



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## ANALÝZA TEČENÍ MATERIÁLU PŘI KOVÁNÍ VAČKY

ANALYSIS OF MATERIAL FLOW DURING CAM FORGING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Kopečný

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Adam Kopečný</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Řiháček, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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:

## **Analýza tečení materiálu při kování vačky**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Jedná se o analýzu a příp. optimalizaci výroby dílce pomocí technologie tváření za tepla ve spolupráci s firmou Šroubárna Kyjov, spol. s r.o., resp. o studium vlivu průměru polotovaru a jeho vzhledu po operaci stříhání na výsledný tvar a polohu přeložky na těle výkovku vačky. Cílem je optimalizovat průměr polotovaru a dále tvar i polohu vznikající přeložky tak, aby bylo možné ji v prostřihovací operaci výroby odstranit. Další možností je přesunutí přeložky směrem do čela vačky tak, aby nedošlo k jejímu odštípnutí při obrábění prostřihované díry. Na oblast kování bude rovněž vypracována literární rešerše. Pro řešení dané problematiky se předpokládá využití numerické simulace s použitím metody konečných prvků či konečných objemů.

### **Cíle diplomové práce:**

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na technologii kování,
- zhodnocení možností optimalizace,
- provedení studie s využitím numerické simulace,
- provedení nezbytných experimentů.

### **Seznam doporučené literatury:**

ASM INTERNATIONAL. Metal Handbook Volume 22B: Metals process simulation. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 2010. ISBN 978-161-5030-057.

BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. Technológia tvárenia. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.

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.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

LOGAN, Daryl L. A first course in the finite element method. United States: Cengage Learning, 2007, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

KOPEČNÝ Adam: Analýza tečení materiálu při kování vačky.

---

Diplomová práce předkládá postup optimalizace výsledné polohy přeložek na výkovku vačky. Dílec je vyráběn ve společnosti Šroubárna Kyjov, spol. s r.o. Použitým materiálem je ocel ČSN 14 109 (100Cr6). Práce řeší optimalizaci přeložek vznikajících kvůli zakovaným otřepům na hranách polotovaru. V současné době je výsledná poloha přeložek velmi blízko hrany předkovaného otvoru vačky. Během obrábění otvoru na přesný rozměr tak dochází k nežádoucímu vyštipování materiálu. Poloha přeložek je optimalizována pomocí numerických simulací v programu Simufact Forming 15.0, včetně provedení ověřovací simulace kvůli optimálnímu nastavení parametrů. V práci jsou testovány různé průměry polotovarů, natočení nástrojů i úpravy jejich tvarů tak, aby bylo zamezeno vzniku přeložek na nežádoucích místech.

Klíčová slova: vačka, přeložky, bezvýronkové kování, numerická simulace

## **ABSTRACT**

KOPEČNÝ Adam: Analysis of Material Flow During Cam Forging.

---

The diploma thesis deals with the optimization of final position of overlaps on a forged cam. This part is manufactured in Šroubárna Kyjov, spol. s r.o. The cam is made from ČSN 14 109 (100Cr6) steel. The thesis is focused on the optimization of overlaps arising due to pressed burrs on the edges of the semifinished forging. Currently, the final position of these overlaps is very close to the edge of the pre-forged hole of the cam. Undesired chipping of material occurs during machining of the hole to the exact dimension. The final position of the overlaps is optimized by using the numerical simulation in Simufact Forming 15.0, including a verification simulation for optimal parameter settings. Various diameters of semifinished products, turned tools, and modification of shapes of the tools are tested in the thesis to prevent occurrence of the overlaps in undesired positions.

Keywords: cam, overlaps, closed die forging, numerical simulation

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOPEČNÝ, Adam. *Analýza tečení materiálu při kování vačky* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123961>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26.6.2020

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále také děkuji zaměstnancům firmy Šroubárna Kyjov, spol. s r.o, zejména pak Ing. Miroslavu Macháčovi, panu Romanu Trňáčkovi, Ing. Pavlu Dočekalovi a Ing. Pavlu Šprtovi za odborné rady a konzultace. Děkuji také panu Ing. Josefu Veverkovi, Ph.D. za poskytnuté školení v programu Simufact Forming.

# OBSAH

Zadání  
Abstrakt  
Bibliografická citace  
Čestné prohlášení  
Poděkování  
Obsah

	Str.
<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b> .....	10
<b>2 TECHNOLOGIE KOVÁNÍ</b> .....	16
<b>2.1 Návrh výkovku a postup výroby</b> .....	17
2.1.1 Ohřev a dělení polotovaru .....	18
2.1.2 Předkování .....	20
2.1.3 Kování a dokončovací operace.....	21
2.1.4 Tepelné zpracování a povrchová úprava výkovků .....	22
2.1.5 Vady výkovků .....	23
<b>2.2 Přesné kování</b> .....	24
2.2.1 Kování v uzavřených nástrojích .....	24
2.2.2 Kování v uzavřených nástrojích na vodorovných kovacíh lisech.....	26
2.2.3 Kování s horní vrtivou zápusťou.....	28
2.2.4 Izotermické kování .....	29
<b>2.3 Tvářecí automaty</b> .....	29
<b>2.4 Numerické simulace</b> .....	31
2.4.1 Metoda konečných objemů (MKO).....	31
2.4.2 Metoda konečných prvků (MKP).....	32
2.4.3 Simulační softwary .....	32
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	34
<b>3.1 Materiálový a geometrický model</b> .....	34
<b>3.2 Ověřovací simulace</b> .....	38
3.2.1 Simulace tvorby přeložky z ořepu.....	39
3.2.2 Volba výpočtové metody.....	41
3.2.3 Volba modelu tření .....	47
<b>3.3 Optimalizace polohy přeložek</b> .....	49
<b>4 ZÁVĚRY</b> .....	61
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam grafů	
Seznam příloh	
Seznam výkresů	



## ÚVOD [2], [3]

V současnosti lze pro výrobu součástí využít širokou škálu výrobních technologií. Jedná se zejména o technologie obrábění, tváření a odlévání. Technologie tváření jsou výhodné zejména kvůli krátkým výrobním časům a také velmi vysokému využití výchozího polotovaru. Samotné tvářecí technologie pak lze rozdělit na procesy probíhající za tepla, či za studena. Dále lze hovořit o plošném, či objemovém tváření. Mezi plošné metody tváření patří např.: stříhání, ohýbání a tažení. Hlavními technologiemi spadajícími do kategorie objemového tváření jsou zejména kování a válcování.

Samotné kování se pak dělí na ruční a strojní kování, přičemž ruční kování je využíváno pouze pro kusovou výrobu, různé opravy, či umělecké výkovky. Strojní kování lze dále rozdělit na volné a zápustkové, přičemž každá ze zmíněných oblastí má nezastupitelné místo při výrobě celé škály polotovarů i konečných výrobků, jako jsou např.: ojnice, ventily, předkovky ozubených kol, lodní hřídele atd.

Jednou z velmi progresivních metod kování je tzv. bezvýronkové kování na vodorovných tvářecích automatech. Tato technologie je velmi využívána například pro výkovky vaček, ložiskových kroužků, či předkovků ozubených kol. Hlavní výhodou této technologie je pak zejména velmi krátký výrobní čas. Běžně jsou vyráběny stovky kusů za minutu. Absence výronku také znamená lepší využití materiálu. Na obr. 1 jsou zobrazeny příklady bezvýronkových výkovků.

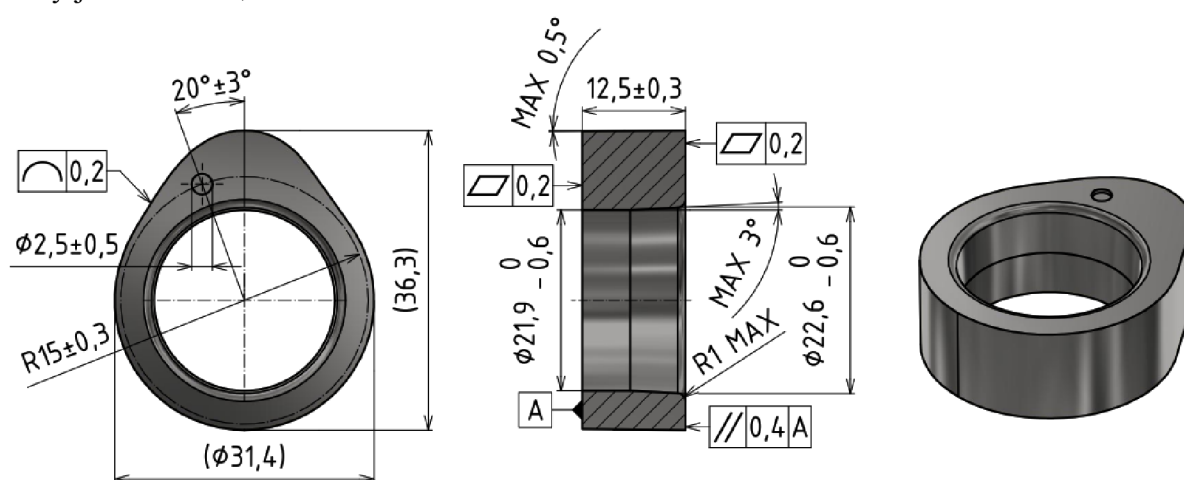


Obr. 1 Příklady bezvýronkových výkovků [2], [3]

# 1 ROZBOR ZADÁNÍ [3], [4], [5], [6]

Diplomová práce je zaměřena na optimalizaci konečné polohy přeložky, která vzniká při kování vačky ve firmě Šroubárna Kyjov, spol. s r.o. Práce předpokládá využití numerické simulace procesu výroby vačky v postupovém automatu.

Vačka je kována bez výronku, jedná se tedy o technologii přesného (bezvýronkového) kování. Profil vačky je určen pomocí souřadnic celkem 362 bodů, které poskytuje zákazník. Na tento profil se vztahuje geometrická tolerance. Na zadní plochu je vztažena geometrická tolerance rovinnosti. Čelní plocha je geometricky tolerována na rovinnost a rovnoběžnost se zadní plochou. Orientační rozměry vačky uvádí obr. 2. Na dílci nelze nalézt žádnou rovinu symetrie, jelikož vačka má náběhovou a výběhovou stranu. Největší dovolený úkos po obvodu vačky je  $0,5^\circ$ . Uprostřed vačky je otvor o průměru 21,9 mm sloužící pro nasazení vačky na hřídel. Tento otvor je u zákazníka dále obráběn na přesný rozměr. V části díry je povolen maximální úkos  $3^\circ$ . Na horní straně vačky se nachází značící otvor o průměru 2,5 mm. Tloušťka vačky je celkem 12,5 mm.



Obr. 2 Orientační rozměry vačky

Vačka je vyráběna z oceli 100Cr6, což je ekvivalent oceli ČSN 14 109. Její základní chemické složení je uvedeno v tab. 1. Jedná se o nadeutektoidní chromovou ocel, která nachází využití zejména při výrobě ložiskových kroužků a také ložiskových válečků, kuželíků a jehliček.

Tab. 1 Chemické složení oceli 14 109 [4].

% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni
0,90 až 1,10	0,30 až 0,50	0,15 až 0,35	1,30 až 1,65	max 0,30
% Cu	% Ni+Cu	% P	% S	
max 0,25	max 0,50	max 0,27	max 0,030	

Mechanické vlastnosti oceli 100Cr6 lze nalézt v tab. 2. Uvedené mechanické vlastnosti platí pro předvalky, tyče válcované za tepla a výkovky a jsou měřené ve stavu po žihání na měkko.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 14 109 [4].

Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	608 až 726
Mez kluzu $R_e$ [MPa]	441
Tvrdość HB	max 210
Modul pružnosti E [GPa]	213 (při 23 HRC)
Kontrakce Z [%]	35
Tažnost $A_5$ [%]	18

Součást je vyráběna na stroji HOTmatic AMP 30 S od švýcarského výrobce tvářecích strojů Hatebur Umformmaschinen AG. Jedná se vodorovný lis, viz obr. 3. Lis má celkem tři tvářecí stanice a nože zajišťující dělení tyčí na špalíky. Lze na něm zpracovávat tyčový materiál do průměru 40 mm. Lis disponuje tvářecí silou o hodnotě celkem 2 500 kN a počtem zdvihů až 140/min. Jeho výhodou je velká produktivita, kterou zajišťuje téměř plně automatický provoz. Velké využití nachází u společností, které se zabývají výrobou ložiskových kroužků, vaček a dílců pro automobilový průmysl. Parametry lisu jsou uvedeny v tab. 3.



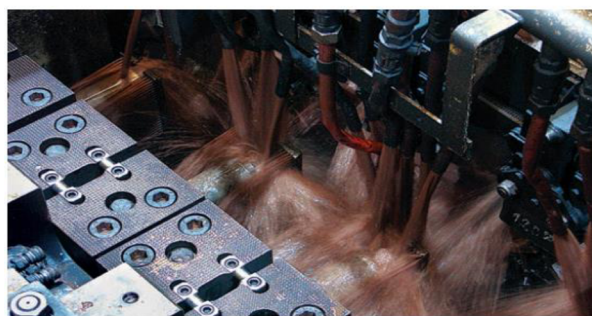
Obr. 3 Lis AMP 30 S [3]

Parametry lisu jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Parametry lisu [3].

Počet tvářecích stanic [-]	3
Průměr tyče [mm]	18 až 40
Hmotnost polotovaru [kg]	0,05 až 0,70
Délka ústřížku [mm]	20 až 72
Maximální výstupní průměr [mm]	67
Maximální tloušťka (šestihrany) [mm]	60
Počet zdvihů za minutu [-]	85 až 140
Celková tvářecí síla [kN]	2 500

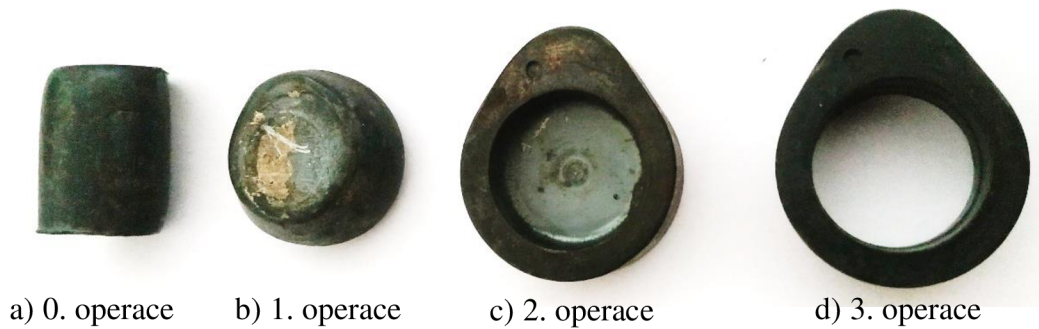
Za účelem zvýšení životnosti tvářecích nástrojů je nutné zajistit jejich chlazení, viz obr. 4. Dále je také důležité nástroje během tvářecího procesu mazat. to například usnadňuje vyhazování výkovků a také tečení materiálu. Firma Šroubárna Kyjov, spol. s r.o. používá Multipress WM, což je vodou mísitelný olej určený pro objemové tváření za tepla s možností použití až do 1 200 °C. Po smíchání tohoto oleje s vodou vznikne emulze, která má jak mazací, tak chladicí účinek.



Obr. 4 Ukázka chlazení nástrojů [5]

Pro výrobu je nyní používána loupaná tyč o jmenovitém průměru 20 mm ohřátá na teplotu 1 150 až 1 190 °C pomocí indukčního ohřevu. V první operaci je z tyče oddělen špalík o délce přibližně 27,6 mm. Podstatnou, a tudíž kontrolovanou veličinou je hmotnost polotovaru, která má být 64 g, aby byl zaručen požadovaný objem polotovaru.

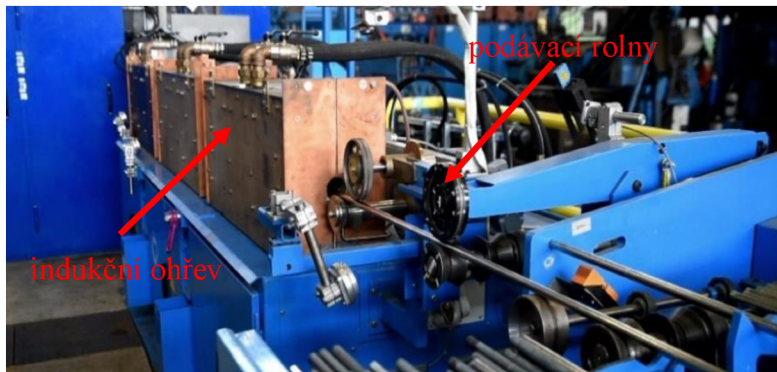
Proces výroby vačky se skládá celkem ze čtyř operací, jak je vidět na obr. 5. Nejprve je z tyče pomocí pohyblivého a pevného nože oddělen špalík. Odstřižený špalík je přenesen do první operace, kde pomocí předkovačích razníků a lisovací plotýnky proběhne předpěch. Ve druhé operaci je vykován tvar vačky včetně blány, která je v poslední operaci děrována. Mezi jednotlivými operacemi je dílec přenášen pomocí dvojice kleštin. Všechny operace budou detailněji popsány níže.



Obr. 5 Postup výroby vačky

Jak již bylo řečeno, teplota tyče před oddělením špalíku se musí pohybovat v rozmezí 1 150 °C až 1190 °C.

Požadované teploty je dosaženo pomocí průběžného indukčního ohřevu. Teplota tyče je kontrolována pomocí pyrometrů, které jsou umístěny před vstupem tyče do stroje. Naměřená hodnota je zobrazena na řídicím panelu. Posun tyčí je zajištěn pomocí podávacích roln, jak je vidět na obr. 6. Teplota tyče, délka odstřížku a aktuální poloha tyče je zobrazována na kontrolních panelech.



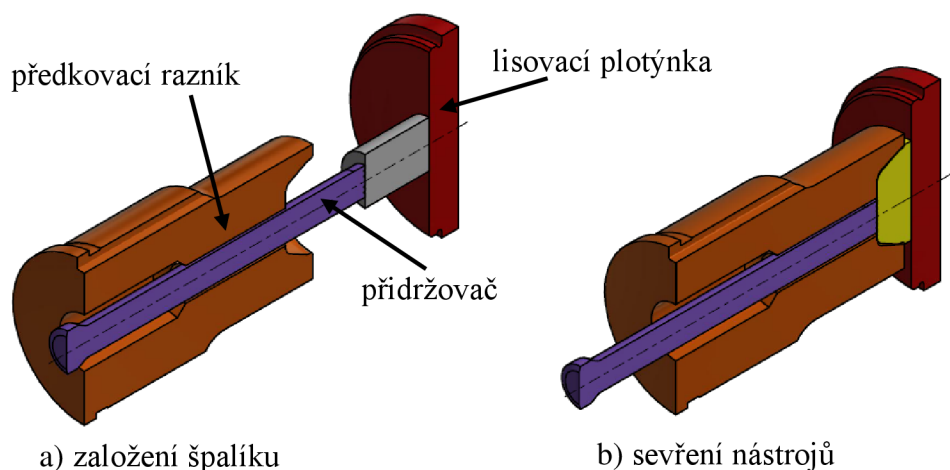
Obr. 6 Podávací rolny a ohřev tyče

V první operaci dochází k oddělení špalíku o průměru přibližně 20 mm a délce 27,6 mm. Rozměry odstřížku je obtížné měřit, jelikož po odstřížení dojde k deformaci. Proto je po určitém počtu kusů kontrolována hmotnost špalíku, aby byl vždy dodržen potřebný objem polotovaru. Při oddělení tyče dojde nejprve k zajištění potřebné délky pomocí dorazu a poté k odstřížení pomocí pevného a pohyblivého nože (obr. 7a). Odstřížení je vždy doprovázeno tvorbou otřepu, viz obr. 7b. Maximální povolený otřep na odstřížku činí 0,4 mm. Životnost nožů je cca 10 000 kusů. K tvorbě otřepu dochází na horní a spodní hraně. Čím větší je otřep, tím pravděpodobnější je tvorba přeložek, tudíž je tato veličina velmi podstatná.



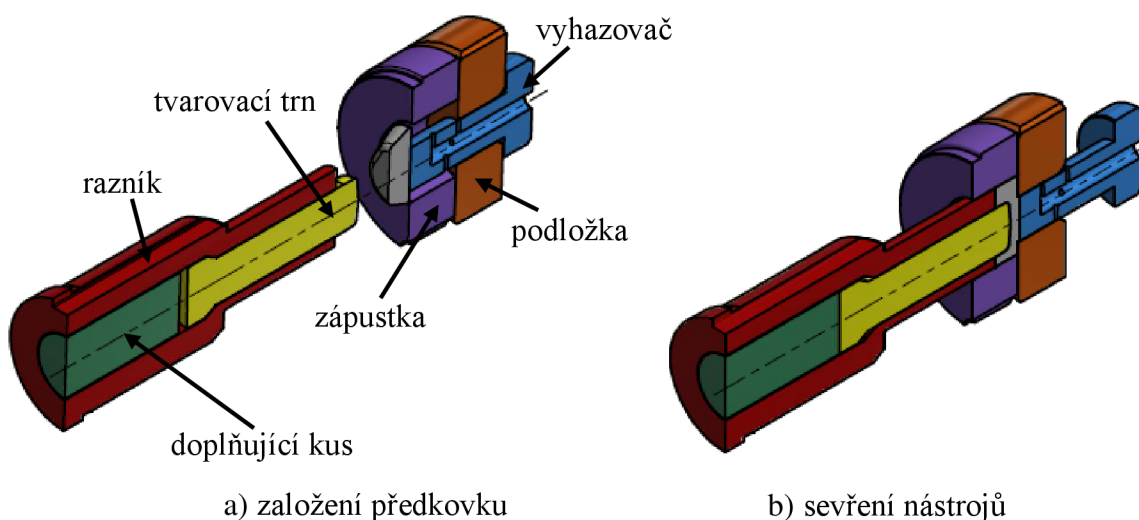
Obr. 7 Pevný, pohyblivý nůž a odstřížený špalík

Ustřížený špalík o požadovaném objemu je v první operaci napěchován, viz obr. 8. Nejprve je ústřížek přenesen k lisovací plotýnce, kde je přidržen pomocí přidržovače, který prochází dutinou předkovacího razníku. Poté je ústřížek stlačen a v dutině razníku napěchován. Není přípustné, aby se plotýnka a razník dotýkaly, jelikož to by mohlo zapříčinit jejich brzké poškození. V konečném kroku operace musí být tedy zachována vůle mezi plotýnkou a razníkem přibližně 4 mm.



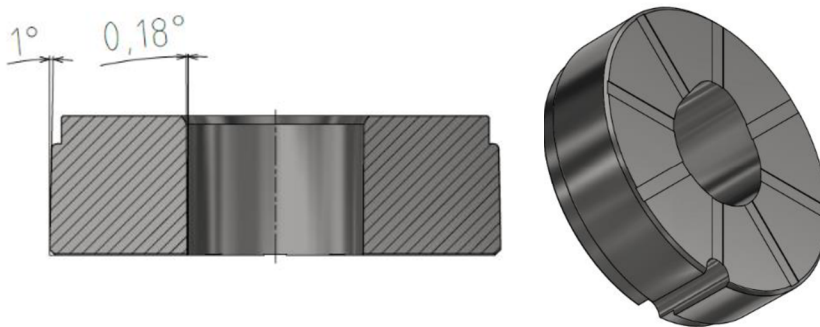
Obr. 8 Předkování vačky

Ve druhé operaci je z předkovku vykována vačka s blánou. V razníku je dutina, do které je vložen tvarovací trn, který vytváří předkovaný otvor. Pod zápustkou je umístěna podložka, viz obr. 9. Dalším důležitým dílcem je vyhazovač, který zajišťuje snadné vyhození z dutiny zápustky. Doplňující kus slouží k zapření tvarovacího trnu při kování.



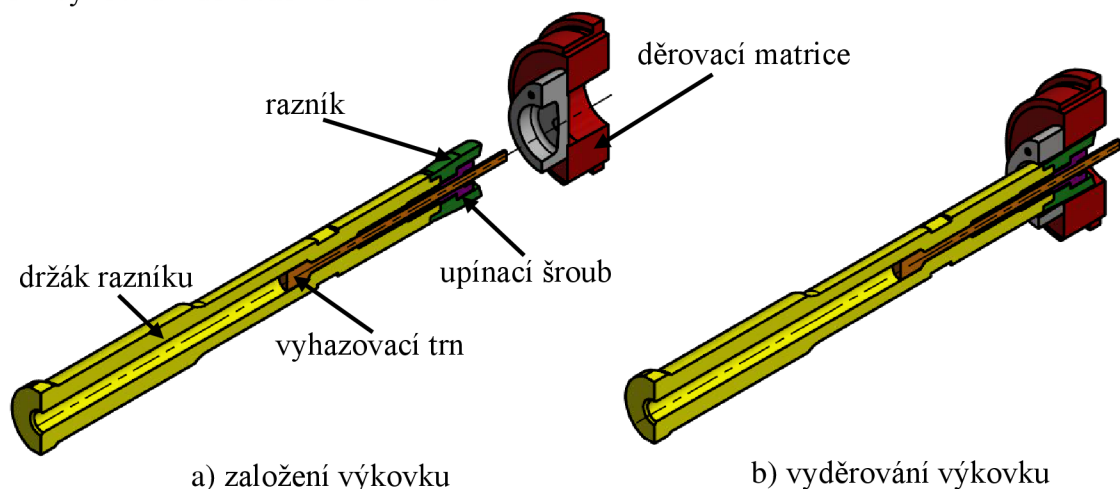
Obr. 9 Kování vačky

Dutina v zápustce je zkosena, viz obr. 10. To zajišťuje snadnější vyhození výkovku. Zápustka i podložka zápustky jsou s určitým přesahem zalisovány do pláště, což slouží k zajištění větší tuhosti a zvýšení životnosti nástrojů. Vnější průměr zápustky je zkosen kvůli usnadnění zalisování do pláště. Na spodní straně zápustky je celkem osm drážek, které slouží k úniku vzduchu z dutiny. Ve vyhazovači je vyvrtáno několik otvorů, skrz které proudí emulze, která chladí a maže zápustku. Na vnějším obvodu zápustky je vyfrézována drážka, do které je při zalisovávání do pláště vložen aretační kolík, který zajišťuje správný úhel natočení při zalisovávání.



Obr. 10 Zápustka

Po vykování vačky následuje operace děrování blány, viz obr. 11. Děrovací razník je pomocí upraveného šroubu přichycen k držáku razníku. Razníkem prochází vyhazovací trn, který slouží k vyhození vyděrované blány. Přimo na nástrojovém bloku je umístěn stěrač, jenž zajišťuje setření výkovku z děrovacího razníku.



Obr. 11 Děrování blány

Veškeré nástroje jsou vyrobeny z oceli ČSN 19 541. Jde o nástrojovou středně legovanou Cr-Mo-V ocel používanou pro práci za tepla. Běžně je používána pro výrobu zápustek, vložek zápustek, lisovací trny atd. Chemické složení a mechanické vlastnosti uvádějí tab. 4 a tab. 5. Nástroje jsou také kaleny a popouštěny a nitridovány za účelem zvýšení životnosti.

Tab. 4 Chemické složení oceli ČSN 19 541 [6].

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Mo	% V
0,27 až 0,37	0,20 až 0,50	0,30 až 0,70	max 0,30	max 0,30	2,70 až 3,50	2,70 až 3,50	0,50 až 0,70

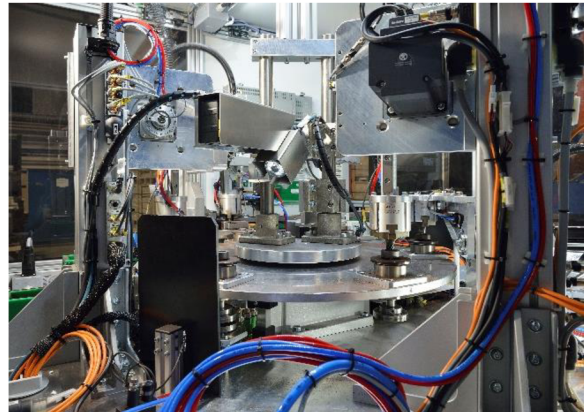
Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 19 541 [6].

Mechanické vlastnosti	
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	1 530 až 1 830 (při 45 až 51 HRC)
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	1 400 až 1 620 (při 45 až 51 HRC)
Mez kluzu v tlaku $R_{et}$ [MPa]	1 700 až 2 000 (při 45 až 51 HRC)
Tvrдость HRC	45 až 51
Tažnost $A_5$ [%]	9 až 11 (při 45 až 51 HRC)
Kontrakce Z [%]	36 až 42 (při 45 až 51 HRC)
Vrubová houževnatost KCU 2 [ $J \cdot cm^{-2}$ ]	40
Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot (200 °C až 600 °C)	
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	1 480 až 920
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	1 300 až 850
Tažnost $A_5$ [%]	10 až 12
Kontrakce Z [%]	33 až 55
Vrubová houževnatost KCU 2 [ $J \cdot cm^{-2}$ ]	58 až 53

Po celém tvářecím procesu je vačka žhána v průběžné válečkové peci s ochrannou atmosférou (obr. 12a) na tvrdost  $190 \pm 20$  HB. Po žhání následuje tryskání pro zajištění kvality povrchu vačky. Po celém výrobním procesu jsou všechny vačky kontrolovány na automatické třídící lince (obr. 12b), která byla sestavena na zakázku pro firmu Šroubárna Kyjov, spol. s r.o.



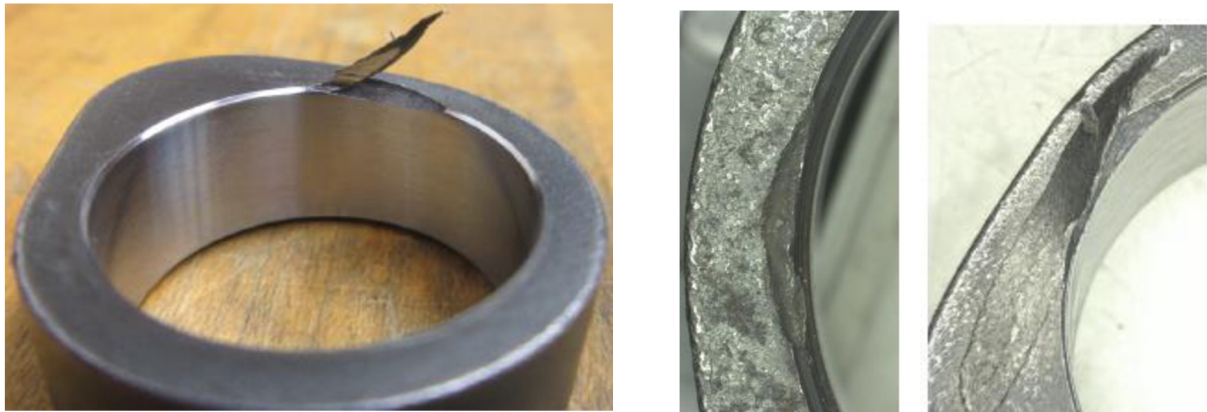
a) žihací pec



b) třídící linka

Obr. 12 Žihací pec a třídící linka

V diplomové práci bude řešen problém vzniku přeložky v oblasti okraje otvoru ve vačce. Přeložka se při obrábění díry u zákazníka vyštípuje a vzniká tak poškozený a již nepoužitelný kus, viz obr. 13. V úvahu připadají dvě základní možnosti, jak tento problém odstranit. První možností je přesunout vzniklou přeložku směrem do čela vačky. Tím by nedošlo k jejímu vyštípnutí při obrábění. Další možnost je potom polohu přeložky ovlivnit tak, aby po operaci kování byla v předkovaném otvoru a tím by v následující operaci došlo k jejímu odstranění společně s proděrovanou blánou.



Obr. 13 Poškození při obrábění vlivem přeložky

Dílec je vyráběn technologií kování za tepla, proto bude teoretická část zaměřena na tuto technologii.

## 2 TECHNOLOGIE KOVÁNÍ [1], [7], [8], [9]

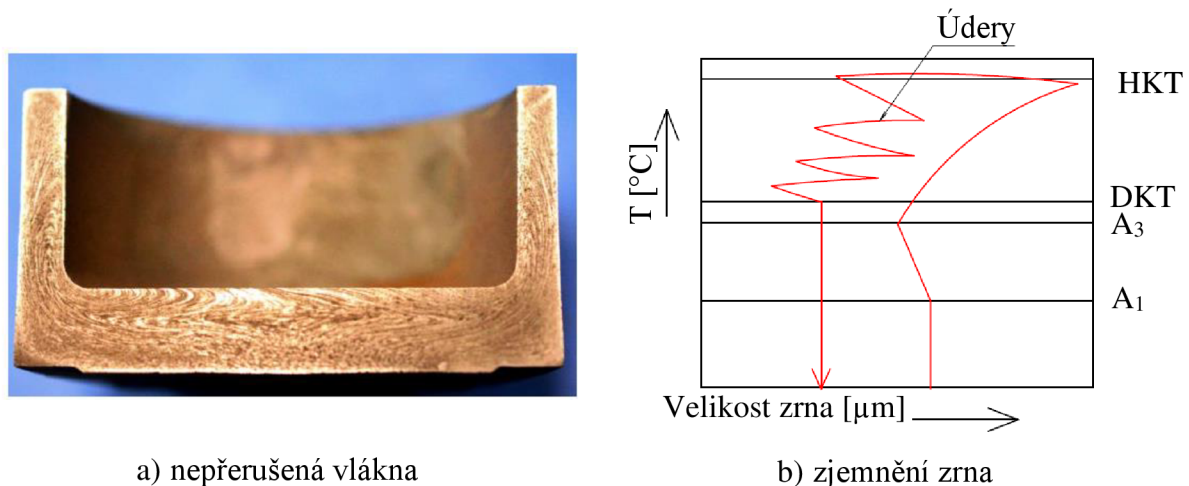
Kování je tvářecí proces, který probíhá za tepla, tzn. nad teplotou rekrystalizace. Tu je možné určit na základě teploty tavení pomocí Bočvarova vztahu, viz rovnice 2.1. V některých případech probíhá kování i za poloohřevu.

$$T_R \approx (0,35 \text{ až } 0,4) \cdot T_{TAV}, \quad (2.1)$$

kde:  $T_R$  – teplota rekrystalizace [°C],

$T_{TAV}$  – teplota tavení [°C].

Mezi hlavní výhody kování patří nepřerušovaný průběh vláken (obr. 14a), což má za následek zlepšení mechanických vlastností výrobku. Dále se mezi výhody řadí zjemnění zrn materiálu, což se opět pozitivně projeví na mechanických vlastnostech. Mezi eutektoidní teplotou ( $A_1$ ) a teplotou  $A_3$  zrno zjemňuje. Pokud teplota ohřevu přesahuje teplotu  $A_3$  dochází k hrubnutí zrna. S údery kovací nástrojů zrno opět zjemňuje, viz obr. 14b. Další výhodou je bezesporu menší silové zatížení nástrojů, neboť za vysokých teplot klesá přetvárný odpor materiálu.



a) nepřerušená vlákna

b) zjemnění zrna

Obr. 14 Výhody kování [1], [8]

K nevýhodám tváření za tepla, a tedy i kování, patří zejména vznik okujů a také oduhličení výrobků, což má neblahý vliv na mechanické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že tváření za tepla probíhá za vysokých teplot, dochází k tepelnému namáhání nástrojů i strojů. Mezi nevýhody patří také náklady spojené s energií nutnou k ohřevu polotovárů.

