

Grafy kovacíh sil z programu Forge a tok materiálových vláken pro jednotlivé operace

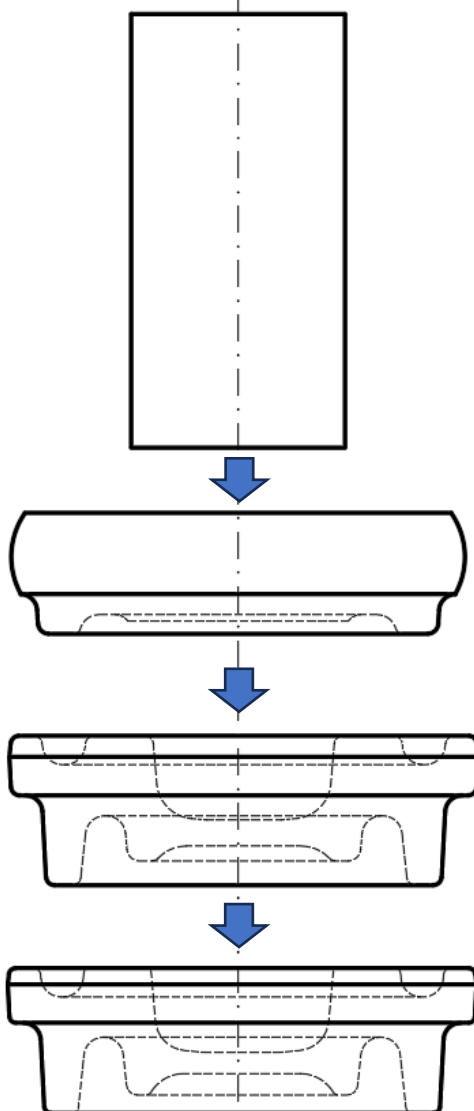




a) Ukázka všech nástrojových sestava – 3D model.



b) Obrazový technologický postup kovací operací



Výpočetní a výsledkové dodatky pro výpočet kovací síly dle Tomlenova.

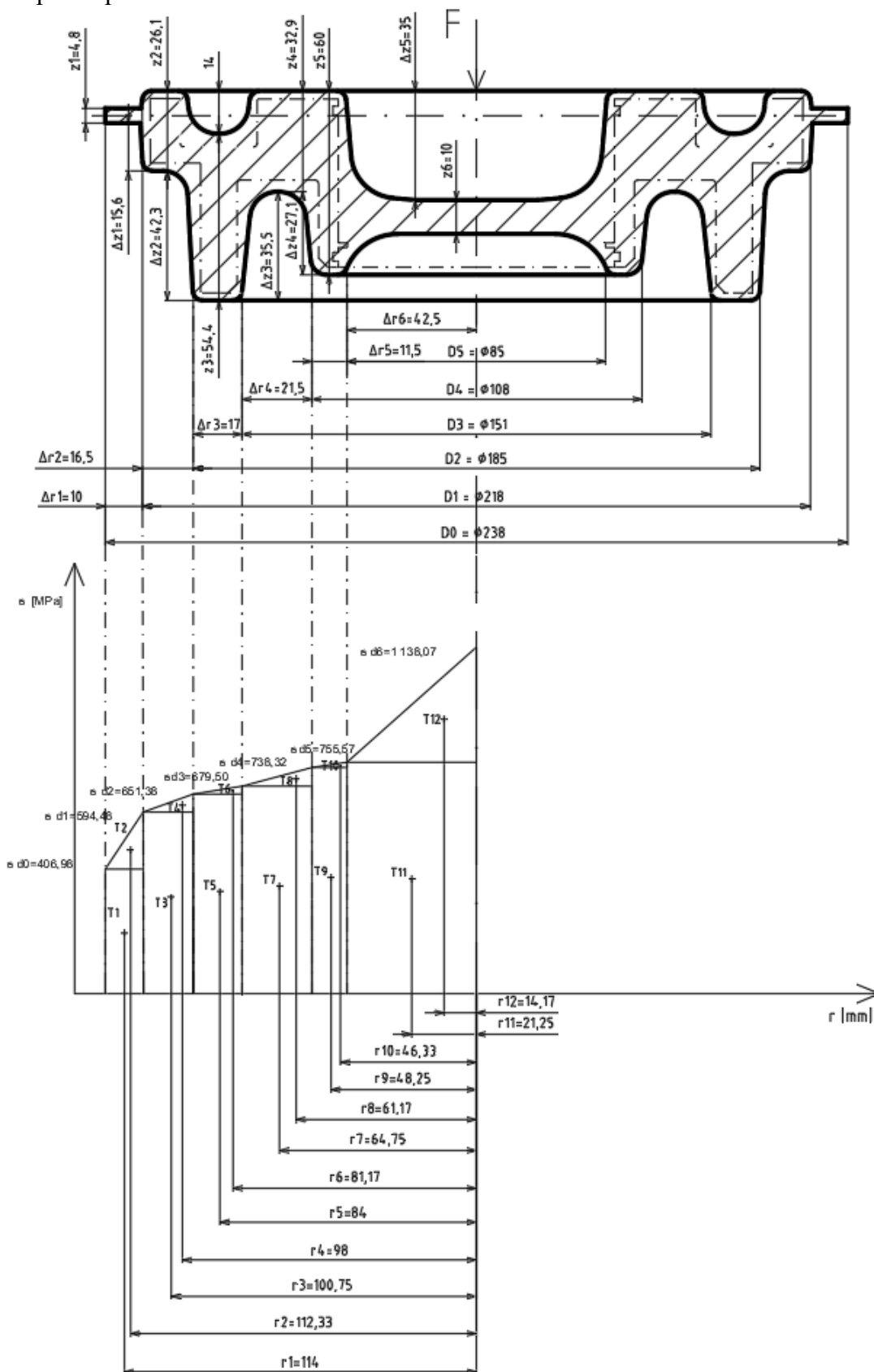
Souhrn výsledků dílčích výpočtů.

