



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA OTOČNÉHO ČEPU

MANUFACTURING OF SWIVEL PIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Vávra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Roman Vávra
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jan Řiháček
Akademický rok:	2016/17

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:

Výroba otočného čepu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh výroby součásti kruhovitého průřezu, která bude vyráběna víceoperačním protlačováním za studena. Na tuto problematiku bude také zaměřena literární rešerše i výpočty potřebné pro návrh a kontrolu nástroje.

Cíle diplomové práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na technologii protlačování
- zhodnocení možností výroby
- návrh vhodné technologie a provedení technologických a kontrolních výpočtů
- analýza výrobního procesu s užitím počítačové podpory
- návrh nástroje společně s vyhotovením výkresů vybraných dílů
- technicko-ekonomické zhodnocení, závěry a doporučení

Seznam literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William F. a Robert M CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, xii, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

VÁVRA Roman: Výroba otočného čepu

Práce se zabývá návrhem vhodné technologie pro sériovou výrobu čepu. Materiálem dílce je konstrukční ocel 11 320 5R. Vzhledem k sériovosti výroby a úspoře materiálu byla zvolena technologie tváření zastudena. Pro výrobu byl navržen postupový lis CM 4 – 5 ECO HATEBUR jehož jmenovitá síla je 1 700 kN. Byl také navržen postupový nástroj a výkresová dokumentace nástrojů pro finální operaci. Zatížení nástroje bylo ověřeno manuálním výpočtem, a pomocí metody konečných prvků byl spočítán ohřev tvářeného polotovaru způsobený tvářením.

Klíčová slova: Tváření, mezní přetvoření, protlačování, pýchování

VÁVRA Roman: Manufacture of a pivot pin

The thesis deals with the design of a suitable technology for serial production of a pin. The component material is structural steel 11,320 5R. Due to the series production and material savings, the molding technology was chosen to be cold. For production, the CM 4-5 ECO HATEBUR process press was designed with a nominal force of 1 700 kN. Progressive tool and drawing documentation of tools for the final operation were also designed. The tool load was verified by manual calculation, and the finite element method was calculated to heat the formed blank due to molding.

Keywords: Forming, limiting strain, extrusion, upsetting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÁVRA, Roman. *Výroba otočného čepu*. Brno, 2017. 67s, 8 výkresů, 9 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tvárných kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. 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 dne 19.5.2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce, také děkuji své rodině za podporu ve studiu i mimo něj.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Výrobní možnosti.....	12
2 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ	15
2.1 Zpevnění a odpevnění	16
2.2 Charakteristiky plasticity.....	17
2.3 Princip pěchování a protlačování	16
2.4 Výpočty přetvárných odporů a tvářecích sil	21
2.4.1 Pěchování.....	22
2.4.2 Dopředné plné protlačování.....	24
2.4.3 Zpětné protlačování	24
2.5 Tvářecí nástroje	25
2.5.1 Nástroje pro pěchování.....	25
2.5.2 Nástroje pro dopředné protlačování	27
2.5.3 Nástroje pro zpětné protlačování	29
2.6 Požadavky na návrh nástrojů.....	31
2.6.1 Materiály tvářecích nástrojů	31
2.6.2 Materiály vhodné pro tváření	32
2.7 Technologičnost tvarů tvářených součástí	33
2.8 Tvářecí stroje.....	36
3 POSTUP TECHNOLOGIE VÝROBY	38
3.1 Výrobní varianty	38
3.2 Zhodnocení výroby závitu.....	44
3.3 Výpočet rozměrů polotovaru v jednotlivých operacích	45
3.4 Výpočet sil a napětí u zvolené varianty	48
3.5 Volba tvářecího stroje	54
3.6 Návrh nástroje pro 4. Operaci	55
4 ANALÝZA PROCESU METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ	59
4.1 Vstupní požadavky pro analýzu	59
4.2 Výstupy z analýzy MKP	61
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	64
5.1 Výroba součástí objemovým tvářením zastudena.....	64
5.2 Výroba součástí třískovým obráběním.....	65
6 ZÁVĚRY	66

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [8], [15], [16],

Hlavním cílem současného strojírenství je zlepšení ekonomických parametrů výroby. To lze například pomocí hospodárného zpracování materiálů, nebo zkrácení výrobního času součásti s ohledem na ekologičnost. Avšak při jakémkoli zefektivnění musí být dbáno na dodržení zadané jakosti výrobku.

Mezi nejvýznamnější výrobní technologie, splňující výše uvedené požadavky, patří tváření. To se může dále dělit na plošné a objemové. Plošné tváření zahrnuje např. stříhání a ohýbání. Polotovarem pro výrobu jsou nejčastěji svitky, nebo tabule plechů o různých tloušťkách. Do technologie objemového tváření spadá válcování, kování, tažení, protlačování a mnoho dalších. Polotovary mohou být ingoty, tyčové polotovary různých průřezů a podobně.

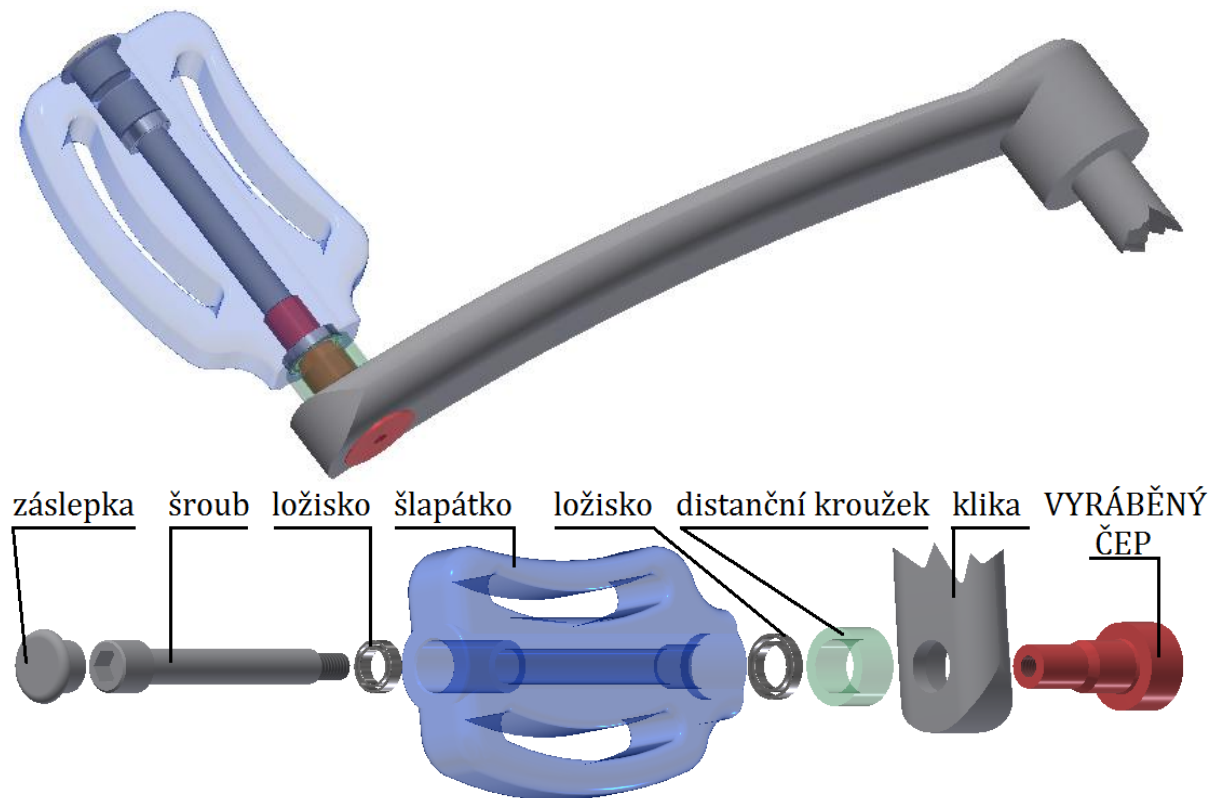
Jednou z nejpoužívanějších technologií objemového tváření je protlačování. Tato technologie může vést k výrobě velmi přesných součástí. Mnohdy nevyžadují další zpracování a jsou tak vyráběny hotové díly požadované jakosti, zajišťující správnou funkčnost sestavy. Na obr.1 je možno vidět příklady součástí, které lze zhotovit protlačováním.



Obr. 1 Příklady součástí vyráběných protlačováním [9], [20], [32],

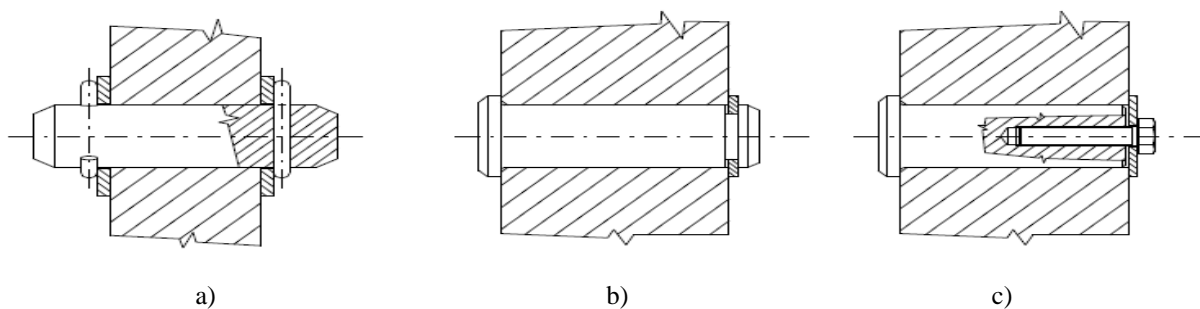
1 ROZBOR ZADÁNÍ [8], [10], [15]

Vyráběnou součástí je otočný čep, ze sestavy šlapátka dětského kola (obr. 2). Čepy jsou používány jako součásti otočných spojů různých mechanismů. Jsou často kontrolovány na smyk a otláčení. Mohou být po celé délce válcové, nebo opatřeny hlavou.



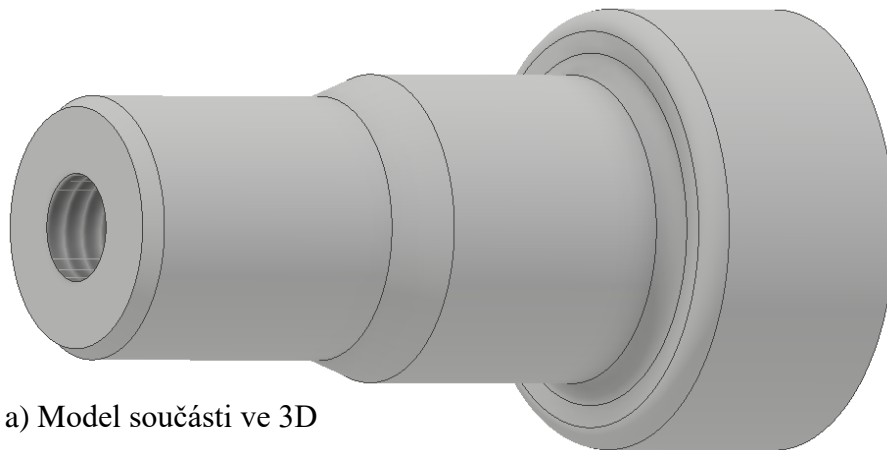
Obr. 2 sestava šlapátka jízdního kola

Čepy jsou obvykle jištěny proti axiálnímu posunu a to pomocí pojistných kroužků, závlaček, kolíků a podobně. Základní druhy provedení viz obr. 3.

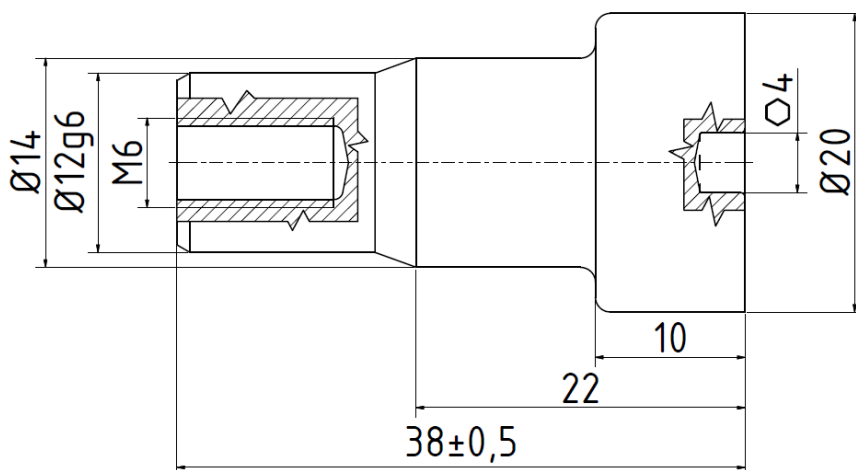


Obr. 3 Schéma základních druhů čepových sestav [35]

Jak je vidět na výkrese vyráběné součásti (obr. 4), čep je složen z hlavy a osazeného dřívku. Zajištění proti axiálnímu posunu zde bude dosaženo pomocí šroubu, a proto je v dřívku vyroben závit. Spoj bude tedy rozebíratelný. Rozměry čepu jsou tolerovány kvůli jeho přesnému uložení. Díry, do kterých se čepy ukládají, jsou vždy lícovány. Uložení čepu v díře bude dle výkresu D11/h11. Velikost zadané série je 500 000 kusů.



a) Model součásti ve 3D



b) výkres s hlavními rozměry

Obr. 4 Vyráběná součást

Materiálem pro vyráběný dílec je ocel 11 320 5R. Následující materiálové charakteristiky (uvedené v tab. 1 – 3), viz [11].

Jde o uhlíkovou nelegovanou ocel, která byla normalizačně žíhána. Je vhodná pro tváření za studena i za tepla. Svařitelnost oceli je dobrá až zaručená. Chemickým složením odpovídá oceli ČSN EN 10204. V tab. 1 je uvedeno ekvivalentní značení.

Tab. 1 Zahraniční ekvivalentní značení oceli 11 320 5R [11]

ISO	Cr01	ISO 17/12N49-69
DIN	Sr12	DIN 1623-72 (1.0320)
Rusko	08kp	GOST 9045-80
Švédsko	1142	SS 141142-75

Na základě provedeného rozboru chemického složení oceli 11 320 5R (dle literatury [10]), jsou výsledky zapsány v procentech v tab. 2. Materiál se vyznačuje velmi nízkým obsahem uhlíku. Obecně oceli s nízkým obsahem uhlíku jsou materiály dobře tvářitelné.

Tab. 2 Chemické složení oceli 11 320 5R [11]

Zdroj	Atest podle	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Al %	Cr %	Cu %
Lexikon technických materiálů	ČSN 41 1320	max 0,11	-	-	max 0,045	max 0,045	-	-	-
VUT FSIS ÚMI v Brně	Spektrometr LECO GDS 750	0,05	0,33	0,06	0,017	0,012	0,027	0,16	0,06

Mechanické vlastnosti jsou rozhodujícím parametrem pro správnou volbu materiálu. Pro ocel 11 320 5R byly získány z polotovaru taženého drátu o průměru 15,5 mm. Jednalo se o stejný vzorek materiálu, jehož chemické složení bylo zkoumáno pomocí spektrometru LECO GDS 750. Výsledky jsou uvedeny v tab. 3.

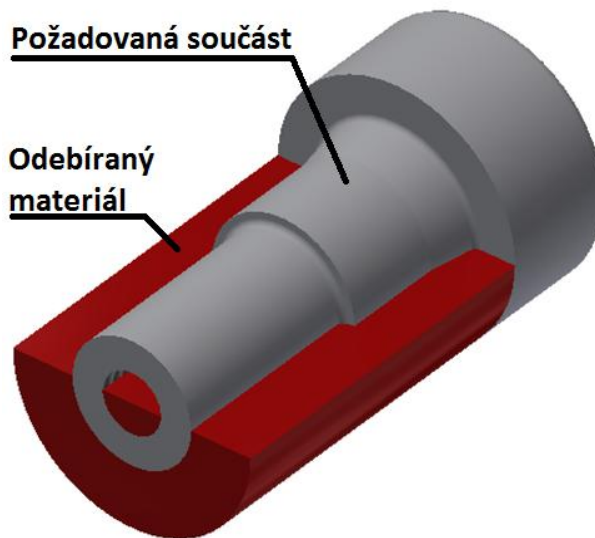
Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 11 320 5R [11]

Mez kluzu	$R_{p0,2}$	589	MPa
Mez pevnosti	R_m	614	MPa
Tažnost	A_5	15,2	%
Kontrakce	Z	70,6	%
Modul pružnosti	E	201	GPa
Tvrdost		170	HV10

1.1 Výrobní možnosti [15], [27], [29]

Požadovaná technologie výroby nebyla zadána, takže je na výběr více cest. Při výběru Technologie je třeba přihlídnout k tvarové složitosti vyráběné součásti. Součástí je čep se dvěma dříky, který obsahuje vnitřní závit, i jeho technologie výroby bude brána v potaz. Důležitým faktorem při volbě technologie je velikost vyráběné série a spotřebu materiálu na výrobu jednoho kusu, tedy využití materiálu. Je třeba zajistit požadované rozměry a jakost výrobku, uvážit následné dokončovací operace a další faktory. Nabízí se hned několik možných technologií výroby, z nichž je třeba vybrat tu nejvhodnější.

- **Třískové obrábění** – je jedna z nejrozšířenějších technologií ve strojírenství. Princip spočívá v tom, že z polotovaru je ubírán materiál ve formě třísky. Zadaný dílec lze zhotovit z normalizovaného tyčového polotovaru o větším průměru než je průměr obráběné součásti. Dělení na špalíky požadované velikosti se provede např. pomocí pásové pily, střížného nástroje, nebo se kus po obrobení upíchne přímo v obráběcím centru. Na obr. 5 je pro názornost červeně vyobrazen materiál, který je třeba odebrat pro získání požadované součásti. Objem hotové součásti a polotovaru byl spočítán v programu Autodesk Inventor Professional 2017. Hotová součást má objem 6534.25 mm^3 . Objem polotovaru závisí na průměru zvolené tyče, ze které se bude součást vyrábět, byl vypočten minimálně na 11920 mm^3 . Z toho je patrné že využití materiálu zde nepřesáhne 60 %.

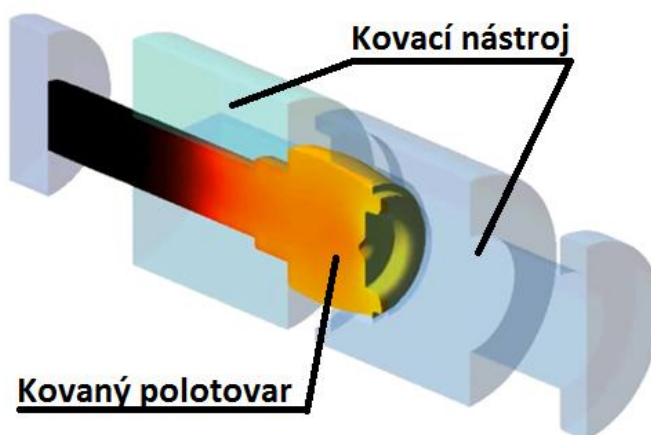


Obr. 5 Obráběný kus

Výhody: lze obrábět velice přesné rotační součásti s výbornou jakostí povrchu, flexibilita stroje a možnost použití stejných nástrojů pro další výrobu.

Nevýhody: součásti vyráběné třískovým obráběním mají porušený průběh vláken a dosahují tak menších pevností než součásti vyráběné tvářením, vzniká zde velký odpad a hodí se tak spíše pro menší série.

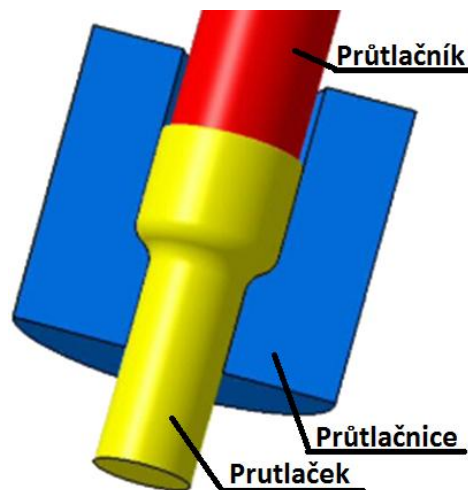
- **Kování** – je objemové tvářením za tepla, konané staticky působící silou lisu, nebo úderem bucharu. Zvýšená teplota přispívá ke snížení přetvárného odporu a obnově plastických vlastností materiálu. Je tak možné vyrábět dílce s velkým přetvořením bez porušení. Výrobek získaný kovářím má na rozdíl od třískového obrábění zlepšené mechanické vlastnosti, díky neporušenému průběhu vláken. Technologie lze aplikovat téměř na všechny kovy. Konkrétně pro zadanou součást by bylo možno využít např. přesného kování, nebo kování ve vodorovných kovářích lisech. Pro tyto technologie je určen přesný objem polotovaru. Kove se v uzavřených zápustkách bez výronku. Jsou vhodné pro válcově symetrické součásti a lze jimi získat velmi přesné výkovky, viz obr 6.



Obr. 6 Schéma kovářského nástroje [34]

- Výhody: díky ohřevu můžou součásti dosahovat velkého přetvoření, technologie je vodná pro sériovou výrobu, výkovky mají zvýšené mechanické vlastnosti, velký koeficient využití materiálu.
- Nevýhody: je třeba stanovit korekce rozměrů kvůli tepelné dilataci, ohřevem vznikají energetické ztráty, vzniká opal a tím ztráty materiálu → zhoršená jakost povrchu, vzhledem k vysokým teplotám nelze snížit tření pomocí maziv.

- Tváření za studena – je technologie objemového tváření, kde probíhá výrazná změna tvaru při působení prostorového napětí. Tím je polotovar přetvořen do požadovaného tvaru a velikosti, aniž by došlo k porušení soudržnosti materiálu. Přetvoření vzniká za působení tlaku vyvolaného nástrojem (průtlačníkem a průtlačnicí, nebo pěchovníkem a pěchovnicí), viz obr. 7. Požadovaného tvaru bývá dosaženo pomocí kombinace tváření, pěchování a rozlišnými způsoby protlačování. Hlavní způsoby protlačování lze rozdělit podle směru toku materiálu na dopředné, zpětné, stranové a sdružené.



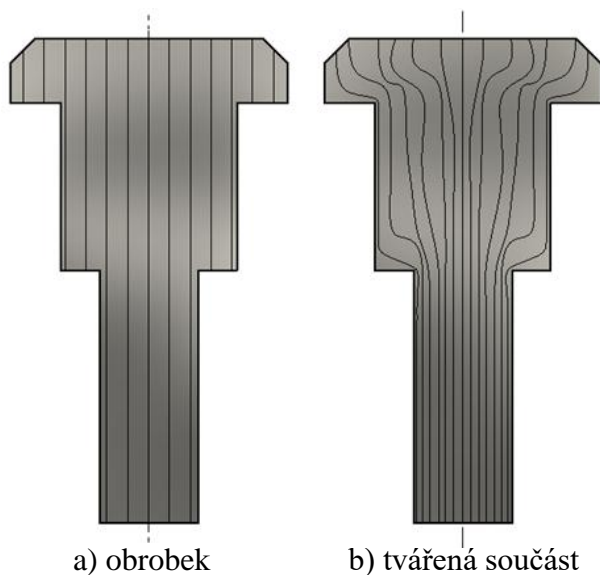
Obr. 7 Schéma dopředného protlačování [34]

- Výhody: velká úspora materiálu, využití 90 ÷ 100 %, vysoká přesnost průtlačků ($\pm 0,05$ mm), zkrácení výrobních časů a snížení nákladů na energii, zlepšení mechanických vlastností součásti, výborná jakost povrchu, možnost použití mazání s ohledem na teplotu, vhodné pro velkosériovou a hromadnou výrobu.
- Nevýhody: nástroje jsou jednoúčelové, v případě malé série nákladná výroba.

Při porovnání objemového tváření za studena s obráběním je tváření technologicky náročnější a jsou zde vyšší náklady na nástroje, které jsou navíc jednoúčelové. Ovšem zpracovávaný materiál je zde mnohem lépe využit. Výrobek dosáhne tvářením za studena lepších mechanických vlastností a dostatečné jakosti povrchu. Obrábět zadanou součást by bylo vhodné spíše pro kusovou výrobu. Při výrobě kováním je třeba ohřev, který je energeticky nákladný. Ohřevem se sníží přetvárný odpor, potřebná tvářecí síla, ale zároveň vzniká opal a tím zhoršení jakosti povrchu. Pro daný tvar součásti postačí vhodná volba polotovaru a technologického postupu objemového tváření za studena. Z uvedených technologií se tedy jako nejvýhodnější jeví tato varianta.

2 TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ [8], [15], [18], [26], [27]

Podstatou objemového tváření je výrazná změna tvaru polotovaru za působení vnějších sil, jež v materiálu vyvolávají prostorovou napjatost. Ta vytváří vhodné podmínky k získání velkých plastických deformací, a to bez porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Ke změně tvaru součásti se užívá kombinace základních technologií tváření, jako je pýchování a různé způsoby protlačování. Takto zpracovaný materiál má pozměněné mechanické vlastnosti. Na rozdíl od třískového obrábění (obr. 8a) tato technologie nepřerušuje průběh vláken (obr. 8b). Vlákná jsou přemístěna a opisují tvar tvářené součásti, tím se zvýší užité vlastnosti.



Obr. 8 Průběh vláken v průřezu součásti

V mnoha případech je po zlepšení některých mechanických vlastností součásti možné změnit její rozměry a snížit její hmotnost. Jako u každé technologie je i zde mnoho faktorů ovlivňujících tvářecí proces. Důležitým činitelem je například teplota. Tváření lze obecně uskutečňovat za studena, za částečného ohřevu (poloohřevu) a za tepla.