Technologii kování lze rozdělit následovně:

a) dle pracovní teploty:

- kování za tepla – nejčastější způsob kování,
- kování za poloohřevu – od 550 °C do 800 °C, symetrické výkovky,
- kování za studena – používané zcela výjimečně, pouze pro oceli s obsahem uhlíku méně než 0,45 %.

b) dle použití stroje:

- ruční kování – v dnešní době výhradně umělecká, případně kusová výroba,
- strojní kování – dominantní technologie.

c) dle technologie:

- volné kování,
- zápusťkové kování,
- přesné kování,
- rotační kování,
- kování kyvnou zápusťkou,
- kování na vodorovných kovacích strojích.



Jelikož je řešený dílec vyráběn technologií přesného kování na vodorovném kovací automat, bude teoretický rozbor zaměřen převážně na technologie přesného kování. U těchto technologií platí následující výrobní postup výkovku:

- návrh výkovku,
- výběr polotovaru a jeho příprava (ohřev, dělení, ...),
- předkování,
- kování,
- dokončující operace (děrování, ostříhování, ...),
- tepelné zpracování,
- povrchová úprava,
- kontrola výkovků.

## 2.1 Návrh výkovku a postup výroby [9], [10], [11], [12]

Návrh výkovku je vždy zpracován na základě tvaru finálního výrobku. Tvar výrobku je modifikován o potřebné

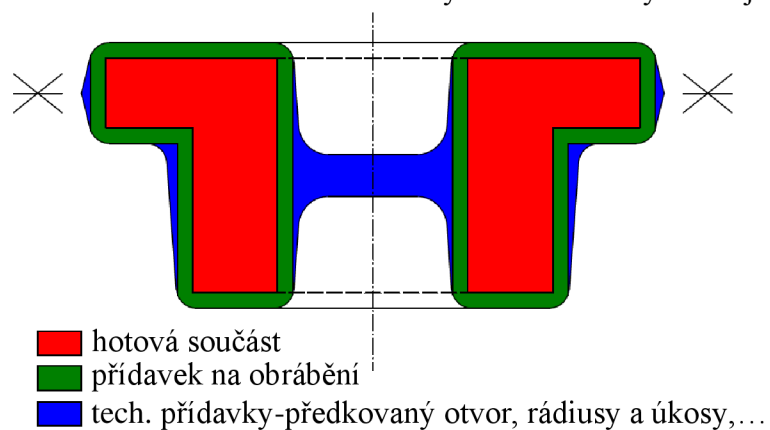
přidávky. Celkem existují tři základní druhy přidavek, a to: na obrábění, technologické a na tvarovou složitost. Přidávky na obrábění jsou nutné z důvodu nekvalitní povrchové vrstvy výkovků, která bývá oduhlíčená, zokujená a může obsahovat trhliny. K obrobení na přesný rozměr je tedy zapotřebí přidavku. Dle normy ČSN 42 9030 se přidávky na obrábění

určují v závislosti na největším rozměru a požadované přesnosti výkovku. Technologické přidávky jsou nezbytné pro zajištění správného kovacího procesu. Jedná se zejména o úkosity bočních ploch, které usnadňují vyjmutí výkovku ze zápustky. Dále jde o zesílení podlimitních tloušťek stěn nebo blánu sloužící pro předkování otvoru. Přidávky na tvarovou složitost je nutné aplikovat na tvarové prvky, které nelze danou technologií kování zhotovit, jako jsou např.: velmi členité plochy, vybrání kolmé na směr pohybu beranu atp. Ukázka přidavek na výkovku je zobrazena na obr. 15. Velmi podstatným prvkem pro tvorbu výkresu výkovku je také dělicí rovina. Jedná se o rovinu, která odděluje jednotlivé zápustky. Dělicí rovina může být rovná, nebo lomená.

Pro správný návrh výkovku existuje několik následujících zásad:

- pozvolné přechody jednotlivých průřezů,
- dělicí rovina by měla být ideálně rovná, neboť výroba zápustek s lomenou dělicí rovinou je dražší a kovací proces je komplikovanější,
- hrany výkovku nesmějí ležet v dělicí rovině,
- dbát na minimální tloušťku stěny předepsanou v normě,
- konstruovat dostatečně velké úkosity,
- předkovávat otvory od průměru cca 30 mm.

Po vypracování výkresu výkovku následuje volba optimálního polotovaru. Při určení velikosti polotovaru je základem objem konečného výkovku. K tomuto objemu je potom přičten objem odpadu. Ten se skládá z objemu předpokládaného opalu a také z objemu případného výronku, či blány předkovaného otvoru, viz následující vztah. Velikost opalu je závislá na použitém způsobu ohřevu a také na teplotě a době ohřevu.



Obr. 15 Přidávky na výkovku [11]

$$V_{\text{pol}} = V_{\text{výk}} + V_{\text{odp}}, \quad (2.2)$$

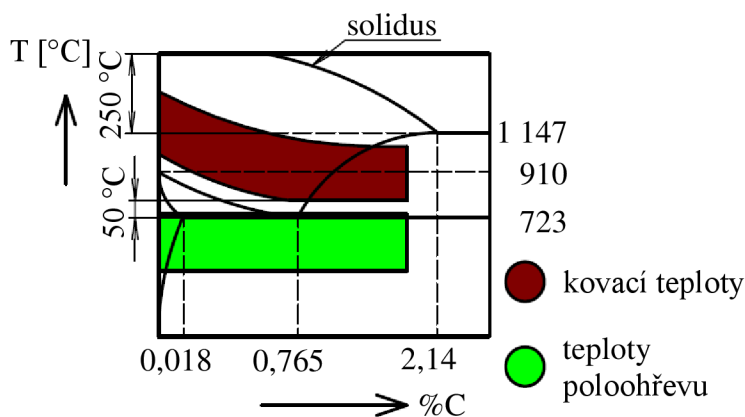
kde:  $V_{\text{pol}}$  – objem polotovaru [ $\text{mm}^3$ ],  
 $V_{\text{výk}}$  – objem výkovku [ $\text{mm}^3$ ],  
 $V_{\text{odp}}$  – objem odpadu [ $\text{mm}^3$ ].

Dále je vždy nutné provést kontrolu štíhlostního poměru zvoleného polotovaru, což je poměr délky ku průměru polotovaru. Dodržení doporučeného štíhlostního poměru zamezuje možné ztrátě stability a tím nežádoucímu vybočení polotovaru. Obecně je doporučen štíhlostní poměr od 1,5 do 2,8. Pro stroj Hatebur AMP 30 S je výrobcem doporučen štíhlostní poměr 1 až 2.

### 2.1.1 Ohřev a dělení polotovaru [9], [10], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]

Jelikož proces kování probíhá v drtivé většině případů za tepla, nebo za poloohřevu, je vždy nutné zajistit ohřev polotovaru na požadovanou teplotu. Kovací teploty se pohybují přibližně od  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Horní kovací teplota je vždy cca  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  pod křivkou solidu. Dolní kovací teplota leží asi  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  nad teplotou rekrytalizace.

Teploty poloohřevu jsou cca  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oblasti kovacích teplot a teplot poloohřevu jsou zakresleny ve výřezu z diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C na obr. 16. Kovací teploty pro zápusťkové výkovky



Obr. 16 Kovací teploty [1]

jsou obvykle nižší než pro volně kované výkovky. Správná volba kovací teploty do značné míry ovlivňuje kvalitu výsledného výrobku, jelikož příliš velká kovací teplota způsobí přehřátí, či spálení oceli a malá teplota způsobuje zvýšení deformačního odporu.

Ohřev materiálu lze zcela obecně rozdělit na přímý a nepřímý. Přímý ohřev funguje na principu vzniku tepla v ohřivaném materiálu. Do této skupiny se řadí např.: přímý odporový ohřev nebo indukční ohřev. Naproti tomu u nepřímého ohřevu je uplatňován přestup tepla vedením, prouděním nebo sáláním. Mezi metody nepřímého ohřevu se řadí zejména plynový ohřev.

Plynový ohřev nachází uplatnění zejména při ohřevu velkých polotovarů. Zdrojem tepla jsou plynové hořáky umístěné v peci. Nevýhodou metody plynového ohřevu je větší množství vzniklého opalu. Pro plynový ohřev lze využít několik druhů pecí:

- komorové pece – mají malou tepelnou účinnost a přerušovaný tok materiálu. Existují i dvoukomorové varianty, které jsou využívány pro stupňovitý ohřev legovaných ocelí. Komorová pec je zobrazena na obr. 17a.
- vozové pece – jsou používány pro značně rozměrné polotovary. Nístěj je výsuvná, kvůli usnadnění zakládání materiálu, viz obr. 17b.
- narážecí pece – mají přehřívací, ohřívací a vyrovnávací část. Jsou to průchozí pece. Polotovary se vkládají otvorem v zadní části pece a vyndávají se bočním otvorem ve stěně.
- štěrbinové pece – slouží pro ohřev konců tyčí nebo trubek.
- karuselové pece – jedná se o pece s otočnou nístějí. Je nutné zajistit regulaci rychlosti pohybu nístěje a tím umožnit regulaci doby ohřevu.
- talířové pece – druh karuselové pece. Má pouze jeden otvor, který slouží pro zakládání i vyjímání polotovarů.



a) komorová pec



b) vozová pec

Obr. 17 Komorová a vozová pec [17]

Odporový ohřev lze provádět přímo, nebo nepřímě. V případě přímého ohřevu ke vzniku tepla dochází díky elektrickému proudu, jenž proudí skrz ohřivaný objekt. Je to velmi rychlý a účinný způsob ohřevu. U nepřímého ohřevu jsou nejprve průchodem proudu zahřáty topné články, které ohřejí pracovní prostor pece, ze kterého přestupuje teplo do ohřivaného polotovaru.

Indukční ohřev je v současnosti jeden z nejvyužívanějších druhů ohřevu v hromadné výrobě.

Zdrojem tepla jsou tzv. vířivé proudy. Ty vznikají, jestliže je vodivý materiál umístěn do střídavého magnetického pole, což je zajištěno umístěním polotovaru do dutiny cívky, kterou prochází střídavý proud, viz obr. 18. Při indukčním ohřevu platí tzv. skin efekt, což znamená, že proudová hustota je největší na povrchu a směrem ke středu polotovaru klesá. Pomocí této metody lze také ohřát pouze určitou část polotovaru, čehož se s výhodou využívá také při indukčním kalení. Tato technologie ohřevu se také velmi využívá při výrobě na tvářecích automatech, kdy je přímo za podavačem tyčí umístěn induktor, který zajistí ohřev procházejícího materiálu na požadovanou teplotu. Výhody jsou velká rychlost a účinnost ohřevu.

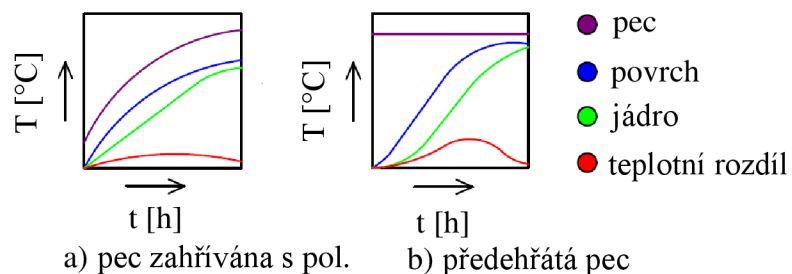


Obr. 18 Indukční ohřev [18]

Proces ohřevu polotovaru je vždy zatížen řadou nežádoucích jevů, zejména tvorbou okují a možností vzniku teplotních trhlin. Obojí lze do jisté míry ovlivnit použitou metodou ohřevu. Vznik okují je způsoben reakcí železa z polotovaru a kyslíku z pecní atmosféry, během které vznikají na povrchu ohřivaného materiálu oxidy. Okuje se tvoří zejména nad teplotou 700 °C. Množství okují je přímo úměrné době ohřevu a lze redukovat například použitím indukčního ohřevu, případně pecí s ochrannou atmosférou. Okuje se tvoří pomaleji, je-li v materiálu přítomen hliník, křemík, chrom, mangan a titan.

Tvorba teplotních trhlin přímo souvisí s rozdílem teplot na povrchu a v jádře polotovaru.

Podstatný vliv na teplotní rozdíl má způsob ohřevu. Je možné umístit polotovar do již předehřáté pece, což zajistí kratší dobu ohřevu, avšak důsledkem je značný teplotní rozdíl. Další možností je zahřívání pece zároveň s polotovarem. Výhodou je malý rozdíl

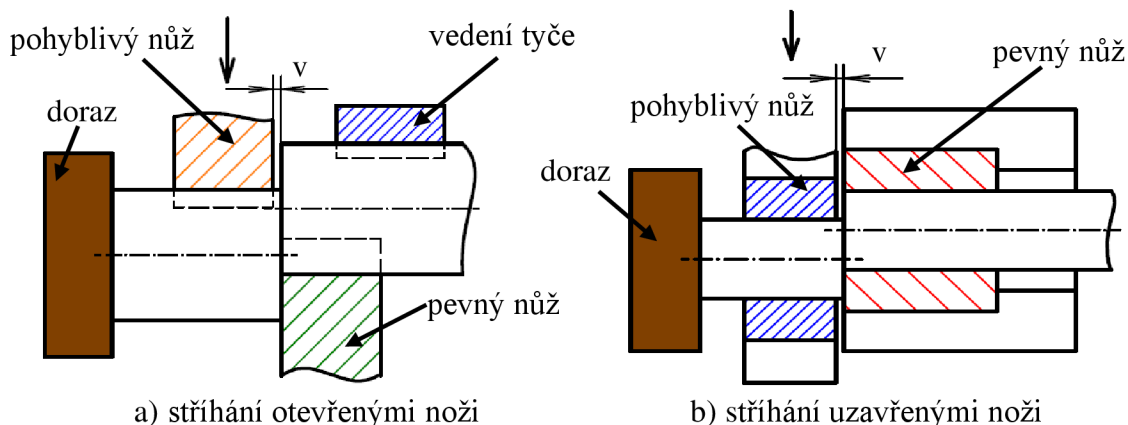


Obr. 19 Teplotní rozdíly [1]

teplot, ale doba ohřevu je delší, což znamená větší množství okují a vyšší náklady na ohřev polotovaru. Ohřev je nutné provést co nejrychleji, kvůli tvorbě okují, ale s ohledem na maximální možný rozdíl teplot povrchu a jádra polotovaru. Graficky jsou tyto teplotní rozdíly znázorněny na obr. 19.

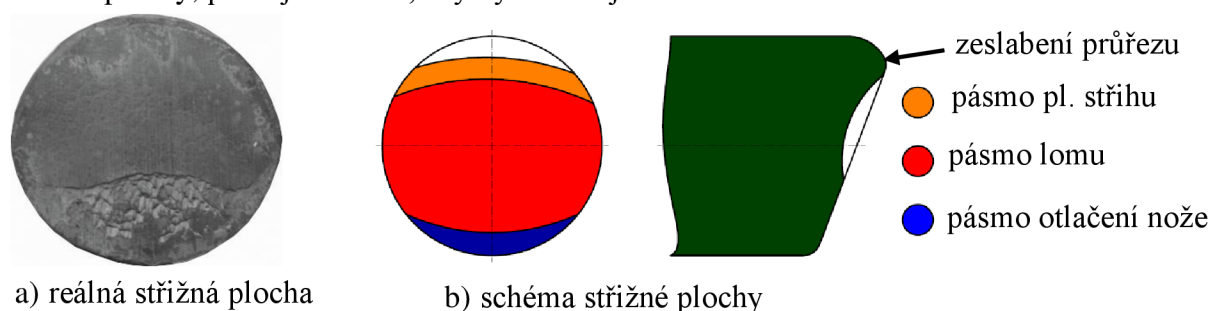
Při běžném zápusťkovém kování na svislých lisech lze pro dělení polotovaru využít technologie řezání, nebo stříhání. Při kování na vodorovném kovací lise nelze použít řezání, neboť vodorovné kovací lisy jsou vybaveny zařízením, které zajišťuje odstřížení polotovaru z tyče.

Objemové stříhání tyčí lze provádět buď s otevřenými noži, nebo s uzavřenými noži. Při stříhání s otevřenými noži je obklopena pouze část stříhané tyče, což způsobuje větší nepřesnosti. U způsobu stříhání s uzavřenými noži je tyč obklopena po celém obvodu. Tato metoda je však nevhodná pro stříhání za tepla, neboť povrch ohřátých tyčí je okujený a průměr tedy kolísá. Mezi noži musí být vždy střížná vůle, která se určuje v závislosti na mezi pevnosti v tahu daného materiálu. Přibližně se pohybuje v rozmezí 1 % až 12 % z průměru tyče. Při stříhání na lisu AMP 30 S jsou použity otevřené nože. Obě metody jsou zobrazeny na obr. 20.



Obr. 20 Stříhání tyčí [16]

Na odstřížené tyči lze najít několik pásem způsobených střížným procesem, viz obr. 21. Při elastické deformaci způsobené prvotním vniknutím nožů vzniká pásmo zeslabení průřezu, které tvoří cca 6 % z průřezu. Další vnikání nožů má za důsledek plastický stříh, což je nejkvalitnější část střížné plochy a tvoří asi 10 % průřezu. V další fázi dochází k odlomení zbylého materiálu. Pásmo lomu zabírá přibližně 80 % z průřezu. Pásmo otlačení nože je 4 % z průřezu. Uvedené velikosti pásem jsou pouze orientační a lze je do značné míry ovlivnit parametry střížného procesu. Při stříhání na stroji Hatebur Hotmatic HM75 XL je například pásmo lomu pouze cca 20 % ze střížné plochy dle literatury [19]. Velikost pásma lomu je klíčovým ukazatelem kvality střížné plochy, proto je vhodné, aby bylo co nejmenší.



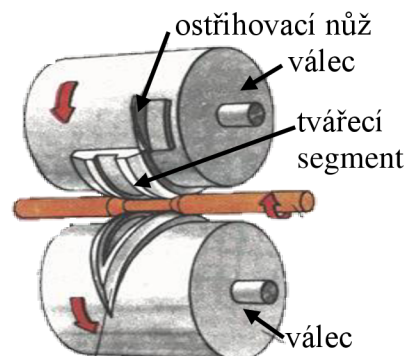
Obr. 21 Střížná plocha [16], [19]

### 2.1.2 Předkování [13], [16], [20]

Před finálním kováním je polotovar předkováván za účelem přiblížení se ke tvaru hotové součásti. Určení rozměrů předkovku lze provést tzv. metodou ideálního předkovku.

Pro určení ideálního předkovku je zapotřebí nejprve určit velikost ploch v důležitých řezech finálního výkovku. V dalším kroku jsou velikosti těchto ploch přepočítány na plochy kruhů a z těchto ploch jsou určeny průměry kruhů. Průměry jsou potom v podobě úseček naneseny na společnou osu a jejich koncové body jsou spojeny.

Jednou z metod zhotovení předkovku je příčné klínové válcování. Materiál je vložen mezi dva válce se stejným směrem otáčení. Na těchto válcích jsou upnuté tvářecí nástroje. Tvářecí nástroje se postupně rozšiřují podél šroubovic (jedné pravotočivé a druhé levotočivé). Nejprve do materiálu vnikne užší část nástrojů a poté dochází k postupnému prodlužování a tvarování vývalku. Na nástrojích jsou plochy redukční a plochy vyrovnávací, které slouží k vyhlazení válcovaných ploch. Nástroje jsou zobrazeny na obr. 22. Součástí nástrojů bývají také nože, které slouží k oddělení vývalku. Životnost nástrojů se pohybuje v rozmezí 60 000 až 150 000 vývalků.



Obr. 22 Příčné klínové válcování [20]

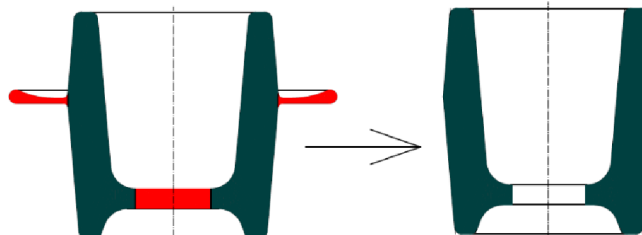
Dále je možné polotovary předkovat pomocí kovacíh válců. Tato technologie je však méně výkonná než technologie příčného klínového válcování. Na hřídelích jsou upevněny zápustky. Mezi zápustky je vložen polotovar, který je vtahován mezi zápustky a dochází k jeho přetvoření. Předkovek je zhotoven na několik průchodů, jelikož se válcuje pouze částí obvodu.

Pro přesné kování a kování na vodorovných kovacíh lisech je využíváno předkování v předkovacím nástroji.

### 2.1.3 Kování a dokončovací operace [1], [10], [12], [21]

Po předkování je provedeno kování vybranou metodou, dle rozdělení v kap. 2. Následují dokončovací operace, jako jsou např.: ostříhování, děrování, rovnání, kalibrování atd.

Ostříhování a děrování jsou operace, jejichž účelem je odstranění výronku, či blány výkovku (obr. 23). Tyto operace jsou většinou prováděny za tepla, ihned po vykování dílce. Pokud materiál polotovaru obsahuje méně než 0,5 % uhlíku je možné tyto operace provádět také za studena. Pro tyto operace se nejčastěji využívá výstředníkových, či ostříhovacích lisů. Konstruují se i sloučená stříhadla, která zajišťují ostřížení i děrování výkovku během jednoho zdvihu stroje.



Obr. 23 Děrování a ostříhování [1]

Do výpočtu ostříhovací síly je zahrnuta pevnost materiálu ve stříhu za ostříhovací teploty, obvod výronku a výška můstku výronkové drážky. Jelikož na sebe střížník a střížnice nedosedají, je potřebná síla násobena koeficientem 1,7. Z důvodu bezpečnosti je ve výpočtu výška můstku dvojnásobně zvětšena.

$$F_{os} = 1,7 \cdot \tau \cdot o_v \cdot 2 \cdot h_v = 1,7 \cdot 0,8 \cdot \sigma_o \cdot o_v \cdot 2 \cdot h_v, \quad (2.3)$$

kde:  $F_{os}$  – ostříhovací síla [N],

$\tau$  – střížný odpor [MPa],

$\sigma_o$  – deformační odpor materiálu při teplotě ostříhování [MPa],

$o_v$  – obvod výronku [mm].

Pro zvýšení přesnosti nebo zlepšení kvality ploch výkovku je v některých případech prováděna operace kalibrování. Tuto operaci je možno provádět za studena i za tepla. Kalibrování za tepla je prováděno za dokovacích teplot, a to ihned po ostříhování výronku (pokud je ostříhováno za tepla). Kalibrování za studena je prováděno až po tepelném zpracování výkovků. Při kalibrování za studena dochází k deformačnímu zpevnění materiálu, a proto je v některých případech nutné kalibrování výkovku tepelně zpracovat. Kalibrováním za studena lze dosáhnout větší přesnosti než kalibrováním za tepla. Existuje plošné a objemové kalibrování. U plošného kalibrování je stlačena dvojice ploch, kdežto u objemového je stlačen celý výkovek. Oba uvedené způsoby je možné také kombinovat.

Další dokončovací operací je rovnání. Výkovky lze rovnat za studena, nebo za tepla. Za tepla jsou většinou rovnány výkovky, u kterých dojde ke zkřivení po kování, či ostříhování a děrování. Výkovky je možné rovnat přímo v dokončovací zápustce. Další možností je rovnání na ostříhovacích lisech za použití rovnacích nástrojů. Rovnání je možné provádět také za studena na bucharech, ostříhovacích lisech, nebo vřetenových lisech.

#### 2.1.4 Tepelné zpracování a povrchová úprava výkovků [10], [12], [22], [23], [24], [25]

Důvody pro tepelné zpracování výkovků jsou zejména: zlepšení obrobitelnosti výkovků, snížení pnutí, zabránění vločkových trhlin a dosažení požadovaných mechanických vlastností. Mezi nejčastěji používané tepelné zpracování zápustkových výkovků patří žihání na odstranění pnutí, žihání na měkko, normalizační žihání, izotermické žihání a zušlechťování.

Účelem normalizačního žihání je získání stejnoměrné struktury, případně také zjemnění struktury. Teplota se pohybuje 30 až 50 °C nad teplotou  $A_3$  (u podeutektoidních ocelí). Výdrž na žihací teplotě je velmi krátká, asi 1 min/ 1 mm tloušťky stěny. Chladnutí probíhá na vzduchu. Používá se zejména pro oceli tříd 12 až 16.

Žihání ke snížení pnutí probíhá za teplot asi 600-630 °C, výdrž je 1-2 hod. Čím vyšší je zvolena teplota, tím menší jsou zbylá pnutí. Ochlazování musí být velmi pomalé, obvykle v peci, aby nevznikla pnutí. Většinou je zařazeno po normalizaci, kdy mohou dosáhnout vnitřní pnutí až třetiny meze kluzu.

Žihání na měkko slouží ke sferoidizaci perlitického cementitu, což vede ke zlepšení obrobitelnosti. U podeutektoidních ocelí je žihací teplota těsně pod  $A_1$ , u nadeutektoidních i nad  $A_1$ . Ochlazování probíhá velmi pomalu v peci, nebo u velmi jednoduchých výkovků z nelegovaných ocelí na vzduchu.

Izotermické žihání se používá u takových materiálů, kde je po normalizačním žihání nutné žihání na měkko. Po izotermickém žihání vznikne rovnoměrná, dobře obrobitelná struktura. Výkovek je nejprve ohřát do oblasti austenitu, na této teplotě je pouze velmi krátká výdrž a následuje poměrně rychlé ochlazení na teplotu izotermické přeměny (teplota z oblasti perlitické přeměny). Správné stanovení teplot vychází z IRA diagramu.

Zušlechťování je operace, která zlepšuje mechanické vlastnosti výkovku. Nejdříve je výkovek zakalen. Kalicí teplota je asi 50 °C nad  $A_1$  (u nadeutektoidních ocelí), nebo nad  $A_3$  (u ocelí podeutektoidních). Následuje rychlé ochlazení na vzduchu, ve vodě, nebo v oleji. Po kalení vznikne tvrdá, málo houževnatá struktura, účelem popouštění je zmenšit tvrdost a zvýšit houževnatost výkovku. Popouštěcí teplota má významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti a je vždy uvedena v materiálovém listu. Po ohřátí na popouštěcí teplotu následuje výdrž asi 2 hodiny a poté ochlazení.

Na závěr výrobního procesu je prováděna povrchová úprava. Mezi používané technologie patří zejména tryskání a omílání.

Podstata technologie tryskání tkví v metání částic abraziva na výkovek. Tím dochází k odstraňování okují a čištění povrchu, viz obr. 24. Tryskacích médií existuje celá řada, např.: ocel ve formě granulátu, či nasekaného drátu, litina, písek, korund atd. Dle metody urychlení abrazivních částic lze tryskací zařízení rozdělit na pneumatická a zařízení s metacími koly, přičemž v hromadné výrobě jsou zejména využívána zařízení s metacími koly. Tryskání lze rozdělit na lehké, důkladné, velmi důkladné a otryskání na vizuálně čistý povrch (označení Sa 1, Sa 2, Sa 2 ½, Sa 3).



a) neotryskaný povrch      b) otryskaný povrch

Obr. 24 Tryskání [24]

Tryskání lze rozdělit na lehké, důkladné, velmi důkladné a otryskání na vizuálně čistý povrch (označení Sa 1, Sa 2, Sa 2 ½, Sa 3).

Omílání je technologie používána hlavně pro výkovky z neželezných kovů menších rozměrů. V bubnu jsou výkovky otírány o omílací médium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , křemičitý písek, porcelánové kuličky, ...). Omílací proces probíhá buď za tepla, nebo za použití kapaliny. Tuto technologii lze také využít pro současné broušení a leštění. Vliv na proces má zejména rychlost otáčení bubnu. Pokud je rychlost příliš velká, tak hrozí nebezpečí poškození výkovků. Jestli je naopak rychlost příliš malá, tak je proces zbytečně pomalý. Používaná zařízení jsou nejčastěji kruhové vibrátory (obr. 25).



Obr. 25 Omílací zařízení [25]

### 2.1.5 Vady výkovků [10], [12], [26]

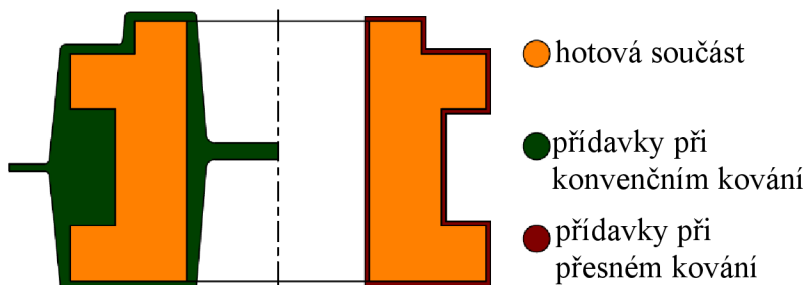
Během celého výrobního procesu výkovku existuje riziko vzniku několika typů vad výkovků. Z obecného hlediska lze vady rozdělit na vnitřní a povrchové. Pro kontrolu výkovků jsou využívány jak nedestruktivní, tak destruktivní zkoušky materiálu. Mezi nejčastěji používané kontrolní prostředky lze zařadit např.: vizuální kontrolu, kapilární zkoušku, ultrazvukovou zkoušku, zkoušku rentgenem atd. Mezi nejčastější vady výkovků lze zařadit např.:

- přeložky – vznikají nejčastěji chybnou konstrukcí nástrojů, chybným ustavením předkovku atp. Přeložky jsou nebezpečné zejména je-li výkovek následně obráběn, neboť hrozí jejich vyštípnutí. V současné době lze vznik přeložek predikovat použitím numerických simulací kovacího procesu.
- přesazení – může být zapříčiněno špatným vedením beranu kovacího stroje, špatným upnutím zápustek nebo chybnou konstrukcí nástrojů. Vzájemný horizontální pohyb zápustek pak znehodnotí výkovek.
- nedokonalé vykování – způsobuje ho špatně zvolený polotovar, či špatně vyrobený předkovek. Další možnou příčinou může být špatně zvolený tvářecí stroj, neboť příliš silný stroj způsobí předčasné tečení kovu do výronku, naopak při použití slabého stroje nedojde k vyplnění dutin zápustek. Další možnou příčinou je opotřebení kovacích nástrojů, či nedodržení kovací teploty.
- otřepy po ostříhování a děrování – jsou vzniklé opotřebenými ostříhovacími a děrovacími nástroji, případně jejich špatnou konstrukcí. Vadné kusy lze opravit broušením.
- prohnutí – dochází k němu při ostříhování či děrování otupenými nástroji. Odstraňuje se dodatečnou rovnací operací.
- trhliny – mohou být způsobeny kovááním přehřáté či spálené oceli. Dále mohou vzniknout příliš velkým teplotním rozdílem jádra a povrchu polotovaru.
- zakované okraje – jsou působeny nedostatečným odstraněním okrajů z předkovku, případně také nedostatečným očištěním kovacích nástrojů.
- přehřátí – nastává, pokud je při procesu teplota delší dobu cca 150 °C pod teplotou tavení materiálu. Dochází k difundování síry na hranice zrn austenitu. To způsobuje zhoršení tažnosti, kontrakce a vrubové houževnatosti. K odstranění se používá difuzní žíhání, nebo dostatečný stupeň prokování.
- spálení – pokud je při výrobním procesu dosaženo teploty tavení materiálu dochází k natavení austenitických zrn, do kterých difunduje síra a fosfor, což zapříčiňuje zhoršení mechanických vlastností. Spálení nelze nijak odstranit.
- oduhlíčení – lze podstatně ovlivnit pecní atmosférou při ohřevu, dobou a teplotou ohřevu. Na míru oduhlíčení má také vliv materiál výkovku. Pro zamezení oduhlíčení lze použít ochranné pecní atmosféry.
- povrchové trhliny – jsou způsobeny nízkou kovací teplotou.

## 2.2 Přesné kování [27], [28], [29], [30]

Technologie přesného kování má řadu výhod, mezi které patří zejména úspora materiálu oproti konvenčnímu zápustkovému kování. Další nespornou výhodou je větší rozměrová přesnost a tím pádem pouze malé přídavky na obrábění. Lze dosáhnout výrobní tolerance  $\pm 0,25$  mm. Při aplikování některé z technologií přesného kování je možné ušetřit přibližně 20 až 40 % materiálu (obr. 26) a podstatnou část dokončujících operací. S technologiemi přesného kování je spjata potřeba preciznosti celého procesu. Je zapotřebí zachovat přesnost objemu tvářeného polotovaru s odchylkou  $\pm 0,5$  až  $\pm 1$  %. Dále je nutné klást důraz na přesnost výroby kovacích nástrojů, jelikož

menší tolerance výkovku znamenají menší tolerance na nástrojích. Důležité je také přesné seřízení kovacího stroje. Nutné je rovněž zajistit konstantní tribologické podmínky procesu, což je zajišťováno



Obr. 26 Přídavky u přesného a konvenčního kování [27]

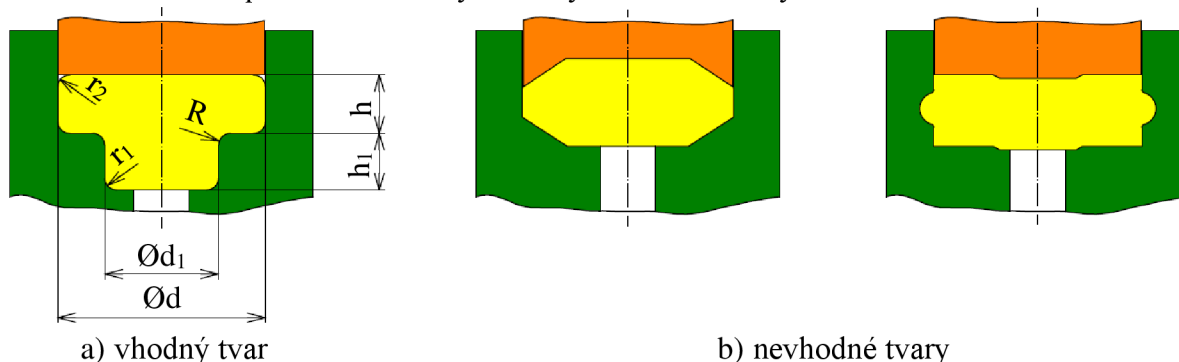
automatizací nanášením maziva. Teplota ohřátého polotovaru musí být dodržena s odchylkou  $\pm 10$  až  $\pm 20$  °C a musejí být použity technologie, které zaručují minimální tvorbu okují. Docílit dodržení všech požadavků pro procesy přesného kování je finančně nákladné. Je tedy zapotřebí vždy zvážit, zda ušetřené náklady budou převyšovat náklady spjaté s přesným kovááním.

Existuje několik používaných metod přesného kování:

- kování v uzavřených nástrojích – jedná se o kování v nástrojích, které nemají výronkovou drážku. Metoda je použitelná pro menší výkovky ze železných kovů a pro střední a velké výkovky z neželezných kovů. Často je využíváno na vodorovných kovacích lisech.
- kování s horní vrtivou zápustkou – speciálně konstruovaný lis zajišťuje vrtivý pohyb horní zápustky. Zápustka tak působí jen na určitou část výkovku. Dochází také ke zmenšení tření. Potřebná síla je až patnáctkrát menší než u konvenčního zápustkového kování. Využívá se i při kování za studena.
- izotermické kování – používá se zejména pro výkovky z barevných kovů. Využívá se superplastické deformace materiálu. Značnou nevýhodou je vysoké teplotní namáhání nástrojů.