	$S_{ji}$ [mm <sup>2</sup> ]	$r_{ji}$ [mm]	$S_{ji} \cdot r_{ji}$ [mm <sup>3</sup> ]
1	4 069,80	114,00	463 957,20
2	937,50	112,33	105 312,50
3	9 808,92	100,75	988 248,69
4	469,40	98,00	46 000,86
5	11 073,40	84,00	930 165,72
6	239,06	81,17	19 403,91
7	14 609,28	64,75	945 951,10
8	632,26	61,17	38 673,04
9	8 490,64	48,25	409 673,17
10	99,19	46,33	4 595,69
11	32 111,56	21,25	682 370,67
12	8 128,13	14,17	115 148,44
$\Sigma$			4 749 500,98

Potřebné parametry pro výpočet tečné kovací síly.

	$z$ [mm]	$\Delta z$ [mm]	$\Delta r$ [mm]	$D_{ji}$ [mm]	$D_{ji} \cdot \Delta z$ [mm <sup>2</sup> ]
1	4,8	15,6	10	238	3 712,8
2	26,1	42,3	16,5	218	9 221,4
3	54,4	35,5	17	185	6 567,5
4	32,9	27,1	21,5	151	4 092,1
5	60	35	11,5	108	3 780
6	10	-	42,5	85	-
$\Sigma$					27 373,8

Vzhledem k tomu, že se jedná o symetrický průběh napětí, tak se pro jednoduchost v příloze uvádí pouze polovina hledaného řešení.



## Technické specifikace pro strojní zařízení.

## a) Technické specifikace lisu LZK 4 000. [Zetor]

Tvářecí síla [MN]	40	Přestavení beranu [mm]	20
Sevření [mm]	1 000	Zdvih/Počet zdvihů [mm]	380/60
Průchod [mm]	1 580	Instalovaný výkon [mm]	200
Upínací plocha stolu [mm]	1 520 x 1 600	Rozměry stroje [m]	4,6 x 4,7 x 7,6
Upínací plocha beranu[mm]	1 470 x 1500	Přestavitelnost beranu	hydraulické

b) Technické specifikace lisu LU 400. [<http://www.kstroje.cz/cz/25/stroj/lis-klikovy/>]