Při tváření za studena dochází k čerpání zásoby plasticity a ke zpevňování materiálu (viz následující podkapitola). Teplota je podstatně nižší, než teplota rekrytalizace (2.1).

$$T \leq 0,3 \cdot T_{TAV} \quad (2.1)$$

kde: T je teplota [$^{\circ}\text{C}$],

T_{TAV} je teplota tavení materiálu [$^{\circ}\text{C}$].

Pro větší přetvoření je nutno zásobu plasticity obnovit, což se provádí pomocí rekrytalizačního žíhání. Rekrytalizace obnoví deformovanou strukturu na nedeformovanou díky nukleaci a růstu nových zrn ze zrn deformovaných. Teplota rekrytalizace lze pro většinu kovů určit z jejich absolutní teploty tavení, Použitím vztahu dle Bočvara (2.2).

$$T_{REK} = (0,35 \div 0,40) \cdot T_{TAV} \quad (2.2)$$

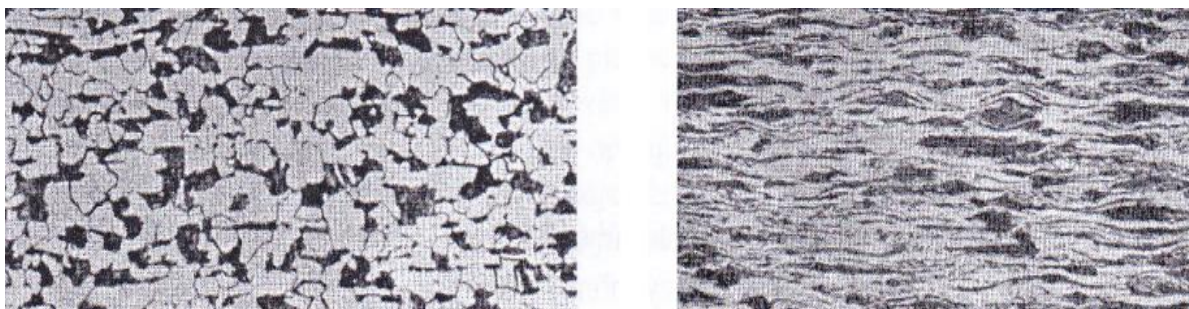
kde: T_{REK} je teplota rekrytalizace [$^{\circ}\text{C}$].

Tvářením za částečného ohřevu lze dosáhnout větších přetvoření bez použití rekrytalizačního žíhání. Proces probíhá pod teplotou rekrytalizace. Tvar zrna se neobnovuje, ale dochází zde k anihilaci (snížení počtu dislokací jejich vzájemným vyrušením). Materiál se zpevňuje, avšak v porovnání s tvářením za studena je zde menší přetvárný odpor a dosahuje se vyššího přetvoření. U nízkouhlíkové oceli, se za teploty 200°C zvýší tažnost o $20 \div 30\%$.

Protlačování za tepla probíhá za teplot vyšších než je teplota rekrytalizace. Tvar zrna je opakovaně obnovován a tím je přetvoření prakticky neomezené. Při vysokých teplotách však může docházet k oxidaci, oduhličování a na povrchu mohou vznikat okuje. Setrvání na vysoké teplotě bez tváření způsobuje zhrubnutí zrna.

2.1 Zpevnění a odpevnění [1], [5], [6], [15], [26], [28],

Zpevnění vzniká zejména při tváření za studena. Hlavním mechanismem plastické deformace vyvolané působením vnějších sil je pohyb dislokací (poruchy mřížky) krystalickou mřížkou materiálu. Při tváření za studena, tedy za teploty výrazně nižší než je teplota rekrytalizace ($T \leq 0,3T_{TAV}$), se tvoří nové dislokace a jejich hustota roste. Toto brání jejich pohybu, čímž narůstá přetvárný odpor a zvyšuje se potřebná síla pro další přetvoření. Na metalografickém výbrusu lze vidět zrna materiálu při malém a větším přetvoření (obr. 9).



a) 10% přetvoření

b) 30% přetvoření

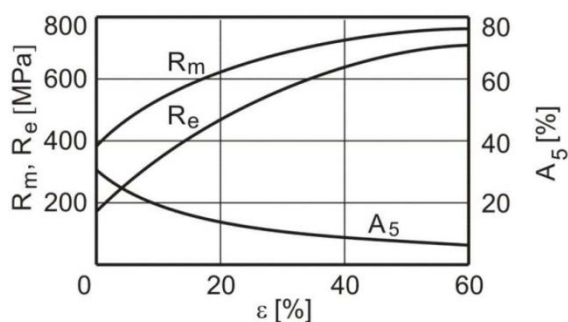
obr. 9 Metalografický výbrus feriticko-perlitické oceli [1]

Jejich deformací vzniká tzv. deformační textura. Zpevnění je doprovázeno zejména zvýšením tvrdosti a pevnosti materiálu, zároveň však poklesem jeho houževnatosti. Tvářet lze do doby než se vyčerpá zásoby plasticity daného materiálu a dojde k lomu jak ukazuje obr. 10.



obr. 10 Lom vzniklý při pěchování tělesa [1]

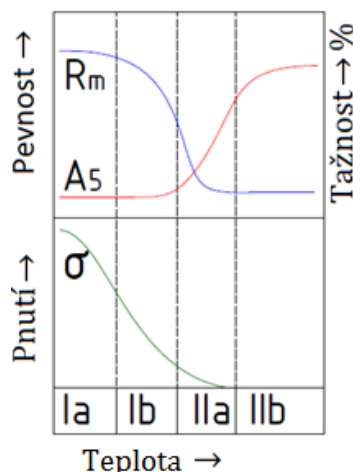
Pro představu lze změnu mechanických vlastností v závislosti na deformaci vykreslit do diagramu závislosti tažnosti, meze kluzu a meze pevnosti v tahu na přetvoření (obr. 11). Takový diagram lze, pro určitý materiál, získat experimentálně z tahové zkoušky. Jak bylo již dříve řečeno, zpevnění může mít pozitivní dopad na konstrukci dané součásti, například lze snížit její hmotnost, přičemž pevnost zůstane dostatečná. Naopak může být zpevnění nežádoucí při víceoperačním tvářecím procesu, kdy je vyčerpána zásoba plasticity a dalším tvářením vznikne lom. Je tedy nutno obnovit zásobu plasticity, aby byly umožněny další tvářecí operace.



obr. 11 Diagram vlivu přetvoření na mechanické vlastnosti mat. [15]

Odpevnění tvářeného materiálu lze provést například rekrytalizačním žiháním. V deformovaném materiálu je naakumulovaná vnitřní energie způsobující značnou termodynamickou nestabilitu. Při zajištění vhodných podmínek, např. při ohřevu tvářené součásti, má materiál snahu vrátit se do stavu s menší volnou energií. Rekrytalizační žihání závisí na teplotě a času. Obecně platí že čím větší je přetvoření tím menší je potřebná rekrytalizační teplota a že vyšší teplota exponenciálně snižuje čas potřebný k rekrytalizaci. Na obr. 12 je graf zobrazující vliv teploty rekrytalizace na mez pevnosti tažnost a napětí v materiálu který byl tvářen.

Pokud v průběhu deformace probíhá zároveň odpevnění, jedná se o dynamické odpevnění. Pochody dynamického zotavování a dynamické rekrytalizace závisí na teplotě a s jejím nárůstem se urychlují. Stejně jako u statické, tak i u dynamické rekrytalizace probíhá nukleace a růst nových zrn. Kinematika procesu je odlišná, narozdíl od předchozího statického odpevnění probíhajícího pod teplotou rekrytalizace, dynamické odpevnění probíhá po překrytalizaci (tvářením za tepla). Jde o proces tvářením kdy jsou zpevnění a odpevnění materiálu v rovnováze.



I a – zotavení polygonizace
II a, b - rekrytalizace

Obr. 12 Vliv teploty na obnovu mechanických vlastností [15]

2.2 Charakteristiky plasticity [10], [15], [29]

Pro tvářením je důležité znát chování tvářeného materiálu, především tedy průběh jeho zpevnění. K tomu slouží křivky zpevnění, které ukazují závislost deformace na skutečných napětích za daných termodynamických podmínek. Pro jednotlivé materiály je lze zjistit ze zkoušek jednoosé napjatosti. Takovou zkouškou je například pýchovací nebo tahová zkouška. Křivky zpevnění se vyjadřují závislostmi:

- I. druhu $\sigma(\epsilon)$, u kterých se sleduje oblast pružně plastické deformace. Lze zde určit poměrné přetvoření dle následujícího vztahu (2.3).

$$\epsilon = \frac{S_0 - S}{S_0} [-] \quad (2.3)$$

kde: S_0 značí průřez zkušební vzorku [mm^2],
 S značí okamžitý obsah průřezu zkušební vzorku [mm^2].

- II. druhu $\sigma(\varphi)$, jež se zabývají pouze oblastí plastické deformace. Namísto poměrného přetvoření se zde počítá přetvoření logaritmické (2.4).

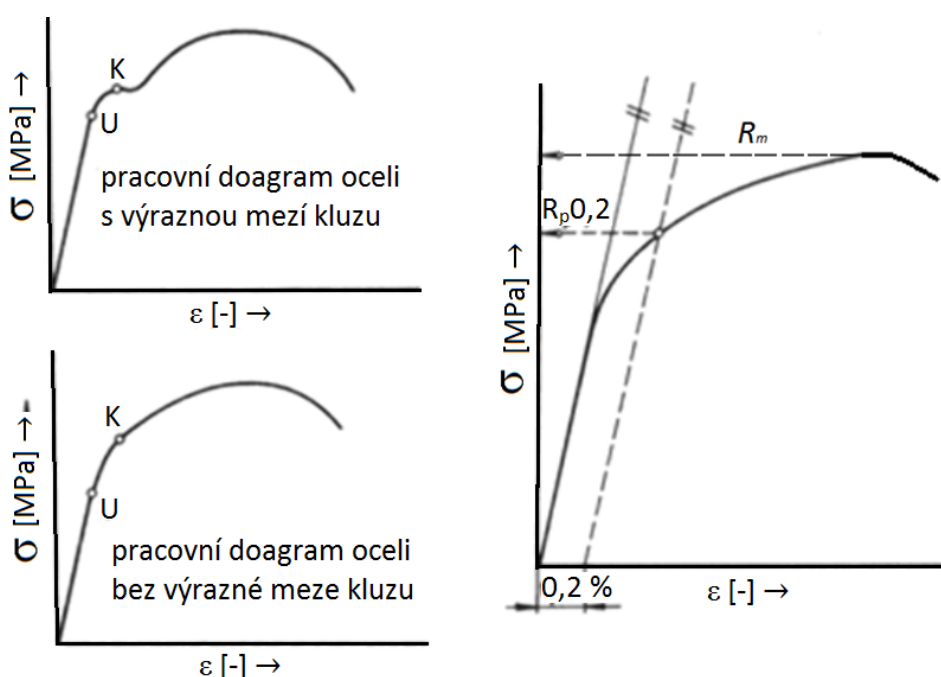
$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} [-] \quad (2.4)$$

Pro zhodnocení mechanických vlastností lze použít pracovní diagram tahové zkoušky (obr. 14). Na získané křivce zpevnění daného materiálu jsou sledovány některé význačné body, jako mez kluzu. Je charakterizována jako přechod z oblasti elastické deformace do oblasti plastické deformace. Může být výrazná R_e , nebo nevýrazná čili smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Smluvní mez kluzu se určuje graficky jako 0,2 % z trvalé deformace viz obr. 13. Další sledovanou hodnotou je smluvní mez pevnosti v tahu R_m (2.5).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [\text{MPa}] \quad (2.5)$$

kde: F_m je maximální síla před přetržením zkušební vzorku [N].

Toto je bod ve kterém průběh deformace přestane být homogenní podél osy a vlivem zatížení dojde ke ztenčení lokální oblasti. Vznikne tzv. krček. Následným zatěžováním dojde k porušení zkušební vzorku.



Obr. 13 Křivky zpevnění s výraznou a nevýraznou mezí kluzu [25]

Základní ukazatele plasticity zjistitelné z tahové zkoušky jsou tažnost A_T určená vztahem (2.6) a kontrakce Z dle vztahu (2.7). Dále lze snadno určit zpevnění materiálu jako poměr dvou napětí, meze kluzu a meze pevnosti.

$$A_T = \frac{L_U - L_0}{L_0} \cdot 100[\%] \quad (2.6)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100[\%] \quad (2.7)$$

kde: L_0 je počáteční délka vzorku [mm],
 L_U je konečná délka vzorku [mm], $\varepsilon \rightarrow$
 S_U je konečný průřez vzorku [mm²].

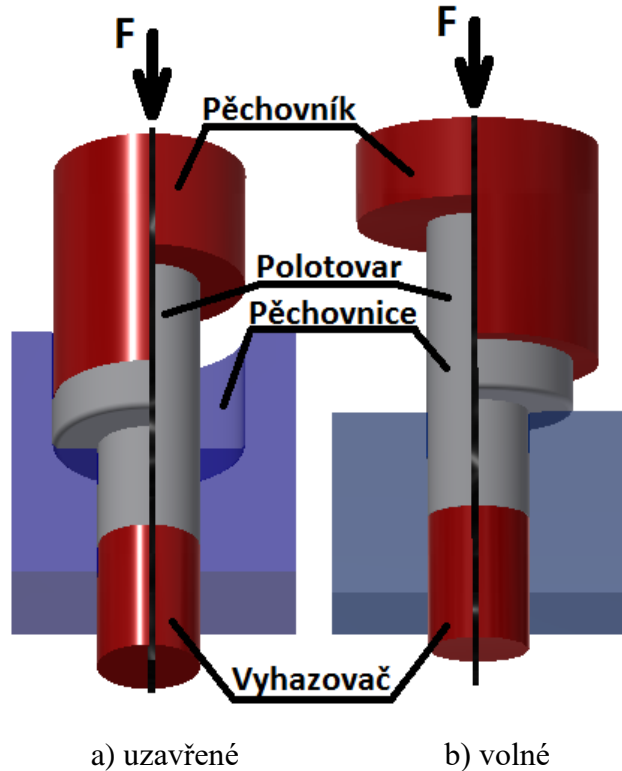
Materiály s mimořádnou plasticitou vyhovují podle vztahu (2.8).

$$\frac{R_e}{R_m} \leq 0,65 \quad (2.8)$$

2.3 Princip pēchování a protlačování [2], [7], [14], [15], [24]

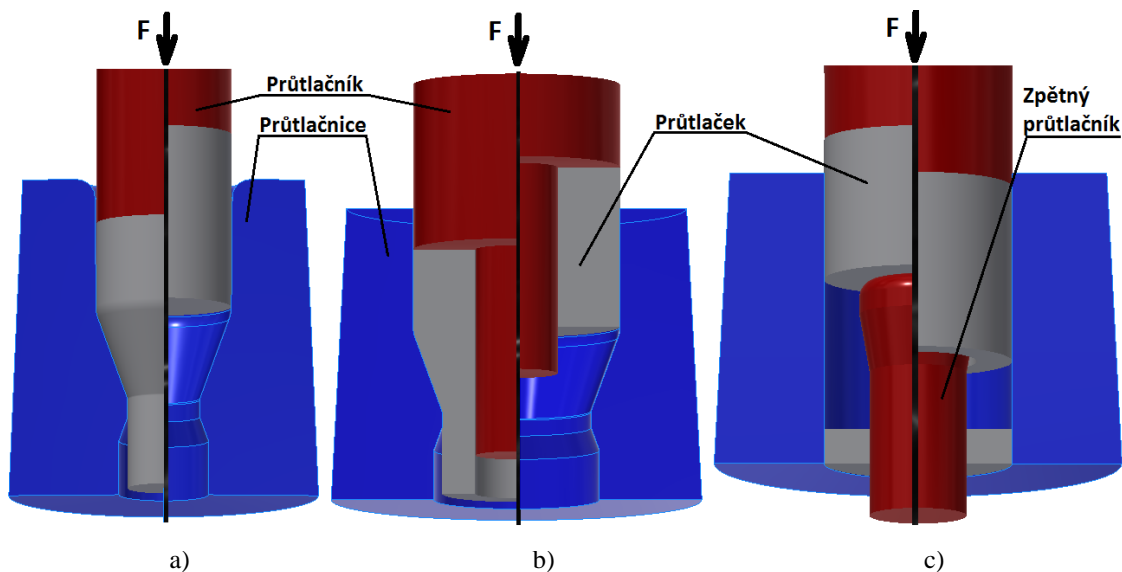
Tyto technologie jsou vhodné pro hromadnou a velkosériovou výrobu, kde mohou zajistit podstatné snížení nákladů. Velmi často se používají pro výrobu strojních a spojovacích součástí. Při procesech je důležité vyvození prostorové napjatosti, díky které lze dosáhnout značných pētvoření, aniž by byla porušena soudržnost materiálu. Nejpoužívanějšími metodami objemového tváření jsou pēchování a protlačování, ty se dále rozdělují. Kupříkladu, podle způsobu a směru toku materiálu se dělí protlačování na dopředné, stranové, zpětné a sdružené.

- Pēchování je jednou z nejzákladnějších operací objemového tváření. Jeho hlavním znakem je zmenšování výšky a zvětšení příčného průřezu pēchovaného tělesa. Pēchovaná součást se umístí mezi dvě protilehlé, vzájemně rovnoběžné, plochy či tvarové nástroje. Ty stlačují součást podél její osy, dokud není dosažena požadovaná výška. Pēchování může být provedeno jako volné, nebo uzavřené (obr. 14). Tuto metodu lze využít např. pro výrobu čepů, hřebíků, hlav šroubů a jiných strojních součástí.



Obr. 14 Pēchování volné a uzavřené [15]

- Dopředné protlačování je technologie u níž je za pomoci průtlačníku protlačován polotovar otvorem průtlačnice (obr. 15). Tím se redukuje jeho průřez. U dopředného protlačování má tok materiálu stejný směr jako průtlačník.

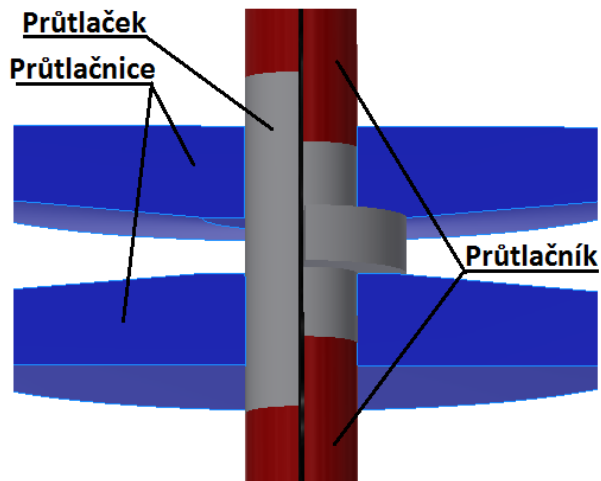


Obr. 15 Dopředné protlačování plných a dutých těles [15]

Technologie dopředného protlačování může probíhat buďto jako uzavřená či otevřená, podobně jak tomu bylo výše u pěchování. Hotová součást se nazývá průtlaček. Při výrobě plných těles, viz. obr. 15a, má kov vytékající z průtlačnice tvar tyčí o různých průřezích. Ty odpovídají tvaru průtlačnice. Jako polotovary se užívají např. špalíky nastříhané z plných tyčí jejichž čela bývají zarovnána při první předpěchovací operaci.

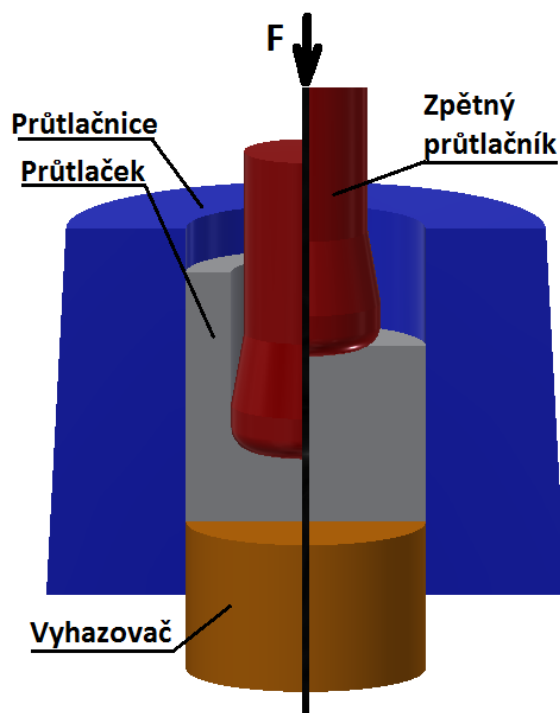
Je možné protlačovat rovněž dutá tělesa se dnem nebo bez dna (obr. 15a,b). Jako polotovar se volí špalíky, kalíšky či prstence. Ať už plné nebo duté, musí být průtlačky odstraněny z dutiny průtlačnice. Vyjmutí hotových kusů se provádí pomocí vyhazovače, nebo jsou protlačeny dalším vyráběnou součástí zkrz.

- U stranového protlačování, podobně jako u předchozího, nástroj na polotovar vyvíjí tlak. Liší se ale tokem materiálu, který není shodný se směrem průtlačníku. Materiál zde teče radiálně (kolmo na osu). Je to vidět na obr. 16 vyobrazujícím příklad, kdy byly pro tuto technologii využity dva průtlačníky. Touto cestou lze vyrábět např. příruby, různé výstupky na obvodu či žebra.



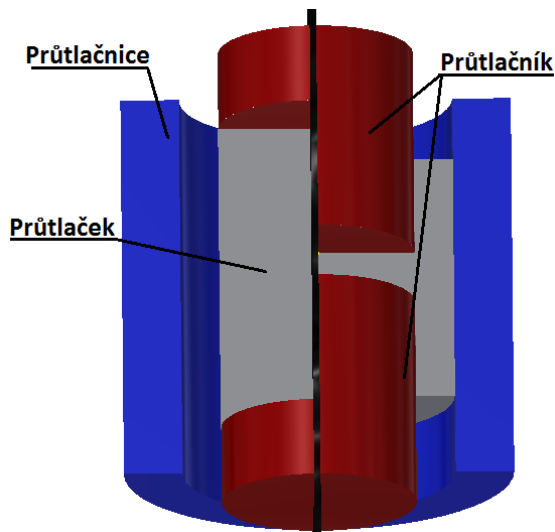
Obr. 16 Stranové protlačování [15]

- Zpětné protlačování je technologie, při které je směr toku materiálu a směr pohybu průtlačníku opačný. U této technologie je průtlačnice uzavřená a mezi průtlačníkem a průtlačnicí je ponechána mezera kudy tvářený materiál teče (viz. obr. 17). Vše se řídí zákonem zachování objemu a úměrně zmenšování původní výšky polotovaru roste výška stěn průtlačku. Lze vyrábět součásti se dnem i s průchozími otvory, podle cílového výrobku se volí polotovar. Polotovarem může být špalík nebo i prstenec. Zmíněná technologie je v praxi hojně využívána. Je velmi efektivní např. pro výrobu mosazných nábojnic.



Obr. 17 Zpětné protlačování [15]

- Sdružené neboli kombinované protlačování je kombinací předchozích metod. Na obr. 18 lze vidět kombinaci dopředného a zpětného protlačování (část materiálu teče ve smětu a část proti směru pohybu průtlačníku). Vhodným zarazením této technologie lze výrobní proces ještě více zefektivnit. Platí zde jakož i u všech ostatních předešlých technologií zákon zachování objemu. Objem polotovaru se bude rovnat objemu průtlačku.



Obr. 18 Sdružené protlačování [15]

2.4 Výpočty přetvárných odporů a tvářecích sil [11], [14], [15], [33]

Aby mohli být tvářecí stroje správně navrženy a dimenzovány, je třeba znát velikost přetvárných odporů, které na ně při procesu působí. Je třeba znát také síly, které zde působí, aby bylo možné zvolit vhodný tvářecí stroj. Velikosti přirozených přetvárných odporů lze zjistit z experimentálně získaných křivek (pracovní diagramy tahových a tlakových zkoušek). Také je lze získat pomocí rovnic, a to pro konkrétní materiál. Deformační přetvárný odpor je přirozený přetvárný odpor materiálu zahrnující technologické vlivy, jako je např. tření, změna teploty, deformační rychlosti atd.

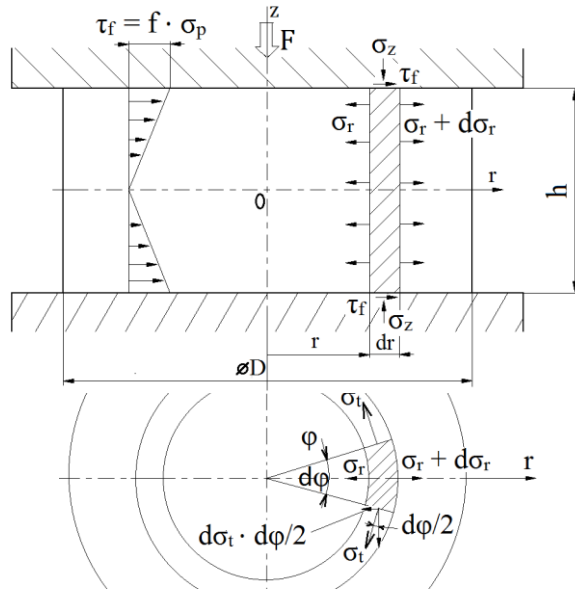
Pro výpočty je vhodné použít analytickou metodu rovinných řezů. Tato inženýrská metoda řeší výpočty deformačních přetvárných odporů a tvářecích sil výpočtem přibližných diferenciálních rovnic. Pro snížení náročnosti výpočtu se používají tato zjednodušení:

- a) materiál, který se tváří je brán jako spojité isotropní kontinuum,
- b) směry souřadných os jsou stejné jako směry hlavních napětí přetvářené součásti, a to ve všech bodech,
- c) prostorová napjatost i přetvoření jsou převáděny na úlohy rovinné a osově symetrické,
- d) rovinné řezy jsou nekonečně tenké a i po přetvoření zůstanou rovinné,
- e) tření se uvažuje jen na stykové ploše materiálu a nástroje,
- f) na základě smluvních vztahů se deformace i rychlost deformace určují jen pro vyjmutý element tělesa.