### 2.2.1 Kování v uzavřených nástrojích [14], [27], [28], [29], [31]

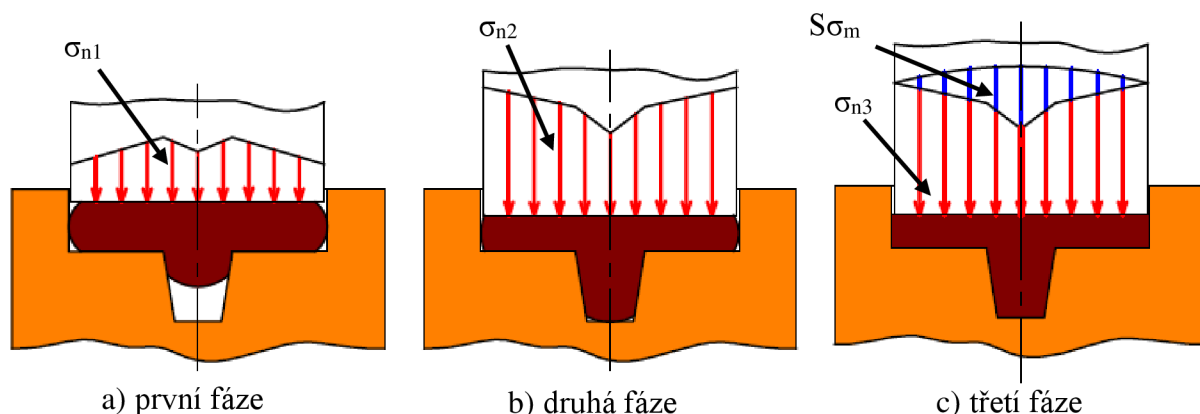
Prvním typem nástrojů používaných pro tuto technologii jsou nástroje, kde výkovek vzniká v dutině nástroje, která je uzavřena pouze razníkem a vyhazovačem. Využití této technologie je omezeno na jednodušší tvary výkovků (obr. 27a). Ideální je rovná, či kuželová boční plocha. Nevhodné jsou výstupky a osazení na bočních plochách, které znemožňují vyrazení výkovku, viz obr. 27b. Čelní plocha razníku by měla být kolmá k ose výkovku.



Obr. 27 Výkovky pro kování v uzavřeném nástroji [14], [27]



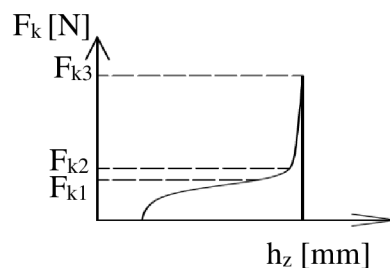
Tvářecí proces kování v uzavřené dutině lze rozdělit na tři fáze a bude podrobněji popsán na příkladu kování výkovku s výstupkem dle obr. 28.



Obr. 28 Fáze přesného kování v uzavřených nástrojích [27]

Nejprve dochází k volnému pěchování materiálu. Již v této fázi dochází k tečení materiálu do výstupku. Normálové napětí  $\sigma_{n1}$  roste směrem ke středu výkovku, ale v oblasti přechodu k výstupku napětí klesá. Jakmile dojde k dotyku výkovku a stěn nástroje, začíná druhá fáze procesu, během které materiál teče za působení tvářecí síly zejména směrem do výstupku v nástroji. Normálové napětí  $\sigma_{n2}$  v této fázi klesá směrem do středu výkovku. Od přechodu do výstupku klesá normálové napětí rychleji. V poslední fázi jsou vyplňovány ostré rohy v zápustce. Při započítání kontaktního tření vzroste napětí  $\sigma_{n3}$  na hodnotu  $S\sigma_m$ .

Průběh tvářecí síly v závislosti na dráze nástroje má u technologie kování v uzavřených nástrojích velmi nepříznivý průběh. Během první fáze tvářecího procesu, který byl popsán výše, síla vzroste na hodnotu  $F_1$ . Při dalším posunu nástroje tvářecí síla mírně vzroste na hodnotu  $F_2$ . V poslední fázi kování, kdy dochází k dotlačení materiálu do rohů zápustky tvářecí síla markantně vzroste na hodnotu  $F_3$ . To je způsobeno tím, že materiál je do rohů dotlačován na velmi krátké dráze nástroje. Velikost tvářecí síly také do značné míry ovlivňuje tvarová složitost daného výkovku. Ke zvýšení dochází také při zmenšování zaoblení na kovaném dílci. Kovací síla se razantně zvýší, pokud dojde k zaplnění tvarové dutiny zápustky a razník dále působí na výkovek. Tím dojde k tečení materiálu do vůle mezi razníkem a zápustkou, což má za následek vznik tzv. listového výronku, který velmi rychle chladne. Průběh tvářecí síly je znázorněn na obr. 29. Tvářecí sílu pro kování v uzavřených nástrojích je možno spočítat pro výkovek dle obr. 27a pomocí následujících vzorců:



Obr. 29 Závislost  $F_k(h_z)$  [27]

$$F_k = C \cdot k_p \cdot S, \quad (2.4)$$

kde:  $F_k$  – kovací síla [N],  
 $C$  – součinitel zvýšení přetvárného odporu [-],  
 $k_p$  – přetvárný odpor při kovací teplotě [MPa],  
 $S$  – půdorysná plocha výkovku [mm<sup>2</sup>].

Součinitel  $C$  je možné určit dle Petržely (vztah 2.5), nebo Smirnova – Aljajeva (vztah 2.6).

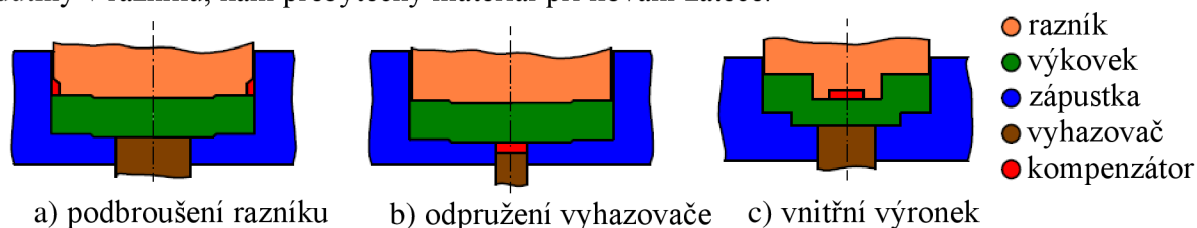
$$C_p = 1,53 \cdot \left( \ln \left( \frac{0,47 \cdot d}{r} \right) + \left( \frac{d_1}{d} \right)^2 \cdot \ln \left( \frac{0,47 \cdot d_1}{r_1} \right) + 2 \cdot \frac{f}{d} \cdot \left( h + \frac{d_1}{d} \cdot h_1 \right) \right), \quad (2.5)$$

kde:  $C_p$  – součinitel zvýšení přetvárného odporu dle Petržely [-],  
 $d, d_1, r, r_1, h, h_1$  – veličiny dle obr. 27a [mm],  
 $f$  – koeficient tření [-].

$$C_{SA} = A + B \cdot \frac{d}{h} + \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{h_1}{d_1} + \frac{h}{d} \right), \quad (2.6)$$

kde:  $C_{SA}$  – součinitel zvýšení přetv. odporu dle Petržely Smirnova – Aljajeva [-],  
 $A, B$  – koeficienty [-].

Při kování v uzavřených nástrojích je zapotřebí tzv. kompenzátorů přebytečného materiálu. Jde buď o dutinu v nástroji, případně o odpružení některé části nástroje. Kompenzátory přebytečného materiálu je nutné umístit tak, aby bylo možno přebytečný materiál lehce odstranit. Na obr. 30 jsou znázorněny tři možné konstrukční varianty kompenzátorů kovu. První z variant je podbroušení razníku, kdy přebytečný materiál zateče do vybroušeného osazení na obvodu razníku. Další možnou variantou je kompenzace pomocí odpružení vyhazovače. Poslední znázorněnou variantou je tzv. kování s vnitřním výronkem, což spočívá ve zhotovení dutiny v razníku, kam přebytečný materiál při kování zateče.



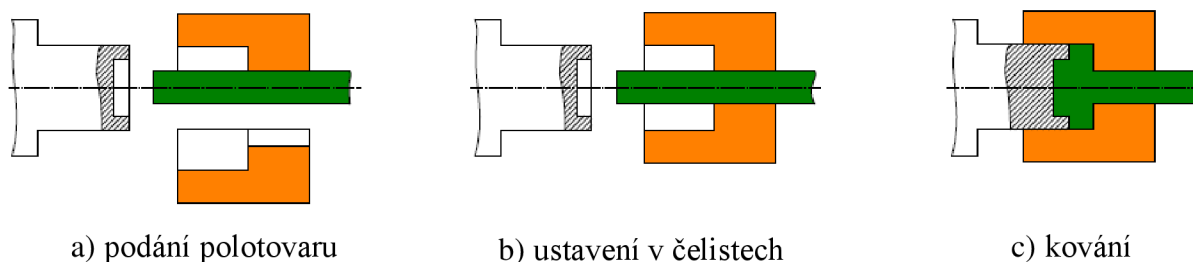
Obr. 30 Kompenzátory materiálu [27]

Pokud není z konstrukčního či technologického hlediska možná aplikace kompenzátoru materiálu, je možné využít tzv. nástroj s protitlakem. Výkovek je pak zhotoven v zápustce mezi dvěma razníky.

Pro velmi složité tvary výkoveků je zapotřebí využít uzavřené nástroje se selektivními pohyby jednotlivých částí. Princip této technologie je založen na rozdělení toku materiálu v nástroji. To má za následek snížení tlaků v nástroji. Nástroj je rozdělen na několik pohyblivých částí. Tato technologie nachází využití hlavně při kování velkých sérií velmi přesných tvarově složitých výkoveků, například v automobilovém průmyslu. Lze dosáhnout přesnosti IT7 až IT9 za standardních kovacíh teplot. Mezi výkovky zhotovené pomocí nástrojů se selektivními pohyby jednotlivých částí lze zařadit hlavně ozubená kola, jež jsou kována včetně ozubení. Konstrukce takovýchto nástrojů je však velmi náročná, neboť kvalita procesu závisí na tlacích, rychlostech a směrech pohybu jednotlivých částí nástroje. Pro tyto nástroje jsou používány klikové a pákové mechanismy, různé pružiny a vícečinné lisy.

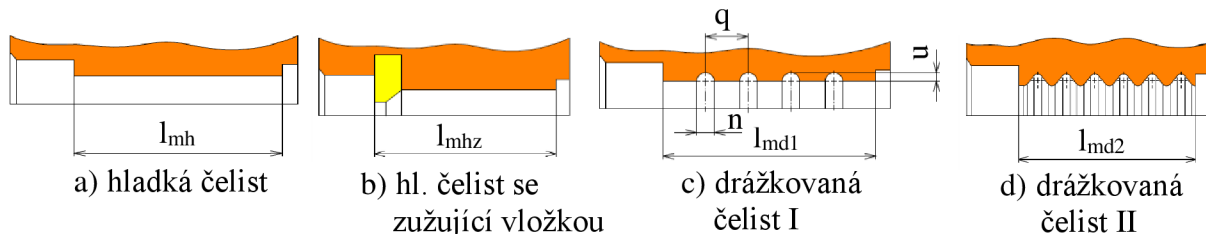
### 2.2.2 Kování v uzavřených nástrojích na vodorovných kovacích lisech [12], [27], [32], [33]

Kování na vodorovných lisech je využíváno zejména pro výrobu součástí určených pro automobilový průmysl, jako jsou např.: vačky, ložiskové kroužky atp. Jako polotovary jsou využívány špalíky nebo tyče, které jsou v samotném kovacím lisu děleny na špalíky. Velkou výhodou oproti kování na svislých lisech je možnost děrování blány přímo v kovacím stroji. Ukázka kování v uzavřených nástrojích na vodorovných lisech je uvedena na obr. 31. Nejprve je polotovary v podobě tyče podán do nástroje, následně je ustaven v čelistech. Po ustavení v čelistech proběhne kování. Zhotovený výkovek je možno z tyče oddělit např. stříháním, či řezáním.



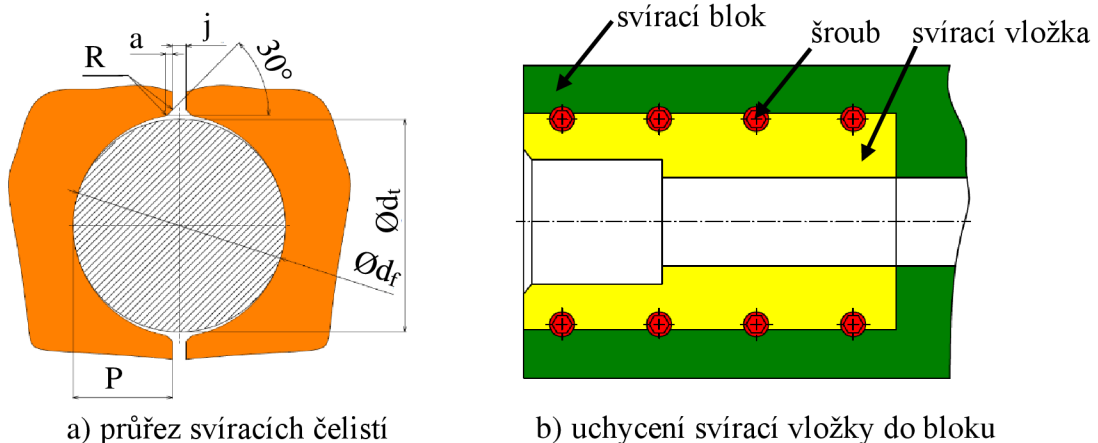
Obr. 31 Ukázka kování na vodorovném lisu [32]

Kovaný polotovár je před kovááním nutno sevřít v tzv. svíracích čelistech. Jedna čelist je pevná a druhá pohyblivá. Existuje několik konstrukčních variant svíracích čelistí, které se liší nutnou minimální délkou dutiny. Nejjednodušší na výrobu je varianta hladkých čelistí (obr. 32a), avšak je zapotřebí nejdelší dutiny ze všech variant. Další variantou je hladká svírací čelist se zužující vložkou, viz obr. 32b. Pro zkrácení nutné délky dutiny jsou používány svírací čelisti s drážkami. Brzdící drážky mají různou geometrii, např. dle obr. 32c a obr. 32d. Při použití drážkovaných čelistí ale vznikají vtačeniny na polotovaru. Výpočty veličin z obr. 32 jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 32 Svírací čelisti [12]

Vnitřní průřez svíracích čelistí je zobrazen na obr. 33a. Mezi pohyblivou a pevnou čelistí je při sevření mezera o šířce  $f$ . Kvůli zamezení skřípnutí tyče jsou hrany sraženy a zaobleny. Potřebný průměr otvoru v čelistech je určován na základě výrobní tolerance a průměru tyče. V příloze 1 jsou uvedeny vzorce pro výpočet rozměrů z obr. 33a. Vložky jsou upevňovány pomocí šroubů do tzv. svíracích bloků, viz obr. 33b.



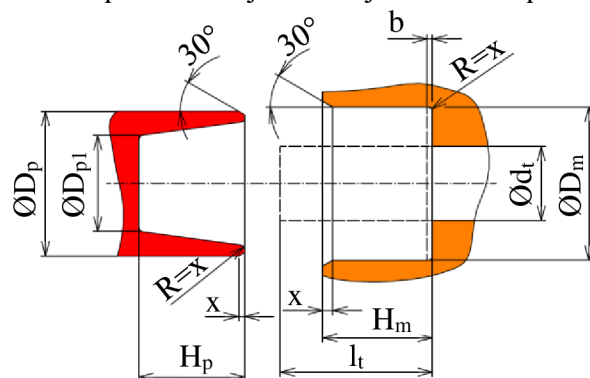
a) průřez svíracích čelistí

b) uchycení svírací vložky do bloku

Obr. 33 Průřez svíracích čelistí a uchycení do bloku [12], [33]

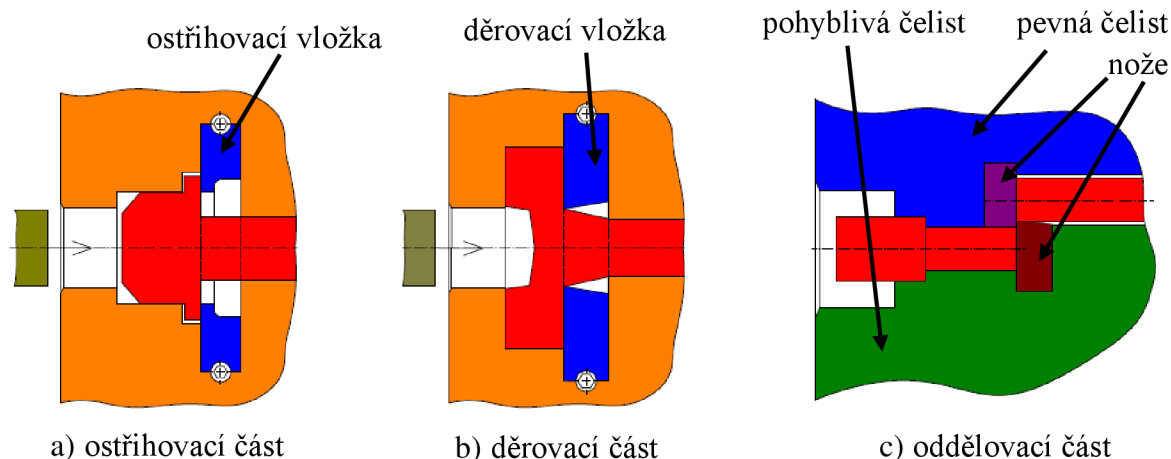
Zápustka pro kováání na vodorovných kovacíh lisech má několik důležitých částí, a to konkrétně část pěchovací, děrovací, ostřihovací a oddělovací.

Pěchování probíhá jako první operace. Účelem pěchování je odokujení a také patřičná úprava tvaru polotovaru pro snadnější zhotovení finálního výrobku. Průměr pěchovací části zápustky (obr. 34) je určován v závislosti na průměru použité tyče. Proces pěchování nesmí začít, dokud není razník zasunut v zápustce. Proto se hloubka pěchovací části zápustky určuje dle hloubky dutiny v razníku  $H_p$  a délky pěchované části výrobku  $l_t$ . Horní průměr dutiny razníku  $D_{p1}$  je vždy o 0,5 až 3 mm větší než průměr tyče  $d_t$ . Po napěchování musí být mezi razníkem a zápustkou vůle  $b$ , která brání dosednutí nástrojů, aby nedošlo k jejich poškození. Výpočetní vztahy uvádí příloha 2.



Obr. 34 Pěchovací část zápustky [12]

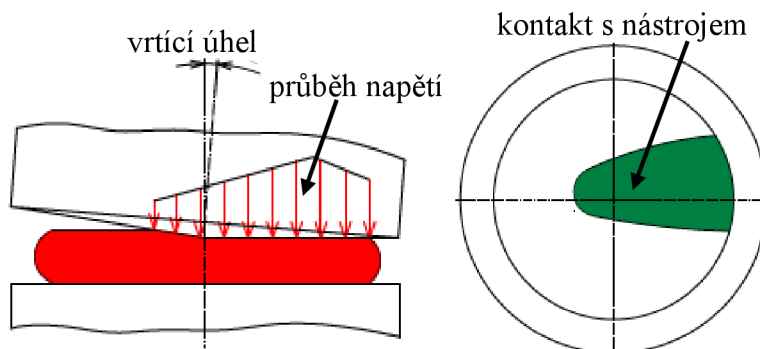
V ostříhvací části zápustky dochází k odstranění výronku z výkovku. Výkovek je ustaven v dutině zápustky a za tvarovou dutinou je do bloku našroubována ostříhvací vložka, jak je vidět na obr. 35a. Poté razník tlačí na výkovek, čímž dojde k ostřížení výronku. Obdobný princip je uplatněn i u operace děrování, při které je děrován předkovaný otvor výkovku (viz obr. 35b). Další používanou operací je oddělení výkovku z tyče, což je zajištěno sevřením čelistí osazených noži obr. 35c.



Obr. 35 Ostatní zápustky pro vodorovné kovací lisy [12]

### 2.2.3 Kování s horní vrtivou zápustkou [27], [28], [34]

Technologie kování s horní vrtivou zápustkou je využitelná zejména pro menší rotační výkovky a probíhá za studena i za tepla. Použití této metody u kování za studena umožňuje dosáhnout odchylek 0,1 až 0,03 mm a přetvoření až 70 % bez žíhání. Princip spočívá v omezení styku horní zápustky pouze na určitou část polotovaru v jeden okamžik, čehož je dosaženo vrtivým pohybem zápustky, viz obr. 36. U konvenčních metod je horní zápustka v kontaktu s celou plochou polotovaru. U této technologie na polotovar nepůsobí tření kluzné, nýbrž valivé, což usnadňuje tok materiálu. Tyto aspekty pak ústí v potřebu mnohem menší tvářecí síly oproti konvenčním technologiím a také dobré vyplnění tvarové dutiny spodní zápustky. Při kování s kyvnou zápustkou nevznikají velké otřesy jako u ostatních technologiích. Další výhodou je krátký seřizovací čas. Velkou nevýhodou je nutnost speciálního lisu, který zajistí kyvný pohyb zápustky. Odvalování zápustky může také zapříčinit vznik trhlin ve středu výkovku.



Obr. 36 Princip kování s vrtivou zápustkou [27]

Existují čtyři druhy pohybu horní zápustky:

- kruhový pohyb – je používán zejména pro rotační výkovky,
- přímočarý pohyb – hodí se pro nerotační dílce, jako např. ozubené tyče,
- vícelistový pohyb – používá se pro ozubená kola a části spojek,
- spirálový pohyb – slouží pro dobré tvarování střední části výkovku (tlusté příruby).

Vrtící úhel se při kování za tepla pohybuje v rozmezí 2 až 8 ° a při tváření za studena 1,5 až 2 °. S větším úhlem se zkracuje výrobní čas, ale zhoršuje se rovinnost, boční házení výkovku a také se zvyšuje příčné namáhání tvářecího stroje. Při větším vrtícím úhlu je kratší doba styku materiálu a nástroje, tedy u tváření za tepla je nástroj méně tepelně namáhán.

### 2.2.4 Izotermické kování [27], [28]

Izotermické kování je technologie patřící mezi metody superplastického tváření. Díky superplastickému chování je dosahováno značných přetvoření. Tažnost při superplastickém chování vzroste o několik řádů. Superplasticita nastává až od určité teploty (různé dle materiálu). Proto je tato technologie omezena pouze na tváření materiálů, u kterých dochází k superplasticitě při dostatečně nízkých teplotách, jako jsou např.: slitiny Ni, slitiny Ti, slitiny Zn-Al a slitiny Al-Cu.

Jsou rozeznávány tři základní druhy superplasticity:

- transformační superplasticita – projevuje se při fázových přeměnách u polymorfních materiálů.
- izotermická superplasticita – pro tento typ je nezbytné, aby měl materiál ultrajemná zrna. Dále je zapotřebí teploty tváření alespoň 40 % z teploty tavení a nízká rychlost deformace. V praxi je nejvíce využívána.
- subkritická superplasticita – doposud méně prozkoumaná. Probíhá v okolí teplot fázové přeměny.

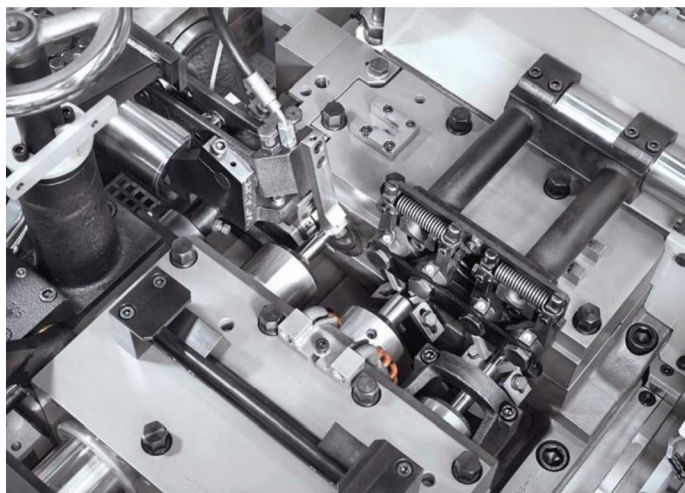
Při konvenčním kování je kovaný dílec v kontaktu s nástroji, které mají nízkou teplotu. Tím dochází ke značnému ochlazování výkovku, což má za následek růst deformačního odporu, a tedy i tvářecí síly. Tento problém lze odstranit ohřátím kovacího nástroje až na kovací teplotu a zajištění udržení stálé teploty. Nástroje jsou ohřívány buď indukčně, nebo odporově.

Izotermický proces kování má řadu výhod, mezi které patří zejména: značné snížení tvářecí síly, možnost většího přetvoření v jedné operaci, zvýšená rozměrová přesnost, reprodukovatelná homogenní struktura. Naopak nevýhodou je značné tepelné namáhání nástrojů, které musejí být vyrobeny z velmi kvalitních žárupevných materiálů. Další nevýhodou je pak nutnost malé rychlosti deformace, kterou zajišťují speciální hydraulické lisy.

### 2.3 Tvářecí automaty [3], [32], [35]

Tvářecí automaty jsou stroje s vodorovným uspořádáním a s dělicí rovinou ve vertikálním směru. Jsou využívány především k výrobě šroubů, matic, vaček, nýtů, čepů, předkovek pro ložiskové kroužky atd. Mezi výrobce těchto strojů patří např.: Hatebur Umformmaschinen AG a Šmeral Brno, a.s. Jedná se o vysoce produktivní stroje, které jsou schopny vyrobit více než 100 výrobků za minutu.

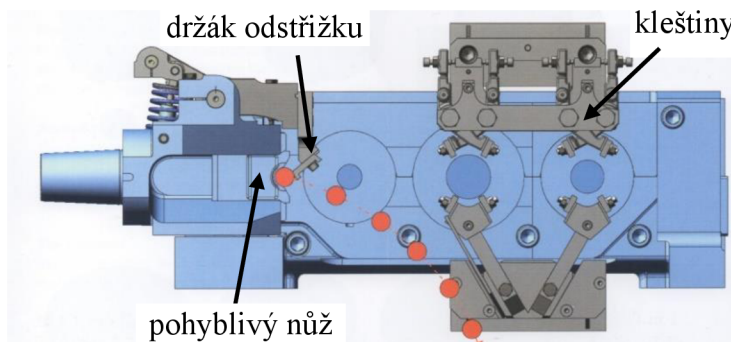
Princip výroby na tvářecích automatech spočívá ve sledu tvářecích operací, jejichž výsledkem je požadovaný kus. Jako polotovary jsou používány tyče, které jsou v první operaci děleny na požadované špalíky pomocí pevného a pohyblivého nože (princip dělení je blíže popsán v kapitole 2.1.2). Poté následují tvářecí operace. Značnou výhodou je také možnost implementování děrovací operace, je tedy možné vykovat například přesný předkovek pro ložiskový kroužek s již prostříženým otvorem. Počet tvářecích stanic u strojů od výrobce Hatebur Umformmaschinen AG pro tváření za studena se pohybuje mezi pěti a sedmi.



Obr. 37 Pracovní prostor tvářecího automatu [35]

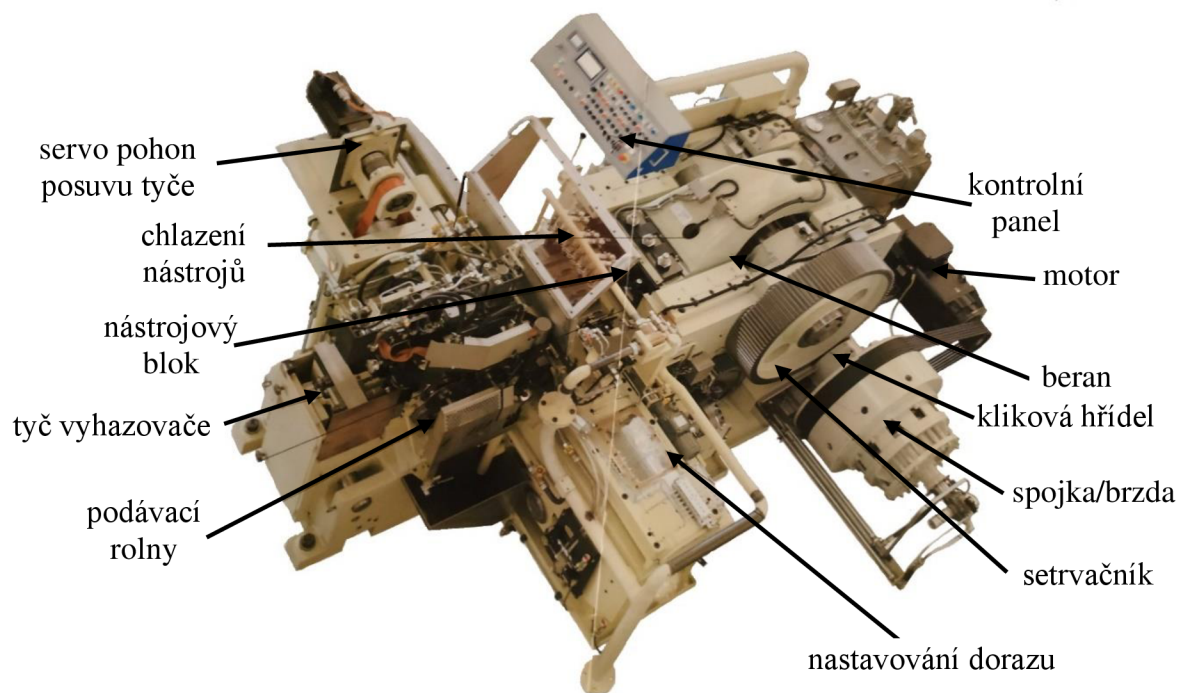
Stroje pro tváření za tepla mají tři až čtyři tvářecí stanice. Pracovní prostor tvářecího automatu Hatebur je zobrazen na obr. 37.

Pro výrobu dílců na těchto strojích je nutné, aby byl polotovar z každé tvářecí operace automaticky přenesen k další tvářecí stanici. Pro automatické přenášení jsou použity dva systémy, které jsou zobrazeny na obr. 38. Mezi stanicí, kde probíhá dělení polotovaru a první tvářecí operací je přenos zajištěn pomocí pohyblivého nože a držáku odstřížků. Mezi ostatními operacemi je polotovar přenášen kleštinami. Přenos výrobku na správnou pozici má zcela zásadní vliv na přesnost vyráběných dílců, proto je vždy nutné správné seřízení systémů pro přenos dílce.



Obr. 38 Přenášení polotovaru [3]

Dílec řešený v rámci diplomové práce je vyráběn na tvářecím automatu HOTmatic AMP 30s (obr. 39). Z toho důvodu budou blíže popsány tvářecí automaty od výrobce Hatebur Umformmaschinen AG.



Obr. 39 Popis stroje HOTmatic AMP 30s [3]

Krouticí moment z elektromotoru je pomocí řemenů přenášen na setrvačnick, který je spojen s brzdou a spojkou. Všechny pohyby jsou řízené pomocí vačkové hřídele a tvary vaček jsou rozhodující pro pohyb všech částí lisu. Stroj je také vybaven jednotkou pro nastavení dorazu. Setrvačnick pohání klikovou hřídel. Na obr. 39 je možné vidět tyč vyhazovače, jejíž pohyb je rovněž řízen pomocí vaček. Nástrojový blok obsahuje celkem tři tvářecí stanice a je vybaven také mechanickými senzory, které mají kontrolovat, zda po předešlé tvářecí operaci nezůstal výkovek na razníku.

Lis musí být také vybaven automatickou kontrolou konců tyčí, což spočívá v automatickém rozpoznání konců zpracovávané tyče. Pokud by nebyl detekován konec tyče, mohlo by dojít ke kování ze zbytku tyče a odstřížku nové tyče. Stroje Hatebur jsou vybaveny systémem ESA, který je založen na laserovém snímání. Při detekování konce tyče nedochází k přenosu odstříženého špalíku, ale k propadnutí odstřížku, jak znázorňuje obr. 38. Stroj je dále vybaven senzory pro měření celkové tvářecí síly.

## 2.4 Numerické simulace [36], [37], [38]

Použití numerických simulací tvářecích procesů usnadňuje tvorbu geometrie funkčních částí tvářecích nástrojů. Značným pozitivem je možnost predikovat různé výrobní vady, jako například přeložky, či nedokonalé vykování. Dále je pomocí simulací možno přibližně určit velikost potřebné tvářecí síly. Z těchto důvodů jsou numerické simulace tvářecích technologií v současné době hojně využívány.

Existuje mnoho numerických metod využitelných pro simulace tvářecích procesů, jako například: metoda konečných prvků, metoda konečných objemů, metoda oddělených prvků, metoda hraničních prvků atd. Pro kování je využívána zejména metoda konečných prvků a také metoda konečných objemů.

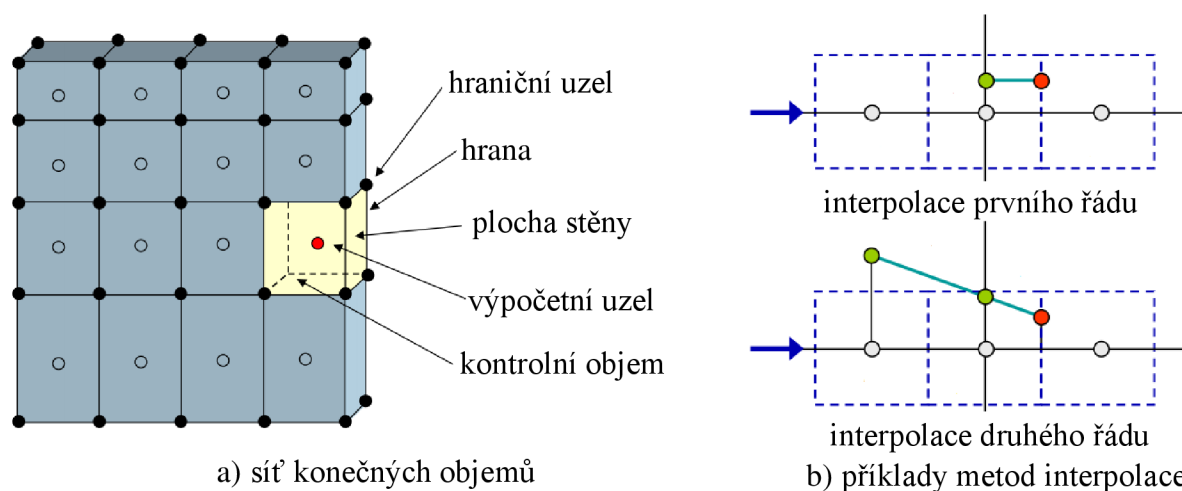
Simulační proces má tři hlavní fáze. Nejdříve je proveden tzv. preprocessing. Tato část spočívá v prvotním nastavení a definování simulace. V této fázi je definována geometrie tvářecích nástrojů a polotovaru, volba materiálového modelu, nastavení třecích podmínek procesu atd. Následuje fáze processingu, ve které probíhá samotný výpočet. Poslední fází je postprocessing, neboli zpracování potřebných výsledků simulace.

### 2.4.1 Metoda konečných objemů (MKO) [39], [40], [41]

MKO byla nejdříve využívána zejména pro výpočty v oblasti proudění kapalin. Potom se začala využívat i pro simulace tvářecích procesů probíhajících za tepla, jelikož ohřátý materiál lze jistým způsobem připodobnit ke kapalině. Tok materiálu je počítán pomocí rovnic používaných v hydrodynamice, jako jsou např.: Navier-Stokesovy rovnice, rovnice kontinuity atd.

Celý objem simulovaného dílce je rozdělen na síť konečného počtu kontrolních objemů. Základní prvky sítě konečných objemů lze rozdělit na 2D a 3D prvky. 2D prvky mají trojúhelníkový, či čtvercový tvar. Mezi trojrozměrné prvky patří např.: čtyřstěny, šestistěny atd. Kontrolní objem je ohraničen hraničními uzly a uprostřed je tzv. výpočetní uzel, ve kterém probíhají potřebné výpočty. Síť konečných objemů popisuje obr. 40a.