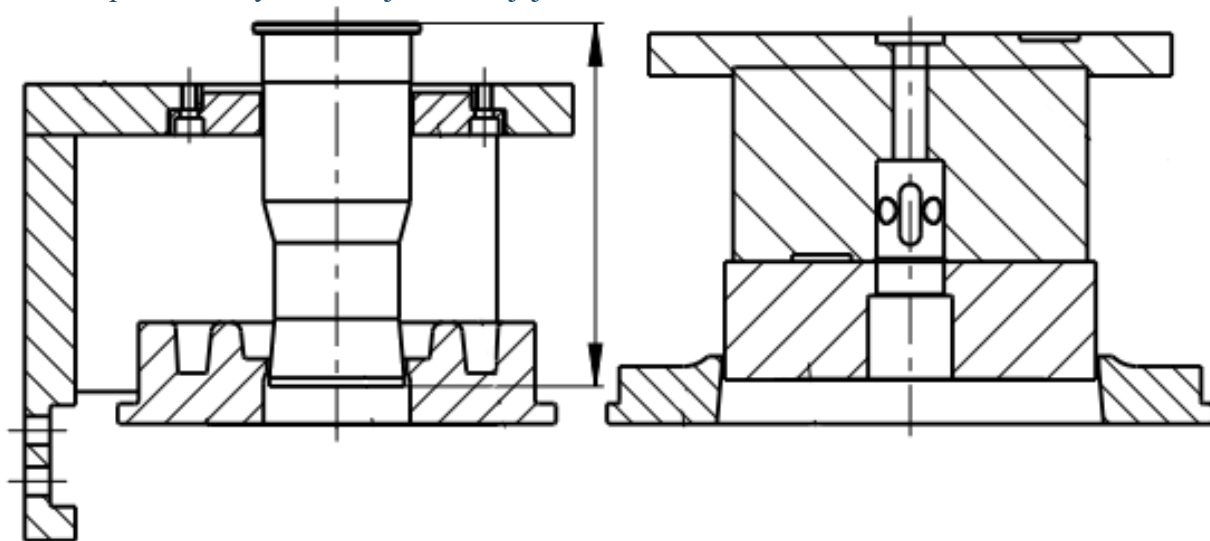
Tvářecí síla [MN]	4	Přestavení beranu [mm]	150
Sevření [mm]	663	Zdvih/Počet zdvihů [mm]	23/60
Průchod [mm]	1 000	Instalovaný výkon [mm]	200
Upínací plocha stolu [mm]	1 000 x 1 200	Rozměry stroje [m]	4,1 x 2,1 x 5,7
Upínací plocha beranu[mm]	900 x 960	Přestavitelnost beranu	hydraulické

## c) Technické specifikace Tryskače PT 500B. [Zetor]

Max. hmotnost vsázky [kg]	1 500	Doba 1 cyklu	dle výkovek
Využitelný objem náplně [m <sup>3</sup> ]	1,2	Náplň tryskacího média [kg]	1 500
Hmotnost stroje [kg]	25 000	Průchodnost trysek [kg/min]	150
Max. hmotnost 1 kusu [kg]	500	Max. rozměr 1 kusu [mm]	1 000



Schéma upnutí střižných nástrojů včetně jejich fotodokumentace.



Pořízení fotografie proběhlo po vykování a dokončení 2 000 kusů.



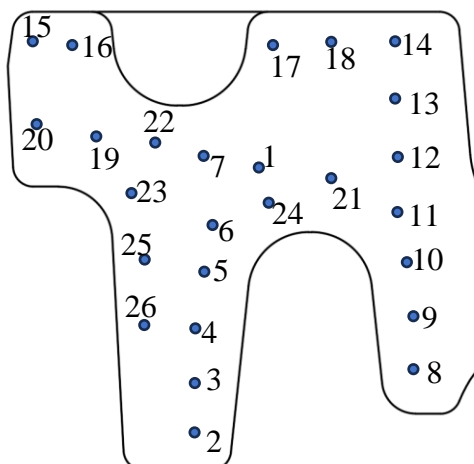
## Předběžný technologický postup výroby spojky.

Tabulka s technologickým postupem výroby spojky.