Výpočet závisí na použité metodě tváření. Dále následují výpočty deformačních odporů pro metody tváření, které je možné použít pro výrobu zadaného čepu.

2.4.1 Pěchování

U pěchování válcových těles (obr. 18), jejichž průměr je výrazně větší než výška, lze směrem do stran uvažovat rovnoměrný tok kovu. Potom napětí σ_z , σ_r a σ_t není závislé na souřadnicích osy z ($d\sigma_z / \sigma_z = 0$). Jelikož je těleso válcové, tečné napětí σ_t nezáleží na úhlu φ , dále $\tau_{r\varphi} = \tau_{z\varphi} = 0$. Ze schématu (obr. 19) je možné za pomoci podmínky rovnováhy sil ve směru poloměru r (vztah (2.9)), obdržet diferenciální rovnici rovnováhy viz vztah (2.10).



Obr. 19 schéma napjatosti pro pěchování válcového tělesa [15]

$$\sum Fr = -\sigma_r \cdot h \cdot r \cdot d\varphi + (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot h \cdot d\varphi - 2\sigma_t \cdot h \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + 2\tau_f \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr = 0 \quad (2.9)$$

kde: σ_r je radiální napětí [MPa],
 σ_t je tečné napětí [MPa],
 τ_f tření dle Coulomba [-],
 h je výška pěchovaného tělesa [mm],
 r je poloměr pěchovaného tělesa [mm],
 $d\varphi$ je úhel, ve kterém se nachází počítaný element [°].

Celou rovnici se roznásobí vztahem " $\frac{1}{h \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr}$ " a získá se následující:

$$-\frac{\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr)}{r \cdot dr} - \frac{2\sigma_t \cdot \sin \frac{d\varphi}{2}}{r \cdot d\varphi} + \frac{2\tau_f}{h} = 0$$

Sinus malého úhlu " $\sin \frac{d\varphi}{2}$ " lze přepsat na " $\frac{d\varphi}{2}$ " rovnice se dále roznásobí

$$-\frac{\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r \cdot r + \sigma_r \cdot dr + d\sigma_r \cdot r + d\sigma_r \cdot dr}{r \cdot dr} - \frac{2\sigma_t \cdot \frac{d\varphi}{2}}{r \cdot d\varphi} + \frac{2\tau_f}{h} = 0$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.10)$$

Protože je úloha rotačně symetrická je rotačně symetrická i její deformace $d\varepsilon_\varphi = d\varepsilon_r$ stejně tak se rovnají tečné a radiální napětí $\sigma_r = \sigma_t$. Za těchto podmínek, lze diferenciální rovnici (2.10) dále zjednodušit na tvar (2.11a), protože " $(\sigma_r - \sigma_t)/r = 0$ ". Přetváření tělesa probíhá v celém jeho objemu a proto i na stykových plochách je dodržena podmínka plasticity maximálních smykových napětí τ_{max} ($\sigma_r - \sigma_z = \sigma_p$). Při derivování dle souřadnic poloměru " r " ($d\sigma_z / \sigma_r = d\sigma_r / \sigma_r = 0$), se získá vztah (2.11b). Na tyto vztahy navazuje řešení dle Siebela.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.11a)$$

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.11b)$$

Při řešení dle Siebela jsou zavedeny předpoklady, že normální napětí σ_z je při pěchování v celé výšce konstantní a smykové kontaktní napětí vychází ze zákona tření dle Coulomba, viz vztah (2.12). Rozložení napětí je na obr. 20.

$$\tau_f = f \cdot \sigma_z = -f \cdot \sigma_p \quad (2.12)$$

kde: f je součinitel tření [-]

Dosažením podmínek, roznásobením vztahu (2.11b), a jeho dalšími úpravami (viz Příloha 1) se získá vztah pro přirozený deformační odpor σ_d , viz (2.13)

$$\sigma_d = -\sigma_{z, \text{stř}} = \sigma_p \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h} \right) \quad (2.13)$$

Především rovnice vyžaduje znalost přirozeného přetvárného odporu, jehož velikost se mění s velikostí přetvoření. Je možné jej zjistit na základě experimentálně získaných křivek zpevnění. Ty jsou vyjádřeny jako matematická funkce (polynom 3., 5., či n-tého stupně), viz vztah (2.14).

$$\sigma_p = A_5 \cdot \varphi^5 - A_4 \cdot \varphi^4 + A_3 \cdot \varphi^3 - A_2 \cdot \varphi^2 + A_2 \cdot \varphi + A_1 \quad [\text{MPa}] \quad (2.14)$$

kde: A_{1-5} jsou konstanty daného polynomu.

Přirozený přetvárný odpor lze zjistit také ze vztahu dle Johnson-Cooka (2.15). Ten zahrnuje, jak velikost přetvoření, tak i přetvárnou rychlost a teplotu procesu. Tento vztah je vhodný pro materiály s BCC mřížkou.

$$\sigma_p = (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{TAV} - T_0} \right)^m \right] \quad [\text{MPa}] \quad (2.15)$$

kde: σ_0 je mez kluzu zjištěná z kompresních testů [MPa],

B je parameter pevnosti [-],

n je exponent zpevnění [-],

C je parameter citlivosti na rychlost deformace [-],

$\dot{\varphi}$ je ef. logaritmická rychlost deformace [s^{-1}],

$\dot{\varphi}_0$ je referenční rychlost deformace [s^{-1}],

T je teplota materiálu [K],

T_0 je referenční teplota u statické meze kluzu $\sigma = \sigma_0$ [K],

m je koeficient teplotního odpevnění [-].

Jakmile je známý deformační odpor, vypočte se výsledná síla pěchování, viz (2.16).

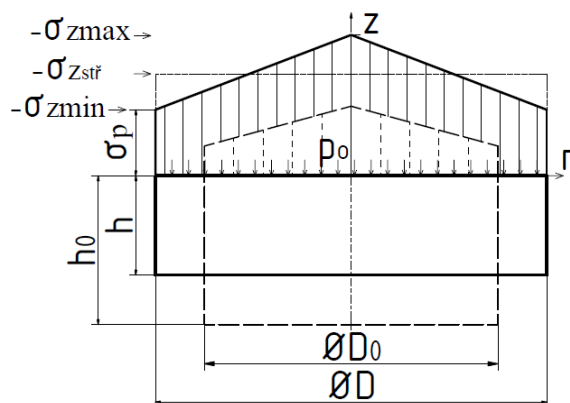
$$F_{\text{Pěch}} = -\sigma_{z, \text{stř}} \cdot S = \sigma_p \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h} \right] \cdot S \quad [\text{N}] \quad (2.16)$$

Pro volbu tvářecího stroje je nezbytná znalost přetvárné práce A . Ta se vypočte ze znalosti deformačního odporu dle vztahu (2.17), nebo jako síla působící na vykonané dráze dle (2.18).

$$A = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = V \cdot A_j \quad [\text{J}] \quad (2.17)$$

kde: A_j je měrná přetvárná práce.

$$A = F \cdot h \quad [\text{J}] \quad (2.18)$$



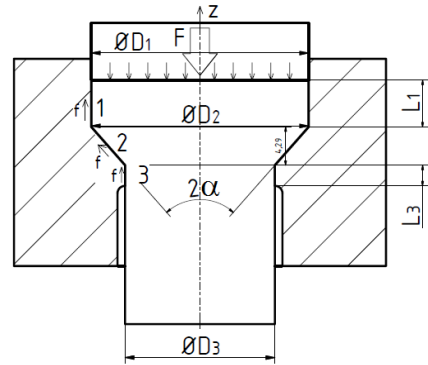
Obr. 20 rozložení osového napětí dle Siebela [15]

2.4.2 Dopředné plné protlačování

U dopředného plného protlačování (obr. 21) lze deformační odpor opět zjistit pomocí metody rovinných řezů. Průtlačnice je pomyslně rozdělena na tři části, kterými jsou kontejner, kuželová část průtlačnice a kalibrační očko. Jednotlivé části se počítají odděleně. Pro zjednodušení lze použít alternativních vztahů, např. dle Feldmana (2.19). Při znalosti deformačního odporu lze dopočítat protlačovací sílu, viz vztah (2.20). Práce viz předchozí.

$$\sigma_d = \sigma_{PS} \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \frac{2}{3} \alpha \right] + 4f_3 \cdot \frac{L_3}{D_3} \cdot \sigma_{PS} + 4f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \sigma_{P1} \quad (2.19)$$

kde: σ_{PS} je střední přetvárný odpor mat. [MPa],
 σ_{P1} je přetvárný odpor materiálu v první operaci [MPa],
 f_1 je součinitel smyk. tření zásobníku [-],
 f_2 je součinitel smyk. tření kuželové průtlačnice [-],
 f_3 je souč. smyk. tření kalibračního očka [-],
 α je úhele kuželu průtlačnice [rad],
 L_1 je neprotlačená délka [mm],
 L_3 je výška kalibračního očka [mm].



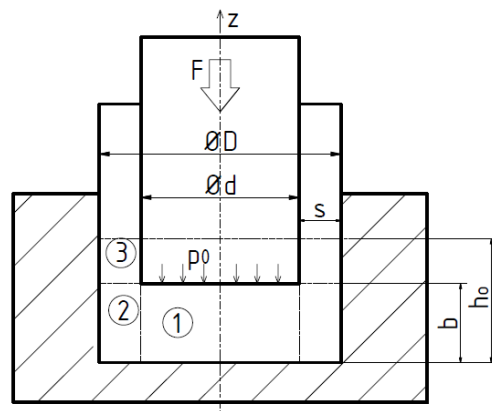
Obr. 21 dopředné protlačování [15]

Síla potřebná k protlačení viz vztah (2.19).

$$F_{protl} = \sigma_d \cdot S_0 \quad (2.20)$$

2.4.3 Zpětné protlačování

Pro zpětné protlačování lze užít vztahu dle Dippera (2.21), který považuje děj za dvojitý proces přechování. První probíhá pod průtlačníkem v 1. oblasti a druhý v pomyslném prstenci označeném jako oblast dva dle obr. 22. Výpočtové vztahy vycházejí z rovnováhy sil na rotačně symetrickém tenkém elementu. Z těchto se obdrží diferenciální rovnice rovnováhy. Ty se řeší podobným způsobem jako předešlý Siebel, za účelem získání rovnice pro výpočet deformačního odporu.



Obr. 22 model zpětného protl. [15]

Jsou zde zavedeny tyto předpoklady řešení:

- velikost poměrného přetvoření $\varepsilon = \frac{\Delta S}{S_0} = \frac{d^2}{D_0^2} \geq 0,5 \div 0,6$,
- velikost součinitele vnitřního tření kovu mezi oblastmi 1 a 2 $f = 0,5$,
- tření materiálu na čele průtlačníku a na průtlačnici se řídí dle Coulomba,
- střední hodnota součinitele tření $f_{stř} = 0,5 \cdot (f_1 + 0,5)$,
- Logaritmičké deformace $\varphi_1 = \ln \frac{h_0}{b}$; $\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_1$; $\varphi_3 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s} \right)$.

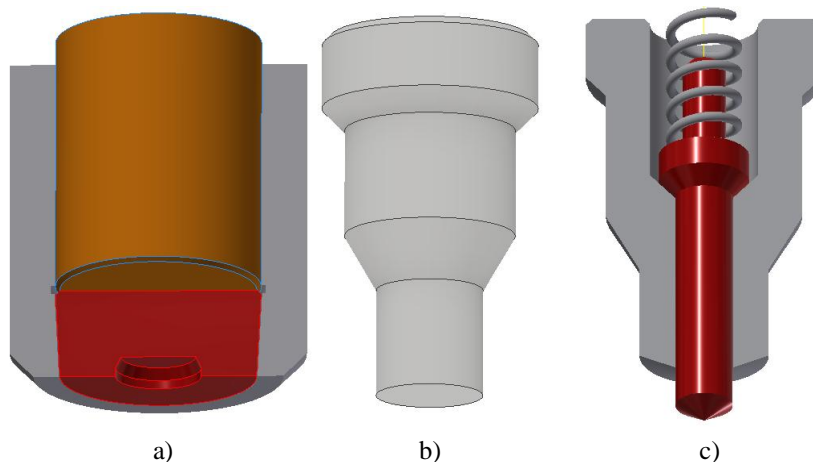
$$\sigma_d = -\sigma_{z1stř} = -\frac{1}{S} \int_S \sigma_{z1} \cdot ds = \sigma_{P1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f_1 d}{b} \right) + \sigma_{P2stř} \cdot \left(1 + \frac{2f_{2stř}}{D-d} \cdot b \right) \quad (2.21)$$

2.5 Tvářecí nástroje [2], [3], [15], [24], [27]

Nejvíce jsou tvářecí nástroje využívány v sériové a hromadné výrobě, bývají často specializované na výrobu určité součásti a tím jednoúčelové. Pro hospodárnost výroby je tedy brán velký ohled na cenu nástroje, bezporuchovost a jeho životnost, jež závisí na více faktorech. Důležitými činiteli ovlivňující životnost nástroje jsou např. jeho konstrukce, materiál nástroje, zpracováváný materiál, mazání a tepelné namáhání při procesu. Pěchovací nástroje jsou namáhány tlakem a při ohřevu pěchované součásti jsou namáhány i tepelně. Protlačovací nástroje bývají namáhány střídavě na tah, tlak a stejně jako pěchovací mohou být namáhány i tepelně. Je tedy důležité správně zvolit jejich materiál i konstrukci.

2.5.1 Nástroje pro pěchování

Jejich konstrukce je odvozena od technologického postupu výroby a od použitého zařízení. Používanými stroji jsou lis, pěchovací automaty, jednooperační či víceoperační kovací stroje. Celý nástroj je složen z pěchovníku a pěchovnice. Pěchovník se používá k napěchování polotovaru do požadovaného tvaru, či k jeho předpěchování pro další tvářecí operace. Je často složen z více částí. Jeho funkční částí je pěchovací vložka.



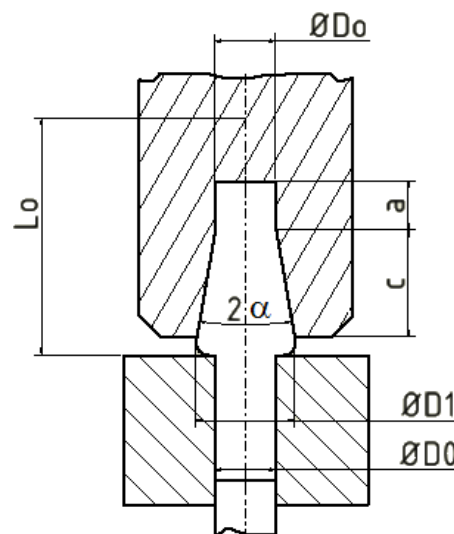
Obr. 23 Funkční tvary pěchovníků [15]

Často má tzv. funkční dutinu, jejíž tvar odpovídá hotové součásti (obr. 23a). Pěchovníky mohou být také s rovným čelem, či s kuzelem pro středění polotovaru viz obr. 23 b, c. Materiál funkčních částí je nástrojová ocel nebo slinutý karbid, který bývá zapuštěn s přesahem do objímky.

Pro pěchování hlav součástí existují doporučené tvary dutin pěchovníků. Příklady volby rozměrů jsou uvedeny na obr. 24 a v tab. 4, kde L_0 je vzpěrná výška a D_0 je průměr polotovaru.

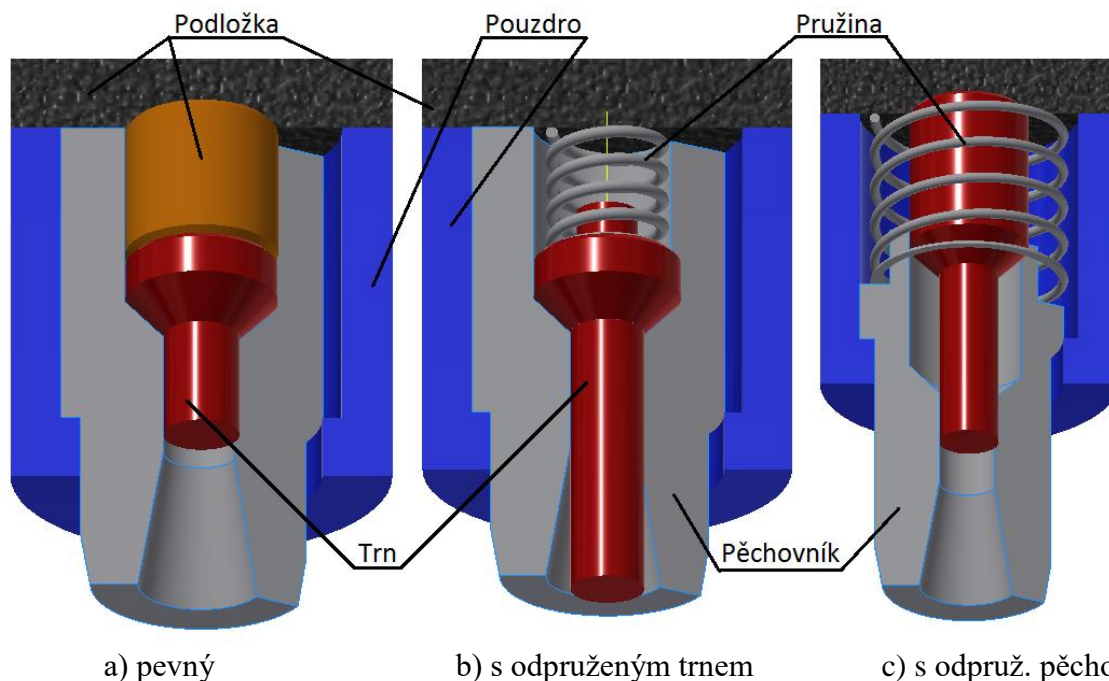
Tab. 4 doporučené rozměry dutiny pěchovníku [15]

Pěch. poměr L_0/D_0	2α [°]	a [mm]	c [mm]
2,5	15	$0,6 \cdot D_0$	$1,37 \cdot D_0$
3,3	15	$1,0 \cdot D_0$	$1,56 \cdot D_0$
3,9	15	$1,4 \cdot D_0$	$1,66 \cdot D_0$
4,3	20	$1,7 \cdot D_0$	$1,56 \cdot D_0$
4,5	25	$1,9 \cdot D_0$	$1,45 \cdot D_0$



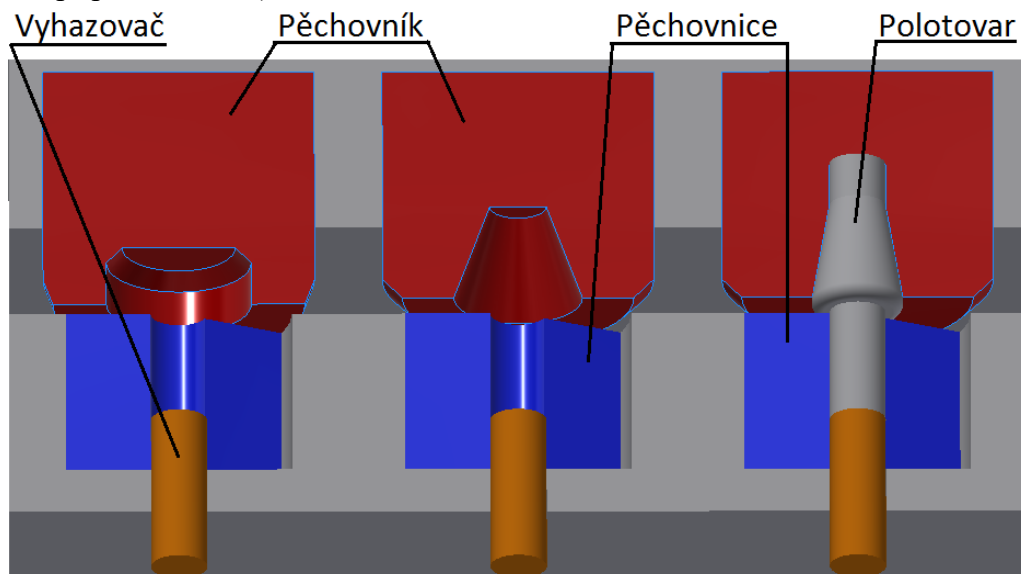
Obr. 24 Tvar dutiny pěchovníku [15]

Celý nástroj může být proveden jako pevný (obr. 25a), nebo s odpružením pro lepší zavádění polotovaru do pēchovnice. K pēchování krátkých součástí se používá odpružený trn (obr. 25b). Pro pēchování dlouhých součástí je vhodný odpružený pēchovník, viz obr. 25c, užívaný pro pēchovací poměry $L_0/D_0 > 2,3$. Pēchování probíhá tak že se polotovar zasune do dutiny a tím je volná délka pēchování $L_0/D_0 < 2,3$. Při dalším tváření je materiál tlačěn trnem do předpēchovací dutiny. Takto lze ve dvou rázech pēchovat polotovary s poměrem až L_0/D_0 až 6.



Obr. 25 Konstrukce pēchovacích nástrojů [15]

Pēchovací automaty mohou být obecně rozděleny na jednorázy, dvourázy, třírázy. V každé operaci by měla být dosažena podmínka $L_0/D_0 < 2,3$. To zaručí, že polotovar vydrží na vzpěr a nebude vybočovat. Pokud je podmínka dodržena již pro první operaci, volí se jednoráz a součást je vyrobena na jeden zdvih. Pro případy kdy má polotovar poměr $L_0/D_0 > 2,3$, volí se dvouráz případně tříráz (obr. 26).

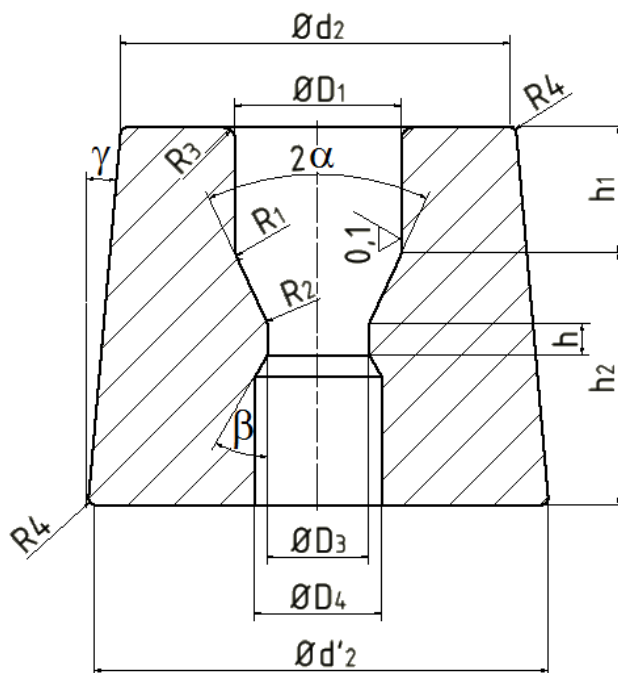


Obr. 26 Model pēchovacího automatu - tříráz [15]

2.5.2 Nástroje pro dopředné protlačování

Nástroje se skládá z průtlačníku a průtlačnice, jejichž geometrie podstatně ovlivňuje tvářecí proces. Vhodnou volbou jejich geometrie lze dosáhnout ideálních tvářecích podmínek. Různá geometrie součástí může vyvodit různé síly potřebné k protlačení polotovaru.

U dopředného protlačování je velmi důležitý tvar redukční části průtlačnice. Nejčastěji je volen redukční kužel, ten je výrobně poměrně nenáročný. Úhel tohoto kužele má velký vliv na deformační odpor, který při procesu vznikne. Na zaváděcí části mívají náběhový kužel nebo rádius, to usnadní vkládání polotovaru. Příklad základního provedení průtlačnice viz obr. 27. Geometrie nástroje závisí i na teplotě, doporučené rozměry viz tab. 5.