Hodnoty na stěnách jsou získány pomocí interpolačních metod. Jednou z používaných metod je interpolace prvního řádu, která předpokládá, že hodnota na stěně je totožná jako hodnota ve výpočetovém uzlu. Další metodou je interpolace druhého řádu, viz obr. 40b. Dle této metody se hodnota na stěně vypočítá z hodnot dvou sousedních výpočetových uzlů. Metoda interpolace má značný vliv na přesnost výsledku simulace.



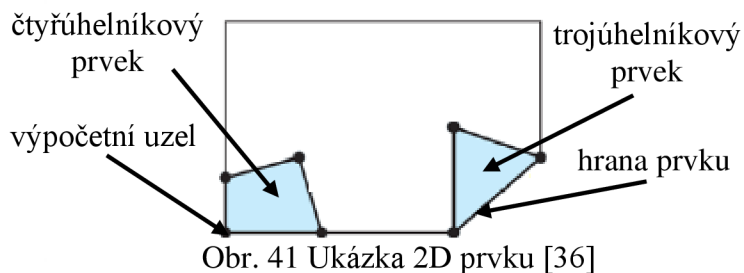
a) síť konečných objemů

Obr. 40 Síť konečných objemů a metody interpolace [39]

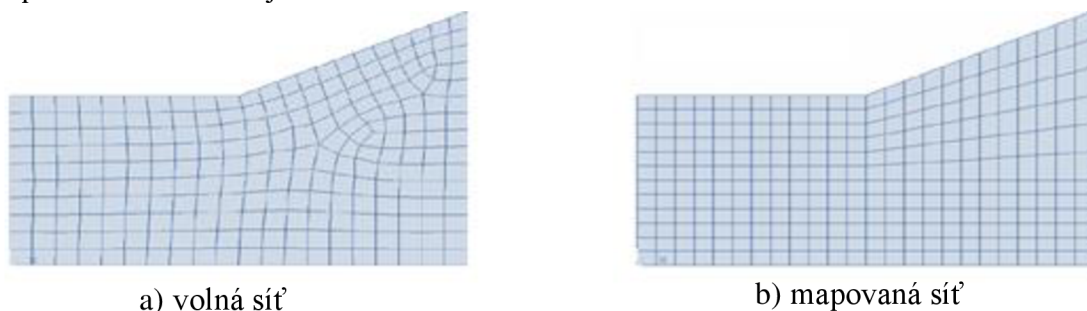
Značnou výhodou metody konečných objemů je menší HW náročnost pro výpočet a rychlejší výpočty oproti metodě konečných prvků. Tuto metodu využívá např. program ANSYS Fluent nebo Simufact forming.

## 2.4.2 Metoda konečných prvků (MKP) [36], [37], [42], [43]

Metoda konečných prvků spočívá v rozdělení řešeného dílce na prvky o konečných rozměrech. Rozdělení tělesa na síť konečných prvků je označováno pojmem diskretizace. Prvky výpočtové sítě lze obdobně jako u MKO rozdělit dle dimenzionality na 1D, 2D a 3D. 2D prvky jsou čtvercové, či trojúhelníkové (obr. 41). K 3D prvkům se řadí: šestistěny, pětistěny, čtyřstěny a skořepiny. Další rozdělení konečných prvků je spjato s počtem výpočetních uzlů. Lineární prvky mají výpočtové uzly pouze v místech styku hran, kdežto kvadratické mají navíc výpočetní uzel uprostřed každé hrany.



Kvalita konečnoprvkové sítě je zcela rozhodujícím faktorem pro přesnost výsledků a stabilitu simulace. Síť konečných prvků lze rozdělit na volné a mapované. Volné sítě jsou tvořeny automaticky přímo v simulačním softwaru, avšak mohou nastat případy, kdy je jejich kvalita nedostatečná pro danou úlohu. Mapované sítě jsou tvořeny manuálně ve specializovaných softwarech (např.: MSC Apex, ANSYS meshing). Jejich tvorba je náročnější, což je vyváženo kvalitou výpočetní sítě. V mnoha případech je také nutné síť v jistých oblastech, kde dochází k velkému přetvoření zjemnit oproti zbytku sítě. Rozdíl mezi volnou a mapovanou sítí ilustruje obr. 42.



Obr. 42 Volné a mapované sítě konečných prvků [36]

Dalším rozhodujícím prvkem ovlivňujícím kvalitu konečnoprvkové sítě je počet použitých prvků. Obecně lze konstatovat, že čím větší je počet prvků, tím přesnější je výsledek simulace. Toto pravidlo lze ovšem aplikovat pouze do určitého počtu prvků, neboť při použití jistého množství prvků již nedochází ke zpřesňování výsledku, jak uvádí obr. 43. Při volbě počtu prvků (velikosti sítě) je nutné také uvažovat prodlužování výpočtového času s rostoucím počtem prvků. Z uvedených důvodů je tedy vždy nutné vhodně zvolit počet prvků tak, aby přesnost výsledku byla vyhovující a výpočtový čas nebyl zbytečně dlouhý.

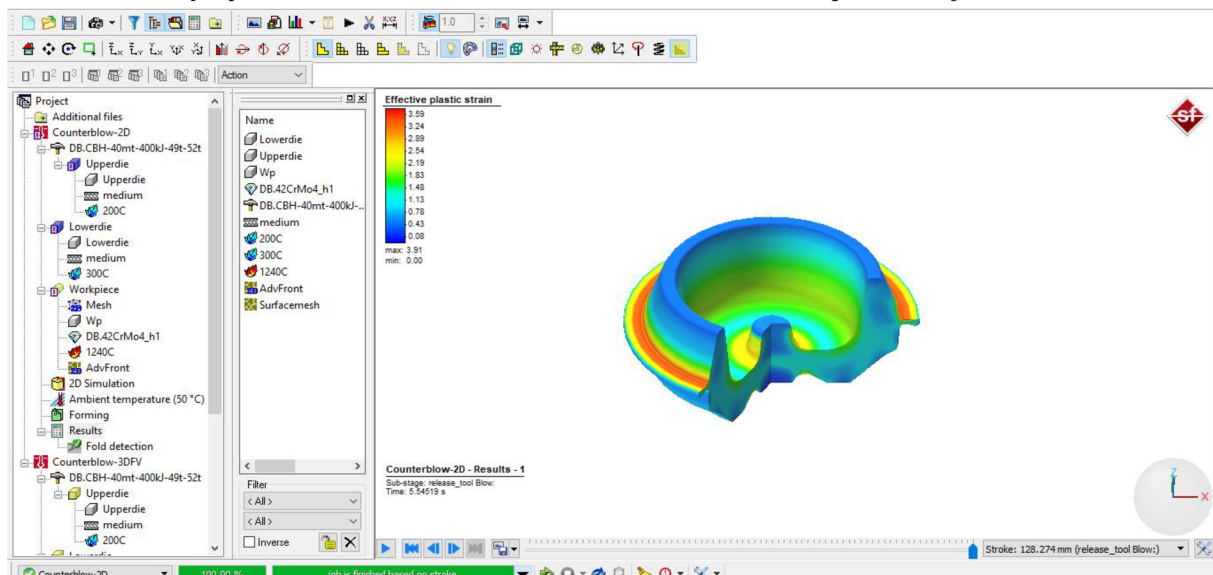


## 2.4.3 Simulační softwary [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]

Programy pro vytváření simulací se dělí na specializované a univerzální. Univerzální softwary umožňují provádět simulace pro širokou škálu technologií, naproti tomu specializovaný software je zaměřen primárně na jednu technologii. Níže je uveden stručný popis vybraných softwarů.



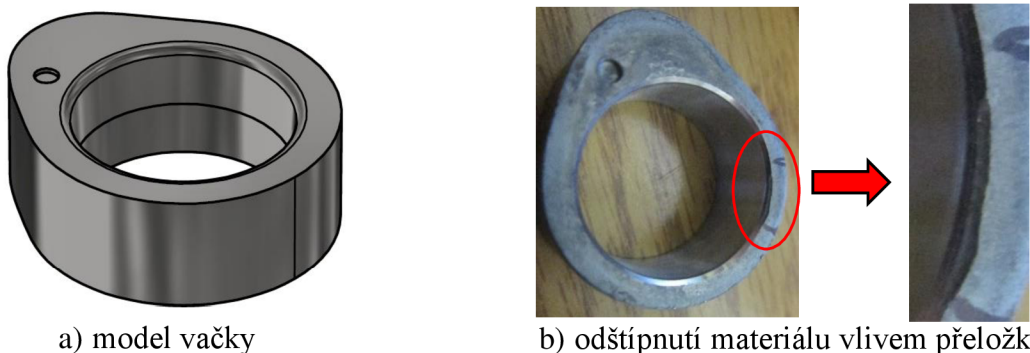
- Univerzální software
  - ANSYS – slouží pro simulace v oblasti tváření, proudění (ANSYS Fluent), elektromagnetických polí (ANSYS Maxwell) atd. Pod společností ANSYS je také licencován řešič LS DYNA, který slouží pro napěťově-deformační analýzy, tedy mimo jiné i k simulacím kování. Tento řešič je používán i pro vysoce dynamické děje, jako jsou např. crash-testy v automobilovém průmyslu.
  - Abaqus – je vyvíjen společností Dassault Systèmes. Jedná se, podobně jako v případě ANSYSU o program, který umožňuje řešit nejrůznější inženýrské problémy. Kromě tvářecích simulací lze mimo jiné simulovat např.: vedení tepla, vibrace, crash-testy atp.
  - MSC MARC – program od společnosti MSC Software. Slouží opět k řešení velmi rozmanitých problémů. Podporuje např. simulace: tváření, svařování, elektromagnetických polí, termomechaniky atd.
- Specializovaný software
  - QForm – je v něm možné provádět simulace volného, či zápusťkového kování, rozvácování kroužků, válcování, vytlačování profilů atd. Kromě tvářecích technologií program disponuje také simulacemi tepelného zpracování.
  - DEFORM-3D – obdobně, jako QForm podporuje simulace zápusťkového kování, volného kování, válcování, vytlačování, atd. Umožňuje také predikci výsledné mikrostruktury materiálu po tvářecím procesu.
  - Simufact Forming – disponuje celou škálou tvářecích technologií, které je možné simulovat, jako např.: zápusťkové kování, volné kování, hluboké tažení, stříhání, protlačování, válcování. Opět lze simulovat také tepelné zpracování. U některých technologií, jako např. u zápusťkového kování, je možné volit mezi metodou konečných prvků a metodou konečných objemů, což je značná výhoda. Simulace jsou také plně kompatibilní s programem Simufact Welding. Simufact forming disponuje velmi jednoduchým a účelným uživatelským prostředím. Program vyvíjí firma MSC Software. Ukázka uživatelského prostředí je na obr. 44.



Obr. 44 Ukázka prostředí Simufact Forming 15.0

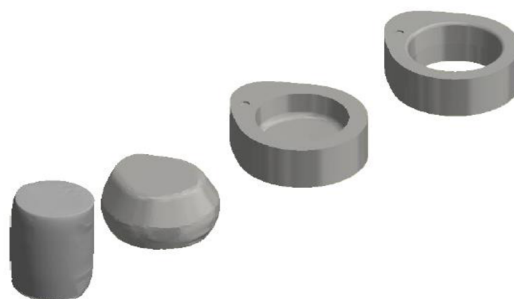
### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Práce je zaměřena na optimalizaci technologie výroby vačky (obr. 45a) ve firmě Šroubárna Kyjov, spol. s r.o. Konkrétně se jedná o ovlivnění výsledné polohy přeložky tak, aby nedocházelo k nežádoucímu odštípnutí materiálu během obrábění otvoru vačky, viz obr. 45b. Jak již bylo řečeno, existují dvě možnosti řešení tohoto problému, a to buď nasměrovat přeložku do blány výkovku, nebo alespoň dále od okraje obráběného otvoru. Dále bude kladen důraz na definici vlivu průměru vstupního polotovaru na polohu přeložky. Pro řešení těchto úkolů budou využity možnosti numerických simulací kování. S přihlédnutím k použité tvářecí technologii a dostupnosti simulačního softwaru pro studenty bude použit program Simufact Forming od společnosti MSC Software, který je dostupný na odboru tváření kovů a plastů.



Obr. 45 Model vačky a odštípnutí materiálu

Vačka je vyráběna na postupovém automatu HOTmatic AMP 30s ve čtyřech tvářecích operacích. V první operaci je z loupané tyče o průměru 20 mm odštířen špalík, ze kterého je následně vyroben předkovaný tvar. Ve třetí operaci je vykována vačka včetně blány v místě otvoru, která je v následující operaci vyděrována. Po vykování následuje žihání na tvrdost  $190 \pm 20$  HB, tryskání a výstupní kontrola na automatické kontrolní lince. Celý výrobní postup, včetně detailního popisu jednotlivých operací je uveden v kap. 1. Postup uvádí obr. 46.



Obr. 46 Postup výroby řešeného dílce

Nejprve byl určen materiálový a geometrický model pro simulace. Poté byla provedena ověřovací simulace současného stavu, pro zjištění vhodných parametrů a výpočtových metod, tak aby výsledek odpovídal reálnému stavu. Dále probíhal proces optimalizace.

#### 3.1 Materiálový a geometrický model [50], [51]

Vačka je vyráběna z materiálu ČSN 14 109 (100Cr6). Jedná se o ocel používanou pro výrobu ložiskových kroužků, vaček atd. Tváření probíhá za teploty 1 150 až 1 190 °C. Pro simulaci bylo využito databáze materiálových modelů programu Simufact Forming, jehož knihovna obsahuje 720 materiálových modelů, včetně oceli 100Cr6. Daný materiál je v databázi definován na základě materiálového modelu GMT. Následující vzorec slouží k výpočtu přirozeného deformačního odporu metodou GMT:

$$\sigma_D = C_1 \cdot e^{C_2 \cdot T} \cdot \varphi^{n_1 \cdot T + n_2} \cdot e^{\frac{I_1 \cdot T + I_2}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{m_1 \cdot T + m_2}, \quad (3.1)$$

kde:  $\sigma_D$  – deformační odpor [MPa],

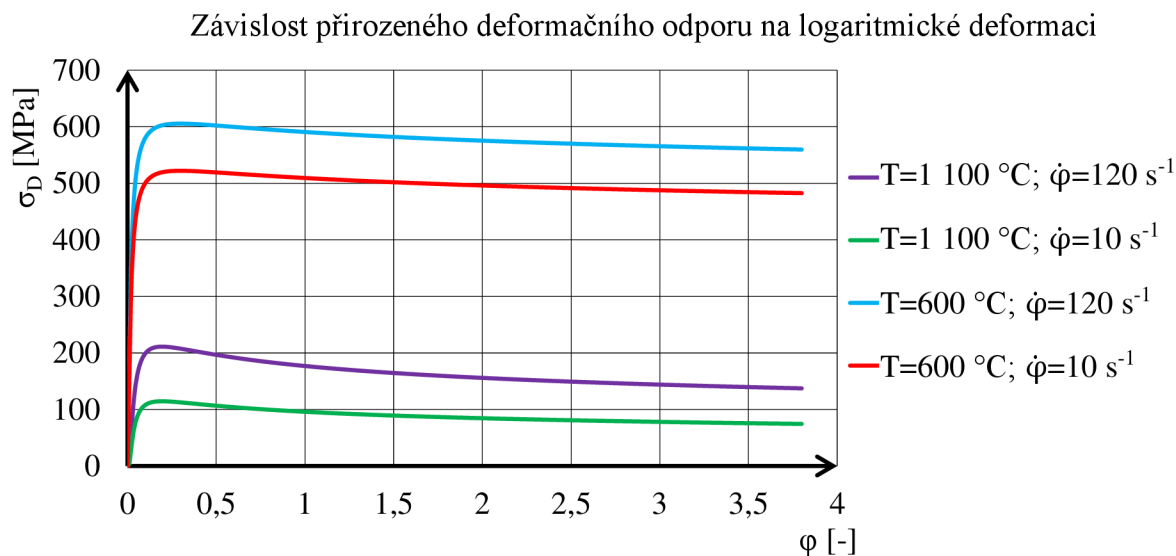
$C_1, C_2, n_1, n_2, I_1, I_2, m_1, m_2$  – materiálové konstanty [-],

$T$  – teplota materiálu [°C],

$\varphi$  – logaritmická deformace [-],

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

Níže uvedený graf uvádí křivky závislosti deformačního odporu na logaritmické deformaci pro vybrané teploty a rychlosti deformace.



Graf 1 Závislost  $\sigma_D(\varphi)$  [50]

Pro optimalizaci polohy přeložky v závislosti na velikosti výchozího polotovaru byly nejprve zvoleny čtyři různé průměry, a to 18, 20, 22 a 23 mm, přičemž momentálně je používán průměr 20 mm. Pro všechny průměry bylo nutné určit výšky odstřížku a také pěchovací poměr, kvůli ověření možnosti výroby na daném stroji.

Délka polotovaru byla určena dle následujících vztahů tak, aby byl zachován stejný objem polotovaru a vačky včetně blány, dle zákona zachování objemu. Pro výpočet délky byl uvažován nezdeformovaný válcový tvar. Přesná délka je v praxi vždy upravena po zvážení odstřížku. Požadovaná hmotnost je 64 g. Ukázkové výpočty jsou realizovány pro průměr 20 mm. Při znalosti hustoty dané oceli lze snadno vypočítat potřebný objem odstřížku dle následujícího vztahu:

$$V_{OD} = \frac{m_{OD}}{\rho} = \frac{0,064}{7850} = 8,15287 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3, \quad (3.2)$$

kde:  $V_{OD}$  – potřebný objem odstřížku [ $\text{m}^3$ ],  
 $m_{OD}$  – hmotnost odstřížku [kg],  
 $\rho$  – hustota materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Při daném průměru je poté možno určit požadovanou délku odstřížku takto:

$$L_{OD} = \frac{4 \cdot V_{OD}}{\pi \cdot D_{OD}^2} = \frac{4 \cdot 8,15287 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,020^2} = 0,025951 \text{ m} \doteq 25,95 \text{ mm}, \quad (3.3)$$

kde:  $L_{OD}$  – délka odstřížku [mm],  
 $D_{OD}$  – průměr odstřížku [mm].

Dále je také nutno brát v úvahu roztažení vlivem teploty. Před vstupem do stroje je teplota 1 150 °C. Mezi místem měření teploty a místem, kde dochází k dělení tyče je jistá vzdálenost, díky které dojde k ochlazení tyče. Pro účely simulace je uvažována teplota 1 100 °C. Délka ohřátého polotovaru byla určena pomocí následujícího vztahu:

$$L_{OH} = L_{OD} + [L_{OD} \cdot \alpha \cdot (T_{OH} - T_0)], \quad (3.4)$$

kde:  $L_{OH}$  – délka odstřížku po tepelném roztažení [mm],  
 $\alpha$  – koeficient tepelné roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ],  
 $T_{OH}$  – teplota ohřevu [K],  
 $T_0$  – původní teplota [K].

Tedy po dosazení:

$$L_{OH} = 25,95 + [25,95 \cdot 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1373,15 - 298,15)] = 26,30 \text{ mm.}$$

Obdobně byl určen i změněný průměr polotovaru:

$$D_{OH} = D_{OD} + [D_{OD} \cdot \alpha \cdot (T_{OH} - T_0)], \quad (3.5)$$

kde:  $D_{OH}$  – průměr odstřížku po tepelném roztažení [mm].

Po dosazení:

$$D_{OH} = 20 + [20 \cdot 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1373,15 - 298,15)] = 20,27 \text{ mm.}$$

Po výpočtu průměru a délky bylo zapotřebí vypočítat štíhlostní poměr, tedy poměr délky a průměru odstřížku.

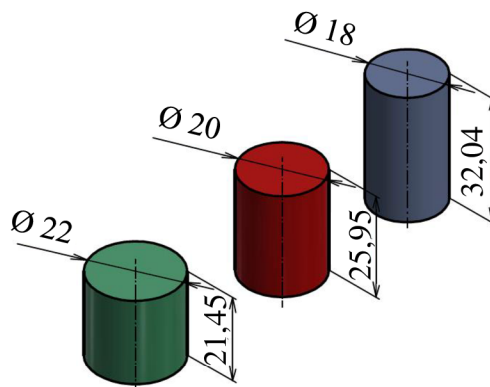
$$\frac{L_{OH}}{D_{OH}} = \frac{26,30}{20,27} = 1,297. \quad (3.6)$$

Souhrnné hodnoty spočtených rozměrů a pýchovacích poměrů pro všechny uvažované varianty průměrů polotovaru uvádí tab. 6.

Tab. 6 Rozměry různých polotovarů.

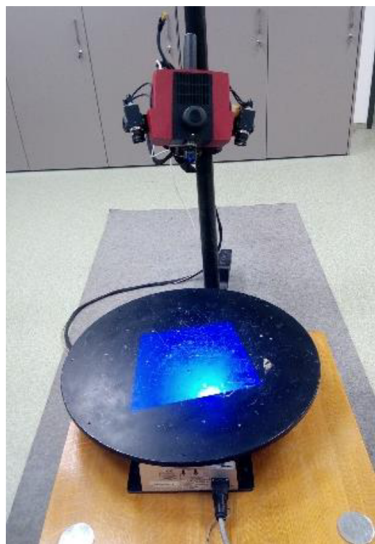
$D_{OD}$ [mm]	$L_{OD}$ [mm]	$D_{OH}$ [mm]	$L_{OH}$ [mm]	$\frac{L_{OH}}{D_{OH}}$ [-]
18	32,04	18,24	32,47	1,76
20	25,95	20,27	26,30	1,28
22	21,45	22,30	21,74	0,96
23	19,62	23,31	19,89	0,84

Pro výrobu na stroji HOTmatic AMP 30 musí být délka odstřížku alespoň 20 mm a průměr 18 mm. Štíhlostní poměr doporučený výrobcem stroje je 1 až 2. Ve firmě Šroubárna Kyjov, spol. s r.o. jsou používány polotovary se štíhlostním poměrem 0,9 až 1,5. Uvedeným podmínkám nevyhovuje výchozí polotovar o průměru 23 mm. Z tohoto důvodu není již dále v práci uvažován. Dále je nutné přihlédnout k ekonomické stránce výroby, jelikož tyče o výchozím průměru 18 mm jsou z této stránky nejméně výhodné. Štíhlostní poměr u polotovaru průměru 22 mm je za hranici doporučení výrobce stroje, avšak stále ještě splňuje firemní doporučení. Pro proces optimalizace byly tedy uvažovány průměry polotovarů 18, 20 a 22 mm, jak je naznačeno na obr. 47.



Obr. 47 Porovnání rozměrů odstřížků

Kvůli značné deformaci odstřížku, která je způsobena stříhem za tepla byla vyloučena možnost vymodelování polotovaru v CAD systému, protože by proces byl jednak velmi časově náročný a také poměrně nepřesný. Pro získání přesného geometrického modelu odstřížku byla tedy zvolena technologie 3D skenování. Konkrétně byl použit skener Atos Compact 2 (obr. 48a) od firmy GOM, který je k dispozici na ÚST FSI. Jedná se o skener, který funguje na principu projekce proužkového světla. Skenovaný objekt nesmí být lesklý, neboť by nedošlo k naskenování. Z toho důvodu byl na odstřížek nanesen speciální matný nástrík obsahující titanový prášek (obr. 48b). Dále je nutné, aby při každém skenování byly zachyceny alespoň tři body z předchozího skenování. Pro skenování odstřížku byly využity referenční body na dvou dalších tělesech kromě odstřížku, viz obr. 48c. Po naskenování proběhly potřebné úpravy sítě v programu GOM Inspect 2019, jednalo se zejména o vyhlazení a zredukování prvků sítě na akceptovatelnou hodnotu pro další práci se souborem.



a) 3D skener Atos



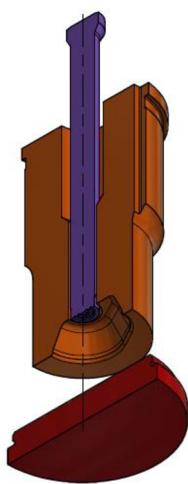
b) matnící nástřik



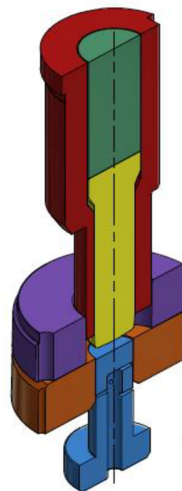
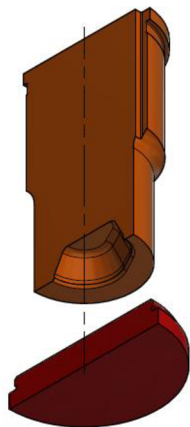
c) ustavení na skenovací ploše

Obr. 48 Postup skenování odstřížků

Příliš komplikované sestavy nástrojů o mnoha dílcích znesnadňují proces i nastavení celé simulace. Dále dochází také k prodloužení výpočtových časů a v některých případech i k horší stabilitě výpočtů. Z tohoto důvodu je velmi žádoucí sestavy nástrojů pro jednotlivé operace náležitě zjednodušit, avšak nesmí dojít k narušení funkce sestavy a je tedy nutné rozvážit, jakým způsobem model nástrojů zjednodušit. Jak je vidět na obr. 49a, tak v sestavě nástrojů pro první operaci, ve které probíhá předkování byl pominut vyhazovač a dutina v razníku byla zaslepena. V sestavě pro druhou operaci byla podložka, vyhazovač a zápustka spojeny do jednoho dílce, viz obr. 49b. Vyhazovač v této operaci slouží zároveň jako kompenzátor materiálu, jak bylo popsáno v kapitole 2.2.1. Pro zjednodušení byla uvažována výška „převýšení“ materiálu způsobeného kompenzací 0,6 mm. Tento rozměr byl zvolen na základě měření vzorků. V razníkové části byl spojen do jednoho dílu tvarovací trn a razník. Dále byly nástroje otočeny tak, aby razníky sjížděly v záporném směru osy z. Tato zjednodušení lze uplatnit pouze za předpokladu simulace s ideálně tuhými nástroji, v opačném případě by došlo k nežádoucímu ovlivnění výsledků. Do simulačního programu byla geometrie vždy vkládána ve formátu stp. V programu Simufact Forming je povrch dané geometrie vždy pokryt trojúhelníkovou sítí. Kvalitu této sítě do značné míry ovlivňuje volitelná veličina „facet sag“, která vyjadřuje maximální odchylku trojúhelníkové sítě oproti step modelu. Tato hodnota byla při importu nastavena na 0,01 mm.



a) zjednodušení předkovací sestavy



b) zjednodušení kovací sestavy

Obr. 49 Zjednodušení nástrojů pro simulaci

### 3.2 Ověřovací simulace

Před samotným optimalizačním procesem je nutné provést tzv. ověřovací simulaci. Jedním z hlavních úkolů ověřovací simulace je navržení vhodné metody simulace tvorby přeložky z otřepu. Otřep na odstřížku je velmi malý, a tedy i prvky výpočtové sítě musí být dostatečně malé, což může způsobit značné obtíže při simulaci. Mezi další úkoly ověřovací simulace patří volba vhodné metody (MKP nebo MKO), třecí model a všechny ostatní parametry simulace. Ověřovací simulace byla provedena s průměrem vstupního polotovaru 20 mm, jelikož tento průměr je v současné době pro výrobu používán, a tedy je možné srovnat reálný stav s numerickou simulací. Během veškerých prováděných simulací byly tvářecí nástroje uvažovány jako ideálně tuhé.

V ověřovací simulaci byly použity níže vypsání základní procesní parametry, které byly po konzultaci schváleny technologi ze společnosti Šroubárna Kyjov, spol. s r.o.

- kovací stroj – klikový mechanismus:
  - délka ojnice = 520 mm,
  - délka kliky = 80 mm,
  - otáčky za minutu = 140,
- počáteční teplota polotovaru = 1 100 °C,
- teplota nástrojů = 100 °C,
- teplota okolí = 50 °C.

Pro samotnou simulaci je také důležité znát přesné ustavení polotovaru a předkovku v nástrojích a mezeru mezi nástroji ve finální poloze. V současné době je vačka kována tak, že v předkovací operaci je odstřížek umístěn horním otřepem vpravo od nosu vačky, jak ukazuje obr. 50a. Naopak dolní otřep na lisovací plotýnce je vlevo od nosu vačky. V první operaci je také uvažováno vyosení odstřížku o 0,5 mm směrem k nosu vačky. Vyosení je v praxi prováděno pomocí vypodložení pohyblivého nože, který odstřížek přenáší do první operace. Vzdálenost předkovacího razníku a lisovací plotýnky ve finální poloze je uvažována 4,3 mm, viz obr. 50b. Ve druhé operaci je předkovek ustaven na střed zápustky, založení předkovku ilustruje obr. 50c. Výška vykované vačky je uvažována 12,5 mm, dle toho je také nastavena finální vzdálenost mezi zápustkou a razníkem.



Obr. 50 Ustavení polotovaru a poloha nástrojů

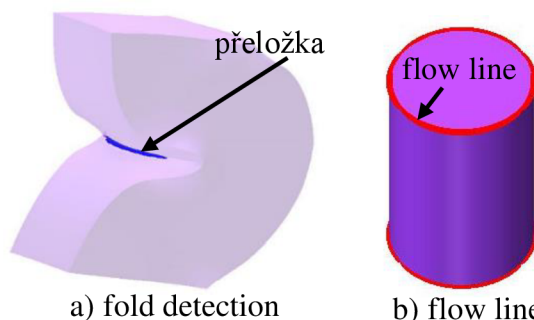
Ještě před řešením vhodného nastavení simulace a metody simulace tvorby otřepu byla provedena testovací simulace s ideálním polotovarem, tedy s nedeformovaným válcem bez otřepů. Důvodem pro provedení této simulace je možná predikce jiných vad než pouze přeložek z otřepů odstřížku, na které by bylo nutné se během procesu optimalizace zaměřit. Bylo také důležité ověřit, zda výchozí předpoklad, že tvorba přeložek souvisí s přítomností otřepů na odstřížku, je pravdivý.

Pro tuto simulaci byla použita metoda konečných prvků, a to zejména kvůli značné přesnosti výsledků. Pro první operaci byla použita síť šestistěnných prvků o velikosti 1 mm v polárním systému, ve druhé operaci pak síť čtyřstěnnů o velikosti 0,8 mm a v místě přechodu do kompenzátoru kovu bylo aplikováno zjemnění sítě úrovně 2, což znamená, že v místě jednoho prvku vznikne 16 menších prvků. Nasítovaný polotovar a předkovek ukazuje příloha 3.

Po simulaci bylo zjištěno, že s ideálním polotovarem bez otřepu nedošlo k tvorbě žádných přeložek. Z toho tedy plyne, že za přeložkou, která způsobuje vyštípnutí materiálu během obrábění, skutečně stojí otřep vzniklý dělením tyče. Tudíž je nutno ověřit a zvolit vhodný model otřepu pro další simulace.

### 3.2.1 Simulace tvorby přeložky z otřepu

Jak bylo řečeno, tak jedním z hlavních úkolů ověřovací simulace je prověřit použitelné metody simulace tvorby a polohy přeložky. V programu existují celkem dvě možnosti, jak odhalit polohu přeložky. Je možno využít funkci *fold detection* (obr. 51a). Díky této funkci je možné velmi snadno predikovat tvorbu, pohyb a plochu přeložek. Dále přichází v úvahu na odstřížku odstranit otřep a nahradit ho ostrou hranou a na tuto hranu aplikovat tzv. *flow lines* (obr. 51b), což znamená, že ostrá hrana nahrazující otřep by byla pokryta linií bodů, které je možné v průběhu tvářecího procesu sledovat.



Obr. 51 Možnosti predikce přeložek

Výhoda *fold detection* tkví ve zjištění plochy vzniklých přeložek. Naopak nevýhodou je nutnost modelu otřepu, který zvyšuje nároky na výpočtovou síť, což způsobuje menší stabilitu simulace a dlouhé výpočtové časy. Naopak možnost využití *flow line* skýtá výhodu v tom, že model otřepu je odstraněn a je nahrazen ostrou hranou. Nevýhoda je nemožnost určení plochy přeložek.

Nejprve byla ověřena možnost využití funkce *fold detection*. Pro ověření této možnosti bylo nutné upravit naskenovaný odstřížek, a to tak, že byl odstraněn naskenovaný otřep, který byl příliš malý a v CAD modeláři byl vymodelován větší otřep na horní i dolní ploše odstřížku. Největší povolený otřep je 0,4 mm. Pro účely simulace byl nejprve otřep zvětšen na 0,8 mm, viz obr. 52. Tento stav byl zvolen z důvodu usnadnění tvorby sítě a zmenšení hardwarové náročnosti simulace. Dále byl tento stav také doporučen zadávající firmou, neboť se při výrobě stává, že maximální povolená velikost otřepu 0,4 mm je překročena. Základní úvahou je, že s větším otřepem je přeložka větší a její vznik je snazší. S tímto geometrickým modelem byla provedena simulace jak metodou konečných prvků, tak metodou konečných objemů.



Obr. 52 Vymodelovaný otřep

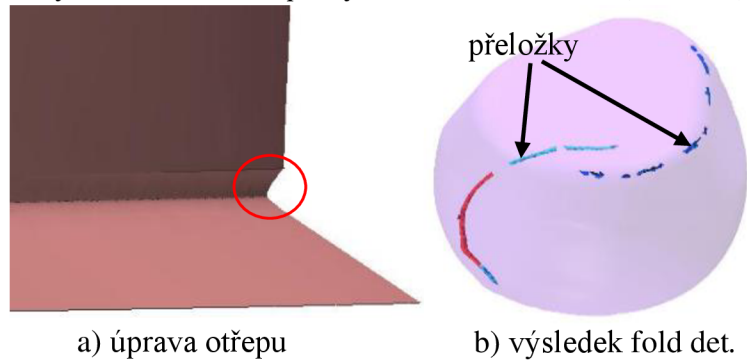
Pro výpočet pomocí metody konečných objemů byla použita síť o velikosti kontrolních objemů 0,9 mm a na obou otřepích byla síť dodatečně zjemněna. Při použití této výpočtové metody nastala velká komplikace, jelikož otřep na dolní ploše odstřížku při předkování netvořil přeložku, ale tekl po lisovací podložce, jak je zachyceno na obr. 53. Bohužel tento stav absolutně neodpovídá reálnému průběhu předkovací operace. Tento problém může být teoreticky způsoben příliš malým objemem otřepu, což zapříčiňuje menší přesnost výpočtu pomocí MKO. V úvahu připadá několik možných řešení tohoto problému.



Obr. 53 Nereálný tok otřepu

První možností je upravit ořep tak, aby bylo usnadněno jeho přeložení, např. vymodelovat pod ořepem malou drážku. Druhou možností pak je šířku ořepu zmenšit. Obě možnosti bohužel zmenšují přesnost predikce výsledné polohy přeložky. Dále je možno obě úpravy zkombinovat.

Pro odstranění problému byl nejprve spodní ořep zmenšen na 0,4 mm a horní ořep ponechán na 0,8 mm, neboť ten přeložku vytvořil. Tato úprava bohužel nevedla k uspokojivému výsledku, protože na dolní ploše ostřížku stále docházelo ke stejnému nereálnému toku materiálu. Následně byla u dolního ořepu vymodelována drážka (obr. 54a), ve které se měl materiál „podlomit“ a mělo dojít k tvorbě přeložky. Ani tato úprava však nebyla úspěšná a stále nedocházelo k tvorbě přeložky. Proto bylo přikročeno k dalšímu zmenšení ořepu. Oba ořepy byly zmenšeny na 0,2 mm. Takto malý ořep se již přeložil a bylo možné použít funkci fold detection. Jelikož byl ořep velmi malý, tak i výsledky predikce přeložek nejsou příliš vyhovující. Zvláště u horního ořepu je přeložka velmi malá a necelistvá, viz obr. 54b. Je také nutno přihlídnout k tomu, že k přeložení došlo, nicméně kvůli ne příliš reálnému toku ořepu nemusí poloha přeložky odpovídat skutečnosti, což je nežádoucí.