Technologický postup – zápusťkové kování			
Název výkovku: Spojka	Číslo výkresu výkovku: 2024_DP_217110_S02	Číslo výkresu součásti: 2024_DP_217110_S01	
Číslo operace:	Název operace		
1	Dělení materiálu		
	Druh materiálu: Ocel 12 020	Profil materiálu: Kruhová tyč Ø100 mm	Rozměrová norma: ČSN EN 10060
	Stroj: Behringer HPB 413	Délka: 201 <sup>+0,5</sup> mm	Hmotnost přířezu: 12,392 kg
2	Kontrola přířezu		
	Kontrola délky a jakosti špalíku s četností 10 %		Přístroj: Posuvné m.
3	Ohřev polotovaru		
	Stroj: Indukční ohříváč KSO 1 200/1,2-C40		Teplota: 1 150°C ± 50°C
4	Zápusťkové kování		
	Stroj: Lis LZK 4000	Max. kovací síla: 30,7 MN	Kovací teplota: 1 100°C ± 50°C
	Op.: 4.1 Pěchování	4,4 MN	-
	Op.: 4.2 Předkování	15,9 MN	-
	Op.: 4.3 Dokování	30,7 MN	-
5	Ostřížení		
	Stroj: Klikový lis LU 400	Hmotnost čistého výkovku: 10,65 kg	Střížná síla: 1,3 MN
6	Tryskát		
	Stroj: Trysač PT 500B	Čas: 15 minut	Vsázka: 110 kusů
7	Standardní výstupní kontrola <sup>(1)</sup>		
	Kontrola jakosti a rozměrů výkovku s četností 10 %		
	Kontrola krystalické struktury s četností 1%		Přístroj: Magnatest D, Posuvné měřidlo, šablony

<sup>(1)</sup> Prototypová a počáteční výstupní kontrola zahrnuje také měření tvrdosti a zhodnocení makro a mikrostruktury.

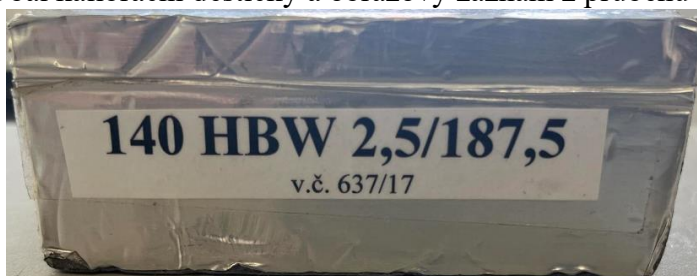
Doplňující informace a fotodokumentace k měření tvrdosti dle Brinella.



Číslo měření	Tvrдость [HBW]	Číslo měření	Tvrдость [HBW]
1.	129	14.	131
2.	127	15.	131
3.	129	16.	125
4.	129	17.	131
5.	135	18.	125
6.	135	19.	131
7.	133	20.	133
8.	133	21.	131
9.	131	22.	131
10.	135	23.	139
11.	129	24.	125
12.	129	25.	123 (vyřazeno)*
13.	133	26.	127

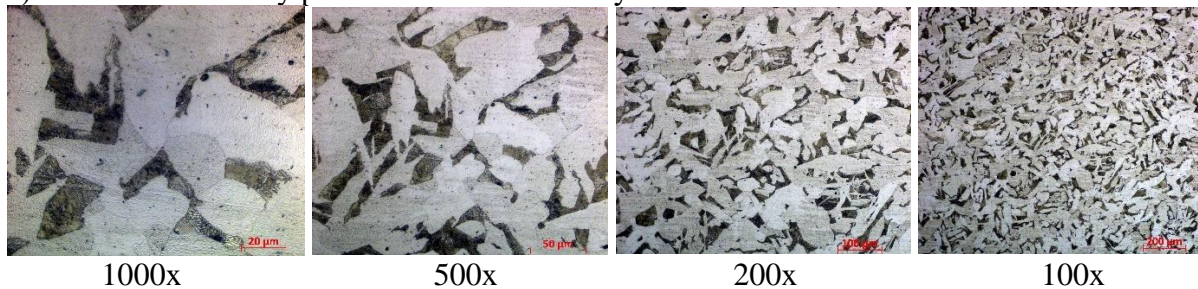
\*chybné měření (nedodržení podmínek měření)