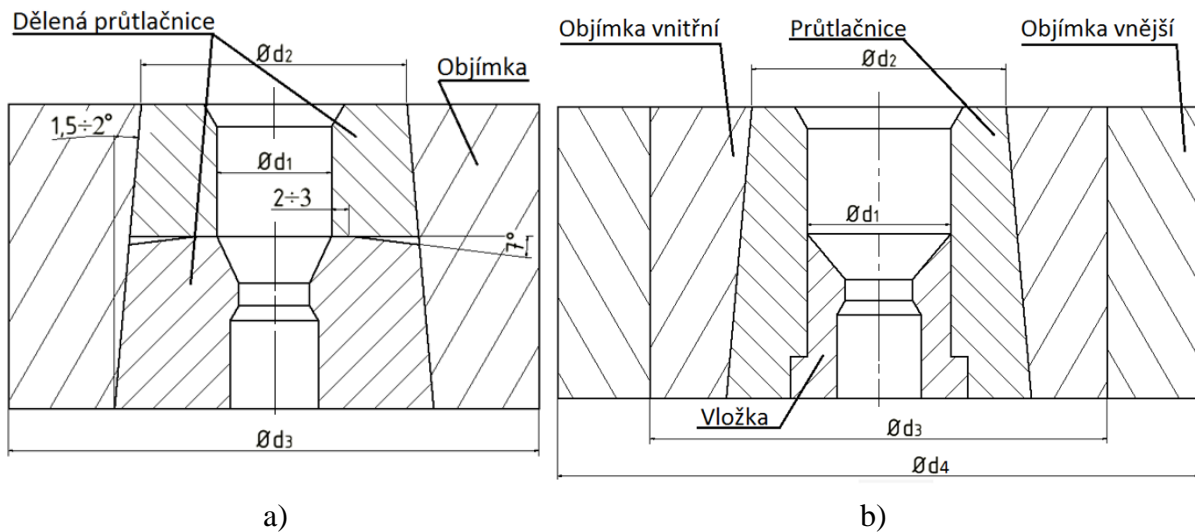


Obr. 27 Průtlačnice dopředného protlačování [15]

Tab. 5 doporučené rozměry průtlačnice dopředného protlačování [15]

Teplota tváření	20 °C	200 ÷ 400 °C	400 ÷ 700 °C	700 °C a více
D_4	$D_3 + (0,1 \div 0,2)$	$D_3 + (0,2 \div 0,4)$	$D_3 + (0,4 \div 0,6)$	$D_3 + (0,4 \div 0,8)$
h	$0,5 \cdot \sqrt{D_3}$	2 ÷ 3 mm	3 ÷ 5 mm	5 ÷ 20 mm
2α	30° ÷ 90°	60° ÷ 120°	90° ÷ 120°	90° ÷ 150°
R_1	$(D_1 - D_3) / 2$			
R_2	$(0,05 \div 0,1) \cdot D_3$	1 ÷ 2 mm	2 ÷ 4 mm	3 ÷ 10 mm
R_3	asi $0,15 \cdot D_1$			
h_2	min $0,7 \cdot D_1$			
γ	1° ÷ 2°			
β	5° ÷ 10°			

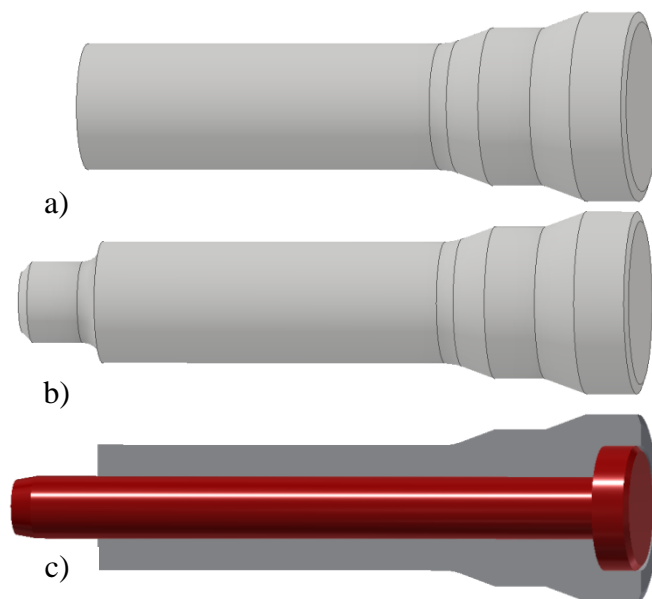
Průtlačnice jsou silně radiálně namáhány a mohlo by dojít k jejich porušení. Pravděpodobné místo možného porušení je přechod válcové části v kuželovou část průtlačnice. Pro vysoká namáhání lze průtlačnice příčně rozdělit (obr. 28a) a snížit tak účinek vrubu. Je důležité dosáhnout těsného styku obou částí, čímž se zamezí zatečení materiálu do dělicí roviny. Rovněž lze dělené průtlačnice konstruovat jako vložkované (obr. 28b). Při opotřebení lze vložka snadno vyměnit. Takové průtlačnice jsou potom zapouzdřeny do objímky. Pro velká namáhání lze navrhnout i několik objímek, které zvyšují napětovou únosnost průtlačnice. Obecně průtlačnici bez objímky lze použít při radiálním tlaku do 1000 MPa. Na vnitřní radiální tlaky do 1600 MPa postačí nástroj s jednou objímkou. Průměry jednotlivých segmentů bývají v poměru dle vztahu (2.22)



Obr. 28 Dělené průtlačnice pro dopředné protlačování [15]

$$\frac{d_2}{d_1} \doteq \frac{d_3}{d_2} \doteq \frac{d_4}{d_3} \approx 1,8 \div 2,2 \quad (2.22)$$

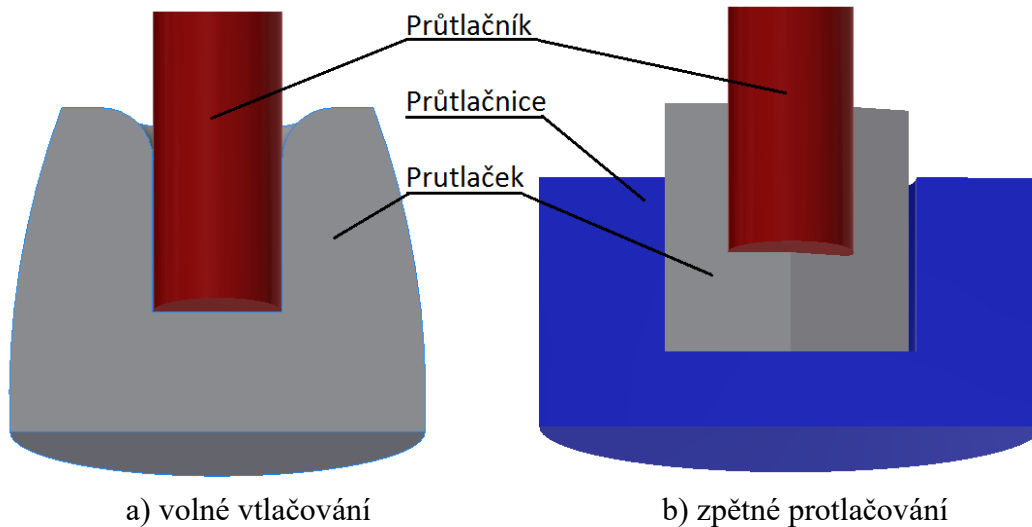
Průtlačníky pro protlačování malých součástí se vyrábí jako celistvé. Jsou konstruovány s válcovou nebo kuželovou hlavou sloužící pro upnutí. Přechody mezi upínací částí a dřikem musí být pozvolný, tím se snižuje koncentrace napětí. To lze pozorovat u jednoduchého průtlačníku (obr. 29a). Při dopředném protlačování dutých součástí je celistvý nástroj (obr. 29b), v místě přechodu nejmenšího průměru silně namáhán a může dojít k jeho porušení. Vhodnější je tedy složený nástroj viz obr 29c. Je důležité dbát na dodržení všech geometrických tolerancí a na finální opracování, jako je lapování funkčních broušených ploch.



Obr. 29 Základní druhy průtlačníků pro dopředné protlačování [15]

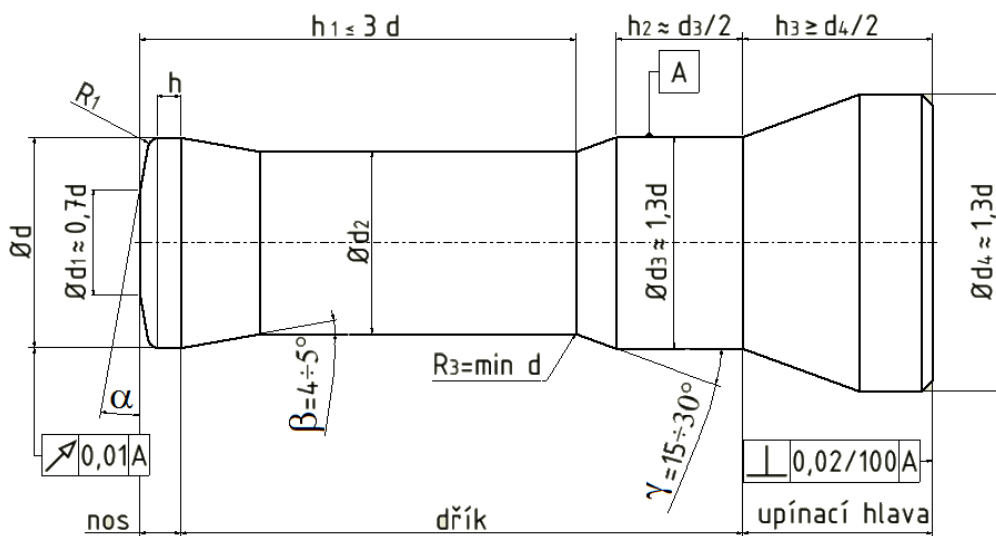
2.5.3 Nástroje pro zpětné protlačování

Stejně jako u předchozího se nástroj skládá z průtlačníku a průtlačnice. Tuto technologii lze dělit na volné vtlačování a usměrněné vtlačování (neboli zpětné protlačování) viz obr. 30. Volné vtlačování ponechává boční povrch tělesa volně. Těleso je přetvářeno tím víc, čím menší je poměr D_o / d . Pokud ale poměr dosáhne hodnoty $D_o / d < 2$ používá se v praxi usměrněného vtlačování viz obr. 30b. U zpětného protlačování není přetvoření rovnoměrné. Část kovu tvářeného polotovaru vytéká mezi průtlačníkem a průtlačnicí v podobě prstence. Tato část materiálu se dále pouze vysouvá a není dále přetvářena.



Obr. 30 Schéma zpětného protlačování [15]

Průtlačníky pro zpětné protlačování se od těch pro dopředné protlačování konstrukčně liší. Průtlačníky jsou za čelní fazetkou odlehčeny kvůli tření, které by vznikalo mezi průtlačníkem a stěnou kalíšku. Velmi podstatný je tvar jejich čel, který má značný vliv na průběh a velikost protlačovací síly. Z praxe je osvědčený tvar dle obr. 31, kde je čelo kuželovité. Úhel kuželu se volí dle tvaru průtlačku, ale zároveň se bere zřetel na teplotu tváření. Přiřazené rozměry jsou závislé, také na teplotě procesu viz tab. 6. Aktivní část nástroje (nos) má vysoké požadavky na drsnost, okolo $Ra\ 0,1$. Nízká drsnost může zajistit vyšší životnost nástroje.



Obr. 31 Doporučená geometrie a rozměry průtlačníku zpětného protlačování [15]

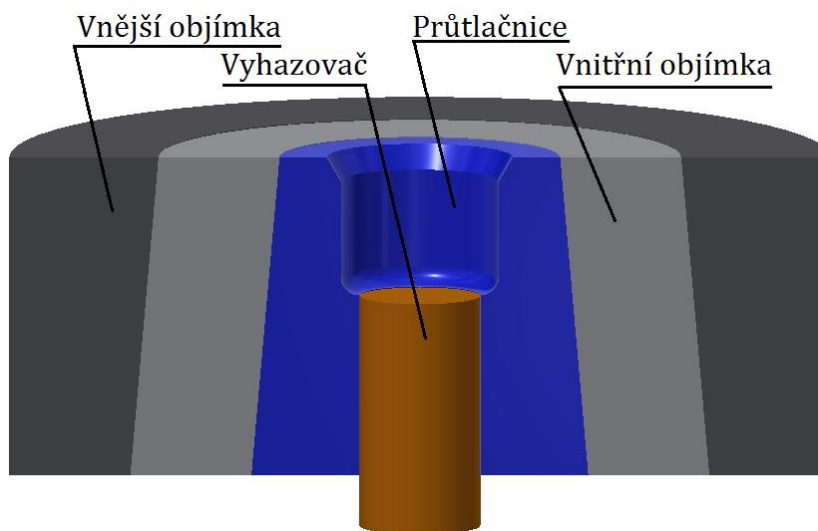
Tab. 6 doporučené rozměry průtlačníku zpětného protlačování [15]

Teplota tváření	20 °C	200 ÷ 400 °C	400 ÷ 700 °C	700 °C a více
$\varnothing d$	$d - (0,1 \div 0,2)$	$d - (0,2 \div 0,5)$	$d - (0,3 \div 0,6)$	$d - (0,4 \div 1,0)$
h	$0,5 \cdot \sqrt{d}$	2 ÷ 3 mm	3 ÷ 5 mm	5 ÷ 20 mm
α	5° ÷ 8°	5° ÷ 15°	5° ÷ 15°	20°
R ₁	$(0,05 \div 0,1) \cdot d$	1 ÷ 3 mm	1 ÷ 4 mm	2 ÷ 10 mm
R ₃	$d - (2 R_1 + 0,2) \approx 0,7 d$			

Průtlačnice pro zpětné protlačování mají tvar dutiny daný rozměrem vyráběné součásti. Stejně jako u průtlačnic dopředného protlačování mají kuželové nebo zaoblené ústí, což usnadňuje zavedení polotovarů. Dutiny mají mírnou kuželovitost (1:1000), ta zamezuje vzniku velkých osových tahů při vyhazování protlačených součástí. Funkční povrch je kvůli potřebné nízké drsnosti broušený a lapovaný.

Na průtlačnici působí velké radiální tlaky její únosnost lze zvýšit pomocí objímek (bandáží). Obvykle pokud radiální tlaky nepřekročí 1000 MPa, lze ponechat nástroj bez objímky, do tlaku 1600 MPa se používá jedné objímky. Při tlaku 1600 ÷ 2000 MPa je třeba dvou objímek.

Objímky se při montáži buďto zalisovávají na kuželové plochy (začíná se vnější objímkou), nebo se pomocí ohřevu zapouzdřují na válcové plochy. Výroba kuželových ploch je náročná. Pokud je kužel nepřesný, není dosaženo rovnoměrného předpětí, což je závažný nedostatek. Výhodou je vyměnitelnost, novou průtlačnici lze zalisovat do použité objímky. Tato metoda se nejčastěji používá pro ocelové průtlačnice. Průtlačnice ze slinutého karbidu mají vyšší životnost a proto se zapouzdřují na válcové plochy. Jde o přesnější metodu, vhodnou pro zajištění rovnoměrného předpětí, jež má vliv na životnost nástroje.



Obr. 32 Model zpětné průtlačnice s objímkami [15]

Při ohřevu musí být dodržena podmínka, že teplota ohřevu nesmí přesáhnout teplotu popouštění, jinak by došlo k poklesu tvrdosti a degradaci materiálu. Schematický model průtlačnice pro zpětné protlačování se dvěma objímkami viz obr. 32. Vyhazovač je v průtlačnici uložen s tolerancí, aby se zabránilo nechtěnému zatékání protlačovaného kovu.

2.6 Požadavky na návrh nástrojů [2], [3], [10], [13], [14], [15], [23]

Tvářecí technologie se často navrhuje kvůli úsporám zpracovávaného materiálu, čímž zlepšují ekonomiku výroby. Používané nástroje jsou však mnohdy jednoúčelové a mají vysoké pořizovací náklady. Pro hospodárnost má značný význam jejich cena a životnost. Na nástroje působí při procesu tváření velký rozsah namáhání, jako je tah, tlak, či ohyb. Často jsou vystaveny cyklickému namáhání, které má na jejich životnost velký vliv. Je důležité správně zvolit materiál tvářecího nástroje, při nevhodné volbě nedosáhneme příliš vysoké životnosti a pro danou sérii bude třeba vyrobit nástrojů více. Dále lze životnost zvýšit vhodnou konstrukcí a v procesu výroby mazáním, aby nedocházelo k degradaci opotřebením. Pro správná zhotovení a použití by měl tvářecí nástroj projít těmito body:

- a) návrh: softwarová simulace tvářecích postupů, vyhodnocení požadavků na nástroj, velmi důležité je již na začátku zvolit správnou nástrojovou ocel (při nevhodné volbě materiálu nemá další postup smysl), návrh postupu při chemicko-tepelném zpracování, pokud je nástroj sestaven z více částí, je snaha o dosažení stejné životnosti celé sestavy.
- b) konstrukce: je třeba uchovat výrobní dokumentaci, nástroj by měl být co nejjednodušší, je však třeba vyhýbat se místům kde se koncentruje napětí (ostré přechody nahradit rádií / úkosy), musí být funkční a správně dimenzovaný,
- c) výroba: nezbytné je dodržení podmínek postupu výroby jinak nástroj degraduje (obrábění, tepelné zpracování, finální úpravy jako je broušení), důležitá je výstupní kontrola.
- d) užití: správná manipulace s nástrojem, jeho montáž a seřízení, indikování pracovních tlaků, možná renovace a opravy nástroje.

U technologie protlačování se často nástroje poruší v důsledku lomu, který může být způsoben např. cyklickým namáháním. Toto poškození mnohdy vzniká také v důsledku nevhodné konstrukce nástroje nebo při špatném zadání parametrů ve výrobě, kdy tvářecí síla překračuje dovolené zatížení nástroje. Ačkoli je velké množství nástrojů vyměňováno z jiných příčin, v ideálním případě by měl být nástroj vyřazen z výroby až po jeho opotřebením. Aby opotřebením nepřišlo příliš brzy, je třeba zvolit vhodnou nástrojovou ocel a její případné tepelné zpracování.

2.6.1 Materiály tvářecích nástrojů [23], [27]

Obecně u nástrojových ocelí bývají kladeny vysoké nároky na jejich vlastnosti, těmi mohou být například:

- a) jejich vysoká pevnost a tvrdost,
- b) dostatečná houževnatost (aby nedocházelo ke křehkým lomům),
- c) odolnost proti opotřebením,
- d) vysoká teplota popouštění,
- e) dobrá obrobitelnost (pro vytvoření nástroje),
- f) malá tepelná dilatace (rozměrová stálost).

Materiály pro nástroje objemového tváření je doporučeno volit s ohledem na zpracovávaný materiál a na způsob jeho zpracování. To znamená, že např. u protlačování volím materiál nástroje v závislosti na materiálu protlačovaném a na způsobu protlačování (dopředné, zpětné, kombinované). Dále je důležitá velikost přetvoření a tvarová složitost vyráběné součásti. V tabulce 7 je uveden přehled materiálů vhodných pro výrobu protlačovacích nástrojů.

Tab. 7 materiály vhodné pro protlačovací nástroje [23]

Díl protlačovacího nástroje		Materiál	
Průtlačník		19 314, 19 315, 19 426, 19 550, 19 569, 19 572, 19 820, 19 830	
Průtlačnice		19 436, 19 550, 19 569, 19 572, 19 655, 19 735, 19 820, 19 830	
Objímka	Jednoduchá	19 550, 19 740 tepelné zpracování na tvrdost 45 ÷ 48 HRC	
	Dvojitá	Vnitřní	19 550 tepelné zpracování na tvrdost 52 ÷ 55 HRC 19 655 tepelné zpracování na tvrdost 55 HRC
		Vnější	15 261 tepelné zpracování na tvrdost 45 ÷ 48 HRC; pro rozměrnější objímky je třeba větší houževnatosti, volí se 19 426 tepelné zpracování na tvrdost 40 ÷ 45 HRC
Vyhazovač		19 314, 19 569, 19 820, 19 830	
Kolík vyhazovače		19 314, 19 426, 19 550,	
Opěrná deska, podložka, vodící vložka		19 314, 19 356, 19 550; u většího tlakového namáhání 19 436	
Těleso protlačovadla, matrice		11 600, 11 700, 12 060, 13 180, 14 260 tepelné zpracování na tvrdost 40 ÷ 45 HRC	

Ocel 19 655 je doporučena jen pro větší průtlačnice s hlubokou dutinou a oceli 19 820 a 19 830 jsou vhodné pro větší série, či pro vysoká namáhání

Při velkých namáháních je možné jako materiál zvolit slinuté karbidy. Takové nástroje se vyznačují velkou tvrdostí a životností. Často se používají slinutý karbid wolframu a kobaltu. V porovnání s ocelí mají slinuté karbidy nižší pevnost v tahu a ohybu, ale větší pevnost v tlaku.

2.6.2 Materiály vhodné pro tváření [8]

Objemově tvářet lze všechny materiály, jež jsou schopné plastické deformace. Vhodnými vlastnostmi tvářených kovů jsou malá mez kluzu, malý sklon ke zpevnění a dobrá tvařitelnost. Zjišťují se pomocí pýchovacích zkoušek. Nejčastěji využívaným materiálem u tváření jsou nízkouhlíkové a nízkolegované oceli. Je možné tvářet také oceli se středním obsahem uhlíku a legované oceli. Čím větší je obsah uhlíku tím menší je její tvařitelnost za studena. Mezní hodnotou množství uhlíku v oceli je asi 0,45 % C (pro protlačování za studena). Používají se však i neželezné kovy, které mají vhodné mechanické vlastnosti. U ocelí kromě obsahu uhlíku zhoršují její tvařitelnost i nečistoty, kterými mohou být síra, fosfor, kyslík dusík.

U volby tvářeného materiálu se bere zřetel na jeho tvárné vlastnosti a na velikost vyráběné série. Jako materiály pro velké série jsou vhodné nízkouhlíkové oceli. Díky jejich značné tvárnosti dobře zaplní dutinu nástroje a není třeba složitých tepelných zpracování. To je často potřeba provádět u legovaných ocelí. Ty mají deformační odpor větší a nezaplňují dutinu

stroje tak dobře jako nízkouhlíkové oceli. Některé oceli vhodné pro pēchování za studena jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 materiály vhodné pro protlačování [8]

Oceli dle ČSN	Chemické složení							Tvárnost oceli
	C	P _{MAX}	S _{MAX}	P+S	Mn	Si	Cr	
11 340	0,10	0,05	0,05					Oceli vysoké tvárnosti
11 370	0,15	0,05	0,05					
12 010	0,13	0,04	0,04	0,07	0,6			
12 013	0,07	0,03	0,03	0,05	0,3	0,35		
11 420	0,22	0,05	0,05					Oceli střední tvárnosti
11 424	0,20	0,05	0,05					
11 456	0,22	0,05	0,05					
12 020	0,20	0,04	0,04	0,07	0,9	0,35		
14 120	0,18	0,04	0,04	0,07	0,6	0,35	0,9	
14 220	0,19	0,04	0,04	0,07	1,4	0,35	1,1	
11 500	0,28	0,06	0,06	0,10				Oceli tvrdé malé tvárnosti
11 600	0,43	0,06	0,06	0,10				
12 040	0,04	0,04	0,04	0,07	0,8	0,35		
12 050	0,04	0,04	0,04	0,07	0,8	0,35		

2.7 Technologičnost tvarů tvářených součástí [2], [14], [10]

Je možné vyrábět různé tvary těles plných, či dutých, se dnem či beze dna. Mohou být symetrická nebo asymetrická. Ne všechny tvary jsou však konvenčními metodami vyrobitelné, nebo pro výrobu vhodné. Podle tvarů lze výroby rozdělit do několika základních skupin.

Čepovité součásti viz obr. 33. Vyrábí se převážně technologií pēchování, dále se často používá dopředné, či stranové protlačování.



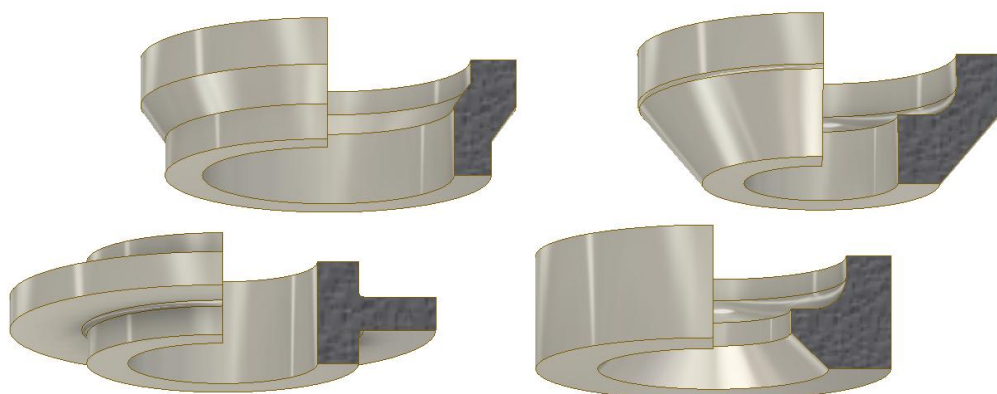
Obr. 33 Modely součástí typu čepu [2]

Kalíškovité součásti viz obr. 34. Pro jejich výrobu je vhodnou technologií zpětné i dopředné protlačování.



Obr. 34 Modely součásti typu kalíšku [2]

Nízké rotační symetrické s otvorem viz obr. 35. Lze je vyrábět například dopředným protlačováním dutých polotovarů, podle tvaru se však volí i další kombinace technologií.