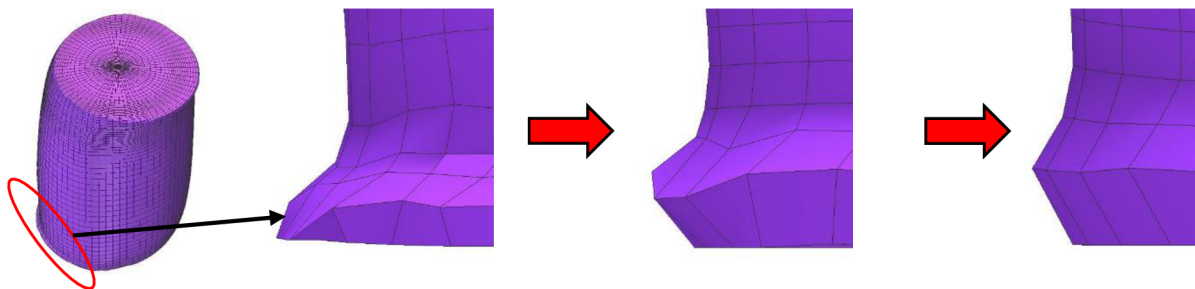


a) úprava ořepu

b) výsledek fold det.

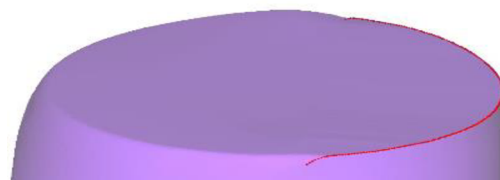
Obr. 54 Úprava ořepu, výsledek fold detection

Následně byla tato metoda aplikována také při simulaci za pomoci metody konečných prvků. Pro výpočet byla použita síť šestistěnných prvků, tzv. ringmesh o velikosti 1 mm a na ořepu bylo opět aplikováno zjemnění sítě. Podstatným problémem byla značná deformace vymodelovaného ořepu vlivem nasíťování. Kvůli takto výrazné deformaci a zmenšení tvaru ořepu však nebyly detekovány žádné přeložky. Postup deformace ořepu ilustruje obr. 55. Byly testovány i jiné typy sítí a celkově jiné nasíťování, avšak stabilita výpočtu s jinou sítí byla velmi malá.



Obr. 55 Postup deformace ořepu

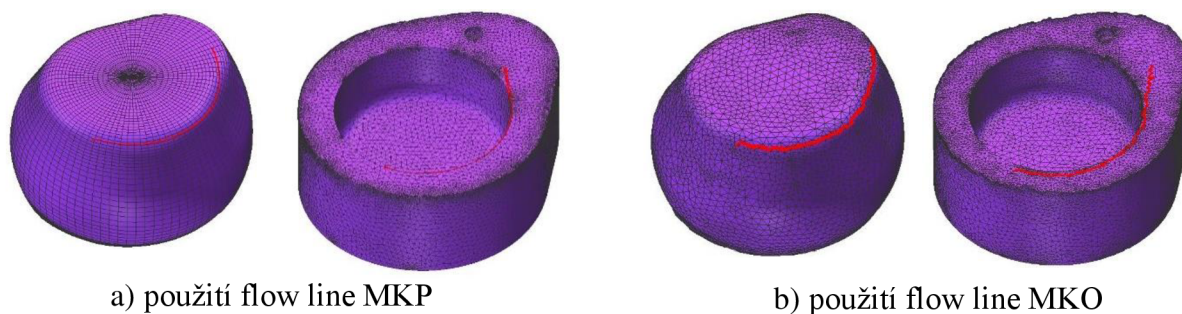
Jak již bylo výše zmíněno, dalším krokem je ověření možnosti využití flow line, opět pomocí metody konečných objemů i konečných prvků. Za tímto účelem byl upraven geometrický model ořepu tak, že ořep byl odebrán, aby na jeho místě byla ostrá hrana. Na tuto hranu byla následně umístěna flow line (obr. 56), jejíž poloha byla sledována.



Obr. 56 Flow line v místě ořepu

V tomto případě nenastal žádný problém při použití obou výpočtových metod a vždy bylo možné zjistit finální polohu ořepu, resp. flow line, jak ukazuje obr. 57. Z tohoto důvodu je pro další simulace využita metoda flow line. Jak je vidět, z výsledků simulace, mezi polohou flow line u MKP a MKO jsou malé rozdíly. Proto následuje rozvaha nad použitím konkrétní metody.





Obr. 57 Použití flowline

### 3.2.2 Volba výpočtové metody [8]

Program Simufact Forming umožňuje pro operaci zápuštkového kování volbu mezi výpočtem pomocí metody konečných prvků, nebo konečných objemů. U metody konečných objemů je také na výběr z prvního, či vyššího řádu aproximace. Teoretické základy obou zmíněných metod jsou popsány v kap. 2.4. Výsledky obou metod jsou navzájem do jisté míry odlišné, jak dokazuje předcházející kapitola. Z toho důvodu je před dalším krokem nutné rozhodnout, která metoda je vhodnější pro řešený problém.

Pro metodu konečných prvků byla u první operace opět použita síť šestistěnných prvků o velikosti 0,8 mm v polárním systému, se zjemněním v místě otřepů. Pro druhou operaci síť čtyřstěnnů o velikosti 0,8 mm se zjemněním v místě přechodu do blány. Jedná se o výpočetní síť použitou již při předchozích výpočtech, tedy je ověřena stabilita výpočtu a dostatečující přesnost výsledků. U metody konečných objemů byla pro první operaci použita velikost kontrolních objemů 1 mm. Hranice rozhraní mezi polotovarem a prostředím byla dodatečně zjemněna. U druhé operace byla použita velikost kontrolních objemů 0,8 mm, taktéž se zjemněním v místě přechodu do kompenzátoru kovu.

Jedním z podstatných kritérií pro volbu výpočtové metody je výpočetní čas simulace. Pro srovnání jednotlivých výpočetních časů je nezbytné téměř stejné nasíťování a také, aby výpočty probíhaly na stejném počítači, který není ničím dalším zatěžovaný. Jelikož tyto podmínky byly splněny pouze částečně, je při srovnání časové náročnosti jednotlivých metod vycházeno z literatury [8] a také z konzultace s technickým konzultantem z firmy MSC Software. Oba zdroje potvrdily, že je časově nejnáročnější metoda konečných prvků. Naopak nejméně náročná na výpočetní čas je metoda konečných objemů při použití aproximace prvního řádu, což odpovídá teoretickým předpokladům.

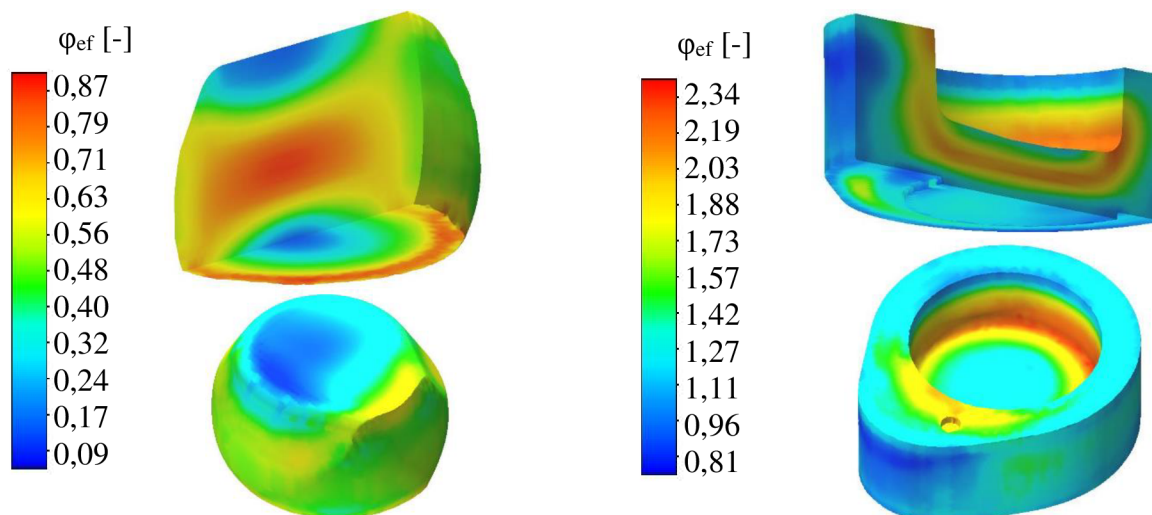
Konkrétní výpočtové časy pro řešený problém s uvedeným nasíťováním uvádí tab. 7.

Tab. 7 Orientační srovnání výpočtových časů.

Výpočtová metoda	Výpočtový čas [s]		
	1. operace	2. operace	Celkem
Metoda konečných prvků	12 908	41 286	54 194
Metoda konečných objemů (první řád)	5 773	9 764	15 537
Metoda konečných objemů (vyšší řád)	16 370	14 558	30 928

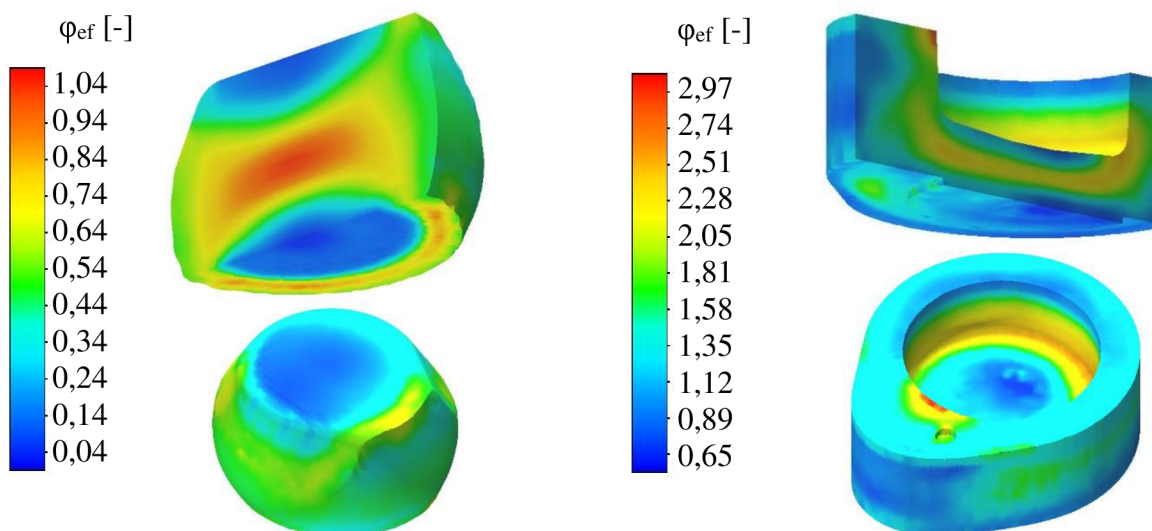
Jak plyne z uvedené tabulky, pro první operaci byla časově nejnáročnější MKO vyššího řádu. To, že je tato metoda oproti MKP více časově náročná, je způsobeno tím, že pro první operaci byla u MKP volena výpočtově méně náročná síť. U druhé operace již bylo potvrzeno, že nejnáročnější na čas je MKP, jakožto i při sečtení časů simulací obou operací.

Jako srovnávací kritérium mezi jednotlivými výpočetními metodami je možné také použít rozložení a velikost efektivního přetvoření. Na obr. 58, obr. 59 a obr. 60 je provedeno srovnání rozložení efektivního přetvoření po průřezu polotovaru po 1. a 2. operaci za použití různých výpočtových metod.



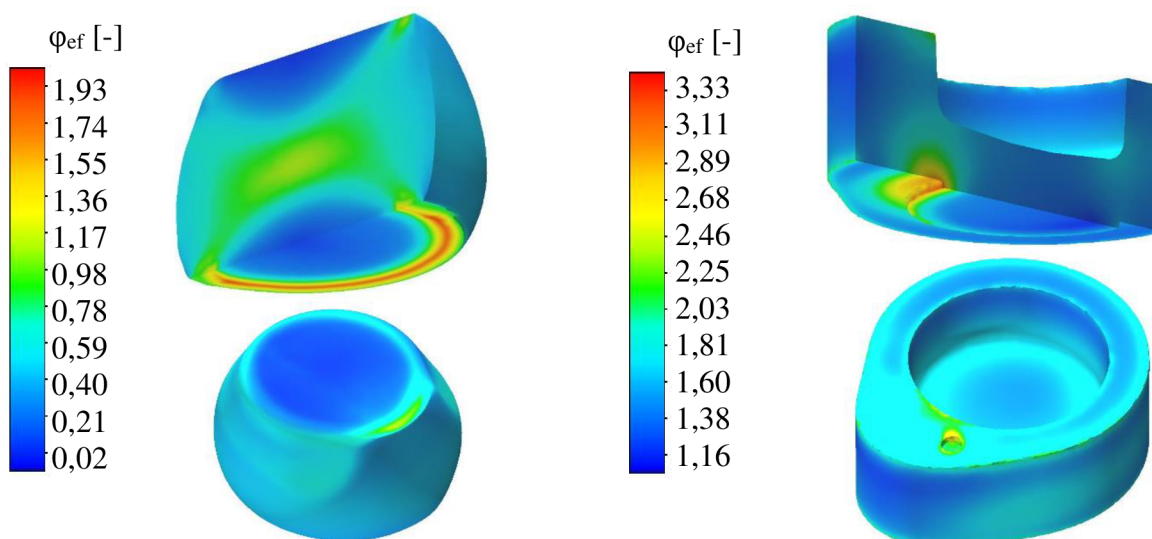
Obr. 58 Efektivní přetvoření dle MKO prvního řádu

Z výsledků plyne že, maximální efektivní přetvoření je u první operace 0,87 a minimální 0,09. U druhé operace je maximum 2,34 a minimum 0,81.



Obr. 59 Efektivní přetvoření dle MKO vyššího řádu

U první operace se maximální hodnota liší od MKO prvního řádu o 0,17 a minimální hodnota o 0,05. U druhé operace je rozdíl v maximech 0,63 a v minimech 0,16.



Obr. 60 Efektivní přetvoření dle MKP

Výsledky analýzy efektivního přetvoření pomocí MKP ukazují, že oproti MKO (jak prvního, tak vyššího řádu) jsou více patrné extrémní hodnoty na dílci.

Srovnání výsledků efektivního přetvoření je shrnuto v tab. 8.

Tab. 8 Souhrnné srovnání výsledků efektivního přetvoření.

1. operace				
Metoda	$\varphi_{ef} \max [-]$	Místo	$\varphi_{ef} \min [-]$	Místo
MKO (1. řád)	0,87	u dolního otřepu	0,09	střed podstavy
MKO (vyšší řád)	1,04	u dolního otřepu	0,04	střed podstavy
MKP	1,93	u dolního otřepu	0,02	horní plocha
2. operace				
Metoda	$\varphi_{ef} \max [-]$	Místo	$\varphi_{ef} \min [-]$	Místo
MKO (1. řád)	2,34	zaoblení předk. díry	0,81	zadní část blány
MKO (vyšší řád)	2,97	přechod díry a nosu	0,65	zadní část blány
MKP	3,33	přechod blány	1,16	zadní část blány

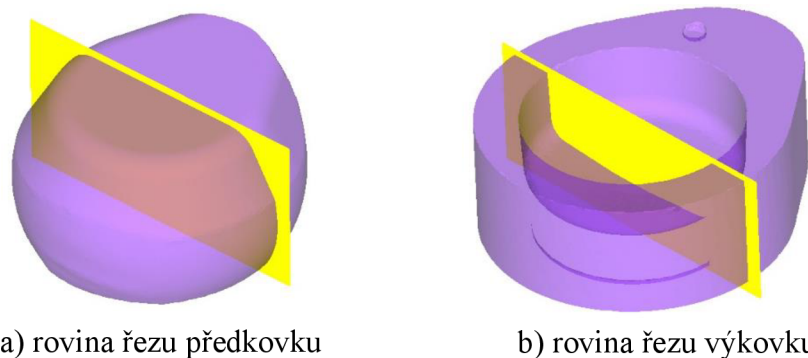
Jak plyne z tab. 8, tak u první tvářecí operace je maximální rozdíl ve výsledku mezi MKP a MKO prvního řádu. U maximálního přetvoření tento rozdíl činí 1,06 a u minimálního přetvoření pouze 0,07. Ve všech výpočtech bylo zjištěno největší efektivní přetvoření v místě, kam by se během tváření dostal dolní otřep, tedy v místě přeložky. Tato skutečnost může být také ovlivněna tím, že v místě otřepu byla ostrá hrana, z důvodu použití flow line, jak bylo popsáno v kap. 3.2.1. Avšak i na opačné straně, kde otřep nebyl, je přetvoření vysoké. Ve středu předkovku je pak u MKO prvního řádu efektivní přetvoření 0,84, u MKO vyššího řádu 1,02 a u MKP 1,12. Největší rozdíl efektivního přetvoření ve středu předkovku je tedy 0,28.

Minimum bylo u MKP narozdíl od obou metod MKO zjištěno na horní ploše předkovku, avšak ve středu podstavy bylo u MKP zjištěno efektivní přetvoření v rozmezí 0,07 až 0,09. Rozdíl u minimálních hodnot je tedy téměř zanedbatelný.

U operace kování je u maximálních hodnot opět největší rozdíl mezi MKP a MKO, který činí 0,99. Podstatný rozdíl je však v tom, že u MKP je maximální hodnota efektivního přetvoření v místě přechodu do kovací blány na dolní straně vačky. Na toto místo bylo také vždy nutné při výpočtu pomocí MKP aplikovat dodatečné zjemnění sítě, neboť bez něj byla simulace značně nestabilní. To může být způsobeno tím, že metoda konečných prvků více postihuje lokální změny v tomto místě, což metoda konečných objemů neumí. U MKO prvního řádu bylo maximum (2,34) zjištěno u zaoblení předkovaného otvoru. Metodou MKP bylo v tomto místě spočítáno na 1,52. Rozdíl je tedy 0,82. U MKO vyššího řádu pak bylo maximum (2,97) u přechodu mezi předkovaným otvorem a noselem vačky. Dle MKP je v tomto místě efektivní přetvoření 2,13, což činí rozdíl 0,84.

Minimální hodnota efektivního přetvoření je pak dle všech výpočtových metod na spodní straně zadní části kovací blány. Největší rozdíl byl dle očekávání mezi MKP a MKO prvního řádu, a to konkrétně 0,35.

Dalším kritériem pro srovnání jednotlivých výpočtových metod je průběh materiálových vláken. Ten byl porovnán tak, že v určité rovině na dílci byla vytvořena „mřížka“, jejíž deformace byla sledována. Výsledný tvar deformované mřížky byl pak porovnán jednak navzájem, ale také se skutečným výbrusem. Roviny vyhodnocovaných řezů jsou na obr. 61.



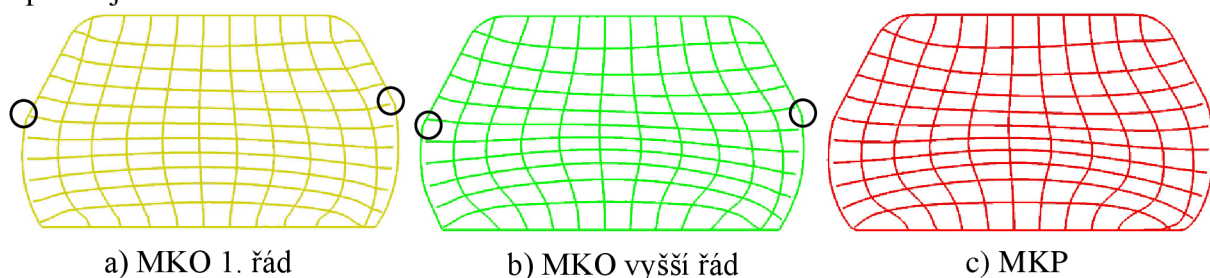
a) rovina řezu předkovku

b) rovina řezu výkovku

Obr. 61 Roviny vyhodnocovaných řezů

Jak je vidět, tak u předkovku je řez veden napříč, a to přibližně středem dílce. U výkovku vačky je řez taktéž veden příčně středem předkovaného otvoru.

Vzájemné porovnání a porovnání průběhu vláken s reálným výbrusem po první tvářecí operaci je zobrazen na obr. 62.



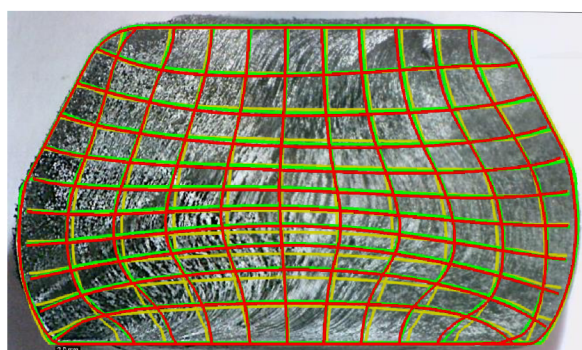
a) MKO 1. řád

b) MKO vyšší řád

c) MKP



d) výbrus



■ MKP ■ MKO vyšší řád ■ MKO 1. řád

e) vzájemné srovnání

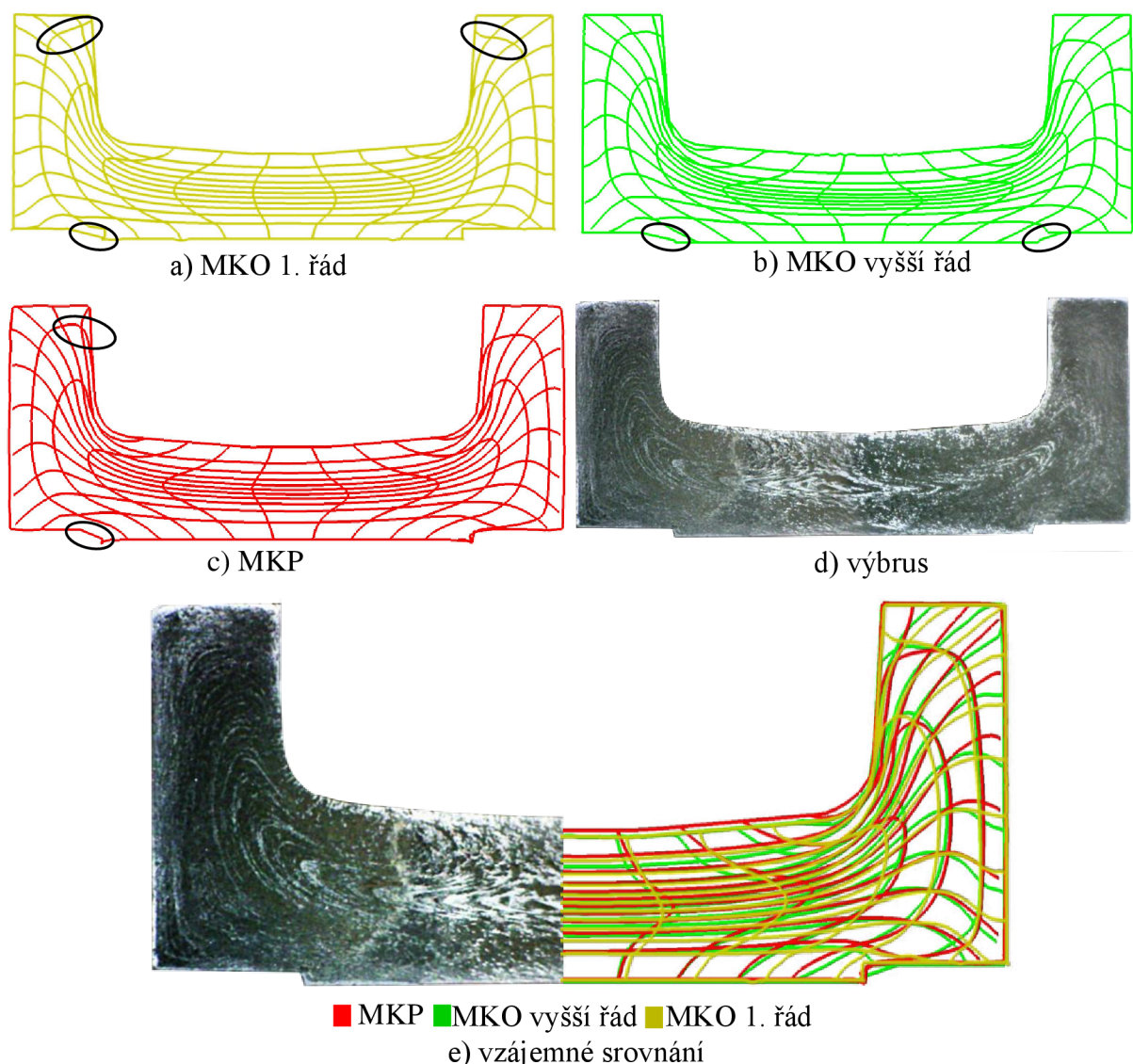
Obr. 62 Srovnání materiálových vláken 1. operace

Z uvedených obrázků je patrné, že u první operace není mezi průběhem vláken získaným různými výpočtovými metodami markantní rozdíl. Vlákná získaná pomocí MKP však nemají tak ostré přechody jako MKO, viz označená místa na obr. 62a a obr. 62b, dá se tedy konstatovat, že více odpovídají reálným vláknům.

Na srovnání s reálným výbrusem je vidět, že v dolní a horní části se s realitou bohužel neshodují vlákna z žádného výpočtu. To je patrné způsobeno tím, že v simulaci deformace vláken není zahrnuta deformace způsobena procesem dělení polotovaru. Nicméně ve středové části je patrná větší shoda s MKP a MKO vyššího řádu. Vlákná získaná z MKO prvního řádu se lehce odchylují od zbývajících, avšak nijak výrazně.

Z uvedených výsledků tedy plyne, že u předkovací operace nemá použití výpočtové metody zásadní vliv na průběh materiálových vláken. Je však nutné si uvědomit, že samotná předkovací operace není nijak složitá. Jedná se totiž pouze o jednoduché přechování materiálu. Větší rozdíly v průběhu vláken lze předpokládat u složitějších tvářecích operací. Z toho důvodu je nutné porovnat průběh vláken i u druhé operace.

Srovnání průběhu vláken pro druhou tvářecí operaci, tedy vykovanou vačku s nevyděrovaným otvorem, je uvedeno na obr. 63.



Obr. 63 Srovnání materiálových vláken 2. operace

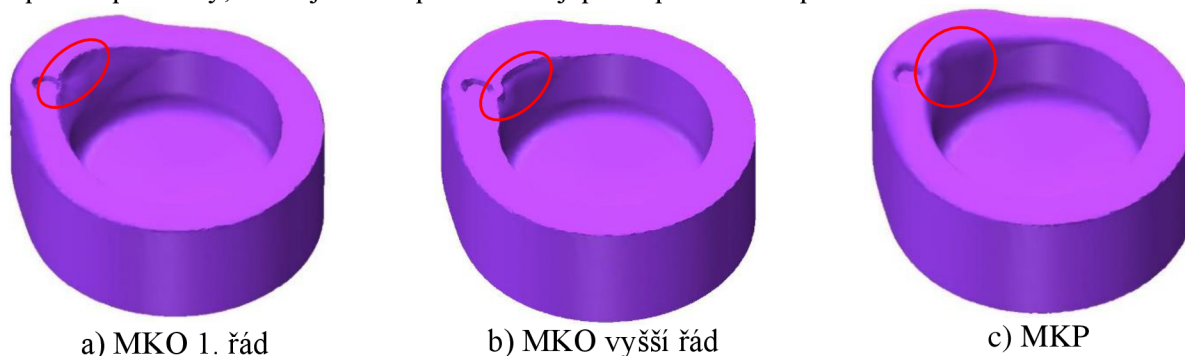
Jak ukazuje obr. 63, tak ve druhé tvářecí operaci jsou vlákna z výbrusu nejvíce shodná s MKP a MKO vyššího řádu, mezi kterými jsou malé rozdíly. Výsledek MKO vyššího řádu je přesnější uvnitř vačky, kde vlákna odpovídají reálnému výbrusu ze všech metod nejvíce.

Dále bylo zjištěno, že výsledky všech simulovaných vláken jsou nepřesné zejména v ostrém přechodu u kovací blány, jak je zvýrazněno na obr. 63. V horní části dílce nastal největší rozdíl oproti výbrusu u metody MKO prvního řádu. Je také vidět jistá odchylka v tloušťce blány, ta ale může být způsobena nastavením a pružností stroje. Rozdíl je však zanedbatelný.

U druhé tvářecí operace tedy opět nenastaly zcela zásadní rozdíly mezi vlákny získanými pomocí různých výpočetních metod. Jak bylo zmíněno, nejmenší rozdíly jsou mezi MKP a MKO vyššího řádu.

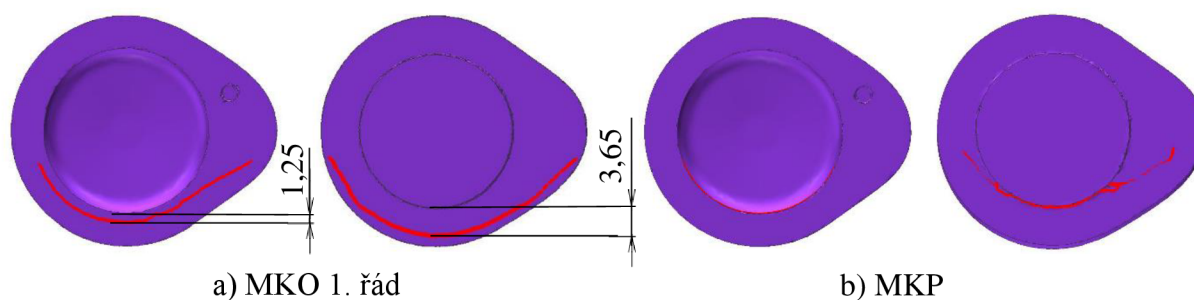
Na základě provedených srovnání lze konstatovat, že volba výpočtové metody nemá na průběh vláken zcela zásadní vliv. Nejvíce se však od ostatních metod i od reálného výbrusu v obou tvářecích operacích odlišovala MKO prvního řádu. Tento fakt je v souladu s teoretickými předpoklady, neboť se jedná o metodu, která je schopna řešit úlohu spočítat v nejkratším čase, jak bylo dokázáno v tab. 7. Lze tudíž předpokládat, že tento fakt se odrazí v přesnosti výsledků.

Bylo také zjištěno, že během druhé operace dochází při použití MKO k tvorbě „kapsy“, která se však neobjevuje při simulaci pomocí MKP, jak ukazuje obr. 64. Při použití vyššího řádu je tvorba kapsy výraznější než u MKO prvního řádu. Reálný vznik této kapsy je velmi nepravděpodobný, tudíž je tento problém nejspíše způsoben nepřesností MKO.



Obr. 64 Tvorba kapsy v průběhu kování

Dalším aspektem volby metody bylo také to, že při totožném nastavení všech procesních parametrů byla oběma metodami zjištěna jiná vzdálenost přeložek od hrany otvoru. Tato skutečnost rozhodujícím způsobem ovlivňuje volbu výpočtové metody. Příklad rozdílu vzdáleností přeložek je zachycen na obr. 65. Měření vzdálenosti přeložek bylo provedeno přímo v simulačním programu pomocí integrovaného nástroje pro měření vzdáleností. Byla měřena vždy nejkratší možná vzdálenost. Rozdíly ve vzdálenosti přeložek jsou shrnuty v tab. 9. Vzdálenost horní přeložky je měřena od okraje otvoru. Vzdálenost dolní přeložky je vždy měřena od okraje kompenzátoru materiálu.



Obr. 65 Srovnání vzdálenosti horní přeložky

Tab. 9 Srovnání vzdálenosti přeložek dle MKO a MKP.

Výpočtová metoda	Vzdálenost horní přeložky [mm]	Vzdálenost dolní přeložky [mm]
MKO (1. řád)	1,25	3,65
MKO (vyšší řád)	0	2,46
MKP	0	0

Z uvedené tabulky je jasné, že rozdíly ve vzdálenosti přeložek při použití různých metod jsou velmi markantní. Největší rozdíl je mezi MKP a MKO prvního řádu u dolní přeložky, a to 3,65 mm. U horní přeložky je rozdíl již menší, avšak vzhledem k danému problému stále podstatný. Lze vypořádat, že při použití MKO je vzdálenost přeložky větší než při použití MKP. Začátek oblasti, určené pro obrábění vačky po jejím vykování, je vzdálen cca 0,74 mm od okraje otvoru a 1,54 mm od okraje kompenzátoru. Tyto kritické vzdálenosti plynou z horního průměru otvoru (22,6 mm), průměru kompenzátoru (21 mm) a průměru obrobeného otvoru (24,085 mm). Z uvedené tabulky tedy vyplývá, že u MKO vyššího řádu není dolní přeložka v oblasti obrábění. U MKO prvního řádu není ani jedna z přeložek v oblasti obrábění. Z této skutečnosti plyne, že vzdálenosti přeložek zjištěné pomocí MKO neodpovídají reálnému stavu. To je pro rozhodování mezi výpočtovými metodami zcela klíčové, jelikož při použití MKO by tak docházelo k podstatnému zkrácení výsledku.

Celkově lze tedy konstatovat, že MKP je časově nejnáročnější výpočtovou metodou pro daný problém. Při srovnání efektivního přetvoření bylo zjištěno, že výsledky MKP a MKO jsou značně odlišné zejména ve druhé operaci, což je patrně způsobeno větší citlivostí MKP na lokální změny. Z analýzy průběhu vláken je dále patrné, že u první i druhé operace realitě nejvíce odpovídala MKP a MKO vyššího řádu. U MKO byla také zjištěna tvorba nereálné kapsy během druhé operace. Dále bylo prokázáno, že při použití MKO dochází ke zvětšení vzdálenosti přeložek od hrany otvoru. Pro další simulace je tedy zejména z posledního uvedeného důvodu použita metoda konečných prvků.

### 3.2.3 Volba modelu tření [36], [52], [53]

Třecí model je pro proces simulace jedním z důležitých faktorů a jeho volba může ovlivnit i výslednou polohu přeložky. Je tedy nutné provést uváženou volbu třecího modelu. V programu Simufact Forming je možno zvolit mezi adhezním, kohezním (Coulombovým), kombinovaným a automatickým třecím modelem. V programu je také možné provést simulace bez uvažování tření, avšak tento přístup není v tomto případě reálný.

Adhezní model využívá k určení třecího napětí tzv. třecí faktor  $m$ . Ten se uvažuje v mezích od nuly do jedné. Pokud je při výpočtu uvažováno  $m = 1$  dochází k největší adhezi materiálu, naopak, pokud je  $m = 0$  není tření mezi materiály uvažováno. Třecí napětí se pak určí dle následujícího vztahu:

$$\tau_{ADH} = m \cdot \sigma_K \quad (3.8)$$

kde:  $\tau_{ADH}$  – třecí napětí dle adhezního modelu [MPa],  
 $m$  – třecí faktor [-],  
 $\sigma_K$  – mez kluzu ve smyku [MPa].

Kohezní neboli Coulombův třecí model stanovuje třecí napětí jako součin normálového napětí a součinitele tření. Hodnota součinitele tření se pohybuje od nuly do 0,577. Maximální hodnota tohoto součinitele vychází z podmínky plasticity HMM. Konkrétní hodnota součinitele tření je dána materiály těles, drsností stykových ploch, podmínkami mazání atd. Třecí napětí dle kohezního modelu lze určit následujícím vzorcem:

$$\tau_{KOH} = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.9)$$

kde:  $\tau_{KOH}$  – třecí napětí dle kohezního modelu [MPa],  
 $\mu$  – třecí koeficient kohezního modelu [-],  
 $\sigma_n$  – normálové napětí [MPa].