Obal kalibrační destičky a obrazový záznam z průběhu měření

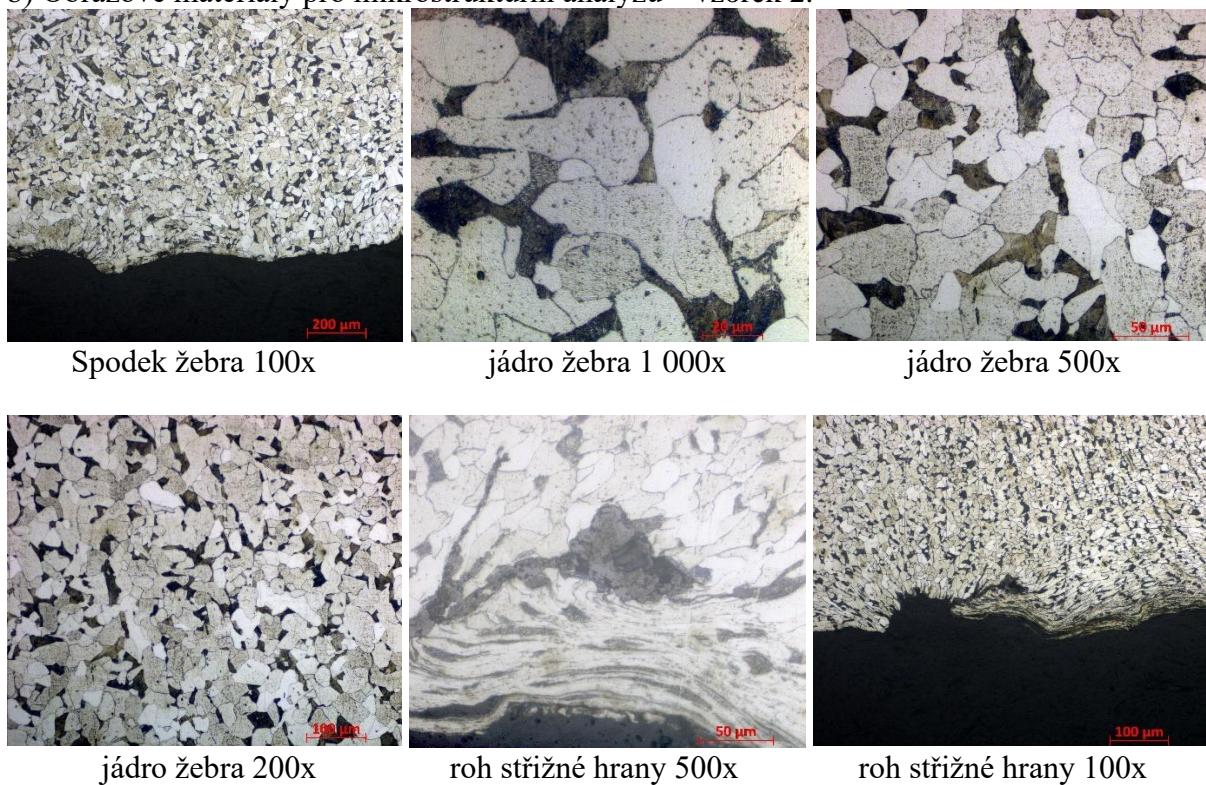




a) Obrazové materiály pro mikrostrukturní analýzu – vzorek 1.



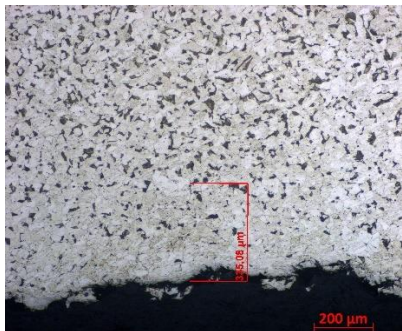
b) Obrazové materiály pro mikrostrukturní analýzu – vzorek 2.



c) Obrazové materiály pro mikrostrukturní analýzu – vzorek 3.