Obr. 35 Modely nízkých rotačně symetrických součástí [2]

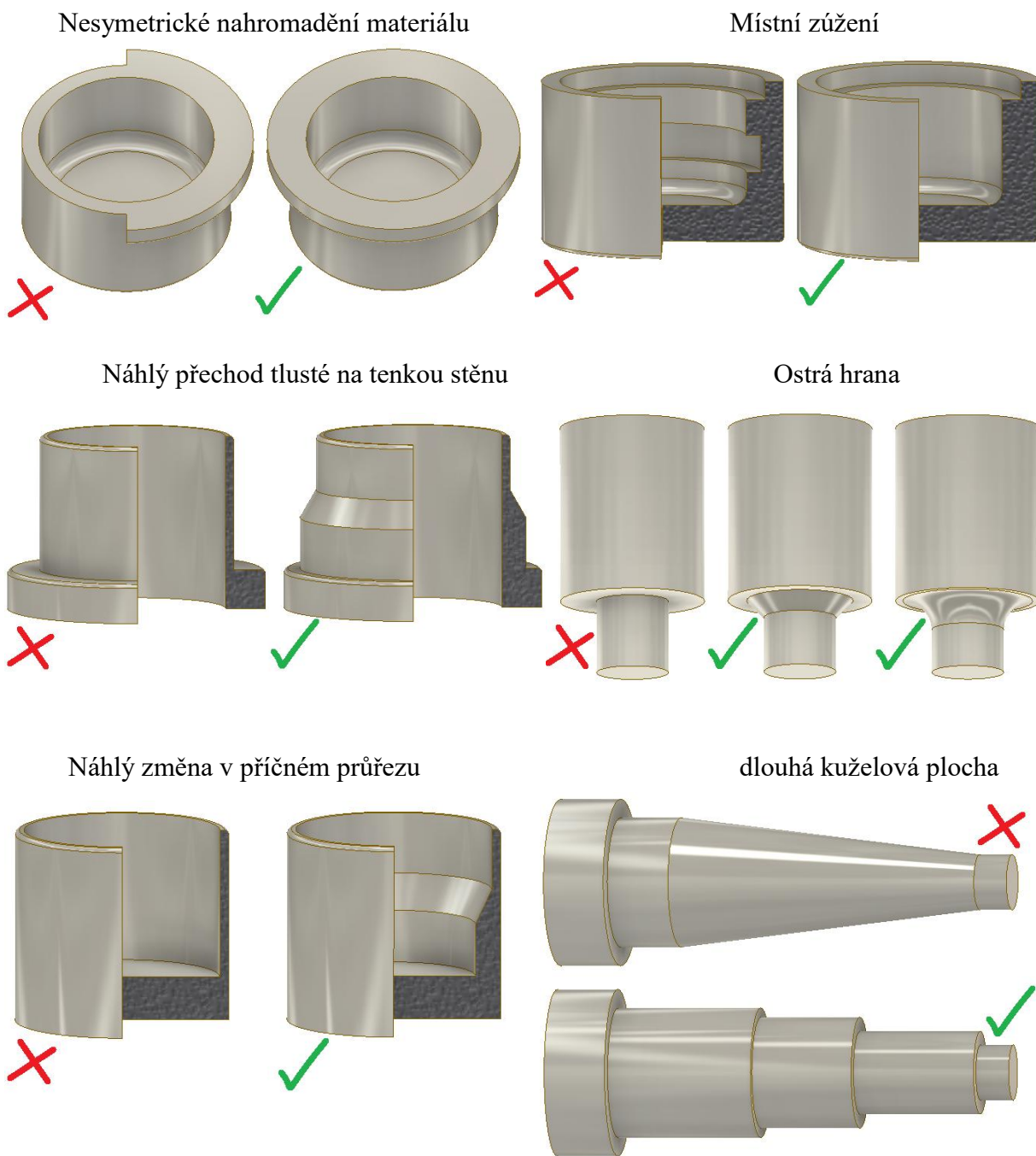
Součásti nesymetrických tvarů viz obr. 36. Výroby takových součástí je velmi náročná a proto není široce rozšířena.



Obr. 36 Modely součástí nesymetrických tvarů [2]

Při návrhu součástí je třeba dbát na dodržení požadavků zaručujících možnou vyrobiteľnosť součástí a bezporuchovosť při výrobě. Těmito požadavky mohou být rozměry součástí, tloušťky stěn dutých součástí, či tvar součástí.

Obecně maximální rozměry výrobků nejsou nijak omezeny, ale v praxi jsou limitovány velikostí a silovými parametry použitého stroje. Pro duté součásti je důležitá tloušťka stěny. Ta by v praxi neměla překračovat 15 mm a je nevhodné aby klesla pod 0,5 mm. Tyto rozměry jsou doporučené a v jistých případech mohou být překročeny. U návrhu součástí je důležité brát ohled na tvar součástí viz obr 37.



Obr. 37 Příklady vhodných a nevhodných tvarů při návrhu součástí [10]

Pokud možno je třeba dodržovat několik zásad (z nich některé jsou zobrazeny na obr. 37):

- a) navrhovat součást tak aby nedocházelo k nesymetrickému nahromadění materiálu,
- b) náhlé přechody tlustých stěn do tenkých nahradit přechody pozvolnými, ostré hrany a rohy nahradit úkosy či zaoblením,
- c) vyhýbat se místním zúžením, ty mohou učinit součást nevyrobitelnou,
- d) když je to možné vnější i vnitřní plochy se volí rovnoběžně se směrem pracovní dráhy nástroje,
- e) u zpětného protlačování by neměla být vtlačovaná hloubka H víc jak dvojnásobek průměru dutiny. Otvor by pak měl mít minimálně 10 mm,
- f) pokud to nezabraňuje funkci součásti je vhodné dlouhé kuželové plochy nahradit válcovými průřezy.

2.8 Tvářecí stroje [2], [10], [15]

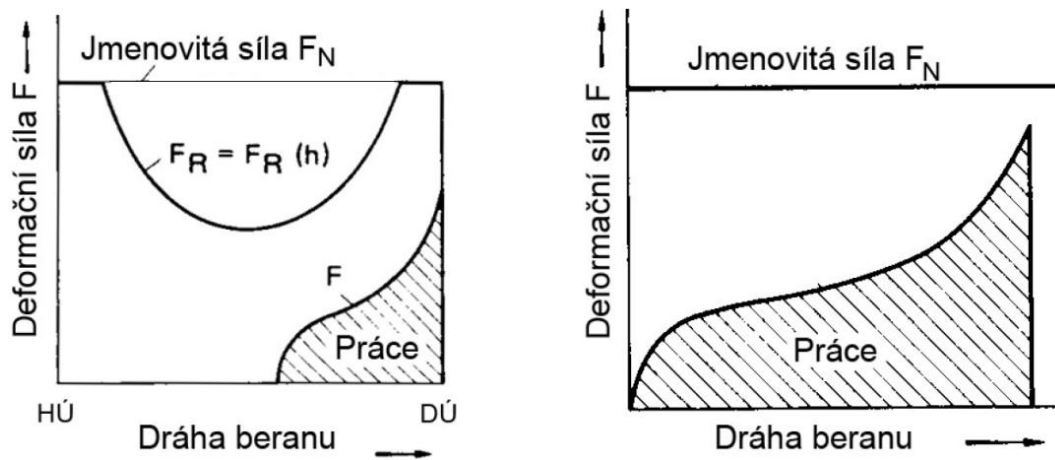
Pro technologie objemového tváření se jako stroje používají lisy, či speciální tvářecí stroje. U výběru stroje jsou hlavními ukazateli pro jeho volbu tvářecí síla, přetvárná práce a velikost série vyráběného dílce. Nejvyšší potřebná tvářecí síla při výrobě součásti nesmí nikdy překročit jmenovitou sílu vybraného stroje, jinak by došlo k jeho přetížení. Pomocí tvářecí práce se ověřuje zatížitelnost pohonu stroje, a to hlavně setrvačnicku a poháněcího elektromotoru. Obvykle se používají tři typy strojů: hydraulické lisy, mechanické lisy a speciální tvářecí stroje

Hydraulické lisy používají k rozpočívání beranu píst poháněný tlakem kapaliny z akumulátoru nebo z čerpadla. V beranu je upnut tvářecí nástroj. Jako kapalina je používána voda, či hydraulický olej. Tyto stroje dosahují na dlouhé pracovní dráze velké tvářecí síly. Jmenovitá pracovní síla je přenášena po celou dobu zdvihu. Hodí se tedy pro výrobu dlouhých a rozměrných součástí. Nevýhoda je malá pracovní rychlost.

Mechanické lisy dosahují vyšší pracovní rychlosti než hydraulické, ale jmenovitá pracovní síla se při zdvihu mění. Výhodou je tuhost strojů, která ovlivňuje účinnost, kvalitu výlisků a životnost stroje. Jsou vhodné pro výrobu rozměrných součástí, na které je třeba velká tvářecí síla. Mechanické lisy se mohou dále dělit na lisy klikové, kolenové a výstředníkové. Všechny lisy jsou poháněny výkonným elektromotorem, který uvádí stroj do pohybu. U klikového lisu je pohyb elektromotoru převáděn na beran pomocí ozubených kol, spojky, klikové hřídele a ojnice. Konstrukce strojů bývá dvojstojanová. Kolenový lis převádí přes spojku pohyb elektromotoru na setrvačnick, ten roztáčí klikový hřídel napojený na kolenové ústrojí, které rozpočívá beran lisu. Lisy tohoto druhu se hodí pro určité tvářecí operace, u nichž není zapotřebí velký zdvih a tím ani velká přetvárná práce. Jsou charakteristické špičkou síly na konci zdvihu. Výstředníkový lis jak název napovídá, používá k rozpočívání beranu přes spojku poháněný výstředník. Lisy se konstruuji jako jednostojanové, či dvojstojanové.

Jako speciální stroje jsou označovány zařízení často užívané pro hromadnou výrobu. Takto jsou označovány pýchovancí, protlačovací a dnes velmi používané postupové automaty. Ty tváří výlisk postupně v několika operacích. Pro přenos polotovaru mezi operacemi je použito speciálních přenášecích zařízení (kleštin). Jako polotovar se nejčastěji používají svitky drátů, ze kterých si stroj stříhá polotovary pro tváření. Příklad nezakrytovaného postupového automatu viz obr. 39.

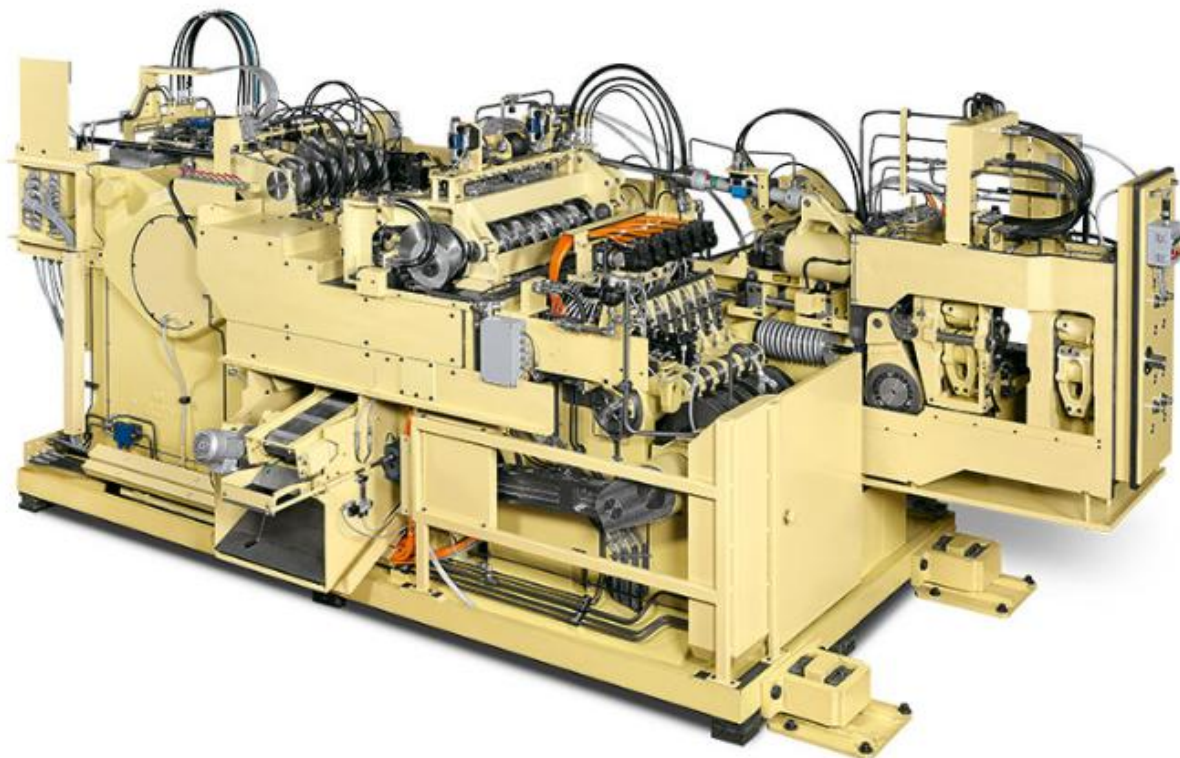
Srovnání průběhu síly a přetvárné práce mechanického a hydraulického lisu je patrné z grafů na obr. 38.



a) mechanický lis

b) hydraulický lis

Obr. 38 závislost síly lisu na dráze beranu [22]



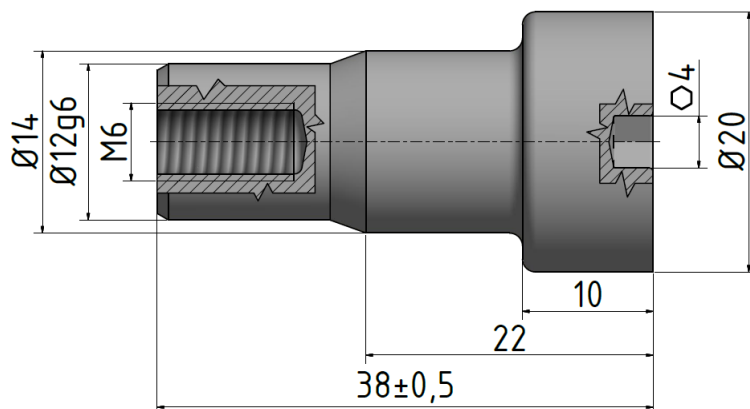
Obr. 39 Postupový automat od firmy HATEBUR [17]

3 POSTUP TECHNOLOGIE VÝROBY [13], [14]

Pro názornost je zde krátká rekapitulace. Vyráběnou součástí je čep ze šlapátka dětského kola (tvar součásti dle obr. 40). Součást je složena z hlavy, v níž je vyroben otvor pro imbusový klíč a dvou dříků, z nichž jeden obsahuje vnitřní závit M6. Otvor pro imbusový klíč bude ve výpočtech (pro zjednodušení) uvažován jako válcový. Výroba čepu se uskuteční tvářením zastudena a budou použity operace pěchování dopředného i zpětného protlačování.

Při návrhu postupu výroby je vhodné zvolit několik variant a z nich vybrat tu nejvýhodnější. Následují výpočty, které vedou ke zjištění deformačních odporů a potřebné tvářecí síly. Tu je třeba znát pro volbu tvářecího stroje.

Obecně tvářecí technologie jsou odvozeny ze zákona zachování objemu, který je tedy nutno předem znát. Výpočet objemu součásti je důležitý pro další postup výroby. Když známe objem, je možné zjistit váhu a zvolit polotovary pro její výrobu. Pro výpočet objemu lze součást imaginárně rozdělit na menší části (kvádry, válce, mezikruží), ty jde snadno vypočítat, následně sečíst a výsledná hodnota je rovna celkovému objemu součásti. Pro uvedenou součást byl objem součásti zjištěn pomocí softwaru Inventor Professional 2017. Objem byl spočítán na 6534.25 mm^3 a při hustotě materiálu $7,85 \text{ g/mm}^3$ je váha součásti $0,05129 \text{ kg}$.

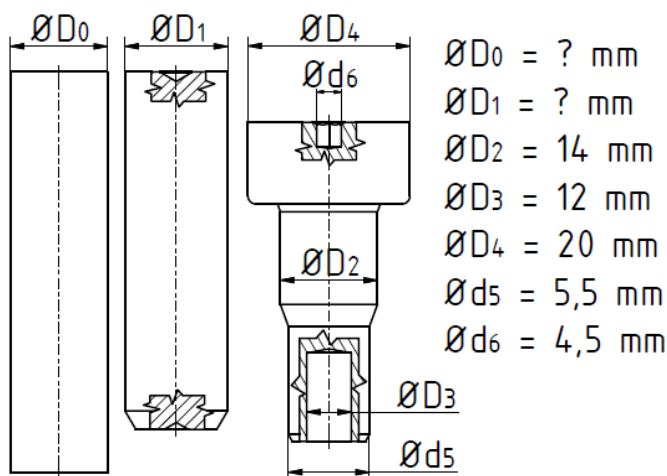


Obr. 40 Součást se základními rozměry

3.1 Výrobní varianty

Materiálem pro vyráběnou součást bude již dříve zmíněná ocel 11 320 5R. Jednotlivé výrobní varianty se budou lišit zvoleným polotovarem. Při výrobě se požaduje, aby výrobek získal co možná nejrovnoměrnější zpevnění v celém svém průřezu, nebo ve vybraných částech. Rovněž nesmí být překročeno maximální povolené přetvoření, to by se mělo pohybovat v intervalu $\varphi \in (0 \div 1,29)$. Následuje návrh tří variant, z nichž bude zvolena ta neoptimálnější.

Usiluje se o rovnoměrné přetvoření největšího a nejmenšího průřezu (hlavy a spodní části dříku). Před tvářecími operacemi potřebnými k získání požadovaného tvaru součásti předchází výpočet optimálního průměru předpěchovaného polotovaru ($\varnothing D_1$ dle obr. 41). Když je vypočten, volí se blízký průměr běžně prodávaného polotovaru ($\varnothing D_0$), ze kterého se optimální polovar získá. Šestihran s roztečí protilehlých stran 4 mm byl pro zjednodušení výpočtů převeden na válec označený jako $\varnothing d_6 = 4,5 \text{ mm}$.



Obr. 41 schéma postupu pro volbu polotovaru

Pro výpočet je nutno znát rovnice logaritmického přetvoření při přechování a při protlačování dle vztahu (3.1). Předpěchovaný průměr $\varnothing D_1$, bude vypočten na základě rovnoměrného přetvoření hlavy a dřívku dle rovnice (3.2)

$$\text{Logaritmické přetvoření při pěchování } \varphi = \frac{D_{\text{výstupní}}^2}{D_{\text{vstupní}}^2}, \text{ při protlačování } \varphi = \frac{D_{\text{vstupní}}^2}{D_{\text{výstupní}}^2} \quad (3.1)$$

Při dosazení do vztahu (3.2) lze vyjádřit předpěchovaný průměr $\varnothing D_1$.

$$\varphi_{\text{hlavy}} = \varphi_{\text{dřívku II}} \quad (3.2)$$

$$\ln \frac{D_4^2}{D_1^2} + \ln \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_6^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_3^2} + \ln \frac{D_3^2}{D_3^2 - d_5^2}$$

vyjádření D_1

$$D_4^2 \cdot (D_3^2 - d_5^2) = D_1^4 - D_1^2 \cdot d_6^2 \rightarrow \text{nyní substituce } D_1^2 = X$$

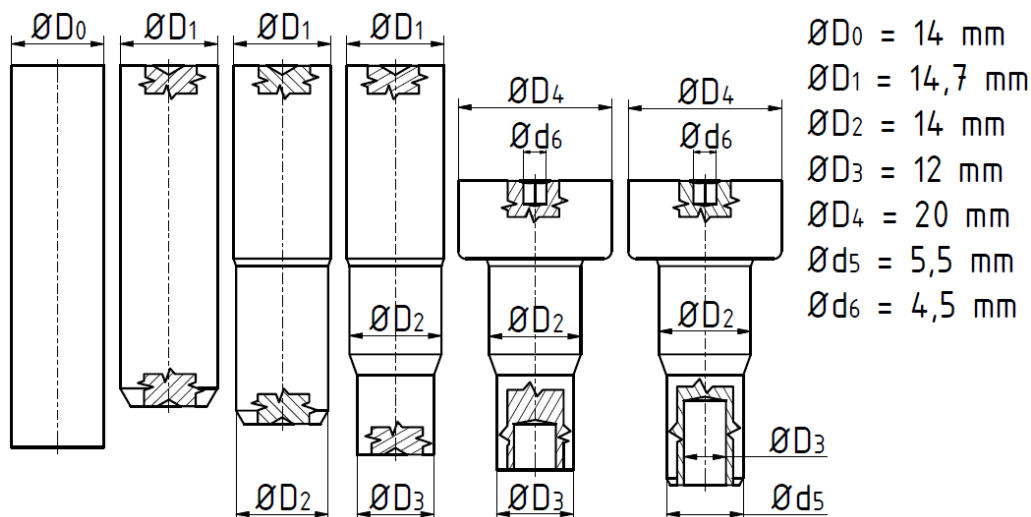
$$D_4^2 \cdot (D_3^2 - d_5^2) = X^2 - X \cdot d_6^2 \rightarrow \text{kvadr. rovnice} \rightarrow -X^2 + X \cdot d_6^2 + D_4^2 \cdot (D_3^2 - d_5^2) = 0$$

$$a = -1; b = d_6^2; c = D_4^2 \cdot (D_3^2 - d_5^2)$$

$$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c \rightarrow X_1; X_2 = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2 \cdot a} \rightarrow D_1^2 = X_1; X_2$$

Navrácením ze substituce vzniknou 4 kořeny. Z nich jediný odpovídá, $D_1 = 14,96 \text{ mm}$.

I. varianta: je zvolen $\varnothing D_1 = 14,7 \text{ mm}$ a výchozím polotovarem pro jeho napěchování bude tyč kruhového průřezu $\varnothing D_0 = 14 \text{ mm}$. Postup tváření dle obr. 42.



Obr. 42 schéma postupu tváření pro I. variantu

Technologický postup:

- z plné tyče je ustrižen polotovar $\varnothing D_0$
- 1. operace – zarovnání čel polotovaru předpěchováním $\varnothing D_0$ na $\varnothing D_1$
- 2. operace – dopředné protlačování z $\varnothing D_1$ na $\varnothing D_2$
- 3. operace – dopředné protlačování z $\varnothing D_2$ na $\varnothing D_3$
- 4. Operace – volné vtláčování dříčku do $\varnothing D_1$ na $\varnothing d_6$, zpětné protlačování otvoru dřívku $\varnothing d_5$ a pěchování hlavy z $\varnothing D_1$ na $\varnothing D_4$
- 5. operace – zpětné protlačování otvoru dřívku $\varnothing d_5$ a kalibrace šestihranu

Výpočet jednotlivých logaritmických přetvoření:

1. operace – předpěchování: $\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{14,7^2}{14^2} = 0,0976$
2. operace – dopředné protlačování: $\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{14^2}{14,7^2} = -0,0976$
3. operace – dopředné protlačování: $\varphi_3 = \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \frac{12^2}{14^2} = -0,3083$
4. operace a) – vtlačení otvoru: $\varphi_{4a} = \ln \frac{D_2^2 - d_6^2}{D_2^2} = \ln \frac{14,7^2 - 4,5^2}{14,7^2} = -0,0984$
4. operace b) – zpět protlačení dřívku: $\varphi_{4b} = \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{12^2}{5,5^2} = -0,2358$
4. operace c) – pěchování hlavy: $\varphi_{4c} = \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{20^2}{12,7^2} = 0,6158$
5. operace – zpětné protlačování: $\varphi_5 = \ln \frac{D_3^2 - d_5^2}{D_3^2} = \ln \frac{10^2 - 5,5^2}{10^2} = -0,2358$

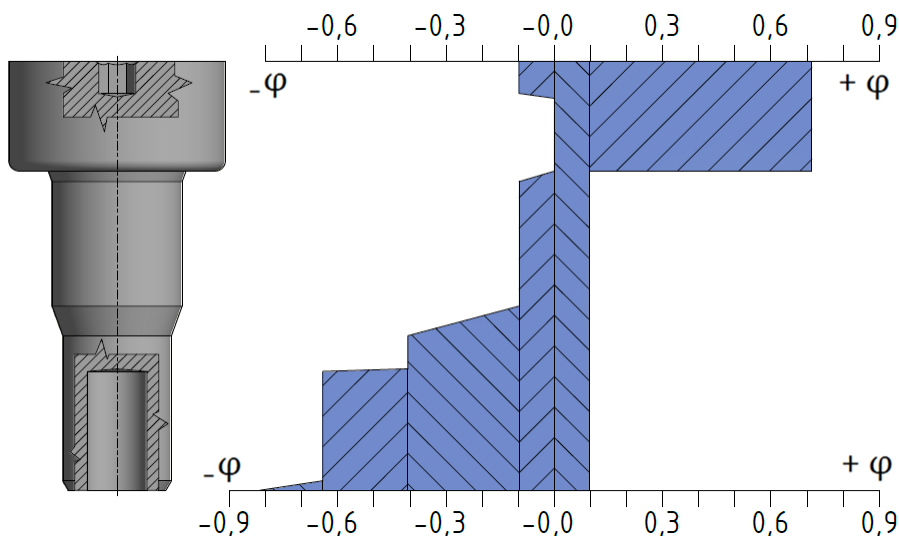
Výpočet celkového přetvoření součásti

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{hlava a}} &= |\varphi_1| + |\varphi_{4a}| + |\varphi_{4c}| = |0,0976| + |-0,0984| + |0,6158| = 0,8117 \\ \varphi_{\text{hlava b}} &= |\varphi_1| + |\varphi_{4c}| = |0,0976| + |0,6158| = 0,71335 \\ \varphi_{\text{dřík I}} &= |\varphi_1| + |\varphi_2| = |0,0976| + |-0,0976| = 0,2268 \\ \varphi_{\text{dřík IIa}} &= |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_3| = |0,0976| + |-0,0976| + |-0,3083| = 0,5035 \\ \varphi_{\text{dřík IIb}} &= |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_3| + |\varphi_5| = |0,0976| + |-0,0976| + |-0,3083| + |-0,2358| \\ \varphi_{\text{dřík IIb}} &= 0,7393 \end{aligned}$$

Ve 4. operaci vznikne na dřívku úkos 0,5 x 30° a tím lokální extrém přetvoření.

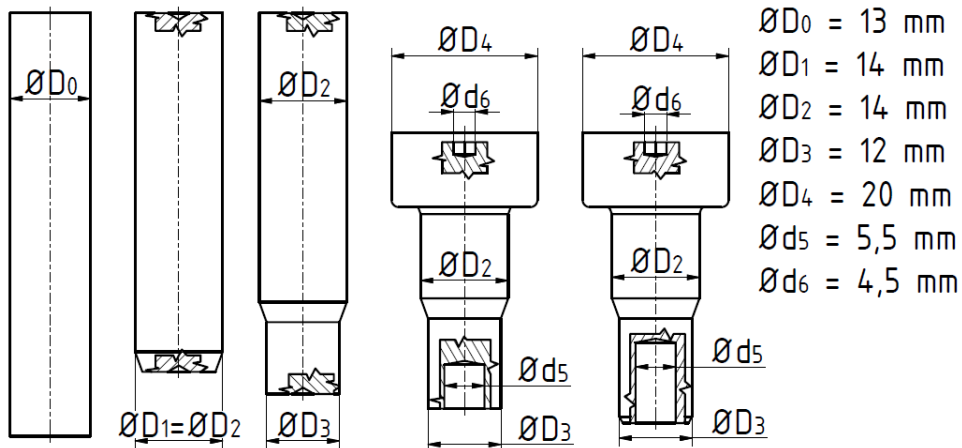
$$\varphi_{\text{dř-úkos}} = |\varphi_{\text{dřík IIb}}| + |\varphi_{\text{úkos}}| = |0,7393| + \left| \ln \frac{(12 - (2 \cdot 0,5))^2}{12^2} \right| = 0,9133$$

Grafické znázornění rozložení napětí pro I. variantu viz obr. 43.