Poslední možnou variantou je kombinovaný třecí model. Jak již název napovídá, jedná se o kombinaci obou předchozích možností. Výpočet pak probíhá dle kohezního modelu až dokud třecí napětí nedosáhne jisté kritické hodnoty, která je reprezentována zadanou hodnotou třecího faktoru. Od toho momentu pak probíhá výpočet dle adhezního modelu.

Program Simufact Forming nabízí také možnost automatického modelu tření. Uživatel zadá pouze koeficient  $k$ , který vyjadřuje míru tření. Program poté na základě všech ostatních procesních podmínek sám vyhodnotí, jaký třecí model použije pro výpočet.

Jak bylo určeno v předešlých kapitolách, tak pro výběr třecího modelu je použita metoda konečných prvků a pro zjištění finální polohy přeložky metoda flowlines. Výpočtová síť byla použita stejná jako v předešlých výpočtech.

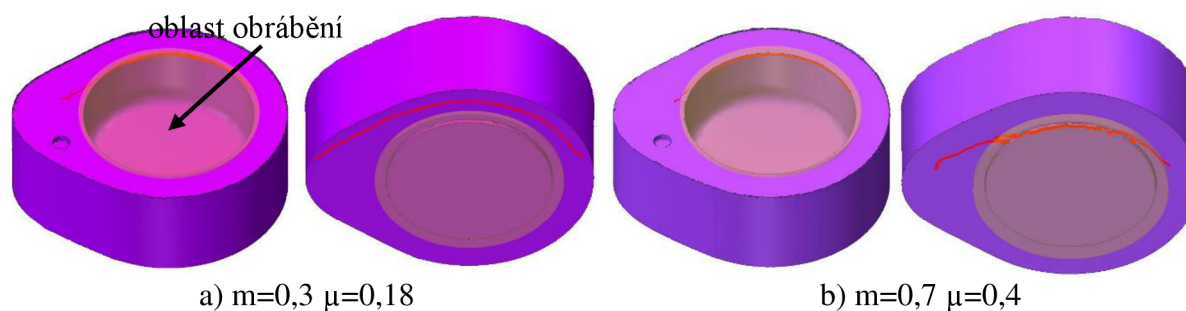
Byla provedena série simulací s automatickým třecím modelem, přičemž byly uvažovány koeficienty  $k$  0,1; 0,4 a 0,8. Následně byl testován kombinovaný třecí model. Pro kombinovaný model byly uvažovány tyto kombinace součinitele třecího faktoru a součinitele tření:  $m = 0,3$   $\mu = 0,18$ ;  $m = 0,4$   $\mu = 0,3$ ;  $m = 0,7$   $\mu = 0,4$ . Hodnoty třecího faktoru a součinitele tření pro simulaci s oběma modely byly zvoleny na základě databáze Simufact Formingu, přičemž byly voleny podmínky dobrého, středního a špatného mazání. Souhrnné výsledky vzdáleností přeložek při použití adhezního a kombinovaného modelu jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Vzdálenosti přeložek při různých modelech tření.

Automatický model			
k [-]		Vzdálenost horní přeložky [mm]	Vzdálenost dolní přeložky [mm]
0,1		0	3,45
0,4		0	2,35
0,8		0	0
Kombinovaný model			
m [-]	$\mu$ [-]	Vzdálenost horní přeložky [mm]	Vzdálenost dolní přeložky [mm]
0,3	0,18	0	3,3
0,4	0,3	0	2,67
0,7	0,4	0	0

Jak je vidět v uvedené tabulce, tak volba modelu tření ovlivňuje pouze finální polohu dolní přeložky, zatímco horní přeložka je ve všech případech přímo na hraně předkovaného otvoru. Dále lze vyzorovat, že čím je třecí koeficient a třecí faktor vyšší, tím více se dolní přeložka přibližuje k hraně otvoru, což je velmi důležitý poznatek, díky kterému lze konstatovat, že případná změna používaného maziva, či úprava procesu mazání by mohla vést k odstranění dolní přeložky z oblasti obrábění. Ze srovnání je dále patrné, že při podmínkách středního mazání je rozdíl mezi oběma modely 0,32 mm. Při podmínkách dobrého mazání pak rozdíl činí pouze 0,15 mm. U horšího mazání není rozdíl mezi oběma modely patrný. Avšak výpočet s kombinovaným modelem byl stabilnější.

Obě přeložky způsobují vyštípnutí materiálu během obrábění otvoru. Z této skutečnosti plyne podmínka verifikace procesu, neboť aby došlo k vyštípnutí musí být finální poloha přeložek v oblasti, kde dochází k obrábění. Oblast obrábění a porovnání dobrého a špatného mazání kombinovaného modelu zachycuje obr. 66. Zmíněnou podmínku splňuje automatický model s koeficientem  $k = 0,8$  a také kombinovaný model při  $m = 0,7$  a  $\mu = 0,4$ . Jelikož byla stabilita výpočtu při využití automatického modelu menší než u kombinovaného modelu, je pro další simulace použit kombinovaný model s  $m = 0,7$  a  $\mu = 0,4$ .



Obr. 66 Vzdálenosti přeložek při použití různých třecích modelů

Provedení ověřovací simulace byl nezbytný krok pro celý nadcházející proces optimalizace polohy přeložek. Bylo nezbytné určit zejména metodu odhalení finální polohy přeložky (model otřepů  $\times$  použití flow line), optimální výpočtovou metodu (MKP  $\times$  MKO) a odpovídající model tření (automatický  $\times$  kombinovaný).

Po celém procesu ověřovací simulace bylo tedy určeno, že veškeré další simulace jsou provedeny s flow liny, místo modelů otřepů. Jako výpočtová metoda je použita metoda konečných prvků. Ze všech kombinací třecích modelů a jejich koeficientů byl zvolen kombinovaný model tření, kdy  $m = 0,7$  a  $\mu = 0,4$ . Dále byla během ověřovací simulace zjištěna skutečnost, že tření výrazně ovlivňuje polohu spodní přeložky, tedy zde vzniká jistá možnost optimalizace.

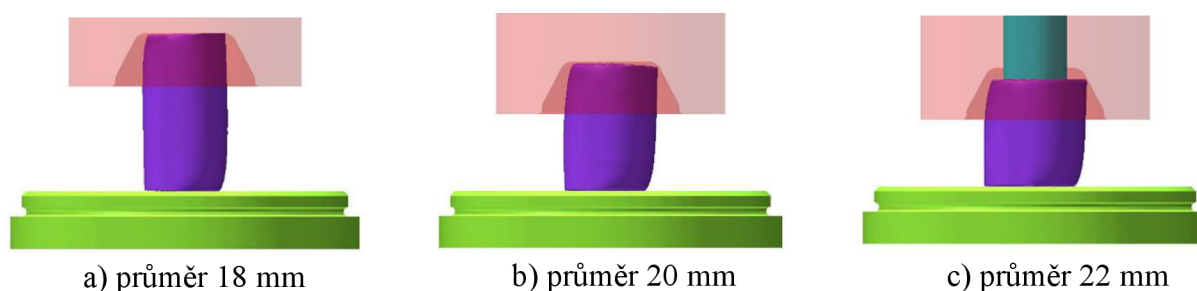


### 3.3 Optimalizace polohy přeložek [54]

Po provedení ověřovací simulace a stanovení všech potřebných faktorů je možno přistoupit k vlastní optimalizaci finální polohy přeložek. Cílem optimalizace je docílit takové polohy přeložek, aby neležely v oblasti obrábění materiálu, případně aby byly obě přeložky pouze v kovací bláně. Pro optimalizaci lze provést tyto kroky:

- změna průměru polotovaru,
- otočení nástrojů vzhledem k polotovaru,
- úprava výšky předkovku,
- konstrukční úpravy tvářecích nástrojů.

Jako první byla prozkoumána možnost optimalizace pomocí změny průměru polotovaru. Byly uvažovány tři průměry, které byly určeny v kap. 3.1 a to konkrétně průměr 18, 20 a 22 mm. Ustavení všech průměrů v první operaci ukazuje obr. 67. U polotovaru o průměru 22 mm bylo nutné zahrnout i přídržovač, neboť při jeho zanedbání docházelo k nepřípustnému vychylování polotovaru. Srovnání vzdálenosti přeložek je shrnuto v tab. 11.

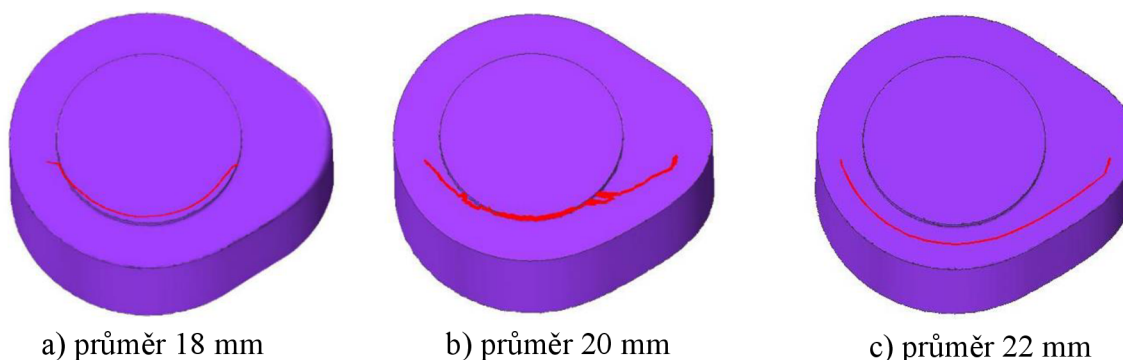


Obr. 67 Ustavení různých polotovarů

Tab. 11 Srovnání vzdálenosti přeložek s různými průměry polotovaru.

Průměr pol. [mm]	Vzdálenost horní přeložky [mm]	Vzdálenost dolní přeložky [mm]
18	0 (větší vzdálenost od čela)	-0,77
20	0	0
22	0,40	2,19

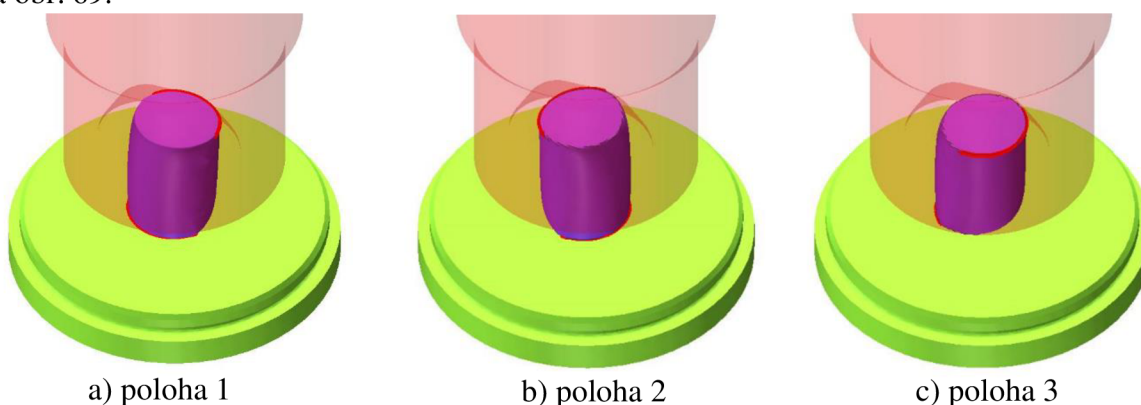
Z tabulky je patrné, že stávající průměr 20 mm je při současné konstrukci a natočení nástrojů nejhorší variantou z uvedených možností, jelikož obě přeložky leží přímo na hraně předkovaného otvoru. U průměru polotovaru 18 mm bylo zjištěno, že velká část dolní přeložky je umístěna v kovací bláně. Bohužel horní přeložka je stále na hraně otvoru, avšak je více vzdálena od horní plochy vačky, tedy hlouběji v otvoru. Polotovaz průměru 22 mm je vyhovující z hlediska polohy dolní přeložky, která je umístěna 2,19 mm od okraje otvoru, což je již dostačující vzdálenost, která zaručí, že nedojde k vyštípnutí materiálu. Dolní přeložka je však stále vzdálena pouze 0,40 mm od okraje otvoru, což je nedostatečná vzdálenost. Porovnání vzdálenosti dolních přeložek ilustruje obr. 68.



Obr. 68 Porovnání vzdálenosti dolních přeložek u různých průměrů polotovaru

Celkově lze konstatovat, že výchozí průměr má značný vliv na umístění přeložek, zejména pak dochází k ovlivnění vzdálenosti dolní přeložky. Oproti průměru 18 mm je u průměru 22 mm dolní přeložka o 2,96 mm dál od hrany předkovaného otvoru, což je velmi markantní rozdíl. Naopak největší rozdíl ve vzdálenosti horní přeložky činí pouze 0,40 mm.

Další možností změny polohy přeložek je otočení předkovacího razníku vzhledem k odstřížku. Tím se změní výchozí poloha otřepu, což způsobí změnu finální polohy přeložek. Bylo testováno otočení vždy o 90°. To znamená, že horní otřep je umístěn buď u nosu vačky (poloha 2), nebo u zadní části vačky (poloha 3). Všechny tři polohy nástrojů jsou znázorněny na obr. 69.



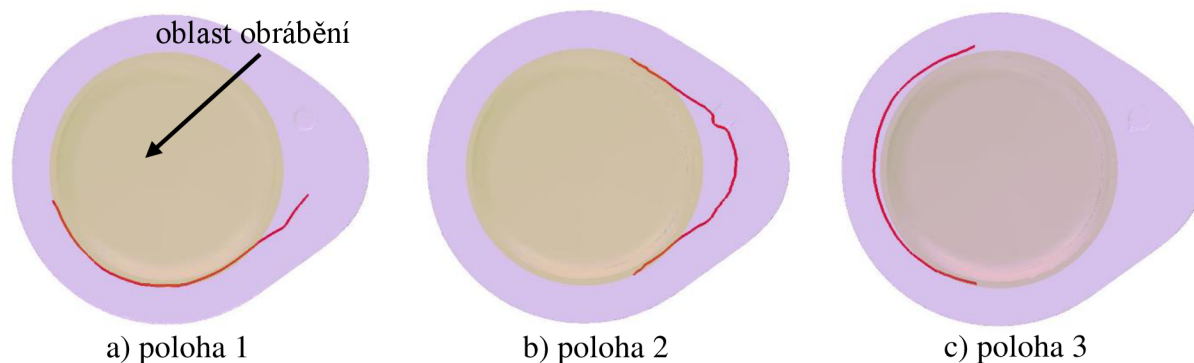
Obr. 69 Natočení nástrojů

Simulace s různým natočením nástrojů byly opět provedeny pro všechny tři testované průměry vstupního polotovaru. Souhrnné výsledky uvádí tab. 12.

Tab. 12 Srovnání vzdálenosti přeložek při různém natočení nástrojů.

Poloha nástrojů	Vzdálenost horní přeložky [mm]			Vzdálenost dolní přeložky [mm]		
	Ø 18 mm	Ø 20 mm	Ø 22 mm	Ø 18 mm	Ø 20 mm	Ø 22 mm
1	0	0	0,40	-0,77	0	2,15
2	0	0	0,44	-0,77	0	2,15
3	0	0	0,47	-0,77	0	2,15

Ze srovnání plyne, že u průměrů polotovaru 18 a 20 mm nedochází při natočení k výrazným změnám a vždy lze nalézt místo, kde je přeložka na hraně předkovaného otvoru. Nutno však podotknout, že natočení do jisté míry ovlivňuje, jak velkou částí leží přeložka v kritické oblasti, jak je vidět na obr. 70. Tento fakt v tabulce není zohledněn, jelikož byla měřena vždy vzdálenost v kritickém místě, kde je přeložka nejbližší k hraně otvoru. Jisté rozdíly ve vzdálenosti přeložek lze pozorovat u polotovaru o průměru 22 mm. Avšak je třeba si uvědomit, že nástroj pro měření sice měří vzdálenost přesně, ale je nutné ručně, bez jakékoliv funkce uchopení specifických bodů, označit body, mezi kterými má být vzdálenost měřena, čímž dochází ke zkreslení měření.

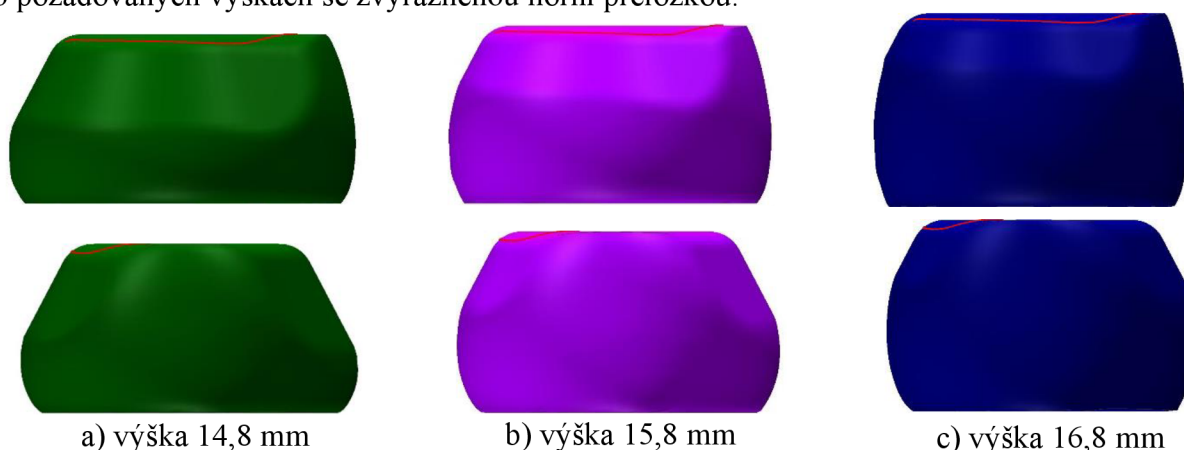


Obr. 70 Poloha horní přeložky při různém natočení nástrojů pro průměr 22 mm

Z uvedeného obrázku je patrné, že při použití polotovaru o průměru 22 mm a současném natočení předkovacího razníku (poloha 1) je v oblasti obrábění větší část přeložky než u ostatních dvou variant natočení. Pokud je předkovací razník otočen tak, aby byl horní otřep u nosu vačky (poloha 2) jsou v oblasti obrábění pouze okraje přeložky. Při natočení, kdy horní otřep směřuje k zadní části vačky (poloha 3) je v obráběcí oblasti přeložka pouze na jedné straně, avšak na druhé straně je přeložka blízko u oblasti obrábění. Polohy horních přeložek při různých natočeních uvádí příloha 4.

Další možností optimalizace je zvýšit, nebo snížit výšku předkovku. Je však nutno brát ohled na to, že se zmenšující se výškou předkovku se zvětšuje jeho šířka a je nutné zajistit, aby se předkovek vešel do kovací záпустky. Naopak při větší výšce předkovku nedochází k tak dobrému předkování nosu vačky, což je z hlediska zatékání kovu a správného dokování velmi problematické místo. Současná výška předkovku je přibližně 15,8 mm s přihlédnutím k teplotní roztažnosti oceli.

Pro optimalizaci bylo uvažováno zvýšení a zmenšení předkovku pouze o 1 mm. Byly tedy provedeny simulace s výškami předkovku (14,8, 15,8 a 16,8 mm). Testování vlivu výšky předkovku bylo provedeno pro všechny tři průměry polotovaru a pro polohu 1, neboť jiná poloha ovlivňuje částečně také geometrii předkovku. Pro testování vlivu výšky je vhodné, aby nebyla geometrie ničím dalším ovlivněna. Na obr. 71 jsou zobrazeny tři předkovky o požadovaných výškách se zvýrazněnou horní přeložkou.



Obr. 71 Předkovky různých výšek

Jak je možné vidět na výše uvedeném obrázku, tak u předkovku o výšce 14,8 mm je značně patrná nesouměrnost, která je způsobena deformací odstrižku při dělení tyče. Tato nesouměrnost se projevuje v menší míře i na současných předkovicích.

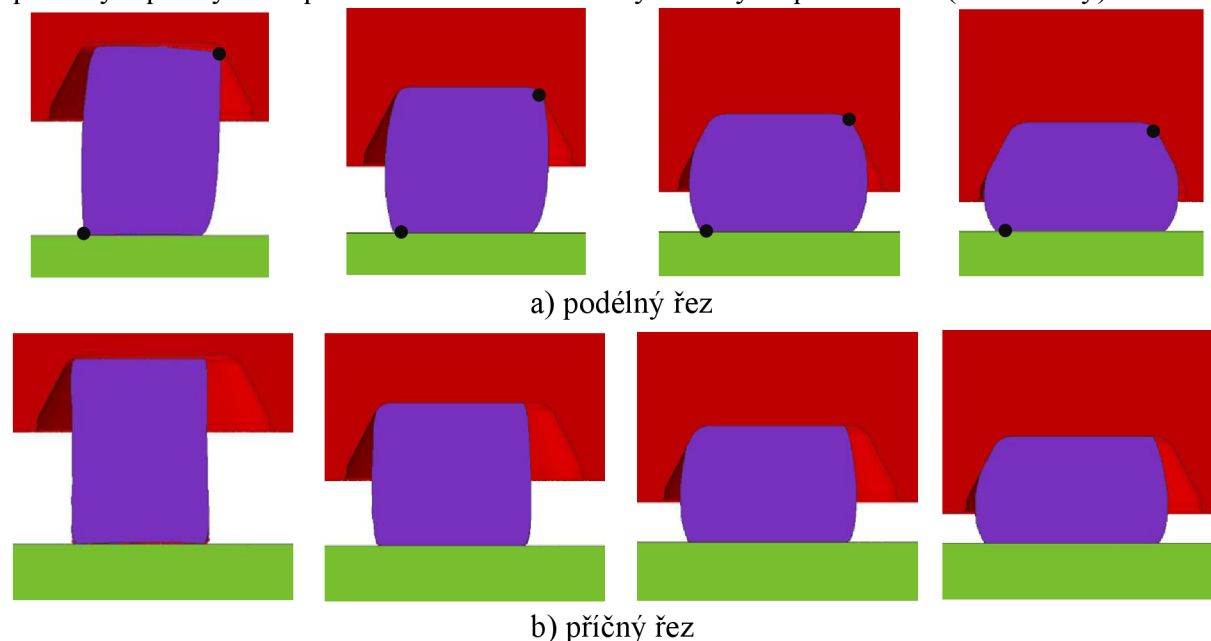
Tab. 13 Srovnání vzdálenosti přeložek při různých výškách předkovku.

Výška předkovku [mm]	Vzdálenost horní přeložky [mm]			Vzdálenost dolní přeložky [mm]		
	Ø 18 mm	Ø 20 mm	Ø 22 mm	Ø 18 mm	Ø 20 mm	Ø 22 mm
14,8	0	0	0,40	-0,77	0,62	2,15
15,8	0	0	0,40	-0,77	0	2,15
16,8	0	0	0,58	-0,77	0	2,15

Jak je patrné, tak obě varianty úpravy výšky předkovku se nijak zásadně neprojevily na finální poloze obou přeložek. Malý rozdíl nastal u polotovaru průměru 20 mm a výšce předkovku 14,8 mm, kdy byla vzdálenost horní přeložky od hrany předkovaného otvoru zvětšena o 0,62 mm. Tato vzdálenost však není dostačující k tomu, aby přeložka již nebyla v oblasti obrábění. Další změnu lze pozorovat u průměru polotovaru 22 mm a výšce předkovku 16,8 mm, kdy byla vzdálenost horní přeložky zvětšena z 0,40 mm na 0,58 mm, tedy o 0,18 mm, což není značný rozdíl. Úprava výšky předkovku se tedy neukázala jako efektivní úprava.

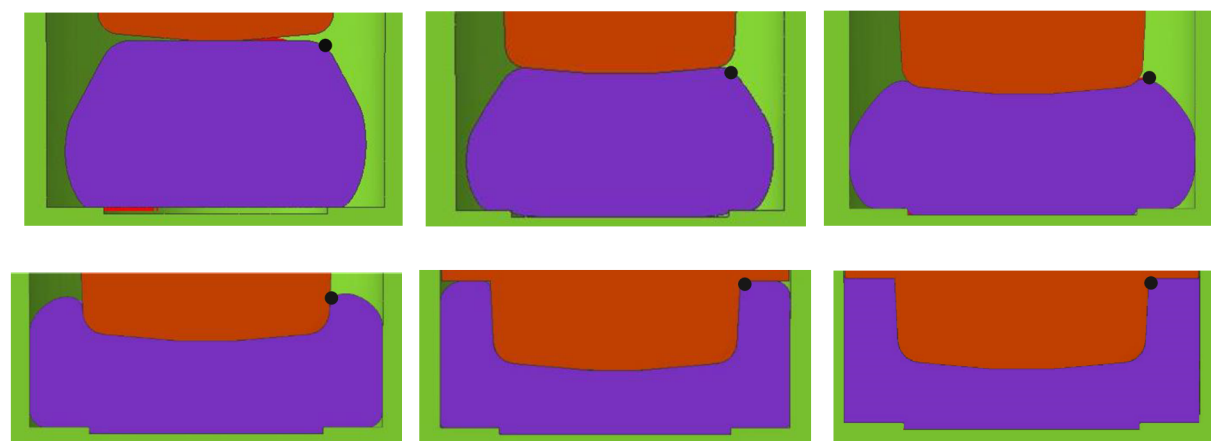
Dalším krokem optimalizace byla úprava geometrie tvářecích nástrojů. Před prováděním jakýchkoliv úprav bylo třeba nejprve analyzovat tok materiálu, tedy popsat průběh deformace materiálu v jednotlivých tvářecích operacích. Analýza toku materiálu byla provedena s průměrem 20 mm v první poloze natočení nástrojů a standardní výškou předkovku.

V první tvářecí operaci nejdříve probíhá jednoduché pěchování odstrižku až do okamžiku, kdy se zpěchovaný odstrižek dotkne boční stěny razníku, která pak začne usměřňovat tok materiálu směrem k nosu předkovku. Dostatečné předkování nosu vačky je nejdůležitějším úkolem předkovací operace. U podélného řezu je také zřetelná asymetrie předkovku. Strana, na které je otřep má přechod ze zkoseného tvaru umístěn výše než strana bez otřepu. Dále je také vidět, že poloha přeložek se během předkování mění pouze nepatrně. Na obr. 72 je zobrazen podélný a příčný řez s průběhem deformace a zvýrazněnými přeložkami (černé body).

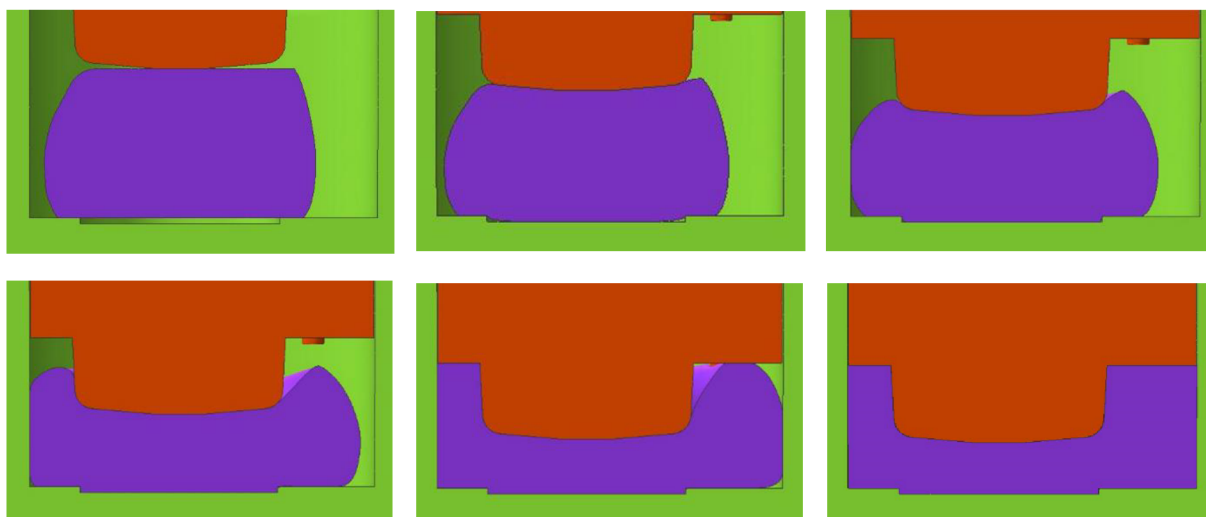


Obr. 72 Průběh deformace předkovku

Průběh deformace a výsledná poloha přeložky je ze značné míry ovlivněna geometrií tvarovacího trnu. Jak je vidět na obr. 73, nejdříve dochází ke kontaktu razníku s předkovkem malou rovnou plochou. Poté je tok materiálu usnadněn zkosenou plochou razníku. Toto zkosení také usnadňuje pohyb přeložky směrem k obvodu tvarovacího trnu. Poté dochází k vytlačování materiálu. Následně dojde ke stlačení pomocí razníku. Na základě průběhu deformace lze konstatovat, že finální polohu horní přeložky by patrně bylo možné do jisté míry ovlivnit geometrií tvarovacího trnu. Jak je možné pozorovat na obr. 74, tak zadní část zápusťky se zaplňuje snadněji, než nos vačky.



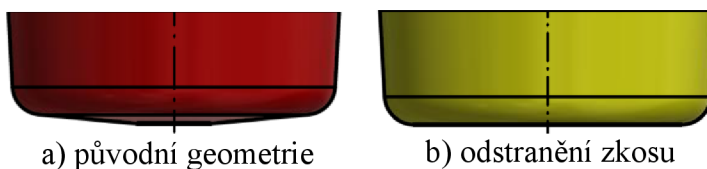
Obr. 73 Průběh deformace výkovku v příčném řezu



Obr. 74 Průběh deformace výkovku v podélném řezu

Z průběhu deformace výkovku plyne, že zkosení na tvarovacím trnu může zapříčinit snadnější tok přeložky. Jako možná úprava nástroje se tedy jeví regulace úhlu jeho zkosení.

První možnou variantou je zkosení zcela odstranit, viz obr. 75. Touto úpravou by se mohl zpomalit pohyb přeložky, což by vedlo k tomu, že horní přeložka bude po vykování umístěna



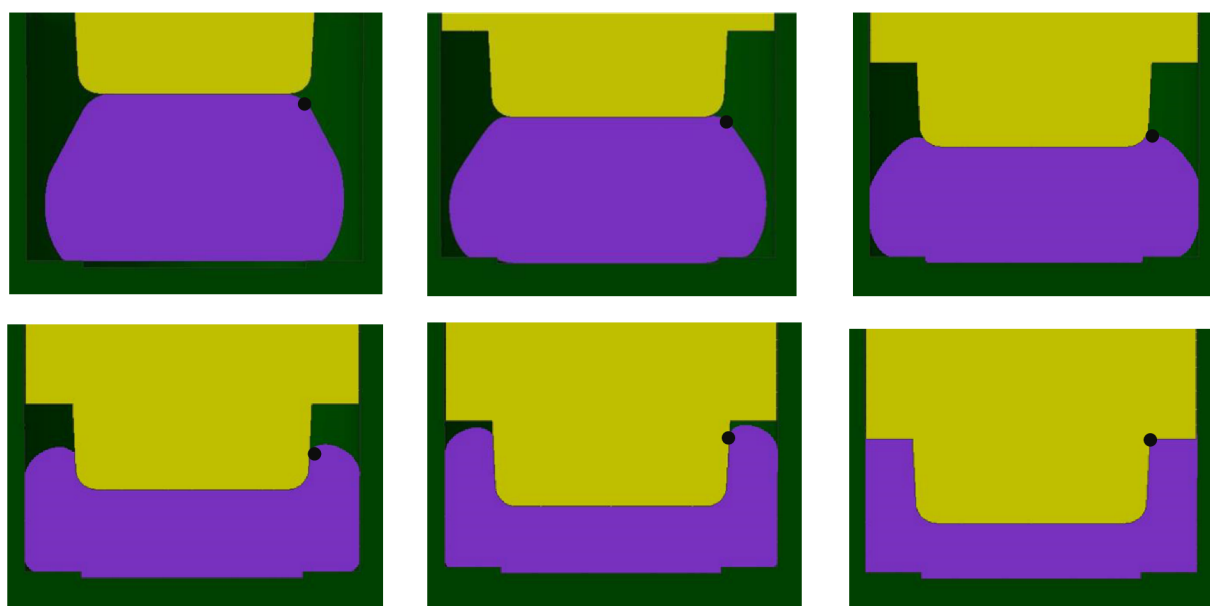
a) původní geometrie

b) odstranění zkosu

Obr. 75 Upravený tvarovací trn-odstranění zkosu

v bláně předkovaného otvoru a bude v následující operaci odstraněna. Tato možnost byla testována na všech třech průměrech polotovarů v základní poloze natočení nástrojů.

Na obr. 76 je patrné, že hlavní rozdíl při použití průměru 20 mm nastal pouze v počáteční fázi procesu tváření. Bohužel pohyb přeložky nebyl odstraněním zkosení z tvarovacího trnu výrazným způsobem ovlivněn a opět došlo ke snadnému pohybu přeložky k obvodu tvarovacího razníku. Pro zvýšení efektivity této úpravy nástrojů by bylo patrně nutné, aby přeložka na předkovku byla umístěna blíže směrem k ose otvoru. Souhrnné porovnání vzdálenosti přeložek s tvarovacím trnem bez zkosení pro všechny tři průměry polotovaru je uvedeno v tab. 14.



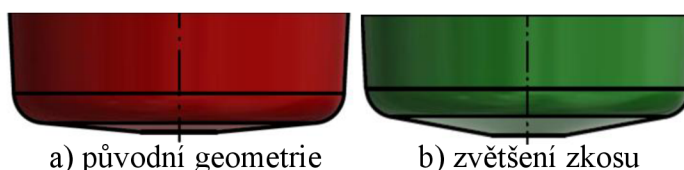
Obr. 76 Průběh deformace s tvarovacím trnem bez zkosení pro průměr 20 mm

Tab. 14 Srovnání vzdálenosti přeložek při odstranění zkosení tvarovacího trnu.

Průměr pol. [mm]	Vzdálenost horní přeložky [mm]		Vzdálenost dolní přeložky [mm]	
	Původní	S úpravou	Původní	S úpravou
18	0	0	-0,77	-0,77
20	0	0	0	0
22	0,40	0,40	2,19	2,19

Fakt, že odstranění zkosení z tvarovacího trnu nevedlo k žádné změně, je dokumentován i v uvedené tabulce, kde je vidět, že u žádného použitého průměru polotovaru nenastala žádná změna. Tato varianta úpravy je tedy zcela neúčinná.