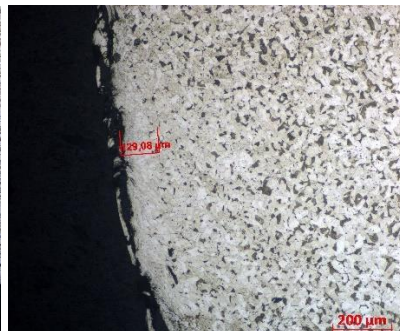




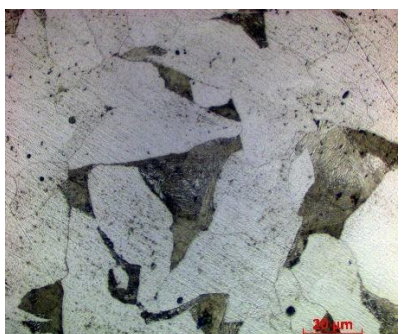
spodek žebra 100x



spodek žebra 25x



bok žebra 100x



jádro žebra 1 000x



jádro žebra 500x



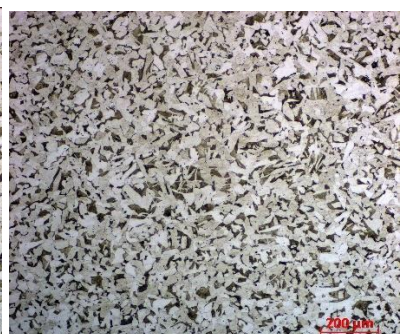
jádro žebra 200x



Widmann 500x



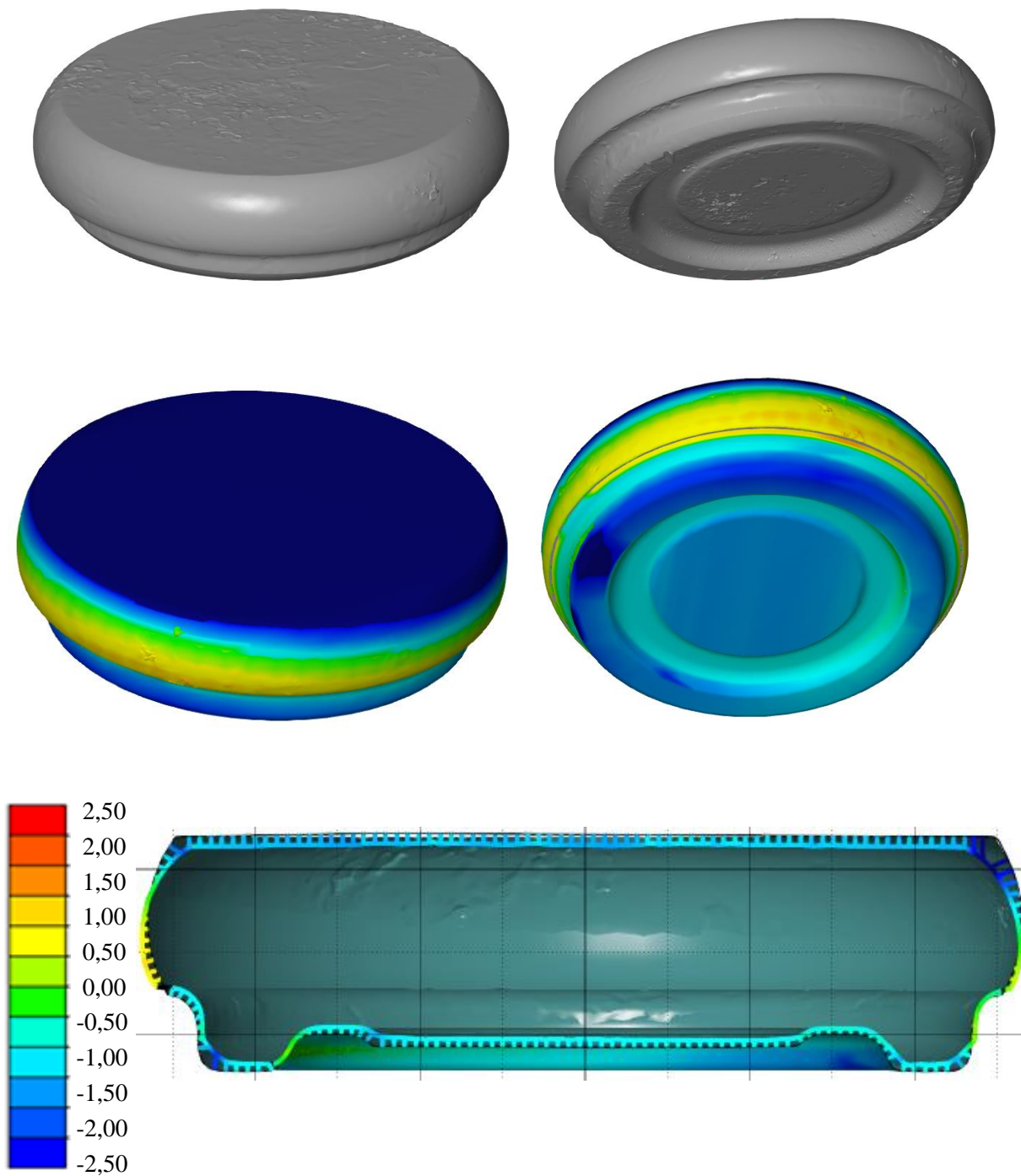
Widmann 200x