Obr. 43 grafické znázornění rozložení napětí pro I. variantu

II. variant III. Je zvolen $\varnothing D_1 = \varnothing D_2 = 14,0$ mm a výchozím polotovarem pro jeho napěchování bude tyč kruhového průřezu $\varnothing D_0 = 13$ mm. Tímto odpadne jedna tvářecí operace, viz obr. 44.



Obr. 44 schéma postupu tváření pro II. variantu

Technologický postup:

- Z plné tyče je ustřižen polotovár $\varnothing D_0$
- 1. Operace – zarovnání polotovaru předpěchováním $\varnothing D_0$ na $\varnothing D_1 = \varnothing D_2$
- 2. Operace – dopředné protlačování z $\varnothing D_2$ na $\varnothing D_3$
- 3. Operace – volné vtlačování otvoru do $\varnothing D_2$ na $\varnothing d_6$, zpětné protlačování otvoru dříku $\varnothing d_5$ a pěchování hlavy z $\varnothing D_2$ na $\varnothing D_4$
- 4. Operace – zpětné protlačování otvoru dříku $\varnothing d_5$ a kalibrace šestihranu

Výpočet jednotlivých logaritmických přetvoření:

$$\begin{aligned}
 1. \text{ operace – předpěchování: } \quad \varphi_1 &= \ln \frac{D_2^2}{D_0^2} = \ln \frac{14^2}{13^2} = 0,1482 \\
 2. \text{ operace – dopředné protlačování: } \quad \varphi_2 &= \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \frac{12^2}{14^2} = -0,3083 \\
 3. \text{ operace a) – volně vtláč. otvoru: } \quad \varphi_{3a} &= \ln \frac{D_2^2 - d_6^2}{D_2^2} = \ln \frac{14^2 - 4,5^2}{14^2} = -0,1091 \\
 3. \text{ operace b) – zpět protlačení dříku: } \quad \varphi_{3b} &= \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{12^2}{5,5^2} = -0,2358 \\
 3. \text{ operace c) – pěchování hlavy: } \quad \varphi_{3c} &= \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{20^2}{14^2} = 0,7134 \\
 4. \text{ operace – zpětné protlačení dříku: } \quad \varphi_4 &= \ln \frac{D_3^2 - d_5^2}{D_3^2} = \ln \frac{12^2 - 5,5^2}{12^2} = -0,2358
 \end{aligned}$$

Výpočet celkového přetvoření součásti

$$\varphi_{\text{hlava a}} = |\varphi_1| + |\varphi_{3a}| + |\varphi_{3c}| = |0,1482| + |-0,1091| + |-0,7134| = 0,9706$$

$$\varphi_{\text{hlava b}} = |\varphi_1| + |\varphi_{3a}| + |\varphi_{3c}| = |0,1740| + |1,0217| = 0,8616$$

$$\varphi_{\text{dřík I}} = |\varphi_1| = 0,1482$$

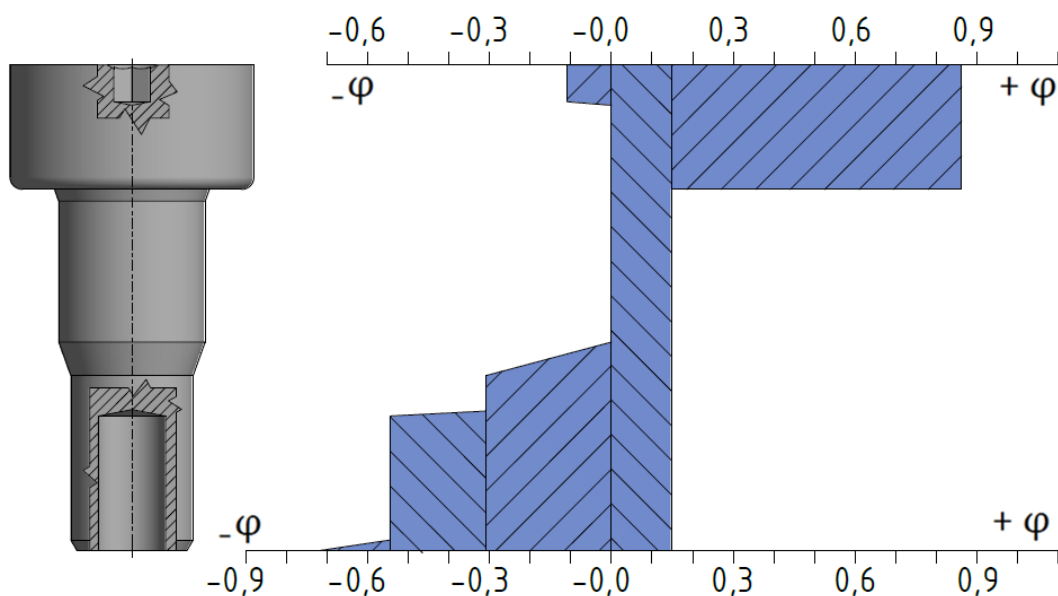
$$\varphi_{\text{dřík IIa}} = |\varphi_1| + |\varphi_2| = |0,1482| + |-0,3083| = 0,4565$$

$$\varphi_{\text{dřík IIb}} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_4| = |0,1482| + |-0,3083| + |-0,2358| = 0,6923$$

Ve 4. operaci vznikne na dříku úkos 0,5 x 30° a tím lokální extrém přetvoření

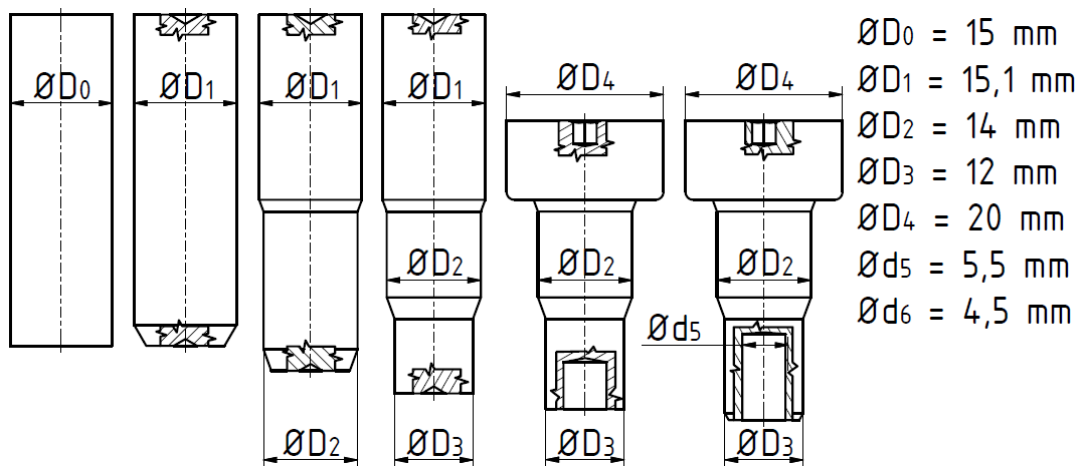
$$\varphi_{\text{dř-úkos}} = |\varphi_{\text{dřík IIb}}| + |\varphi_{\text{úkos}}| = |0,6923| + \left| \ln \frac{(12 - (2 \cdot 0,5))^2}{12^2} \right| = 0,8664$$

Grafické znázornění rozložení napětí pro I. variantu viz obr. 45.



Obr. 45 grafické znázornění rozložení napětí pro II. variantu

III. varianta: Je zvolen $\varnothing D_1 = 15,1$ mm a výchozím polotovarem pro jeho napěchování bude tyč kruhového průřezu $\varnothing D_0 = 15$ mm. Postup tváření dle obr. 46.



Obr. 46 schéma postupu tváření pro III. variantu

Technologický postup:

- Z plné tyče je ustřižen polotovár $\varnothing D_0$
- 1. Operace – zarovnání polotovaru předpěchováním $\varnothing D_0$ na $\varnothing D_1$
- 2. Operace – dopředné protlačování z $\varnothing D_1$ na $\varnothing D_2$
- 3. Operace – dopředné protlačování z $\varnothing D_2$ na $\varnothing D_3$
- 4. Operace – volné vtlačování otvoru do $\varnothing D_1$ na $\varnothing d_6$, zpětné protlačování otvoru dříku $\varnothing d_5$ a pěchování hlavy z $\varnothing D_1$ na $\varnothing D_4$
- 5. Operace – zpětné protlačování otvoru dříku $\varnothing d_5$ a kalibrace šestihranu

Výpočet jednotlivých a celkových logaritmických přetvoření:

1. operace – předpěchování: $\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{15,1^2}{15^2} = 0,0133$
2. operace – dopředné protlačování: $\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{14^2}{15,1^2} = -0,1513$
3. operace – dopředné protlačování: $\varphi_3 = \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \frac{12^2}{14^2} = -0,3083$
4. operace a) – vtlačování otvoru: $\varphi_{4a} = \ln \frac{D_1^2 - d_6^2}{D_1^2} = \ln \frac{15,1^2 - 4,5^2}{15,1^2} = -0,093$
4. operace b) – zpět protlačení dřívku: $\varphi_{4b} = \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{12^2}{5,5^2} = -0,2358$
4. operace c) – pěchování hlavy: $\varphi_{4c} = \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{20^2}{15,1^2} = 0,5621$
5. operace – zpětné protlačování: $\varphi_5 = \ln \frac{D_3^2 - d_5^2}{D_3^2} = \ln \frac{12^2 - 5,5^2}{12^2} = -0,2358$

$$\varphi_{\text{hlava a}} = |\varphi_1| + |\varphi_{4a}| + |\varphi_{4c}| = |0,0133| + |-0,0930| + |0,5621| = 6684$$

$$\varphi_{\text{hlava b}} = |\varphi_1| + |\varphi_{4c}| = |0,0133| + |-0,5621| = 0,8615$$

$$\varphi_{\text{dřík I}} = |\varphi_1| + |\varphi_2| = |0,0133| + |-0,1513| = 0,1907$$

$$\varphi_{\text{dřík IIa}} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_3| = |0,0133| + |-0,1513| + |-0,3083| = 0,4729$$

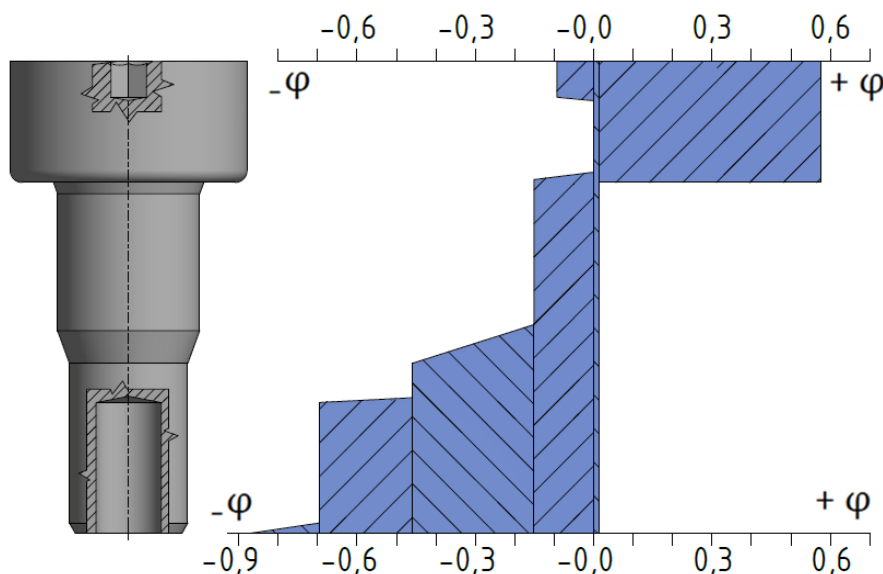
$$\varphi_{\text{dřík IIb}} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_3| + |\varphi_5| = |0,0133| + |-0,1513| + |-0,3083| + |-0,2358| = 0,7087$$

$$\varphi_{\text{dřík IIb}} = 0,7087$$

Ve 4. operaci vznikne na dřívku úkos 0,5 x 30° a tím lokální extrém přetvoření

$$\varphi_{\text{dř-úkos}} = |\varphi_{\text{dřík IIb}}| + |\varphi_{\text{úkos}}| = |0,7087| + \left| \ln \frac{(12 - (2 \cdot 0,5))^2}{12^2} \right| = 0,6469$$

Grafické znázornění rozložení napětí pro III. variantu viz obr. 47.



Obr. 47 grafické znázornění rozložení napětí pro III. variantu

Vhodný technologický postup musí zajistit, že vyráběná součást dosáhne požadovaných rozměrů, tolerancí, jakostí povrchu a mechanických vlastností nutných pro zajištění její funkčnosti. Často je kladen požadavek na co nejrovnoměrnější zpevnění v celém průřezu součásti, nebo na co nejmenší počet operací potřebný k dosažení požadovaného tvaru. Zároveň nesmí být překročeno maximální dovolené přetvoření součásti.

Všechny uvedené varianty povedou k získání požadovaných rozměrů, tolerancí i požadované jakosti povrchu. Přetvoření všech uvedených variant se budou pohybovat v dovoleném rozsahu $\varphi \in (0 \div 1,29)$. Při volbě I. varianty budou největší přetvoření $\varphi_{\text{hlava a}} = 0,8117$ a $\varphi_{\text{dříku IIb}} = 0,7393$, takové přetvoření čepu je poměrně rovnoměrné. Nejrovnoměrnější přetvoření bude dosaženo volbou III. varianty ($\varphi_{\text{hlava a}} = 0,6684$; $\varphi_{\text{dříku IIb}} = 0,7087$). Tato varianta by se mohla zdát jako nejvhodnější pro výrobu čepu. U varianty II. bude přetvoření nerovnoměrné, ($\varphi_{\text{hlava a}} = 0,97062$; $\varphi_{\text{dříku IIb}} = 0,69233$). To je však stále dovolené a součást je vyrobitelná.

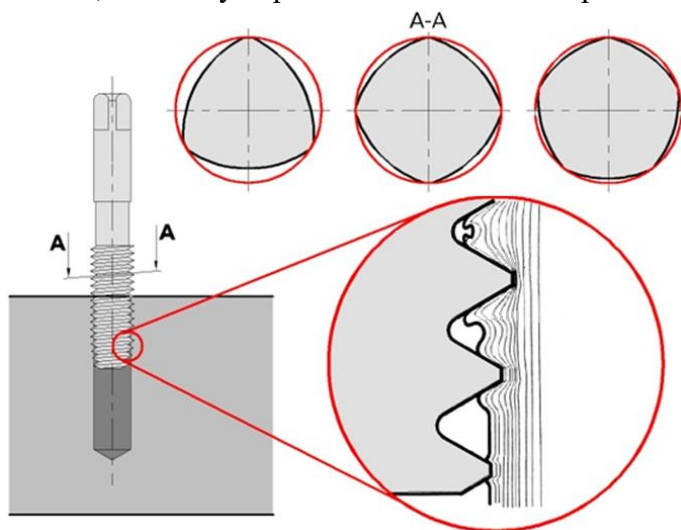
Jelikož dřík čepu obsahuje vnitřní závit, který bude vytvořen v dalším výrobním postupu tvářením, bude tato varianta vhodná. Přetvoření dříku je z uvedených variant nejmenší, a tak by ani v další operaci nemělo dojít k vyčerpání plasticity. V opačném případě by bylo nutno do výrobního postupu zařadit mezioperační žihání pro obnovení plasticity. Dalším faktorem je, že u varianty II. je k vyrobení zapotřebí o jednu tvářecí operaci méně. To bude mít pozitivní ekonomický efekt, a proto je tato varianta volena jako výchozí pro výrobu součásti.

3.2 Zhodnocení výroby závitu [36]

V malosériové výrobě je nejčastějším způsobem zhotovování řezání závitu, při sériové výrobě se však zvažují i jiné způsoby. Jak již bylo řečeno, v otvoru dříku čepu bude zhotoven vnitřní závit M6 a to metodou tváření závitů.

Tato metoda je vhodná pro uzavřené otvory. Protože se zde netvoří třísky, není je nutno odvádět, čímž odpadá riziko ucpání nástroje a jeho následné poškození. Závit vytvořený tvářením dosahuje lepší jakosti a pevnosti, to díky zpevňování tvářeného povrchu a neporušenému průběhu vláken. Řezná rychlost bývá až o 100 % vyšší, což zvyšuje produktivitu.

Tvářecí závitník se od řezného podstatně liší. Je složen z náběžné a kalibrační části. Při výrobě závitu se nejprve do materiálu vtlačují zoubky náběžové části, vzniká zde teplo, materiál měkne a postupně zatéká mezi zoubky tvářecího závitníku. To je vidět na obr. 48 spolu s nejčastějšími tvary průřezu závitníku. Jak je vidět nejsou zde žádné podélné drážky (ty u řezných závitníků tvoří čela břitů a odvádí třísku). Průřez závitníku

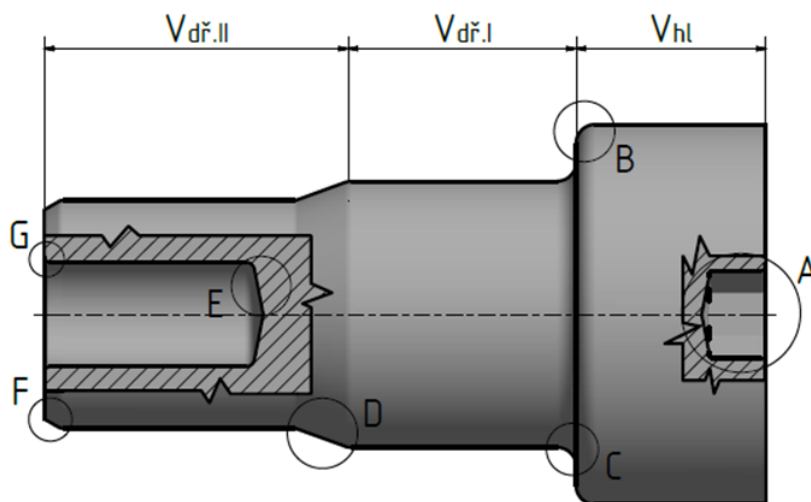


Obr. 48 tvářecí závitník [36]

je mnohoúhelník se třemi, čtyřmi, či pěti oblými vrcholy, to umožní přívod řezného oleje pro zajištění mazání. Závitníky jsou vyrobeny z rychlořezných ocelí, které jsou povlakovány TiN, či TiCN. Povlaky snižují tření a zvyšují trvanlivost nástroje.

3.3 Výpočet rozměrů polotovaru v jednotlivých operacích

Rozměry budou počítány pro II. výrobní variantu. Pro tu byla jako polotovar zvolena tyč kruhového průřezu o průměru $\text{Ø}D_0 = 11 \text{ mm}$. Z té se stříháním získají špalíky o objemu odpovídajícímu objemu hotové součásti. U té byl vypočten programem Inventor Professional 2017 na $V = 5498,979 \text{ mm}^3$. Objemy jednotlivých částí čepu, jež jsou třeba znát pro další postup, jsou zakresleny v detailech na obr. 49 a 50. Pro daný případ byly zjištěny zmíněným programem Inventor. Příklad ručního výpočtu pro konkrétní součást, viz příloha 2. Objem značený písmenem H není na hotové součásti vyhotoven, jedná se o objem dutiny středícího důlku který se dále tváří.



Obr. 49 detaily objemů součásti

A) objem šestihřanné dutiny V_A :

$$V_A = 43,440 \text{ mm}^3$$

B) objem scházející do válce V_B :

$$V_B = 13,183 \text{ mm}^3$$

C) objem úkosu V_C

$$V_C = 9,740 \text{ mm}^3$$

D) objem odebraný úkosem V_{D1} :

$$V_{D1} = 57,604 \text{ mm}^3$$

objem úkosu V_{D2} :

$$V_{D2} = 54,664 \text{ mm}^3$$

E) objem úkosu V_E :

$$V_E = 13,462 \text{ mm}^3$$

F) objem odebraný na úkosu V_F :

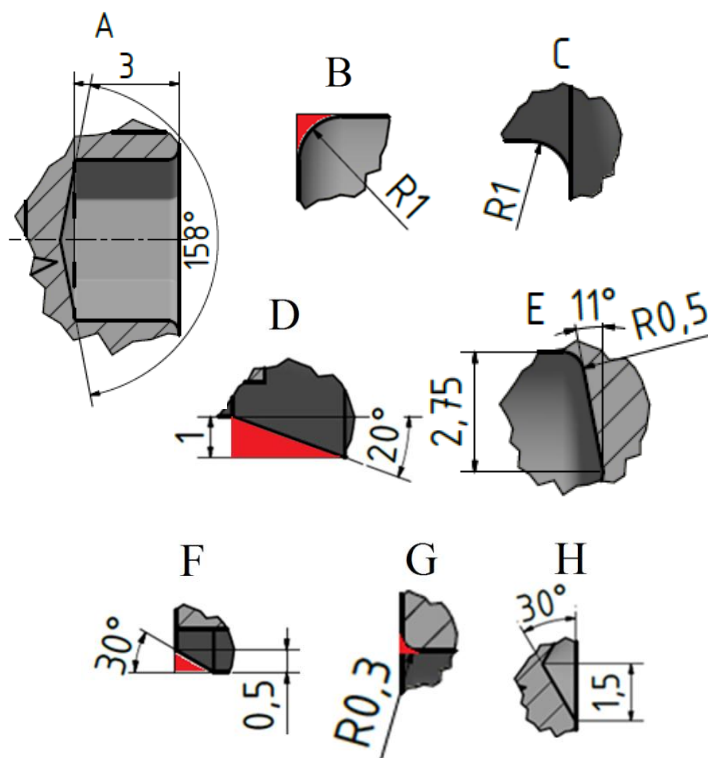
$$V_F = 7,935 \text{ mm}^3$$

G) objem scházející u rádiu dutiny:

$$V_G = 0,342 \text{ mm}^3$$

H) objem středících důlků:

$$V_H = 2,041 \text{ mm}^3$$



Obr. 50 detaily počítaných objemů dutin a úkosů

Čep je složen ze tří hlavních částí, kterými jsou hlava, první, a druhý dřík. Pro výpočet rozměrů polotovaru v jednotlivých operacích bude vhodné vypočítat jejich objemy (V_{hl} ; $V_{dř.I}$; $V_{dř.II}$).

$$\text{Objem hlavy čepu } V_{hl} = 3084,970 \text{ mm}^3$$

$$\text{Objem dříku II } V_{dř.II} = 1592,325 \text{ mm}^3$$

$$\text{Objem dříku I } V_{dř.I} = 1856,956 \text{ mm}^3$$

Nyní je možno vypočítat rozměry polotovaru v jednotlivých operacích. Ty je nutno znát při výrobě součásti. Pro názornost budou vypočteny manuálně v návaznosti na předchozí výpočty objemů. Protože objemy dutin a úkosů byly spočítány softwarově, nebylo třeba zanedbávat rádiusy a dělat jiná zjednodušení, tím výsledek nabude na přesnosti. Výpočty výšek ve 3. a 4. operaci (jedná se o rozměry ze zadání, které jsou nyní počítány z objemů) slouží pro ověření správnosti výsledků. Na obr. 51 je ústřížek a jeho zpracování v 1. Operaci.

Ustřížení špalíku

Výška ústřížku h_0

$$V = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 \rightarrow h_0 = \frac{4V}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 6534,251}{\pi \cdot 13^2} = 49,23 \text{ mm}$$

1. operace

výška při spěchování na h_1

při pěchování vzniknou na polotovaru středící důlky a kužel, objemy těchto "dutin" budou přičteny k objemu součásti V a výška h_2 bude počítána jako výška válce.