Další variantou úpravy tvarovacího trnu je naopak zvětšení úhlu zkosení. Aby bylo zjištěno, zda má tato úprava nějaký vliv na výslednou polohu přeložek byl úhel zkosení zvětšen dvojnásobně, viz obr. 77. Účelem úpravy je zrychlení toku materiálu a tím i horní přeložky, což by mohlo při použití

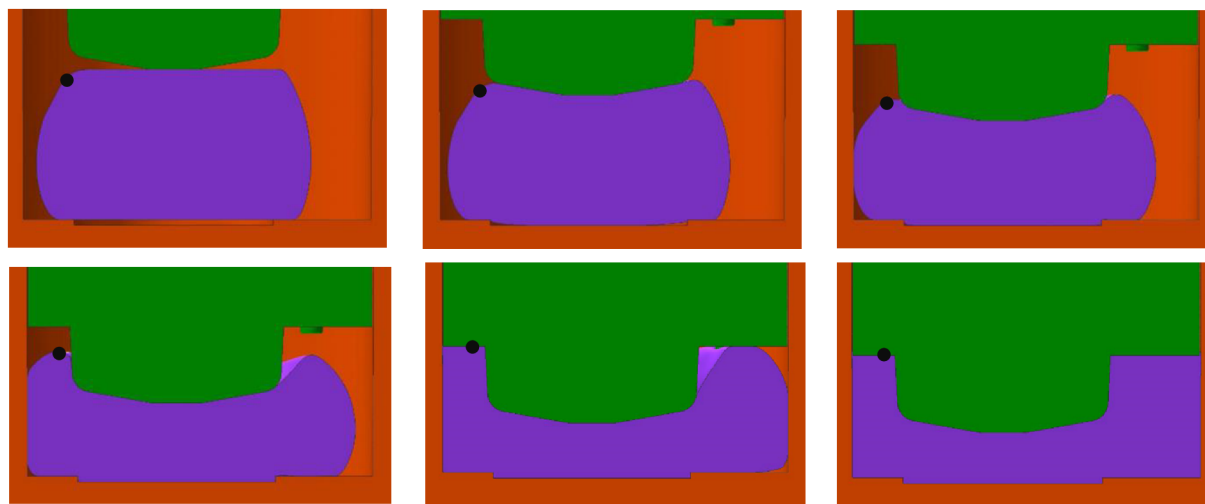


a) původní geometrie b) zvětšení zkosu

Obr. 77 Zvětšení zkosu tvarovacího trnu

průměru polotovaru 22 mm vést ke zvětšení vzdálenosti přeložky od hrany otvoru. Simulace byla provedena pro polohu nástrojů 2 a 3, neboť u těchto poloh byla zjištěna větší vzdálenost horní přeložky než u polohy 1 a dolní přeložka je u tohoto polotovaru mimo oblast obrábění.

Z průběhu deformace při poloze nástrojů 3, který je uveden na obr. 78 plyne, že zvětšení zkosení na tvarovacím trnu skutečně usnadnilo tečení materiálu. Bohužel výsledná poloha přeložky opět nebyla významným způsobem ovlivněna. Obdobně tomu bylo i u simulace s polohou nástrojů 2, jak dokazuje tab. 15.



Obr. 78 Průběh deformace (větší zkosení tvarovacího trnu)

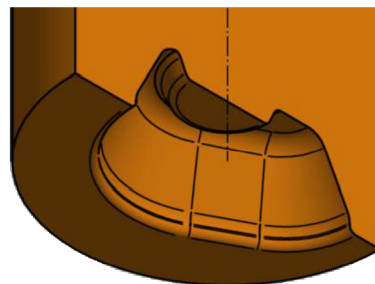
Tab. 15 Srovnání vzdálenosti přeložek (větší zkosení tvarovacího trnu).

Poloha nástrojů	Vzdálenost horní přeložky [mm]		Vzdálenost dolní přeložky [mm]	
	Původní	S úpravou	Původní	S úpravou
2	0,44	0,44	2,15	2,15
3	0,47	0,67	2,15	2,63

Z tabulky plyne, že u polohy 3 došlo neočekávaně k posunu spodní přeložky, jelikož ta ale není ovlivněna tvarovacím trnem, jedná se patrně o nepřesnost flowline. U polohy 3 také nastal rozdíl 0,2 mm ve vzdálenosti horní přeložky, což ale není výrazná změna. Na základě uvedených výsledků lze konstatovat, že ani větší úhel zkosení není účinnou úpravou.

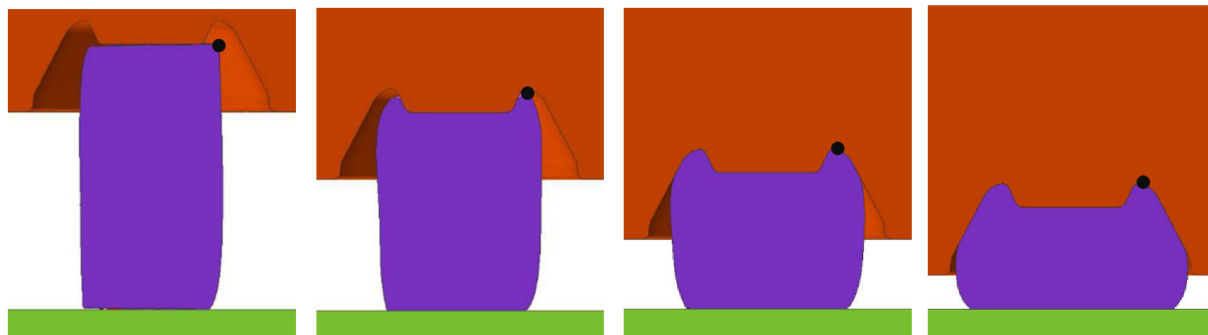
Jelikož se tyto úpravy tvarovacího trnu ukázaly jako téměř neúčinné, tak bylo přikročeno k úpravě předkovacího razníku s případnou kombinací již provedených úprav.

Nejprve byla testována možnost kombinace odstranění zkosení tvarovacího trnu společně se zhotovením výstupku ve středu předkovacího razníku, jak je zobrazeno na obr. 79. To by mělo vést ke zmenšení vzdálenosti přeložky od středu předkovku, což by ve spojení s odstraněním zkosení z tvarovacího trnu vedlo k umístění horní přeložky do kovací blány. Bohužel tato varianta obnáší jisté riziko v podobě možnosti vzniku dalších přeložek během operace kování. Takto vzniklé přeložky by však měly být umístěny také v kovací bláně, a tudíž by byly odstraněny při děrování. Simulace byla provedena s průměrem polotovaru 18 mm, jelikož při použití tohoto polotovaru lze předpokládat menší vzdálenost od středu předkovku a dolní přeložka je z velké části v kovací bláně.



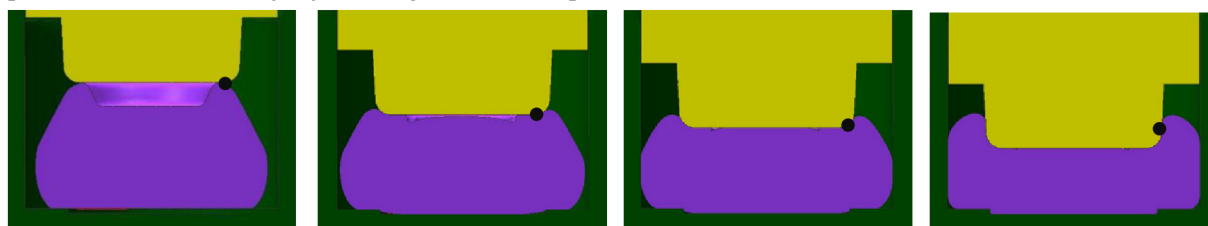
Obr. 79 Úprava předkovacího razníku-výstupek

Průběh deformace podélného řezu předkovku s takto upraveným předkovacím razníkem je zachycen na obr. 80. Je patrné, že pohyb přeložky je usměrněn do středu výkovek.

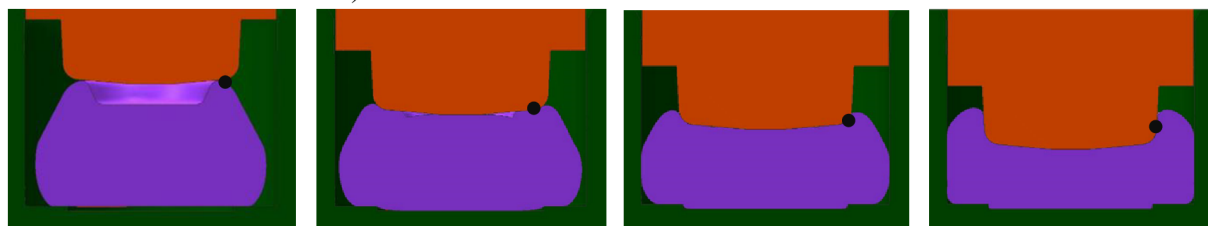


Obr. 80 Průběh deformace předkovku-výstupek na předkovacím razníku

Na obr. 81 je vidět, že vlivem dutiny v předkovku skutečně dochází k tvorbě přeložek, neboť stěny dutiny jsou stlačeny tvarovacím trnem. Jelikož takto vzniklá přeložka měla příliš velkou plochu, docházelo opakovaně ke zborcení výpočtové sítě. Tento problém nebyl odstraněn ani jiným nastavením podmínek remeshingu. Proto bohužel nebyla simulace operace kování dokončena. Avšak i z posledního kroku před zborcením výpočtové sítě lze usoudit, že horní přeložka není v kovací bláně, nýbrž opět na okraji předkovaného otvoru, viz obr. 81a. Tato simulace byla provedena i se standardním tvarovacím trnem, avšak výsledek byl téměř stejný (obr. 81b). Lze tedy konstatovat, že kombinace těchto úprav opět není efektivní. Upravený předkovek a následný výkovek je uveden v příloze 5.



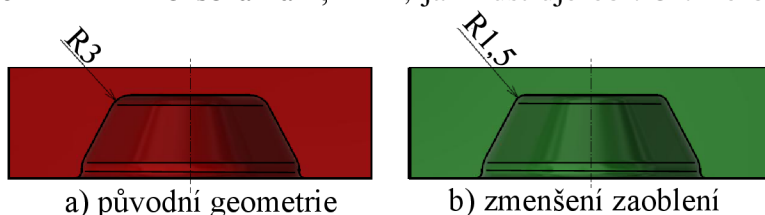
a) simulace s tvarovacím trnem bez zkosení



b) simulace se standardním tvarovacím trnem

Obr. 81 Průběh deformace během kování (dutina v předkovku)

Dále byl testován vliv velikosti zaoblení horní části předkovacího razníku. Pro tento účel byla velikost zaoblení z původních 3 mm zmenšena na 1,5 mm, jak ilustruje obr. 82. To by mohlo mít za následek větší vzdálenost přeložky od středu předkovku, což by v kombinaci s použitím polotovaru průměru 22 mm mělo zaručit výslednou polohu přeložky mimo oblast obrábění. Dolní přeložka je při použití tohoto průměru mimo oblast obrábění.



Obr. 82 Úprava předkovacího razníku-zmenšení zaoblení

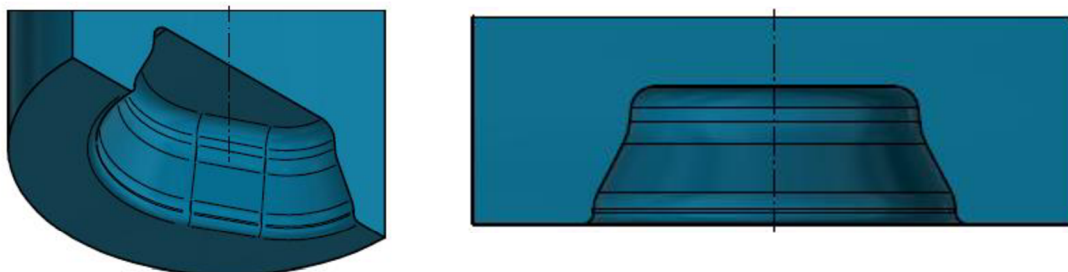
Simulace byly provedeny s průměrem polotovaru 22 mm a polohou nástrojů 2 a 3. Jelikož průběh deformace byl s provedenou úpravou téměř shodný, jako při použití neupravených nástrojů, jsou výsledky pouze shrnuty v tab. 16.

Tab. 16 Srovnání vzdálenosti přeložek (změna zaoblení předkovacího razníku).

Poloha nástrojů	Vzdálenost horní přeložky [mm]		Vzdálenost dolní přeložky [mm]	
	Původní	S úpravou	Původní	S úpravou
2	0,44	0,44	2,15	2,15
3	0,47	0,45	2,15	2,15

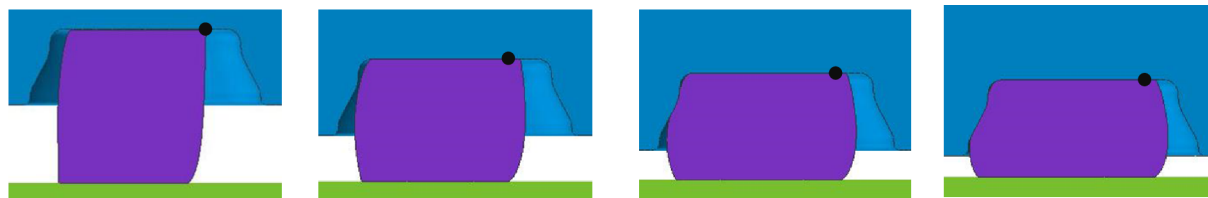
Při zmenšení velikosti zaoblení razníku se neprojevila téměř žádná změna vzdálenosti horní přeložky. Jde tedy opět o neefektivní úpravu.

Další úprava předkovacího razníku spočívá ve zhotovení „zlomu“ (obr. 83), od kterého je úhel zkosení značně menší. Tato úprava má za cíl zamezit toku přeložky v první operaci a tím jejímu přibližování ke středu předkovku. Testování bylo opět provedeno s průměrem polotovaru 22 mm v poloze 2 a 3 z obdobných důvodů jako v předešlém případě.

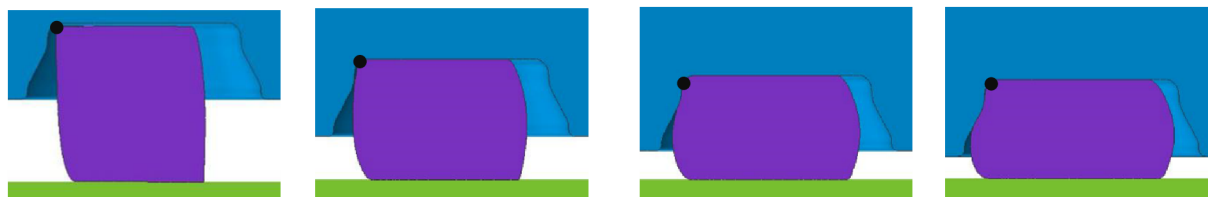


Obr. 83 Úprava předkovacího razníku-„zlom“

Z obr. 84 je patrné, že při předkování skutečně nedochází k výraznému pohybu přeložky. Lze ale říci, že u polohy 2 (obr. 84a) dojde k většímu posunu než u polohy 3 (obr. 84b).



a) průběh deformace předkovku (poloha 2)

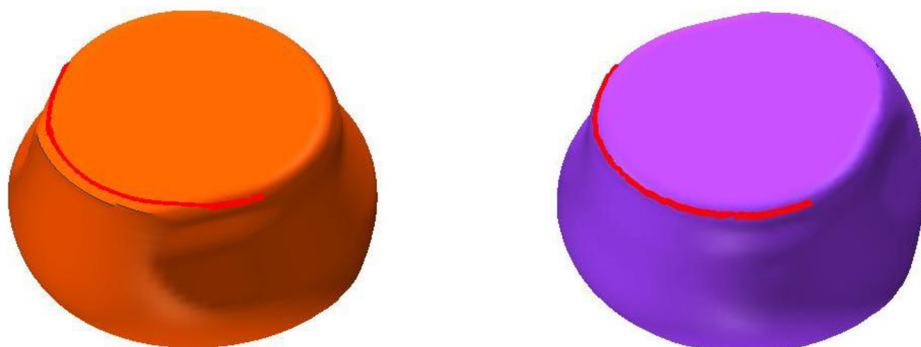


b) průběh deformace předkovku (poloha 3)

Obr. 84 Průběh deformace a výsledné předkovky při úpravě předkovacího razníku



Výsledné předkovky při použití upraveného předkovacího razníku ilustruje obr. 85. Lze vidět, že u polohy 2 není přeložka přímo na hraně nosu, a tedy došlo k malému posunu, jak je zmíněno výše.

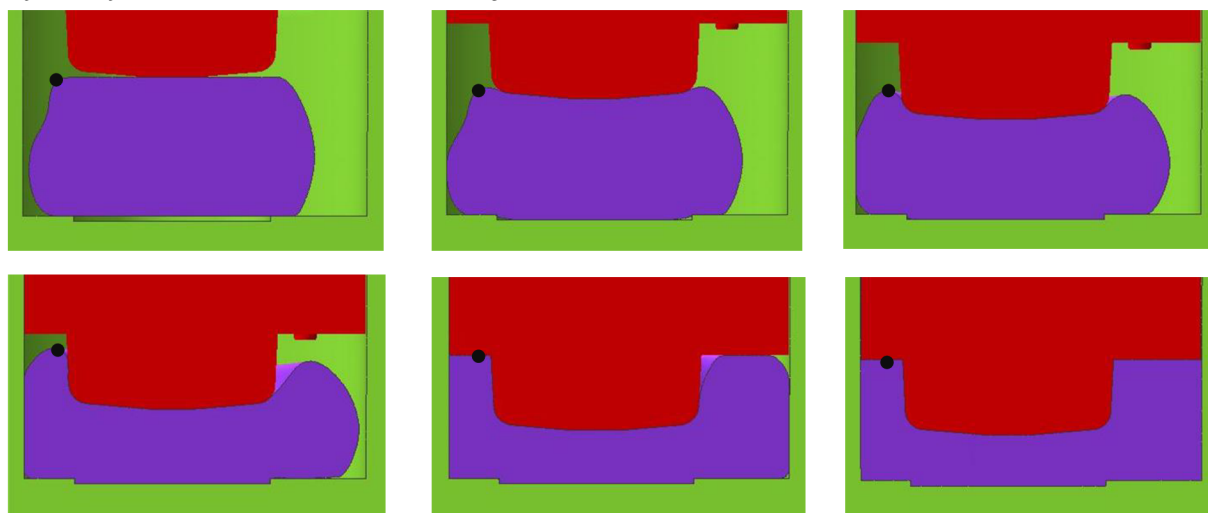


a) předkovek poloha nástrojů 2

b) předkovek poloha nástrojů 3

Obr. 85 Výsledné předkovky při úpravě předkovacího razníku

Průběh deformace při kování je uveden na obr. 86. Je patrné, že ačkoliv je průběh deformace jiný než u současného předkovku, opět nenastal výrazný posun horní přeložky. Souhrnné výsledky obou variant natočení nástrojů uvádí tab. 17.



Obr. 86 Průběh deformace během kování (upravená dutina předkovacího razníku)

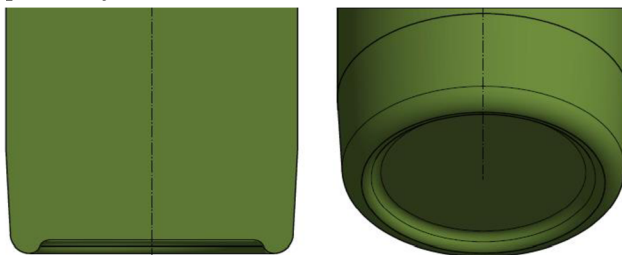
Tab. 17 Srovnání vzdálenosti přeložek (upravená dutina předkovacího razníku).

Poloha nástrojů	Vzdálenost horní přeložky [mm]		Vzdálenost dolní přeložky [mm]	
	Původní	S úpravou	Původní	S úpravou
2	0,44	0,44	2,15	2,45
3	0,47	0,42	2,15	3,83

Z tabulky je patrné, že k markantní změně polohy horní přeložky nedošlo ani u jedné z testovaných poloh nástrojů. U polohy 3 však došlo k posunu dolní přeložky oproti původnímu stavu, a to konkrétně o 1,68 mm. Tento posun je způsoben tím, že již na předkovku je dolní přeložka dále od středu předkovku, jak ukazuje příloha 6. Úpravou dutiny předkovacího razníku tedy bylo dosaženo pouze posunu dolní přeložky. Tento problém lze však vyřešit pouze samotným použitím polotovaru o průměru 22 mm, jak bylo dokázáno dříve. Opět se tedy jedná o neefektivní úpravu.

Jelikož bylo zjištěno, že úpravy zkosení tvarovacího trnu, ani úpravy dutiny předkovacího razníku nevedou ke změně finální polohy horní přeložky, je nutné otestovat úpravy tvaru tvarovacího trnu. Jelikož průměr otvoru vačky je jasně daný výkresem od zákazníka, není možné, jakkoliv změnit průměr tvarovacího trnu.

Jak se ukázalo u každé z provedených simulací, tak horní přeložka je vždy vytlačena k okraji tvarovacího trnu již v první polovině deformace výkovku. Dále bylo také zjištěno, že všechny úpravy vedoucí k oddálení horní přeložky od okraje otvoru nevedly k úspěchu. Jelikož pravděpodobně není možné tvarovací trn upravit tak, aby došlo k oddálení přeložky, byla navržena úprava vedoucí k zakotvení horní přeložky v kovací bláně během celého tvářecího procesu. Navrženou úpravou je zhotovení tvarové dutiny v tvarovacím razníku, viz obr. 87. Do této dutiny by měla přeložka v prvních fázích deformace zatéct, což by zamezilo jakémukoliv dalšímu pohybu. Při této úpravě tvarovacího trnu je nutné použít předkovek zhotoven z polotovaru o průměru 18 mm, jelikož použití ostatních polotovarů vede k příliš velké vzdálenosti horní přeložky od středu předkovku.



Obr. 87 Dutina tvarovacího trnu

Účinnost této úpravy lze odhadnout již při pohledu na založený předkovek do zápustky. Předpokladem úspěchu opatření je, aby přeložka byla v oblasti dutiny tvarovacího trnu. Jak je vidět na obr. 88, tak u polohy 1 přeložka nezapadá zcela do tvarové dutiny. U poloh 2 a 3 je umístění v dutině téměř stejné, avšak u polohy 3 je přeložka nepatrně blíže středu předkovku, a tedy i k tvarové dutině. Simulace byla tedy provedena s polohou nástrojů 3.



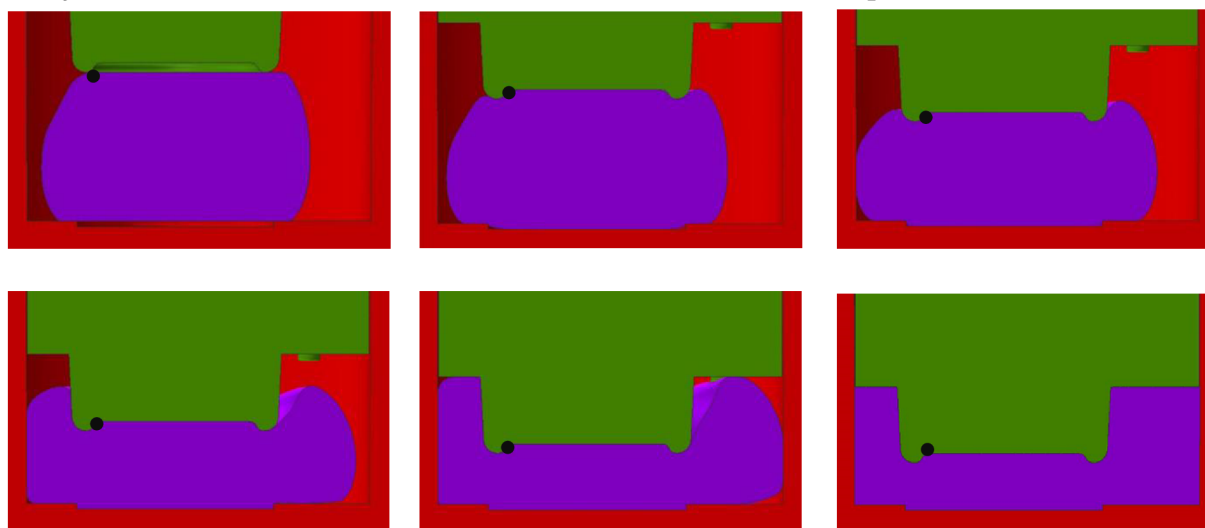
a) poloha 1

b) poloha 2

c) poloha 3

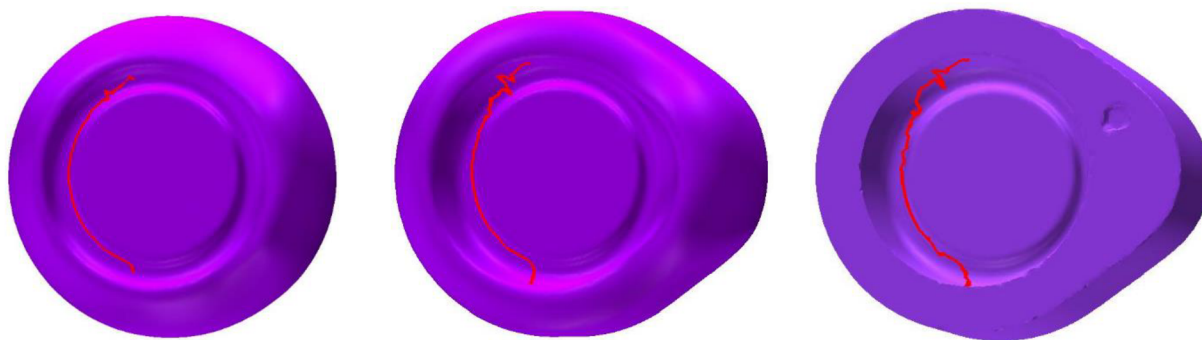
Obr. 88 Ustavení předkovku s upraveným tvarovacím trnem

Na obr. 89 je vidět, že již během počátku deformace předkovku dojde k zakotvení přeložky ve vytvořené dutině tvarovacího razníku, kde zůstává během celé operace.



Obr. 89 Průběh deformace během kování (upravená dutina tvarovacího trnu)

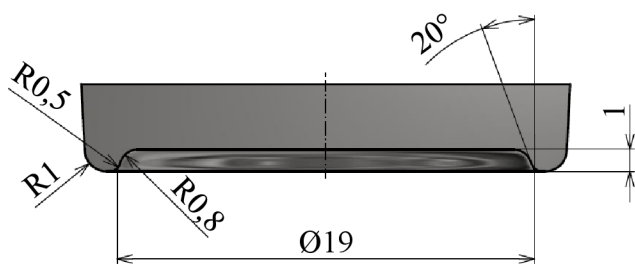
Bohužel malá část přeložky nebyla umístěna v dutině, a tak došlo k jejímu toku na okraj otvoru, jak je ukázáno na obr. 90.



Obr. 90 Tok přeložky s úpravou dutiny tvarovacího trnu

Bylo tedy zjištěno, že vytvoření dutiny v tvarovacím trnu skutečně způsobuje zamezení pohybu horní přeložky, což vede k její finální poloze v bláně výkovku.

Pro zvýšení efektivity této úpravy je nutné zvětšit průměr dutiny v tvarovacím trnu, tak aby nedošlo k nežádoucímu toku přeložky k hraně otvoru. Rozměry upravené dutiny tvarovacího trnu jsou schematicky znázorněny na obr. 91a. Z obr. 91b. je patrné, že nyní je celá přeložka v dutině. Avšak čím větší je průměr dutiny, tím pravděpodobnější je poškození razníku.



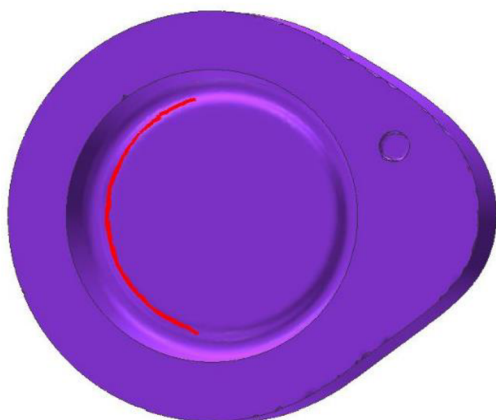
a) geometrie dutiny tvarovacího trnu



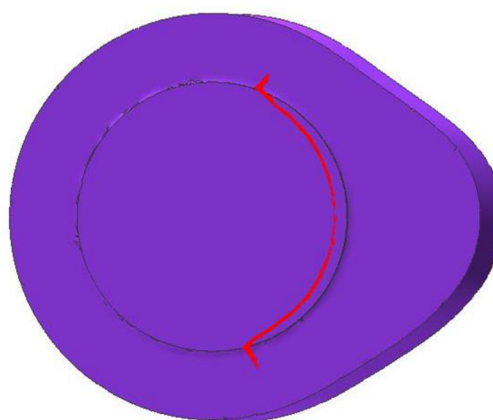
b) ustavení předkovku

Obr. 91 Geometrie dutiny tvarovacího trnu a ustavení předkovku

Jak bylo předpokládáno, tak po zvětšení průměru dutiny byla skutečně po vykování vačky celá horní přeložka v kovací bláně, viz obr. 92a. Bohužel malá část spodní přeložky přesahuje kovací blánu (obr. 92b).



a) horní přeložka



b) dolní přeložka

Obr. 92 Horní a dolní přeložka s úpravou dutiny tvarovacího trnu

Jde tedy o účinnou úpravu vzhledem k horní přeložce. Nevýhodou je však to, že ji lze použít pouze u polotovaru o průměru 18 mm, jelikož s větším průměrem polotovaru je přeložka mimo dutinu. Bohužel výroba vačky z průměru 18 mm je finančně nevýhodná oproti výrobě z průměru 20 mm. Další nevýhodou je také zvětšení objemu odpadu o objem dutiny.

Mezi další možné způsoby ovlivnění přeložky patří zvýšení životnosti dělicích nožů, jelikož otupení těchto nástrojů má přímý vliv na velikost otřepu, a tedy i plochu přeložky. Životnost nožů je v současné době prodlužována pomocí návarů stelitové slitiny.

Jak bylo dokázáno, tak součinitel tření má vliv na polohu dolní přeložky, z čehož plyne, že použití jiného maziva by vedlo k oddálení této přeložky.

V úvahu také připadá výroba vačky z polotovaru o jiném průřezu než kruhovém. Bohužel tento způsob ovlivnění by byl velmi těžce realizovatelný, neboť pro výrobu jsou používány loupané polotovary kvůli odstranění povrchových vad. Loupaní tyčí o jiném, než kruhovém průřezu je však bohužel neproveditelné, neboť loupání je proces založen na rotaci loupacích nožů kolem tyče.

Poslední možností optimalizace je použití nově vyvíjeného systému hydraulického dorazu. Tento systém je v současné době vyvíjen ve společnosti Hatebur Umformmaschinen AG. Literatura [52] uvádí, že lze dosáhnout redukce lomové plochy stříhu až na 1 %, jak je vidět na obr. 93. Kvalita střížné plochy by mohla mít také pozitivní vliv na velikost otřepů, a tedy i tvorbu přeložek. Bohužel momentálně není možné ho implementovat do používaného stroje, neboť prozatím je vyvinut pouze do určitých typů strojů od tohoto výrobce.



a) současný stav

b) použití hydraulického dorazu

Obr. 93 Porovnání kvality střížné plochy za použití hydraulického dorazu [54]

## 4 ZÁVĚRY

Cílem diplomové práce byla optimalizace výsledné polohy přeložek na výkovku s využitím numerické simulace tvářecího procesu. Řešeným dílcem byla vačka vyráběná ve společnosti Šroubárna Kyjov, spol. s r.o. Vačka je vyráběna z oceli ČSN 14 109. V současné době je jako polotovár používána loupaná tyč o průměru 20 mm. Dílec je vyráběn na tvářecím automatu HOTmatic AMP 30 S od výrobce Hatebur Umformmaschinen AG. Problémem současného výrobního procesu je vyštípnutí materiálu během obrábění otvoru vačky. Vyštípnutí je způsobeno přeložkami, k jejichž tvorbě dochází kvůli otřepům na odstřížku.

Pro účely optimalizace byly po výpočtu potřebných rozměrů a pýchovacích poměrů zvoleny průměry polotovarů 18, 20 a 22 mm. K získání geometrického modelu polotovarů pro účely simulace byla použita technologie 3D skenování pomocí skeneru Atos Compact 2. Materiál polotovaru byl v simulaci definován pomocí materiálového modelu z databáze simulačního programu. Tvářecí nástroje byly u všech provedených simulací uvažovány jako ideálně tuhé. Po zvážení možností využití dostupných simulačních programů byl pro řešení dané problematiky zvolen Simufact Forming 15.0.

Nejprve byla provedena série ověřovacích simulací, jež měly za úkol stanovit model otřepu, vhodnou výpočtovou metodu (MKP × MKO) a správný model tření. Z těchto simulací plyne, že pro simulaci tvorby přeložek z otřepu odstřížku je vhodné použít metodu flowline. Dále bylo zjištěno, že pro řešený problém je vhodnější použít MKP než MKO. Nejblíže reálnému stavu pak odpovídal kombinovaný třecí model s koeficienty  $m = 0,7$  a  $\mu = 0,4$ .

Po ověřovací simulaci bylo přikročeno k samotné optimalizaci polohy přeložek. Nejprve byly testovány různé polohy nástrojů. Lze konstatovat, že na nejmenší vzdálenost přeložek od okraje otvoru nemá poloha nástrojů velký vliv. Je však nutno podotknout, že poloha nástrojů má vliv na to, jak velká část přeložky bude v oblasti obrábění.

Simulace byly také provedeny s průměry polotovaru 18, 20 a 22 mm. Bylo prokázáno, že průměr polotovaru do značné míry ovlivňuje finální polohu přeložek, přičemž k významnějšímu ovlivnění dochází u dolní přeložky. Nejhorších výsledků bylo dosaženo se současným průměrem polotovaru, kdy jsou obě přeložky na hraně předkovaného otvoru. Při použití průměru 18 mm je značná část dolní přeložky umístěna v bláně výkovku, ale horní přeložka je stále na hraně otvoru. Při použití průměru 22 mm je při současné poloze nástrojů horní přeložka vzdálena 0,40 mm od hrany otvoru a dolní přeložka 2,19 mm. Z toho plyne, že použití průměru 22 mm eliminuje možnost vyštípnutí dolní přeložky během obrábění. Horní přeložka však stále, i při použití zmíněné modifikace, leží v oblasti obrábění.

Rovněž bylo přikročeno k modifikaci tvaru tvarovacího trnu. Nejprve bylo zcela odstraněno zkosení tvarovacího trnu. V druhé variantě bylo naopak zkosení dvojnásobně zvětšeno. Obě tyto varianty se ukázaly jako neúčinné.

Poté bylo provedeno několik úprav předkovacího razníku. Nejprve bylo zhotovení výstupku ve středu razníku. Dále pak zmenšení velikosti zaoblení v dutině. Poslední úpravou bylo zhotovení „zlomu“, od kterého byla značně menší velikost zkosení. Z výsledků simulací lze konstatovat, že pouze poslední úprava měla vliv na polohu přeložek. Bohužel došlo pouze k oddálení dolní přeložky.