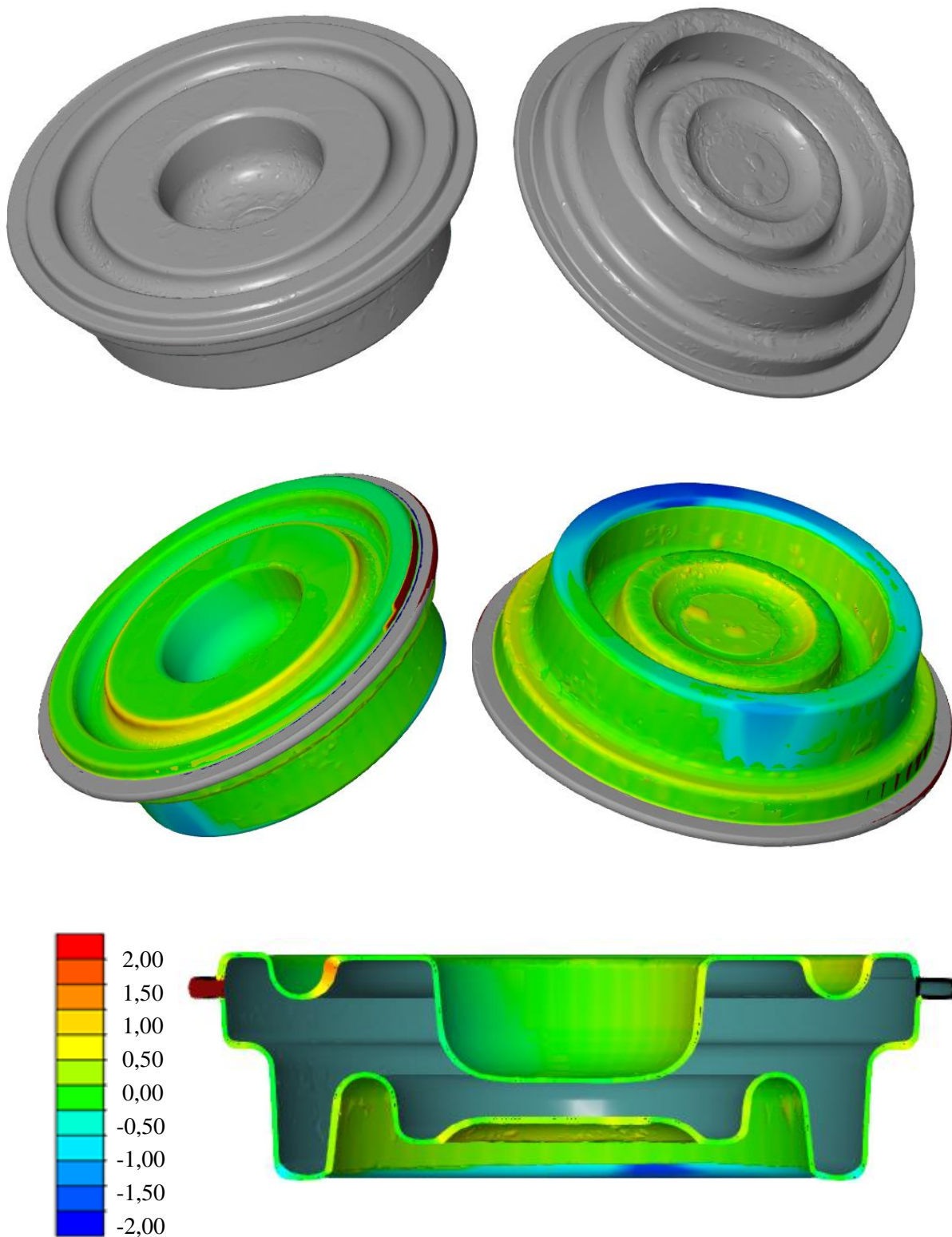
Widmann 100x



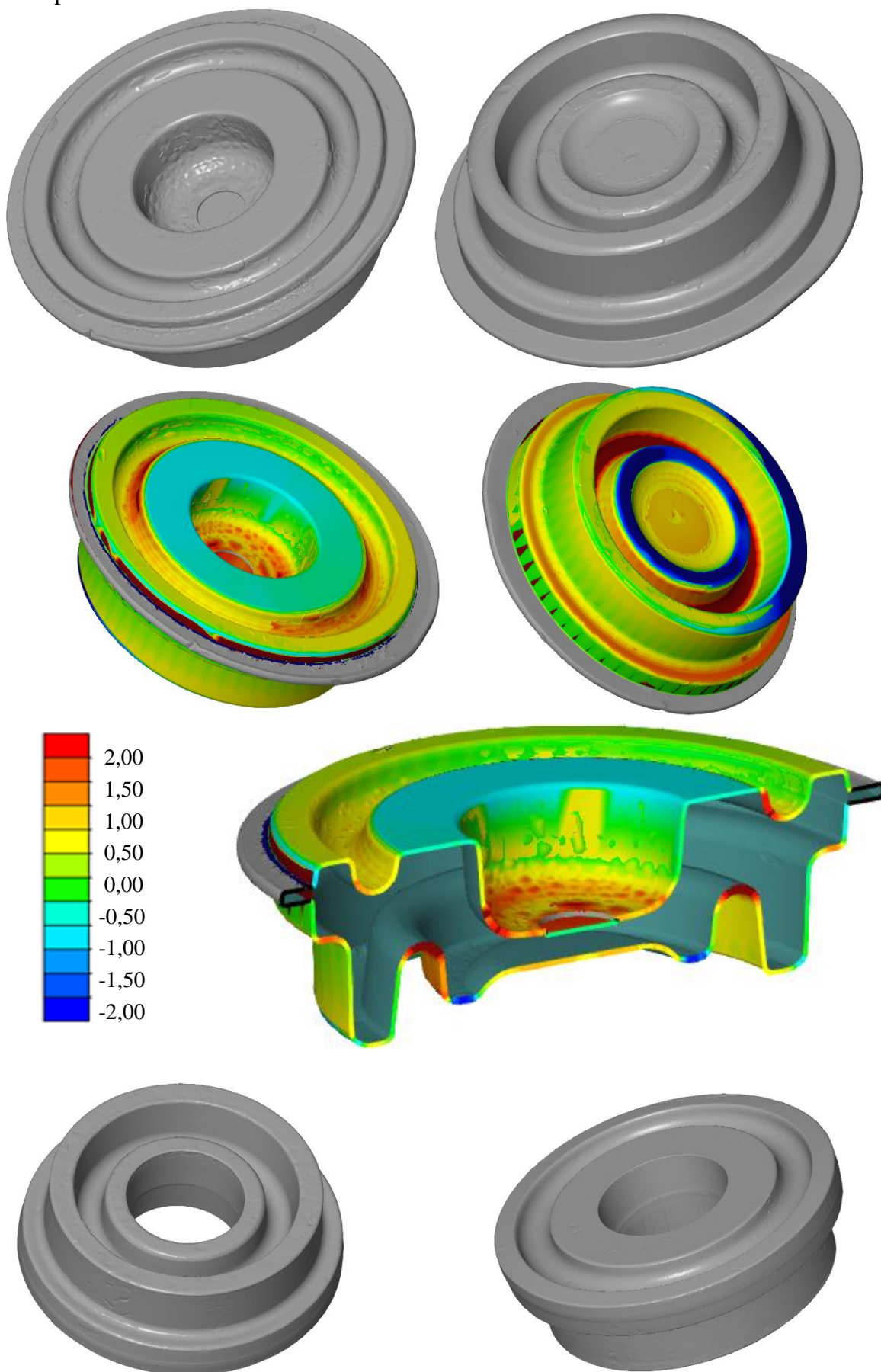
a) první operace



a) druhá operace



a) třetí operace





Obrazové materiály pro ukázkou opotřebení nástrojů.



Lehké poškození hrany nástroje při demontáži po zkušební sérii – proběhla oprava

a) spodní vložka po 50 kusech – 2op.

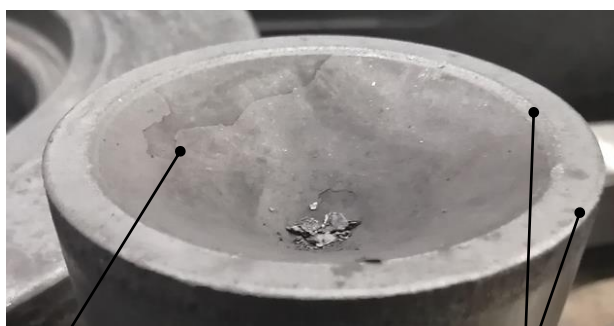


Vzniklé opotřebení na nástroji

b) spodní vložka po 2000 kusech – 2op.



c) vrchní pēchovací nástroj po vykování 2000 kusů – 1op.



d) děrovací střížník po 2000 kusech. Zkosení nástroje Opotřebované střížné hrany

Další ukázky nástroj po vykování 50 a 2 000 kusů.