Výška h_1

$$h_1 = \frac{4 \cdot V_{C1}}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4(V + 2 \cdot V_H + V_{D1})}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4(6534,251 + 2 \cdot 2,041 + 57,604)}{\pi \cdot 13,9^2} = 43,47 \text{ mm}$$

2. operace

protlačování dříku II o objemu materiálu V_{2II} viz obr. 52.

$$V_{2I} = V_{hl} + V_{dř.I} = 3084,970 + 1856,956 = 4941,926 \text{ mm}^3$$

$$V_{2II} = V_{dř.II} = 1592,325 \text{ mm}^3$$

Výška h_{2I}

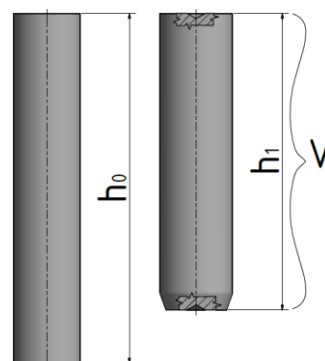
$$h_{2I} = \frac{4 \cdot (V_{2I} + V_H)}{\pi \cdot D_1^2}$$

$$h_{2I} = \frac{4 \cdot (4941,926 + 2,041)}{\pi \cdot 13,92^2} = 32,49 \text{ mm}$$

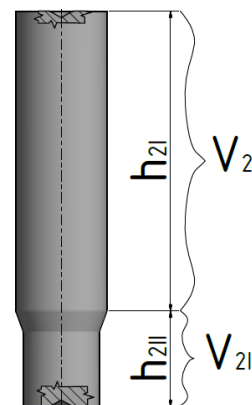
$$D_1 = D_2$$

Výška h_{2II}

$$h_{2II} = \frac{4 \cdot (V_{2II} + V_H - V_{D2})}{\pi \cdot D_3^2} = \frac{4 \cdot (1592,325 + 2,041 - 54,644)}{\pi \cdot 12^2} = 13,61 \text{ mm}$$



Obr. 51 polotovar při ustřížení a v 1. operaci



Obr. 52 polotovar ve 2. operaci

3. operace (viz obr. 53)

Výška hlavy čepu h_{hl}

$$h_{hl} = \frac{4 \cdot (V_{hl} + V_A + V_B)}{\pi \cdot D_4^2}$$

$$h_{hl} = \frac{4 \cdot (3084,970 + 43,440 + 13,183)}{\pi \cdot 19,9^2} = 10,10 \text{ mm}$$

Výška 1. dříku čepu $h_{dř.I}$

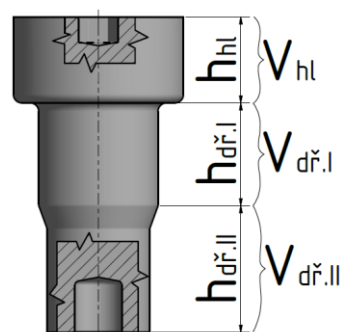
$$h_{dř.I} = \frac{4 \cdot (V_{dř.I} - V_C)}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot (1856,956 - 9,740)}{\pi \cdot 13,96^2} = 12,07 \text{ mm}$$

Výška 2. dříku čepu $h_{dř.II}$

$$h_{dř.II} = \frac{4 \cdot (V_{dř.I} + V_{otv} - V_{D2} + V_E + V_G)}{\pi \cdot D_3^2} \quad [\text{mm}]$$

kde: V_{otv} je objem válcového otvoru [mm].

$$h_{dř.II} = \frac{4(1592,325 + \frac{\pi 5,5^2}{4} \cdot 5,543 - 54,664 + 13,462 + 0,342)}{\pi \cdot 12^2} = 14,88 \text{ mm}$$



Obr. 53 polotovar ve 3. operaci

4. operace – kalibrace (viz obr. 54)

Výška hlavy čepu h_{hl}

$$h_{hl} = \frac{4 \cdot (V_{hl} + V_A + V_B)}{\pi \cdot D_4^2}$$

$$h_{hl} = \frac{4 \cdot (3084,970 + 43,440 + 13,183)}{\pi \cdot 20^2} = 10,00 \text{ mm}$$

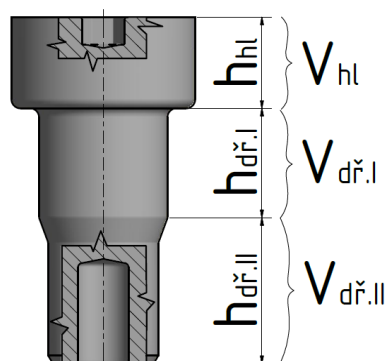
Výška 1. dříku čepu $h_{dř.I}$

$$h_{dř.I} = \frac{4 \cdot (V_{dř.I} - V_C)}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot (1856,956 - 9,740)}{\pi \cdot 14^2} = 12,00 \text{ mm}$$

Výška 2. dříku čepu $h_{dř.II}$

$$h_{dř.II} = \frac{4(V_{dř.II} + V_{otv} - V_{D2} + V_E + V_F + V_G)}{\pi \cdot D_3^2}$$

$$h_{dř.II} = \frac{4(1592,325 + \frac{\pi 5,5^2}{4} \cdot 10,53 - 54,664 + 13,462 + 7,935 + 0,342)}{\pi \cdot 12^2} = 16,00 \text{ mm}$$



Obr. 54 polotovar ve 4. operaci

3.4 Výpočet sil a napětí u zvolené varianty

Jak bylo již dříve zmíněno, pro výpočet tvářecí síly je nejprve nutno znát přirozený a deformační přetvárný odpor. Přirozený přetvárný odpor bude vypočten dle vztahu Johnson-Cook (2.16), tato rovnice je vztažena k parametrům konkrétního materiálu. Pro zvolený materiál 11 320 5R platí hodnoty dle tab. 9.

Tab. 9 Parametry pro Johnson-Cookovu konstitutivní rovnici [11]

σ_0 [MPa]	B [-]	C [-]	n [-]	m [-]	T_0 [K]	T [K]	T_{TAV} [K]
450	350	0,055	0,18	0,7	293	296	1793

Rovnice Johnson-Cook zahrnuje přetvárnou rychlost a teplotu. Teplota bude uvažována konstantní pro všechny operace a pro zjednodušení je vliv teploty T'' vypočítán předem jako vztah (3.3). Ten se dosadí do Johnson-Cookovy konstitutivní rovnice (2.16).

$$T'' = \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{TAV} - T_0} \right)^m \right] = \left[1 - \left(\frac{296 - 293}{1793 - 293} \right)^{0,7} \right] = 0,9871 \quad (3.3)$$

Dále je nutno znát rychlosti přetvoření v jednotlivých operacích. Přetvárná rychlost se zjistí na základě rychlosti beranu v_0 , pro její výpočet platí vztah (3.4).

$$v_0 = \frac{s}{t \cdot 10^3} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.4)$$

$$v_0 = \frac{2 \cdot n_{zd} \cdot h_{zdv}}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 110 \cdot 125}{60 \cdot 10^3} = 0,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde: s je dráha konaná beranem lisu [mm],
 t je čas [s],
 n_{zd} je počet zdvihů za minutu [-],
 h_{zdv} je výška zdvihu [mm].

Parametry odpovídají volenému stroji, viz kapitola 3.5.

- Pro výpočet střížné síly ne nutno znát deformační odpor stříhu dle vztahu (3.5) a samotná síla se pak zjistí dle vztahu (3.6).

Střížná síla při dělení tyče F_s .

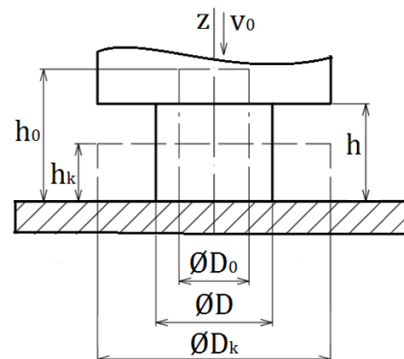
$$\tau_s = 0,85 \cdot R_m = 0,85 \cdot 614 = 521,9 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

$$F_s = (1,15 \div 1,3) \cdot S_0 \cdot \tau_s = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \tau_s = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot 13^2}{4} \cdot 521,9 = 90\,055 \text{ N} \quad (3.6)$$

- 1. operace předpěchování z průměru $\varnothing D_0$ na $\varnothing D_1 = \varnothing D_2$

Rychlost přetvoření při pěchování dle následujícího vztahu (3.7), kde h_1 odpovídá konečné pěchované výšce h_k , viz schéma pěchování na obr. 55.

$$\dot{\varphi}_{z1} = \frac{v_0}{h_1} = \frac{0,458}{0,04347} = 10,54 \text{ s}^{-1} \quad (3.7)$$



Obr. 55 schéma pěchování [13]

Přirozený přetvárný odpor bude vypočten podle vztahu (2.16). Pro zvolený materiál 11 320 5R platí hodnoty dle tab. 9.

$$\sigma_{P1} = (\sigma_0 + B \cdot \varphi_1^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{z1}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot T''' \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{P1} = (450 + 350 \cdot 0,1482^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{10,54}{1}\right) \cdot 0,9871 = 778,507 \text{ MPa}$$

Deformační přetvárný odpor je vypočten dle Siebela (2.14). Při dobrém mazání je součinitel tření uvažován jako $f = 0,05$.

$$\sigma_d = -\sigma_{z,\text{stř}} = \sigma_{P1} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_1}{h_1}\right] = 778,507 \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 14}{43,47}\right] = 782,687 \text{ MPa}$$

Působící síla se vypočte dle vztahu (2.15).

$$F_{\text{pěch}} = \sigma_d \cdot S = 782,687 \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 120\,485 \text{ N}$$

Přetvárná práce A se vypočte ze závislosti síly na dráze dle vztahu (2.17).

$$A = F_{\text{pěch}} \cdot (h_0 - h_1) \quad [\text{J}]$$

$$A = 120\,485 \cdot (0,04923 - 0,04347) = 694 \text{ J}$$

- 2. operace dopředného protlačování $\text{Ø}D_1 = \text{Ø}D_2$ na $\text{Ø}D_3$

Rychlost přetvoření při dopředném protlačování dle vztahu (3.8), schéma viz obr. 56.

$$\dot{\varphi}_{z2} = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{R_1^2}{R_3^3} \cdot \text{tg}\alpha \quad [\text{s}^{-1}] \quad (3.8)$$

$$\dot{\varphi}_{z2} = 2 \cdot 0,458 \cdot \frac{7^2}{6^3} \cdot \text{tg}20^\circ = 75,69 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor

$$\sigma_{P2} = (\sigma_0 + B \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{z2}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot T''' \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{P2} = (450 + 350 \cdot (0,1482 + 0,3083)^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{75,69}{1}\right) \cdot 0,9871$$

$$\sigma_{P2} = 921,291 \text{ MPa}$$

Deformační přetvárný odpor dle Feldmana (2.18). Pro tento výpočet je třeba znát hodnotu středního přirozeného přetvárného odporu σ_{ps} , vyjádřeného dle vztahu (3.9). Součinitele tření $f_1 = f_2 = f_3 = 0,05$.

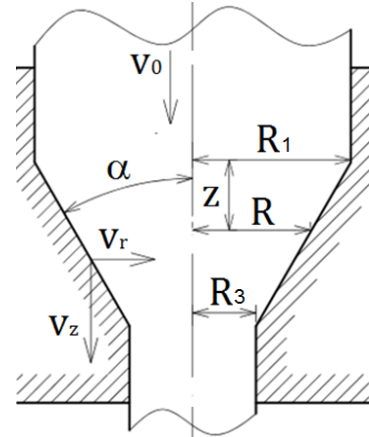
$$\sigma_{PS1} = \frac{\sigma_{P1} + \sigma_{P2}}{2} = \frac{778,507 + 921,291}{2} = 849,899 \text{ MPa} \quad (3.9)$$

Úhel sklonu kuželové průtláčnice je dosazen jako $\bar{\alpha}$ dle vztahu (3.10) v radiánech.

$$\bar{\alpha} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} = \frac{\pi \cdot 20}{180} = 0,3491 \text{ rad} \quad (3.10)$$

$$\sigma_d = \sigma_{PS1} \left[\left(1 + \frac{f_2}{\bar{\alpha}}\right) \ln \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^2 + \frac{2}{3} \bar{\alpha} \right] + 4f_3 \cdot \frac{L_3}{D_3} \cdot \sigma_{PS1} + 4f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \sigma_{P1}$$

Neprotlačená délka $L_1 = h_{21} = 39,8 \text{ mm}$ a výška kalibračního oka $L_3 = 2 \text{ mm}$.



Obr. 56 schéma dopředného protlačování [13]

$$\sigma_d = 849,899 \left[\left(1 + \frac{0,05}{0,3491} \right) \ln \left(\frac{14}{12} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,3491 \right] + 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{32,49}{10} \cdot 849,899 + 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{2}{14} \cdot 778,507 = 979,772 \text{ MPa}$$

Síla se vypočte dle vztahu (2.15).

$$F_{\text{protl}} = \sigma_d \cdot S = 979,772 \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 150\,824 \text{ N}$$

Přetvárná práce A se vypočte ze závislosti síly na dráze dle vztahu (2.17).

$$A = F_{\text{protl}} \cdot \left[h_1 - \left(h_{2I} + \frac{1}{\text{tg}20^\circ} \right) \right] = \left[43,47 - \left(32,49 + \frac{1}{\text{tg}20^\circ} \right) \right] = 1242 \text{ J}$$

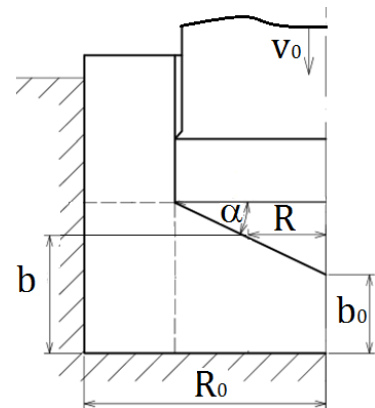
• 3. operace a) volné vtláčování šestihranu $\text{Ø}d_6$

Dříve než dojde k napěchování hlavy, proběhne volné vtláčení šestihranu. Pro zjednodušení výpočtu bude namísto šestihranu uvažován válec $\text{Ø}d_6$.

Vztah pro výpočet rychlosti přetvoření (3.11) platí pro zpětné protlačování, viz obr. 57. Řeší rychlost deformace v ose „z“ (pod průtláčníkem), lze jej tedy aplikovat i na volné vtláčování.

$$\dot{\varphi}_{z3a} = \frac{v_0}{R \cdot \text{tg}\alpha + b_0} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (3.11)$$

kde: b_0 je výška dna [mm],
 α je úhel sklonu průtláčníku [°],
 R je poloměr protlačovaného otvoru [mm].



Obr. 57 schéma zpětného protlačování [13]

Největší rychlosti přetvoření bude dosaženo v ose otvoru (při volbě poloměru $R = 0$), úhel sklonu průtláčníku $\alpha = 11^\circ$.

$$\dot{\varphi}_{z3a} = \frac{0,458}{0 \cdot \text{tg}11^\circ + (0,038 - 2 \cdot \text{tg}30^\circ \cdot 0,0015)} = 13,95 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor

$$\sigma_{P3a} = (\sigma_0 + B \cdot (\varphi_1 + \varphi_{3a})^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{z3a}}{\dot{\varphi}_0} \right) \cdot T'' \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{P3a} = (450 + 350 \cdot (0,1482 + 0,1091)^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{13,95}{1} \right) \cdot 0,9871$$

$$\sigma_{P3a} = 818,385 \text{ MPa}$$

Deformační přetvárný odpor pro volné vtláčování dle Unksova (3.12).

$$\sigma_d = \sigma_P \cdot \left(1 + 1,1 \cdot \ln \frac{D_0}{d} + \frac{1}{6} \cdot \frac{d}{b} \right) \quad (3.12)$$

Tento vztah však popisuje situaci, kdy se průtláčník přiblíží k průtláčnici asi na vzdálenost $1/6$ jeho průměru ($d/b = 6/1$), což je tzv. kritická hloubka dna a deformační odpor značně narůstá. Ovšem v našem případě bude hloubka dna několikanásobně větší než průměr průtláčníku a v plastickém stavu bude jen malá část kovu nacházející se v tzv. ohnisku deformace, viz obr. 52. Toto ohnisko deformace bylo zjišťováno experimentálně a uvádí se, že dosahuje asi do $1/6$ průměru průtláčníku. Tím se vztah (3.12) zjednodušuje a získá se tak vztah (3.13). Podrobněji viz příloha 3.

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \left(1 + 1,1 \cdot \ln \frac{D_0}{d} + 1\right) \quad (3.13)$$

$$\sigma_d = \sigma_{P3a} \cdot \left(1 + 1,1 \cdot \ln \frac{D_1}{d_6}\right) = 910,07 \cdot \left(2 + 1,1 \cdot \ln \frac{14}{3}\right) = 3023,516 \text{ MPa}$$

Síla dle vztahu (2.15).

$$F_{\text{protl}} = \sigma_d \cdot S = 3023,516 \cdot \frac{\pi \cdot 4,5^2}{4} = 48\,087 \text{ N}$$

Přetvárná práce dle vztahu (2.17):

$$A = F_{\text{protl}} \cdot h_{\text{dulku}} = 48\,087 \cdot 0,003 = 144 \text{ J}$$

kde: h_{dulku} je hloubka vtlačeného šestihranu [mm].

- 3. operace b) zpětného protlačování $\text{Ø}D_3$ na $\text{Ø}D_5$

Rychlost přetvoření při zpětném protlačování dle vztahu (3.11)

Největší rychlosti přetvoření bude dosaženo v ose otvoru (při volbě poloměru $R = 0$), úhel sklonu průtlačníku $\alpha = 11^\circ$.

$$\dot{\varphi}_{z4} = \frac{v_0}{R \cdot \text{tg}\alpha + b_0} = \frac{0,458}{0 \cdot \text{tg}11^\circ + (0,037 - 0,006 - 0,003)} = 16,37 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor vychází ze vztahu (2.16), avšak je třeba dosadit logaritmické deformace dle Dippera, viz kapitola 2.4.3. K tomu slouží vztahy (3.14), (3.15), (3.16).

$$\varphi_1' = \ln \frac{h_0}{b} = \ln \frac{h_{2I} + h_{2II}}{h_{hI} + h_{dř.I} + h_{dř.II} - h_{díry} - h_{šestihr.}} \quad (3.14)$$

kde: $h_{díry}$ je hloubka dutiny dřívku [mm].

$$\varphi_1' = \ln \frac{32,49 + 13,61}{10 + 12 + 16 - 6 - 3} = 0,4635$$

$$\varphi_3' = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s}\right) = 0,4635 \cdot \left(1 + \frac{5,5}{8 \cdot 2,25}\right) = 0,6052 \quad (3.15)$$

kde: s je šířka stěny [mm].

$$\varphi_2' = \varphi_3 - \varphi_1 = 0,6052 - 0,4635 = 0,1417 \quad (3.16)$$

Pro výpočet přirozeného přetvárného odporu bude použito φ_1' (přetvoření pod průtlačníkem).

$$\sigma_{P4} = (\sigma_0 + B \cdot (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_1')^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{z4}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot T'' \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{P4} = (450 + 350 \cdot (0,1482 + 0,3083 + 0,4635)^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{16,37}{1}\right) \cdot 0,9871$$

$$\sigma_{P4} = 905,149 \text{ MPa}$$

Deformační přetvárný odpor dle Dippera (2.20). Opět je třeba znát střední přirozený přetvárný odpor σ_{PS3} dle (3.9).

$$\sigma_{PS3} = \frac{\sigma_{p2} + \sigma_{p4}}{2} = \frac{921,291 + 905,149}{2} = 913,22 \text{ MPa}$$

$$f_{2stř} = 0,5 \cdot (f_1 + 0,5) = 0,5 \cdot (0,05 + 0,5) = 0,275$$

$$\sigma_d = \sigma_{P2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f_1 \cdot d}{b}\right) + \sigma_{PS3} \left(1 + \frac{2 \cdot f_{zstř} \cdot b}{D - d}\right)$$

$$\sigma_d = 921,291 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 5,5}{\frac{5,5}{6}}\right) + 913,22 \left(1 + \frac{2 \cdot 0,275 \cdot 5,5}{12 - 5,5} \cdot \frac{5,5}{6}\right) = 1997,473 \text{ MPa}$$

Síla dle vztahu (2.15).

$$F_{protl} = \sigma_d \cdot S = 1997,473 \cdot \frac{\pi \cdot 5,5^2}{4} = 47\,457 \text{ N}$$

Přetvárná práce dle vztahu (2.17).

$$A = F_{protl} \cdot h_{díry} = 47\,457 \cdot 0,006 = 285 \text{ J}$$

- 3. operace c) pēchování hlavy na $\text{Ø}D_2$

Rychlost pētvoření při pēchování dle vztahu (3.3)

$$\dot{\varphi}_{z3} = \frac{v_0}{h_{hl}} = \frac{0,458}{0,010} = 45,83 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený pētvárný odpor

$$\sigma_{P3} = (\sigma_0 + B \cdot (\varphi_1 + \varphi_{3a} + \varphi_{3c})^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{z3}}{\varphi_0}\right) \cdot T^m \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{P3} = (450 + 350 \cdot (0,1482 + 0,1091 + 0,7134)^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{45,83}{1}\right) \cdot 0,9871$$

$$\sigma_{P3} = 953,573 \text{ MPa}$$

Deformační pētvárný odpor dle Siebela (2.14). Součinitel tření je uvažován jako $f = 0,05$.

$$\sigma_d = -\sigma_{z,stř} = \sigma_{P3} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_4}{h_{hl}}\right] = 953,573 \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 20}{10}\right] = 985,359 \text{ MPa}$$

Síla dle vztahu (2.15).

$$F_{pēch} = \sigma_d \cdot S = 985,359 \cdot \frac{\pi \cdot 20^2}{4} = 309\,560 \text{ N}$$

Přetvárná práce dle vztahu (2.17).

$$A = F \cdot h = F_{protl} \cdot (h_{2I} - h_{dř.I} - h_{hl})$$

$$A = 309\,560 \cdot (0,03249 - 0,012 - 0,01) = 3\,247 \text{ J}$$

- 4. operace, zpětné protlačování $\text{Ø}D_3$ na $\text{Ø}d_5$

Rychlost pētvoření při zpětném protlačování dle vztahu (3.11)

Největší rychlosti pētvoření bude dosaženo v ose otvoru (při volbě poloměru $R = 0$), úhel sklonu průtlačníku $\alpha = 8^\circ$.

$$\dot{\varphi}_{z4} = \frac{v_0}{R \cdot \text{tg}\alpha + b_0} = \frac{0,458}{0 \cdot \text{tg}8^\circ + (0,038 - 0,011 - 0,003)} = 19,1 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený pētvárný odpor dle vztahu (2.16). Je však třeba dosadit logaritmické deformace dle Dippera, viz vztahy (3.14), (3.15), (3.16).

$$\varphi_1' = \ln \frac{h_0}{b} = \ln \frac{h_{hl} + h_{dř.I} + h_{2II}}{h_{hl} + h_{dř.I} + h_{dř.II} - h_{díry}} = \ln \frac{10 + 12 + 12,59}{10 + 12 + 16 - 11} = 0,4525 \quad (3.14)$$

$$\varphi_3' = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s}\right) = 0,4525 \cdot \left(1 + \frac{5,5}{8 \cdot 2,25}\right) = 0,5908 \quad (3.15)$$

$$\varphi_2' = \varphi_3 - \varphi_1 = 0,5908 - 0,4525 = 0,1383 \quad (3.16)$$

Výpočet přirozeného přetvárného odporu (pod průtláčníkem).

$$\sigma_{P4} = (\sigma_0 + B \cdot (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_1')^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{z4}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot T'' \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{P4} = (450 + 350 \cdot (0,1482 + 0,3083 + 0,4525)^{0,18}) \cdot \left(1 + 0,055 \cdot \ln \frac{19,1}{1}\right) \cdot 0,9871$$

$$\sigma_{P4} = 910,945 \text{ MPa}$$

Deformační přetvárný odpor podle Dippera (2.20). Je nutno znát střední přirozený přetvárný odpor σ_{PS3} dle (3.9).

$$\sigma_{PS3} = \frac{\sigma_{P2} + \sigma_{P4}}{2} = \frac{921,291 + 910,945}{2} = 916,118 \text{ MPa}$$

$$f_{2stř} = 0,5 \cdot (f_1 + 0,5) = 0,5 \cdot (0,05 + 0,5) = 0,275$$

$$\sigma_d = \sigma_{P2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f_1 \cdot d}{b}\right) + \sigma_{PS3} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2stř} \cdot b}{D - d}\right)$$

$$\sigma_d = 921,291 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 5,5}{\frac{5,5}{6}}\right) + 916,118 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,275 \cdot \frac{5,5}{6}}{12 - 5,5}\right) = 2000,596 \text{ MPa}$$

Síla dle vztahu (2.15).

$$F_{protl} = \sigma_d \cdot S = 2000,596 \cdot \frac{\pi \cdot 5,5^2}{4} = 47\,531 \text{ N}$$

Přetvárná práce dle vztahu (2.17).

$$A = F_{protl} \cdot h_{díry} = 47\,531 \cdot 0,005 = 238 \text{ J}$$

Pro volbu stroje je nutno znát celkovou přetvárnou sílu ta se spočítá jako součet sil v jednotlivých operacích dle vztahu (3.17). Je také nutné znát celkovou tvářecí práci, ta se rovněž vypočte jako suma přetvárných prací z jednotlivých operací dle vztahu (3.18). Potřebný výkon stroje se pak vypočte dle vztahu (3.19).

Celková tvářecí síla

$$F = \sum_{i=1}^{n=4} F_i = F_1 + F_2 + F_{3a} + F_{3b} + F_{3c} + F_4 = \quad [\text{N}] \quad (3.17)$$

$$F = 120485 + 150824 + 48087 + 47457 + 309560 + 47531 = 723,944 \text{ kN}$$

Celková přetvárná práce

$$A = \sum_{i=1}^{n=4} A_i = A_1 + A_2 + A_{3a} + A_{3b} + A_{3c} + A_4 \quad [\text{J}] \quad (3.18)$$

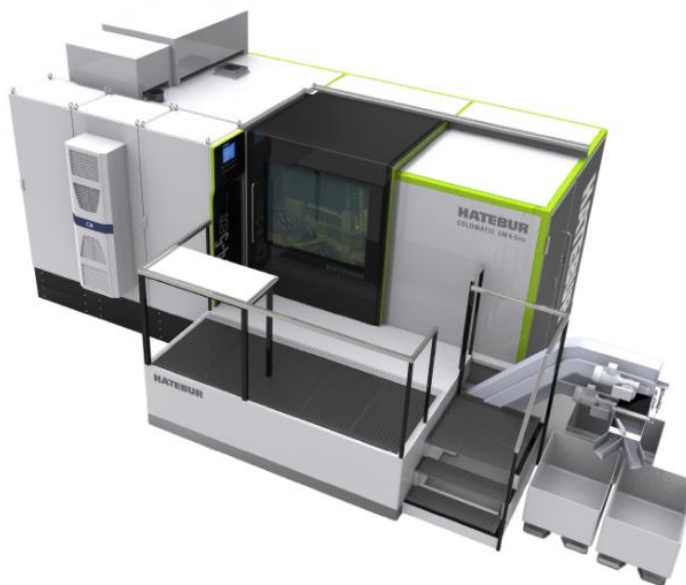
$$A = 694 + 1242 + 144 + 285 + 3247 + 238 = 5850 \text{ J}$$

Celkový potřebný výkon stroje

$$P = \frac{A}{t} = \frac{A \cdot n_{zd}}{t} = \frac{A \cdot 110}{t} = \frac{5850 \cdot 110}{t} = 10,725 \text{ kW} \quad (3.19)$$

3.5 Volba tvářecího stroje [17], [19]

Tvářecí stroj byl navrhován s ohledem na počet operací, které vedou k finálnímu výrobku, s ohledem na jeho tvářecí sílu a výkon. Byl zvolen postupový automat CM 4-5 ECO od výrobce HATEBUR. Tento stroj má jmenovitou tvářecí sílu 1700 kN, jeho výkon je 55 kW a je schopen vykonávat 5 tvářecích operací, což pro výrobu zadané součásti dostačuje. Zvolený tvářecí stroj je vyobrazen na obr. 58, parametry stroje jsou v tab. 10 (ostatní parametry viz příloha 4).