Jako poslední byla provedena úprava tvaru tvarovacího trnu. Tato úprava spočívala ve zhotovení dutiny, která měla zapříčinit zafixování horní přeložky v bláně výkovku. Zhotovení dutiny se ukázalo jako velmi efektivní a horní přeložka byla skutečně umístěna v bláně. V kombinaci s použitím průměru polotovaru 18 mm, kdy je značná část dolní přeložky umístěna v bláně lze hovořit o značném zlepšení současného stavu, i když průměr 18 mm představuje problém z hlediska finančních nároků na výrobu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [55]

1. KOPEČNÝ, Adam. *Problematika ostříhování a děrování výkovku*. Brno, 2018. 45s, 7 výkresů, 7 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Jan Řiháček
2. Úvod. *Šroubárna Kyjov, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.sroubk.cz/hlavni-stranka/1/uvod>
3. *Informační brožura prodávaných tvářecích strojů a zařízení*. Hatebur Umformmaschinen AG, 2011.
4. ČSN 41 4109. *Ocel 14 109 chromová 8s*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1976.
5. MESSNER, Günther. a Stephan HUBER. *Hot Forging on Horizontal Multi-Stage Presses: Machine technology, processes and products*. Munich: corporate media GmbH, 2007.
6. ČSN 41 9541. *Ocel 19 541 Cr-Mo-V 5s*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1977.
7. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
8. ŘIHÁČEK, Jan, Eva PETERKOVÁ, Michaela CÍSAŘOVÁ a Jaroslav KUBÍČEK. Comparison of FEM and FVM for the numerical simulation of forging process. *MM Science Journal* [online]. 2020, 13 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.17973. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/March%202020/articles/comparison-of-fem-and-fvm-for-the-numerical-simulation-of-forging-process>
9. LIDMILA, Zdeněk. *Přípravky a nástroje*. Přednáška Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 27.3.2018
10. SUCHOPÁREK, Rudolf. *Základy zápusťkového kování oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956, 380 s.
11. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 169 s. ISBN 80-214-2683-7.
12. HAŠEK, Vladimír. *Kování: pomůcka pro studenty vysokých a odborných škol*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 730 s. Řada strojírenské literatury.
13. BLAŠČÍK, František, Juraj HUDÁK a Svetlana BODNÁROVÁ. *Technológia objemového tvárnenia: návody na cvičenia*. Bratislava: Alfa, 1988, 172 s.
14. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 245 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
15. VRÁNA, Václav. Elektrické teplo. *Katedra elektrotechniky VŠB* [online]. 2008 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: [http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FMMI/Prednasky/TEPLO\\_bc\\_08.pdf](http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf)
16. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
17. Pece pro kovárny. *Realistic, a.s.* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.realistic.cz/pece-pro-kovarny>

18. Indukční ohřev. In: *Rajmont, s.r.o.* [online]. 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: [https://www.rajmont.cz/cache/af181\\_Image\\_fotogalerie\\_dscn9333\\_resize800x500.jpg](https://www.rajmont.cz/cache/af181_Image_fotogalerie_dscn9333_resize800x500.jpg)
19. Střížná plocha odstřížku. In: *Forging magazine* [online]. 2019 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.forgingmagazine.com/forming/media-gallery/21924276/servo-hydraulic-innovation-for-steel-forming/slideshow?slide=1>
20. LENFELD, Petr. Skripta TKP. *Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/02.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm)
21. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992, 186 s. ISBN 80-214-0401-9.
22. KLAČURKOVÁ, Lenka. *Strojírenské materiály a tepelné zpracování*. Přednáška Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 5.3.2019
23. LÁNC, Kryštof. Problematika tryskání. Brno, 2017. 36s, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Eva Peterková
24. Tryskání kovů, pískování a úprava povrchu *Kovo-Lako s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.lako.cz/tryskani-kovu-piskovani-uprava-povrchu.html>
25. Omílání. In: *KOMAS, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.komas.cz/UserFiles/Image/1526626271omilani-01.jpg>
26. RATHI, Mahendra a Nilesh JAKHADE. An Overview of Forging Processes with Their Defects. *International Journal of Scientific and Research Publications* [online]. 6(4) [cit. 2020-06-05]. ISSN 2250-3153. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/e8aa/20d62ebafcff52d3940ddd03934f7bd5e932.pdf>
27. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
28. ASM INTERNATIONAL. *Metals handbook volume 14: Forming and forging*. 9. vyd. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1988. ISBN 978-0-871-70020-9
29. DOEGE, Eckart a Rüdiger BOHNSACK. Closed die technologies for hot forging. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2000, 2(98), 165-170 [cit. 2020-06-05]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013699001946#!>
30. ČERMÁK, Jan. Přesné zápusťkové kování. FOREJT, Milan, ed. *FORM 2000: forming technology, tools and machines : 5th international conference : conference proceedings: Brno, september 19-20*. Brno: Brno University of Technology, 2000, s. 43-48. ISBN 80-214-1661-0.
31. STOROŽEV, Michail Vasil'jevič a Jevgenij Aleksandrovič POPOV. *Teória tvárnenia kovov*. Bratislava: Alfa, 1978, 486 s. Edícia strojárskej literatúry (Alfa).
32. DRASTÍK, František. *Kovářství: základní učivo pro výcvik kovářů v praxi a pomůcka k odbornému školení dorostu*. 3. doplněné vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1971, 116 s. Kurs technických znalostí.
33. LIDMILA, Zdeněk. *Tvářecí nástroje*. Přednáška Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 22.4.2019

34. FÜRST, Jürgen. Kování výkyvnou zápusťkou a přesné kování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, s.r.o., 2012 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
35. Hatebur HOTmatic AMP 20 N. *Fastener and Fixing Magazine* [online]. 2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.fastenerandfixing.com/manufacturing-technology/hatebur-introduces-hotmatic-amp-20-n/>
36. ŘIHÁČEK, Jan. *Sylabus k předmětu počítačová podpora technologie* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-06-05]. 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)
37. FABÍK, Richard. *Modelování tvářecích procesů* [online]. Ostrava, 2013, 76s. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: [http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik\\_Modelovani\\_tvarecich\\_procesu.pdf](http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik_Modelovani_tvarecich_procesu.pdf)
38. ASM INTERNATIONAL. *Metal Handbook Volume 22B: Metals process simulation*. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 2010. ISBN 978-161-5030-057.
39. Počítačová dynamika tekutin (CFD) Řešení rovnic. - metoda konečných objemů. *VŠCHT* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41559110-Pocitacova-dynamika-tekutin-cfd-reseni-rovnic-metoda-konecnych-objemu.html>
40. ZÁCHA, Pavel. *Metoda konečných objemů (MKO)* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://adoc.tips/fluent-pednaky-metoda-konnych-objem-mko.html>
41. ŠIDLÓF, Petr. *Metody a postupy ve výpočetní mechanice tekutin (CFD)*. *Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://astra.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/NMPT/pr02%20-%20Metody%20a%20postupy%20v%20CFD.pdf>
42. LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method*. United States: Cengage Learning, 2007, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-6.
43. ŘIHÁČEK, Jan. *Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu*. Brno, 2017. 109s, 10 příloh. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Libor Mrňa.
44. Produkty společnosti ANSYS ANSYS [online]. 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products>
45. ANSYS Workbench. *Techsoft-eng* [online]. 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/software/ansys-workbench>
46. Abaqus. *Dassault Systemes* [online]. 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
47. PAM-STAMP. *ESI Group* [online]. 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/cz/softwareva-reseni/virtualni-vyroba/tvareni-plechu/lisovani-s-pam-stamp>
48. QForm. *QForm 3D* [online]. 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.qform3d.com/about>
49. Simufact Forming. *Simufact* [online]. 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/simufactforming-forming-simulation.html>



50. MSC Software. *Simufact Forming 15.0*. [software]. [přístup 28. dubna 2018]
51. Skener ATOS. *GOM* [online]. 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos.html>
52. *Tutoriál-třecí modely*, Simufact Engineering GmbH.
53. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
54. Hydraulický doraz. *Forging magazine* [online]. 2019 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.forgingmagazine.com/forming/media-gallery/21924276/servo-hydraulic-innovation-for-steel-forming>
55. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Koeficient pro výpočet CSA	[-]
A <sub>1</sub>	Eutektoidní teplota	[°C]
A <sub>3</sub>	Teplota překrytí austenitu	[°C]
A <sub>5</sub>	Tažnost	[%]
a	Šířka sražení svíracích čelistí	[mm]
B	Koeficient pro výpočet CSA	[-]
b	Vůle mezi pēchovníkem a zápustkou	[mm]
C	Součinitel zvýšení pērtvárného odporu	[-]
C <sub>1</sub>	Materiálová konstanta	[-]
C <sub>2</sub>	Materiálová konstanta	[-]
C <sub>p</sub>	Součinitel zvýšení pērtvárného odporu dle Petržely	[-]
C <sub>SA</sub>	Součinitel zvýšení pērtvárného odporu dle Smirnova– Aljajeva	[-]
DKT	Dolní kovací teplota	[°C]
D <sub>m</sub>	Průměr dutiny pēchovací části zápustky	[mm]
D <sub>OD</sub>	Průměr odstřižku	[mm]
D <sub>OH</sub>	Průměr odstřižku po tepelném roztažení	[mm]
D <sub>p</sub>	Vnější průměr pēchovníku	[mm]
D <sub>p1</sub>	Průměr kužele v pēchovníku	[mm]
d	Rozměr výkovku dle obr. 27	[mm]
d <sub>f</sub>	Průměr otvoru čelisti	[mm]
d <sub>t</sub>	Průměr tyče	[mm]
d <sub>1</sub>	Rozměr výkovku dle obr. 27	[mm]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[GPa]
F <sub>k</sub>	Kovací síla	[N]
F <sub>k1</sub>	Kovací síla v první fázi přesného kování	[N]
F <sub>k2</sub>	Kovací síla ve druhé fázi přesného kování	[N]
F <sub>k3</sub>	Kovací síla ve třetí fázi přesného kování	[N]
F <sub>os</sub>	Ostřihovací síla	[N]
f	Koeficient tření	[-]
HKT	Horní kovací teplota	[°C]
H <sub>m</sub>	Hloubka dutiny v pēchovací části zápustky	[mm]
H <sub>p</sub>	Hloubka dutiny v pēchovníku	[mm]
h	Rozměr výkovku dle obr. 27	[mm]
h <sub>v</sub>	Výška můstku výronkové drážky	[mm]
h <sub>z</sub>	Dráha nástroje	[mm]
h <sub>1</sub>	Rozměr výkovku dle obr. 27	[mm]
I <sub>1</sub>	Materiálová konstanta	[-]
I <sub>2</sub>	Materiálová konstanta	[-]
j	Mezera mezi svíracími čelistmi	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
KCU	Vrubová houževnatost	[J·cm <sup>-2</sup> ]
kp	Přetvárný odpor při kovací teplotě	[MPa]
L <sub>OD</sub>	Délka odstřížku	[mm]
L <sub>OH</sub>	Délka odstřížku po tepelném roztažení	[mm]
l <sub>md1</sub>	Délka dutiny drážkované čelisti I	[mm]
l <sub>md2</sub>	Délka dutiny drážkované čelisti I	[mm]
l <sub>mh</sub>	Délka dutiny hladké čelisti	[mm]
l <sub>mhz</sub>	Délka dutiny hladké čelisti se zužující vložkou	[mm]
lt	Délka pěchované části výkovku	[mm]
m	Třecí faktor	[-]
m <sub>1</sub>	Materiálová konstanta	[-]
m <sub>2</sub>	Materiálová konstanta	[-]
m <sub>OD</sub>	Hmotnost odstřížku	[kg]
n	Šířka drážky	[mm]
n <sub>1</sub>	Materiálová konstanta	[-]
n <sub>2</sub>	Materiálová konstanta	[-]
o <sub>v</sub>	Obvod výronku	[mm]
P	Výřez jedné čelisti	[mm]
q	Rozteč drážek	[mm]
r	Rozměr výkovku dle obr. 27	[mm]
r <sub>1</sub>	Rozměr výkovku dle obr. 27	[mm]
R <sub>e</sub>	Mez kluzu	[Mpa]
R <sub>et</sub>	Mez kluzu v tlaku	[Mpa]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	[Mpa]
S	Půdorysná plocha výkovku	[mm <sup>2</sup> ]
Sσ <sub>m</sub>	Skutečné napětí po třetí fázi přesného kování	[MPa]
T	Teplota materiálu	[°C]
T <sub>0</sub>	Původní teplota	[K]
T <sub>OH</sub>	Teplota ohřevu	[K]
T <sub>R</sub>	Teplota rekystalizace	[°C]
T <sub>TAV</sub>	Teplota tavení	[°C]
t	Čas	[h]
u	Hloubka drážky	[mm]
V <sub>OD</sub>	Potřebný objem odstřížku	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>odp</sub>	Objem odpadu	[mm <sup>3</sup> ]
V <sub>pol</sub>	Objem polotovaru	[mm <sup>3</sup> ]
V <sub>výk</sub>	Objem výkovku	[mm <sup>3</sup> ]
x	Šířka sražení pěchovací části zápustky	[mm]
Z	Kontrakce	[%]

Označení	Legenda	Jednotka
$\alpha$	Koeficient tepelné roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Hustota materiálu	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\mu$	Třecí koeficient kohezního modelu	[-]
$\sigma_D$	Deformační odpor	[MPa]
$\sigma_K$	Mez kluzu ve smyku	[MPa]
$\sigma_n$	Normálové napětí	[MPa]
$\sigma_{n1}$	Normálové napětí po první fázi přesného kování	[MPa]
$\sigma_{n2}$	Normálové napětí po druhé fázi přesného kování	[MPa]
$\sigma_{n3}$	Normálové napětí po třetí fázi přesného kování	[MPa]
$\sigma_o$	Deformační odpor materiálu při teplotě ostřihování	[MPa]
$\tau$	Střížný odpor	[MPa]
$\tau_{ADH}$	Třecí napětí dle adhezního modelu	[MPa]
$\tau_{KOH}$	Třecí napětí dle kohezního modelu	[MPa]
$\tau_{KOM}$	Třecí napětí dle kombinovaného modelu	[MPa]
$\varphi$	Logaritmická deformace	[-]
$\varphi_{ef}$	Efektivní přetvoření	[-]
$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady bezvýronkových výkovků [2], [3] .....	9
Obr. 2 Orientační rozměry vačky .....	10
Obr. 3 Lis AMP 30 S [3] .....	11
Obr. 4 Ukázka chlazení nástrojů [5] .....	11
Obr. 5 Postup výroby vačky .....	12
Obr. 6 Podávací rolny a ohřev tyče .....	12
Obr. 7 Pevný, pohyblivý nůž a odstřížený špalík .....	12
Obr. 8 Předkování vačky .....	13
Obr. 9 Kování vačky .....	13
Obr. 10 Zápustka .....	13
Obr. 11 Děrování blány .....	14
Obr. 12 Žihací pec a třídící linka .....	15
Obr. 13 Poškození při obrábění vlivem přeložky .....	15
Obr. 14 Výhody kování [1], [8] .....	16
Obr. 15 Přidávky na výkovku [11] .....	17
Obr. 16 Kovací teploty [1] .....	18
Obr. 17 Komorová a vozová pec [17] .....	19
Obr. 18 Indukční ohřev [18] .....	19
Obr. 19 Teplotní rozdíly [1] .....	19
Obr. 20 Stříhání tyčí [16] .....	20
Obr. 21 Střížná plocha [16], [19] .....	20
Obr. 22 Příčné klínové válcování [20] .....	21
Obr. 23 Děrování a ostřihování [1] .....	21
Obr. 24 Tryskání [24] .....	22
Obr. 25 Omílací zařízení [25] .....	23
Obr. 26 Přidávky u přesného a konvenčního kování [27] .....	24
Obr. 27 Výkovky pro kování v uzavřeném nástroji [14], [27] .....	24
Obr. 28 Fáze přesného kování v uzavřených nástrojích [27] .....	25
Obr. 29 Závislost $F_k(h_z)$ [27] .....	25
Obr. 30 Kompenzátory materiálu [27] .....	26
Obr. 31 Ukázka kování na vodorovném lisu [32] .....	26
Obr. 32 Svírací čelisti [12] .....	27
Obr. 33 Průřez svíracích čelistí a uchycení do bloku [12], [33] .....	27
Obr. 34 Pěchovací část zápustky [12] .....	27
Obr. 35 Ostatní zápustky pro vodorovné kovací lisy [12] .....	28
Obr. 36 Princip kování s vrtivou zápustkou [27] .....	28
Obr. 37 Pracovní prostor tvářecího automatu [35] .....	29
Obr. 38 Přenášení polotovaru [3] .....	30
Obr. 39 Popis stroje HOTmatic AMP 30s [3] .....	30
Obr. 40 Síť konečných objemů a metody interpolace [39] .....	31
Obr. 41 Ukázka 2D prvku [36] .....	32
Obr. 42 Volné a mapované sítě konečných prvků [36] .....	32
Obr. 43 Závislost přesnosti řešení .....	32
Obr. 44 Ukázka prostředí Simufact Forming 15.0 .....	33
Obr. 45 Model vačky a odštípnutí materiálu .....	34
Obr. 46 Postup výroby řešeného dílce .....	34
Obr. 47 Porovnání rozměrů odstřížků .....	36
Obr. 48 Postup skenování odstřížků .....	37
Obr. 49 Zjednodušení nástrojů pro simulaci .....	37

Obr. 50 Ustavení polotovaru a poloha nástrojů.....	38
Obr. 51 Možnosti predikce přeložek .....	39
Obr. 52 Vymodelovaný otřep.....	39
Obr. 53 Nereálný tok otřepu.....	39
Obr. 54 Úprava otřepu, výsledek fold detection .....	40
Obr. 55 Postup deformace otřepu.....	40
Obr. 56 Flow line v místě otřepu.....	40
Obr. 57 Použití flowline .....	41
Obr. 58 Efektivní přetvoření dle MKO prvního řádu.....	42
Obr. 59 Efektivní přetvoření dle MKO vyššího řádu.....	42
Obr. 60 Efektivní přetvoření dle MKP .....	42
Obr. 61 Roviny vyhodnocovaných řezů .....	44
Obr. 62 Srovnání materiálových vláken 1. operace .....	44
Obr. 63 Srovnání materiálových vláken 2. operace .....	45
Obr. 64 Tvorba kapsy v průběhu kování .....	46
Obr. 65 Srovnání vzdálenosti horní přeložky .....	46
Obr. 66 Vzdálenosti přeložek při použití různých třecích modelů .....	48
Obr. 67 Ustavení různých polotovarů .....	49
Obr. 68 Porovnání vzdálenosti dolních přeložek u různých průměrů polotovaru .....	49
Obr. 69 Natočení nástrojů .....	50
Obr. 70 Poloha horní přeložky při různém natočení nástrojů pro průměr 22 mm .....	50
Obr. 71 Předkovky různých výšek .....	51
Obr. 72 Průběh deformace předkovku .....	52
Obr. 73 Průběh deformace výkovku v příčném řezu .....	52
Obr. 74 Průběh deformace výkovku v podélném řezu.....	53
Obr. 75 Upravený tvarovací trn-odstranění zkosu .....	53
Obr. 76 Průběh deformace s tvarovacím trnem bez zkosení pro průměr 20 mm.....	53
Obr. 77 Zvětšení zkosu tvarovacího trnu .....	54
Obr. 78 Průběh deformace (větší zkosení tvarovacího trnu).....	54
Obr. 79 Úprava předkovacího razníku-výstupek .....	55
Obr. 80 Průběh deformace předkovku-výstupek na předkovacím razníku .....	55
Obr. 81 Průběh deformace během kování (dutina v předkovku) .....	55
Obr. 82 Úprava předkovacího razníku-zmenšení zaoblení .....	56
Obr. 83 Úprava předkovacího razníku-"zlom" .....	56
Obr. 84 Průběh deformace a výsledné předkovky při úpravě předkovacího razníku .....	56
Obr. 85 Výsledné předkovky při úpravě předkovacího razníku .....	57
Obr. 86 Průběh deformace během kování (upravená dutina předkovacího razníku).....	57
Obr. 87 Dutina tvarovacího trnu .....	58
Obr. 88 Ustavení předkovku s upraveným tvarovacím trnem .....	58
Obr. 89 Průběh deformace během kování (upravená dutina tvarovacího trnu) .....	58
Obr. 90 Tok přeložky s úpravou dutiny tvarovacího trnu .....	59
Obr. 91 Geometrie dutiny tvarovacího trnu a ustavení předkovku .....	59
Obr. 92 Horní a dolní přeložka s úpravou dutiny tvarovacího trnu .....	59
Obr. 93 Porovnání kvality střížné plochy za použití hydraulického dorazu [54] .....	60

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 14 331 [4].....	10
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 14 109 [4].....	10
Tab. 3 Parametry lisu [3].....	11
Tab. 4 Chemické složení oceli ČSN 19 541 [6].....	14
Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 19 541 [6].....	14
Tab. 6 Rozměry různých polotovarů.....	36
Tab. 7 Orientační srovnání výpočtových časů.....	41
Tab. 8 Souhrnné srovnání výsledků efektivního přetvoření.....	43
Tab. 9 Srovnání vzdálenosti přeložek dle MKO a MKP.....	46
Tab. 10 Vzdálenosti přeložek při různých modelech tření.....	48
Tab. 11 Srovnání vzdálenosti přeložek s různými průměry polotovaru.....	49
Tab. 12 Srovnání vzdálenosti přeložek při různém natočení nástrojů.....	50
Tab. 13 Srovnání vzdálenosti přeložek při různých výškách předkovku.....	51
Tab. 14 Srovnání vzdálenosti přeložek při odstranění zkosení tvarovacího trnu.....	54
Tab. 15 Srovnání vzdálenosti přeložek (větší zkosení tvarovacího trnu).....	54
Tab. 16 Srovnání vzdálenosti přeložek (změna zaoblení předkovacího razníku).....	56
Tab. 17 Srovnání vzdálenosti přeložek (upravená dutina předkovacího razníku).....	57

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost $\sigma_D(\varphi)$ [50].....	35
--	----

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Vztahy pro výpočet rozměrů svíracích čelistí [12]
Příloha 2	Vztahy pro výpočet rozměrů pýchovací části [12]
Příloha 3	Nasíťovaný ideální polotovar a předkovek
Příloha 4	Horní přeložka při různých polohách nástrojů
Příloha 5	Předkovek a výkovek s výstupkem v předkovacím razníku
Příloha 6	Dolní přeložka při úpravě dutiny předkovacího razníku

## SEZNAM VÝKRESŮ

Výkovek vačky	DP-01
---------------	-------

$$l_{mh} \geq 2,5 \cdot d_t + 50 \text{ mm}$$

kde:  $l_{mh}$  – délka dutiny hladké čelisti [mm],  
 $d_t$  – průměr tyče [mm].

$$l_{mhz} \geq 2 \cdot d_t$$

kde:  $l_{mhz}$  – délka dutiny hladné čelisti se zužující vložkou [mm],  
 $d_t$  – průměr tyče [mm].

$$l_{mhd1} = l_{mhd2} \geq 2 \cdot d_t + 30 \text{ mm}$$

kde:  $l_{mhd1}$  – délka dutiny drážkované čelisti I [mm],  
 $l_{mhd2}$  – délka dutiny drážkované čelisti II [mm],  
 $d_t$  – průměr tyče [mm].

$$q = 0,05 + (20 \text{ až } 25) \text{ mm}$$

kde:  $q$  – rozteč drážek [mm].

$$n = (5 \text{ až } 7) \text{ mm}$$

kde:  $n$  – šířka drážky [mm].

$$u = (1 \text{ až } 1,3) \text{ mm}$$

kde:  $u$  – hloubka drážky [mm].

$$d_f = c \cdot d_t$$

kde:  $d_f$  – průměr otvoru čelistí [mm],  
 $c$  – koef. zohledňující toleranci tyče [-].

$$j = 0,005 \cdot d_t + 1 \text{ mm}$$

kde:  $j$  – mezera mezi svíracími čelistmi [mm].

$$a = 0,08 \cdot d_t + 2 \text{ mm}$$

kde:  $a$  – šířka sražení [mm].

$$P = 0,5 \cdot (d_f - f)$$

kde:  $P$  – výřez v jedné čelisti [mm].



$$x = (2 \text{ až } 5) \text{ mm}$$

kde:  $x$  – šířka sražení [mm].

$$D_{p1} = d_t + (0,5 \text{ až } 3)$$

kde:  $d_p$  – průměr kužele v pēchovníku [mm],

$d_t$  – průměr tyče [mm].

$$H_m \geq l_t - H_p + 3 \cdot x$$

kde:  $H_m$  – hloubka dutiny v pēchovací zāpustce [mm],

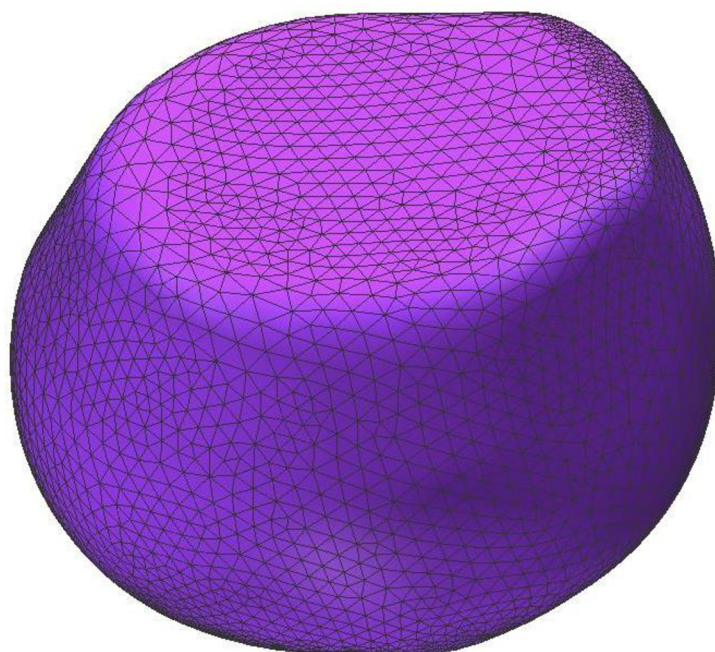
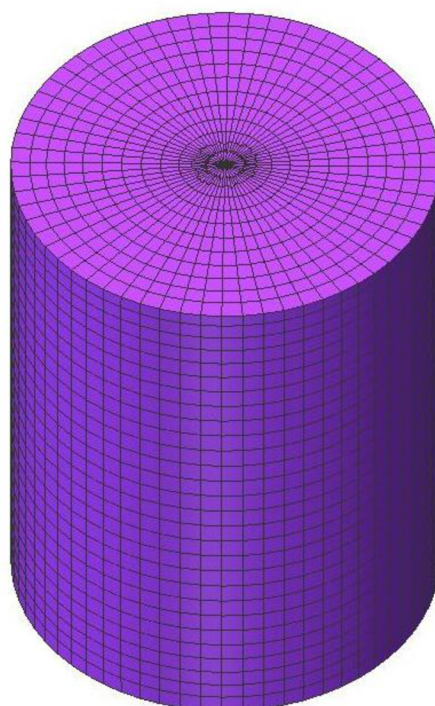
$l_t$  – délka pēchované části vȳkovku [mm].

$$D_m \geq 1,5 \cdot d_t + 12$$

kde:  $D_m$  – průměr dutiny pēchovací části zāpustky [mm],

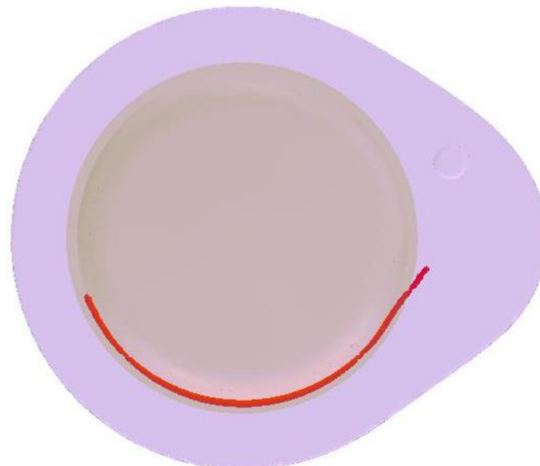
$$D_p = D_m - (1 \text{ až } 2)$$

kde:  $D_p$  – vnější průměr pēchovníku [mm],

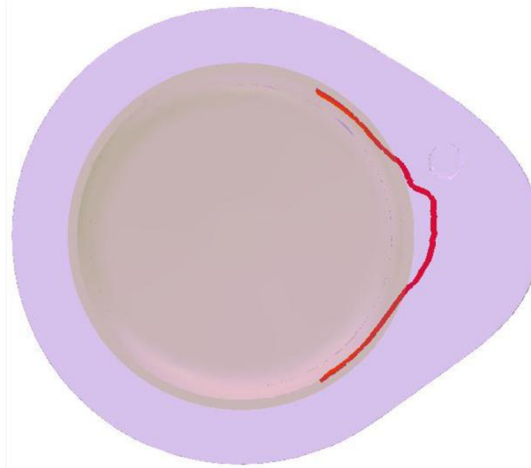
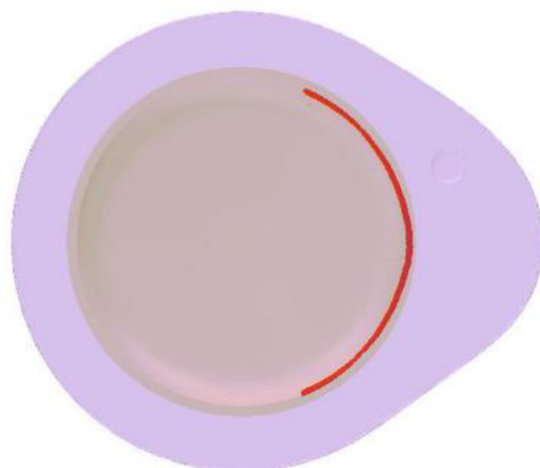


Průměr 18 mm

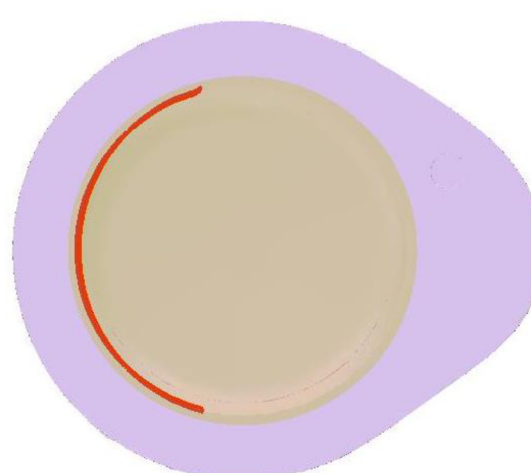
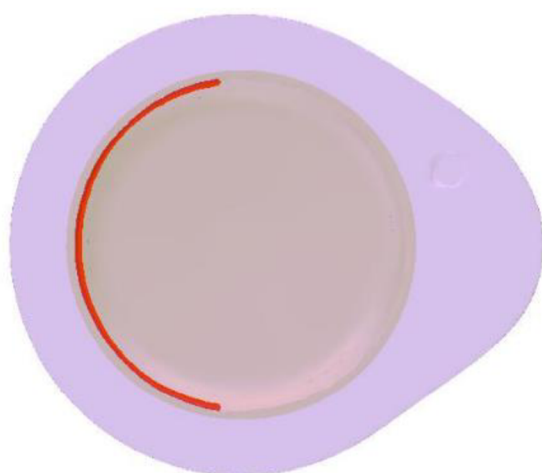
Průměr 20 mm



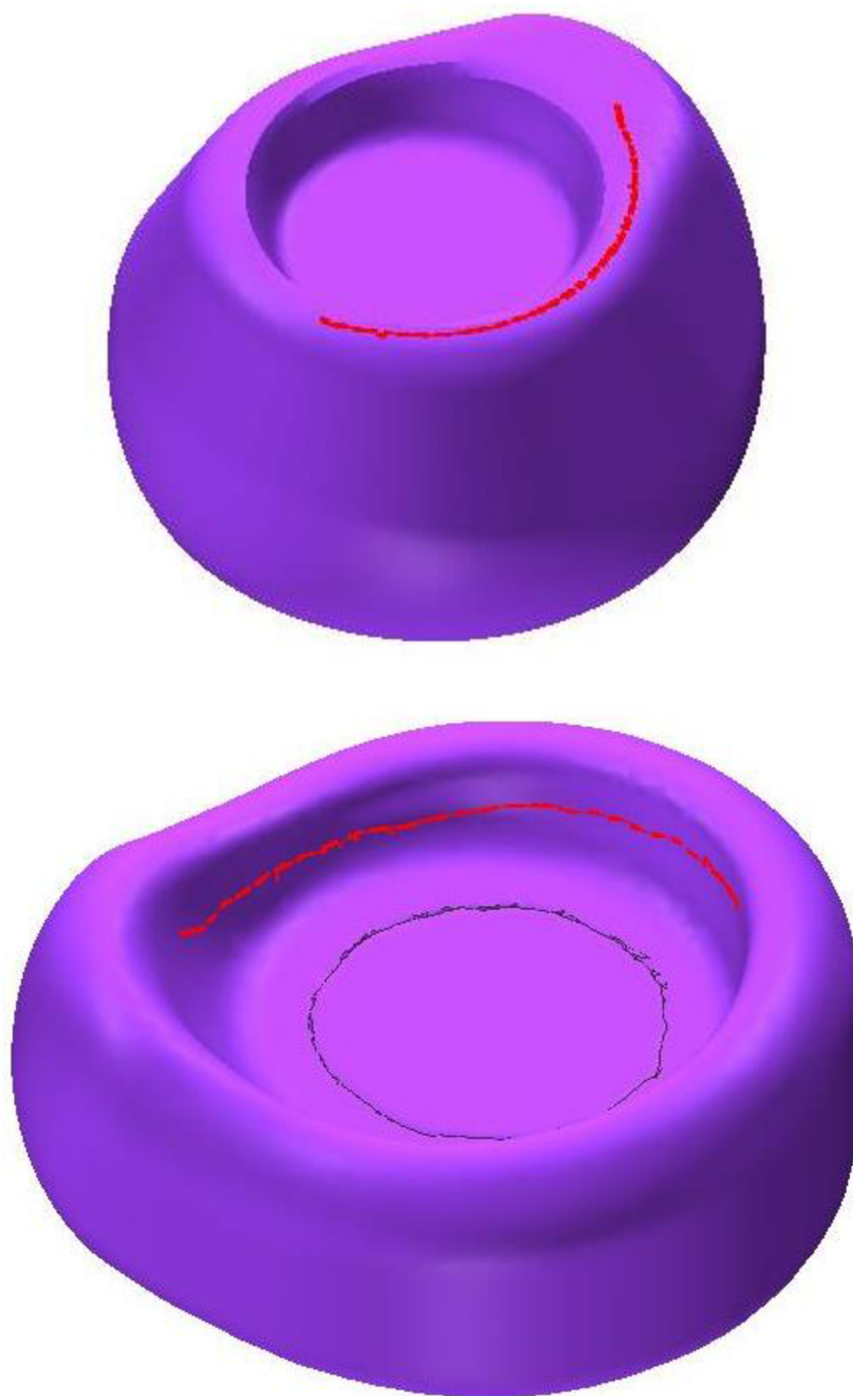
poloha 1

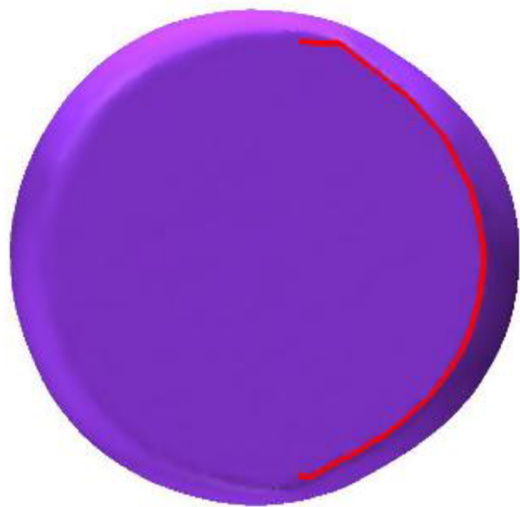


poloha 2

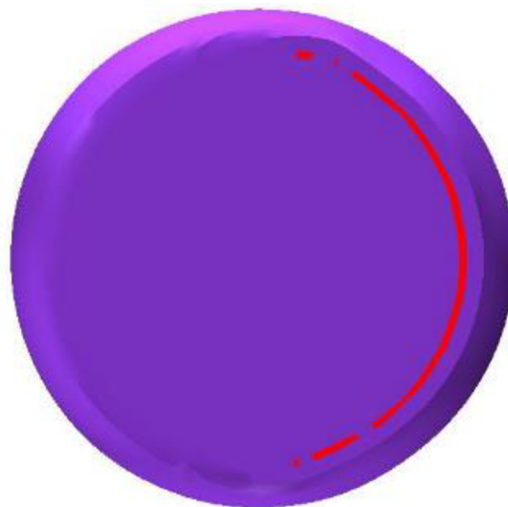


poloha 3





a) upravený stav



b) neupravený stav