Obr. 58 stroj CM 4 – 5 ECO HATEBUR [17]

Tab. 10 Parametry CM 4-5 ECO

Vstupní materiál:		
Maximální průměr	[mm]	20
maximální pevnost v tahu	[MPa]	600
délka ústřížku	[mm]	8 – 125
Parametry stroje:		
Jmenovitá síla stroje	[kN]	1 700
Výkon stroje	[kW]	55
Počet zdvihů / min	[min ⁻¹]	110 – 160
Výška zdvihu	[mm]	125
Rozměry stroje:		
Délka	[mm]	5 700
Šířka	[mm]	3 350
Výška	[mm]	2 480
Váha	[t]	33
Maximální hlučnost	[dB(A)]	85

3.6 Návrh nástroje pro 4. operaci [8], [13], [15]

Dle zadání byly pro jednu zvolenou operaci dodány výkresy nástrojů, a to pro operaci finální. Celý nástroj se skládá z průtlačníku průtlačnice a vyhadzovače (zpětného průtlačníku). Nástroje kopírují tvar hotového čepu.

- Návrh průtlačnice

Průtlačnice obvykle bývá značně namáhána, je tedy třeba spočítat radiální napětí, které na ni působí, viz vztah (3.17).

$$\sigma_r = \sigma_p \cdot \left[\frac{4 \cdot f_{2stř} \cdot b}{D - d} + 1 \right] \quad [\text{MPa}] \quad (3.17)$$

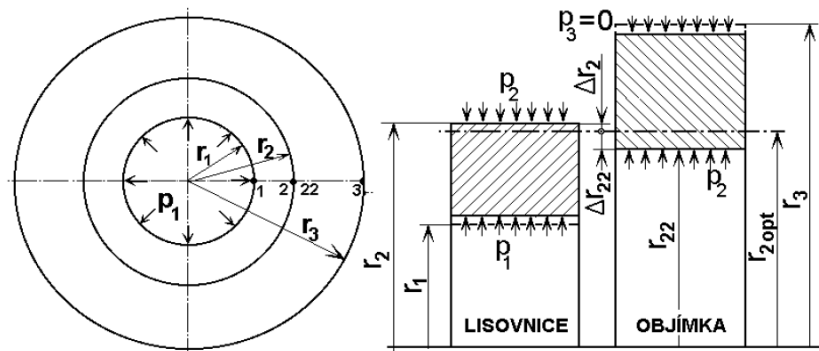
$$\sigma_r = \sigma_{p2} \cdot \left[\frac{4 \cdot f_{2stř} \cdot b}{D_3 - d_5} + 1 \right] = 921,291 \cdot \left[\frac{4 \cdot 0,5 \cdot \frac{5,5}{6}}{12 - 5,5} + 1 \right] = 1181,14 \text{ MPa}$$

Podle velikosti radiálního napětí je možné volit průtlačnice bez objímky, s jednou nebo i více objímkami. Obecně při radiálním namáhání do 1000 MPa je nástroj bez objímky, od 1000 do 1600 MPa se volí jedna objímka a od 1600 do 2000 MPa objímky 2. Výkresy nástroje viz výkresová dokumentace, schéma sestavy je v příloze 5.

Jelikož radiální napětí působící na průtlačnici vyšlo 1181,14 MPa bude průtlačnice zapouzdřena do jedné objímky. Pro návrh rozměrů lisovnice byl použit program OPTIM97. Příklad modelu geometrie pro lisovnici s jednou objímkou ukazuje obr. 59.

Jako vstupní hodnoty programu OPTIM97 je třeba zadat vlastnosti zvolených materiálů a rozměry průtlačnice.

Materiálem průtlačnice byl zvolen slinutý karbid SK 64 a pro objímku byla zvolena nástrojová ocel 19 733. Rozměry průtlačnice odpovídají rozměrům vyráběné součásti. Vnitřní poloměr $r_1 = 6$ mm, vnější rozměr objímky je volen podle rozměru matrice tvářecího automatu, $r_3 = 36$ mm. Parametry zadané do programu viz tab. 11.



Obr. 59 schéma složené lisovnice a objímky [12]

Tab. 11 parametry pro výpočet v OPTIM97

	Průtlačnice	Objímka
Materiál	SK 64	19 740
Modul pružnosti E [MPa]	490 000	207 000
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	1000	1480
Mez pevnosti v tlaku R_d [MPa]	3400	0
Mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	0	1390
Poissonovo číslo μ [-]	0.26	0.30
Dovolené napětí σ_D [MPa]	750	1360
Teplota popouštění T_{POP} [°C]	-	600
Koef. tep. roztažnosti α_r [-]	0,0000065	0,0000126

Pouzření lisovnice do objímky proběhne za tepla. Vypočítané hodnoty rozměrů, tlaků, tolerancí a další, viz tab. 12. Bližší podrobnosti jsou uvedeny v příloze 6.

Tab. 12 výstup z programu OPTIM97

Poměrný dělicí poměr	r_1/r_2 [mm]	2,52113
Radiální tlak	p_1 [MPa]	1370,03
Kontaktní tlak	p_2 [MPa]	646,563
Dělicí poměr	r_2 [mm]	15,12681
Vypočítaný přesah	$2\Delta r$ [mm]	0,17624
Kontaktní předpětí	\bar{p}_2 [MPa]	548,29283
Stažení vnějšího \varnothing lisovnice	$2\Delta r_2$ [mm]	0,0377
Roztaž. vnitřního \varnothing objímky	$2\Delta r_{22}$ [mm]	0,13854
Zvětšení kontakt. tlaku od p_1	\dot{p}_2 [MPa]	98,27018
Kontaktní přesah	$2\Delta r_s$ [mm]	0,19386
Stažení funkčního \varnothing lisovnice	$2\Delta r_1$ [mm]	-0,03186
Teplota ohřevu objímky	T_2 [°C]	585
Teplota podchlazení lisovnice	T_1 [°C]	0

Aby vypočtené hodnoty bylo možno převést do praxe, je nutno aby byly při výrobě dodrženy patřičné rozměrové a geometrické tolerance. Pokud by se tak nestalo, nástroj neodolá vysokým tvářecím tlakům. Zároveň při zapouzření za tepla nesmí teplota objímky přesáhnout popouštěcí teplotu, jinak by došlo ke snížení její tvrdosti, čímž nástroj opět degraduje.

Průtláčnice ve 4. operaci slouží zároveň ke kalibraci součásti, z konstrukčních důvodů byl volen poměrně vysoký poměr $r_2/r_1 = 2,52113$. Při takové volbě nemusí být nástroj dělený a vejde do něj celý polotovár, což zajistí jeho sousost.

• Návrh pěchovníku

Jde o finální část tváření, kde pěchovník je válcového tvaru (viz obr. 60). Jeho hlavním úkolem je napěchovat součást na vyhazovač, tím protlačit otvor dříku a kalibrovat rozměry součásti. Materiálem pěchovníku je nástrojová ocel 19 830 s mezí pevnosti v tlaku $R_d = 3670$ MPa

Vzdálenost protilehlých stran šestihranu:

$$a = 4 \text{ mm}$$

Vrcholový úhel šestihranu:

$$\text{volím } \alpha = 158^\circ$$

Průměr pracovní části d_1 :

$$d_1 = 20 \text{ mm}$$

Průměr dříku d_2 :

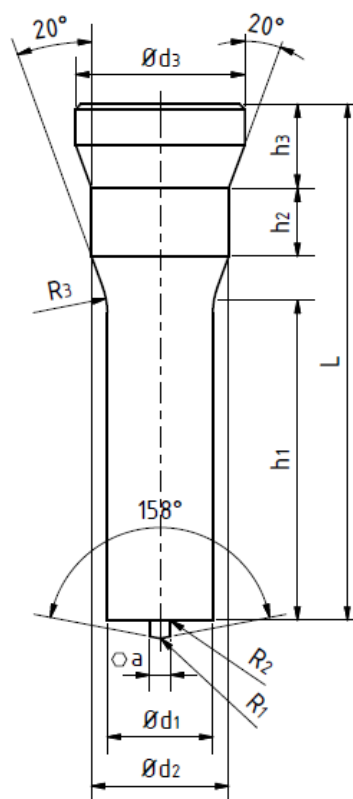
$$d_2 = d_1 \cdot 1,3 \quad [\text{mm}]$$

$$d_2 = 20 \cdot 1,3 = 26 \text{ mm}$$

Průměr upínací hlavy d_4 :

$$d_3 = d_2 \cdot 1,6 \quad [\text{mm}]$$

$$d_3 = 20 \cdot 1,6 = 32 \text{ mm}$$



Obr. 60 schéma pěchovníku

Délka pracovní části h_1 :

$$h_1 = 61 \text{ mm}$$

Délka válcové části dříku:

$$h_2 = d_2/2 \quad [\text{mm}]$$

$$h_2 = 26/2 = 13 \text{ mm}$$

Délka upínací hlavy:

$$h_3 = d_3/2 \quad [\text{mm}]$$

$$h_3 = 32/2 = 16 \text{ mm}$$

Délka pěchovníku bez šestihranu:

$$L = 98,2 \text{ mm}$$

Zaoblení špičky:

$$R = 0,1 \text{ mm}$$

Zaoblení hrany čela:

$$R_1 = (0,1 - 0,2) \cdot d_1 \quad [\text{mm}]$$

$$R_1 = 0,11 \cdot 4,5 \doteq 0,5 \text{ mm}$$

Zaoblení přechodu:

$$R_2 = 0,3 \text{ mm}$$

Zaoblení přechodu do stopky:

$$R_3 \approx 0,7 \cdot d_1 \quad [\text{mm}]$$

$$R_3 = 0,7 \cdot 20 \doteq 14 \text{ mm}$$

- Návrh vyhazovače pro 4. operaci

V této operaci je nutno protlačit zbývající část otvoru dříku, k tomu slouží tvarový vyhazovač. Ten byl konstruován jako zpětný průtlačník, bez doporučeného odlehčení (viz kapitola 2.5.3). Takto sice nebude sníženo kontaktní tření mezi nástrojem a stěnou otvoru, ale při kalibraci nedojde k zatečení materiálu do odlehčení a nástroj tak bude možné bezpečně vyjmout. Schéma viz obr. 61. Materiálem vyhazovače je nástrojová ocel 19 830 s mezí pevnosti v tlaku $R_d = 3670 \text{ MPa}$.

Proces tváření bude probíhat zastudena, výpočty rozměrů průtlačníku jsou tedy vztaženy k tab. 6 pro teplotu 20°C . Hodnoty, které nejsou pevně dány tvarem výlisku, byly zaokrouhleny.

Jmenovitý průměr vyhazovače:

$$d_1 = d - (0,1 - 0,2) \quad [\text{mm}]$$

$$d_1 = 5,5 - 0,1 = 5,4 \text{ mm}$$

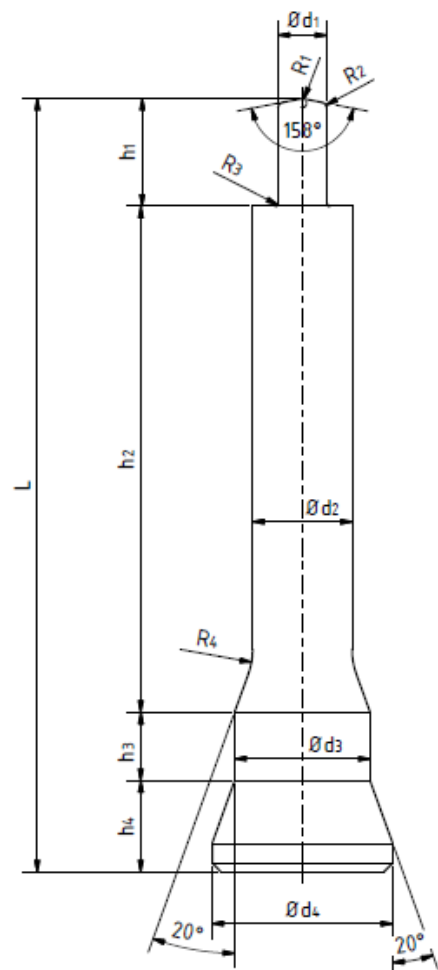
Průměr dříku d_2 :

$$d_2 = 11 \text{ mm}$$

Průměr dříku d_3 :

$$d_3 = d_2 \cdot 1,3 \quad [\text{mm}]$$

$$d_3 = 11 \cdot 1,3 \doteq 15 \text{ mm}$$



Obr. 61 schéma vyhazovače

Průměr upínací hlavy d_4 :

$$d_4 = d_2 \cdot 1,6 \quad [\text{mm}]$$
$$d_4 = 11 \cdot 1,6 \doteq 20 \text{ mm}$$

Délka pracovní části:

$$h_1 = d \cdot 2 \quad [\text{mm}]$$
$$h_1 = 5,5 \cdot 2 = 11 \text{ mm}$$

Délka vyhazovací části:

$$h_2 = 55,5 \text{ mm}$$

Délka válcové části dříku:

$$h_3 = d_3/2 \quad [\text{mm}]$$
$$h_3 = 15/2 = 7,5 \text{ mm}$$

Délka upínací hlavy:

$$h_4 = d_4/2 \quad [\text{mm}]$$
$$h_4 = 20/2 = 10 \text{ mm}$$

Celková délka:

$$L = 84,8 \text{ mm}$$

Vrcholový úhel vyhazovače:

$$\text{volím } \alpha = 158^\circ$$

Zaoblení špičky:

$$R_1 = 0,5 \text{ mm}$$

Zaoblení hrany čela:

$$R_2 = (0,1 - 0,2) \cdot d_5 \quad [\text{mm}]$$
$$R_2 = 0,11 \cdot 5,5 = 0,6 \text{ mm}$$

Zaoblení přechodu :

$$R_3 = 0,3 \text{ mm}$$

Zaoblení přechodu do stopky:

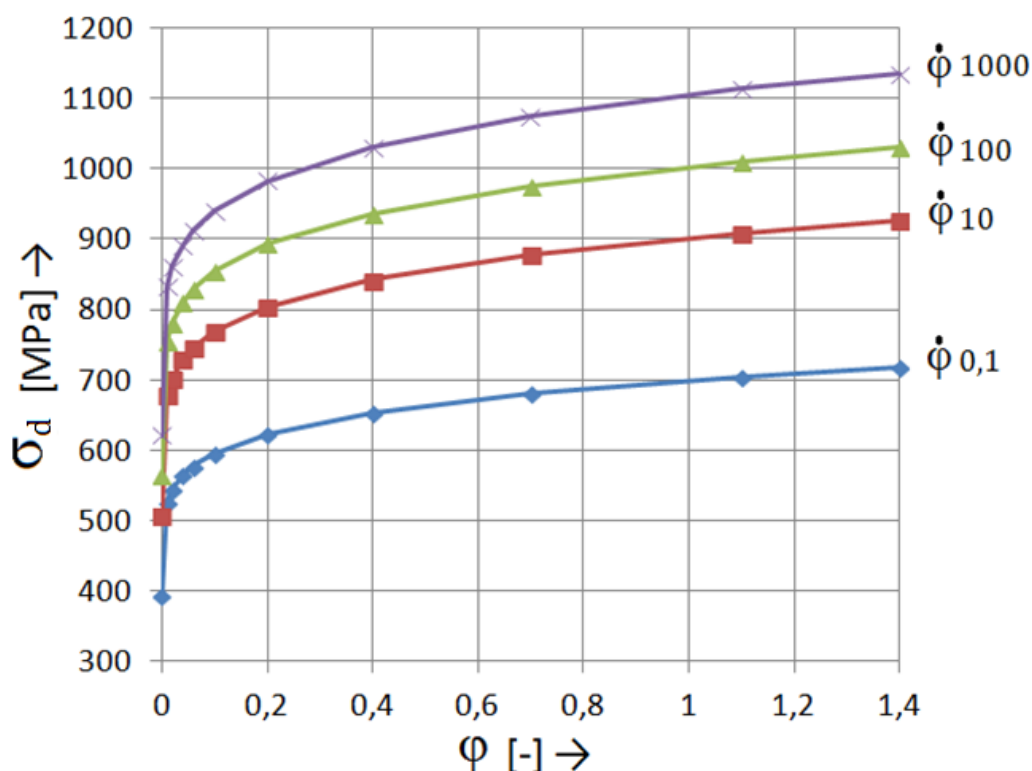
$$R_4 \approx 0,7 \cdot d_2 \quad [\text{mm}]$$
$$R_4 = 0,7 \cdot 11 \doteq 8 \text{ mm}$$

4 ANALÝZA PROCESU METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ [21], [31]

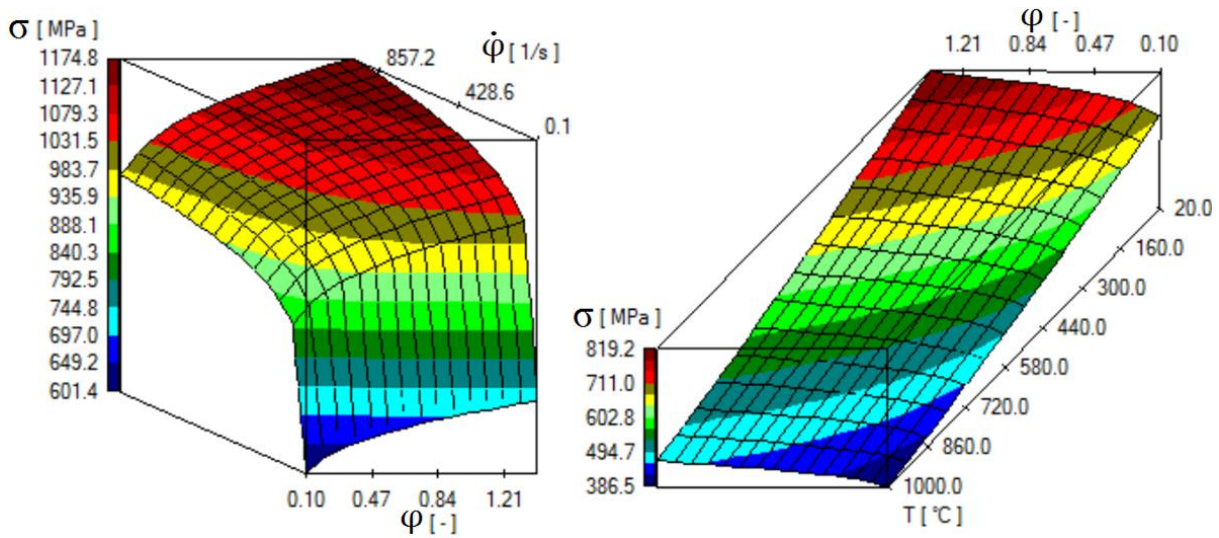
Pro získání dalších údajů týkajících se tvářecího procesu je možné použít metodu konečných prvků. Metodu není možno provádět jako manuální výpočet, ale pouze použitím výpočetní techniky. Je vytvořen model zkoumaného tělesa, který je rozdělen na konečný počet prvků. Při deformaci tělesa se zároveň deformují i prvky a z jejich deformace, posunů a natočení jsou počítány zkoumané veličiny. Tvary prvků je možné kombinovat a stejně tak i jejich velikost. Čím jemnější je síť prvků, tím vyšší přesnosti výpočtů je dosaženo. Hustotu sítě je možno navýšit i jen pro určité oblasti. Velkou výhodou této technologie je přenos tvářecího modelu mezi jednotlivými kroky.

4.1 Vstupní požadavky pro analýzu

Programem použitým pro vyhodnocení tvářecího postupu výroby čepu byl FormFEM 2.1. Kromě geometrického modelu je nutno znát i materiálový model. Materiálový model závisí na chemickém složení, jeho zadáním je možno vypočítat termomechanické (fyzikální) vlastnosti. Dále je pro určení materiálového modelu nutno znát mez kluzu, mez pevnosti, přetvoření, teplotu a rychlost přetvoření. Pro popis chování materiálu byla využita Johnson-Cookova konstitutivní rovnice, která zahrnuje vliv přetvoření, rychlosti přetvoření a teploty pro konkrétní materiál. Z ní vyplývá závislost napětí na přetvoření různá, pro různé rychlosti přetvoření a teploty. Při konstantní teplotě 23 °C byla získána zmíněná závislost (viz obr. 62). ze softwaru FormFEM 2.1 lze zadáním patřičných hodnot získat trojrozměrný diagram, viz obr. 63a. Avšak teplota při procesu není konstantní, je nutno popsat celé spektrum teplot, v němž tváření probíhá. Toto spektrum popisuje 3D graf na obr. 63b.



Obr. 62 závislost deformačního odporu na přetvoření pro různé rychlosti

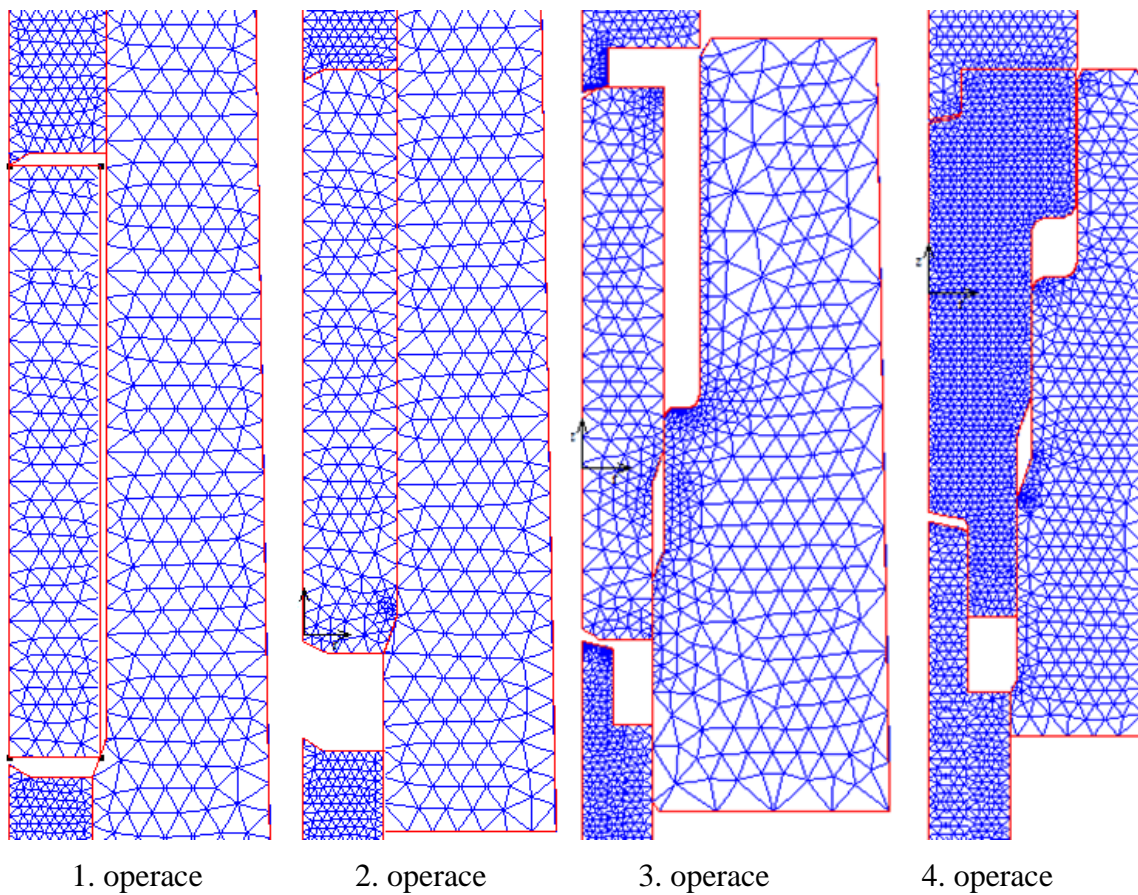


a) pro různé rychlosti deformace

b) pro různé teploty

Obr. 63 závislost deformačního odporu na přetvoření

Pro metodu konečných prvků, byl jako prvek zvolen trojúhelník se šesti uzlovými body. Jednotlivé kroky tváření popsané sítí prvků jsou vidět na obr. 64 (pro přehlednost nejsou uzly prvků vyobrazeny).

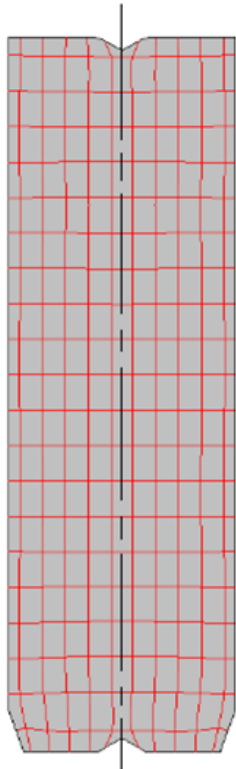


Obr. 64 schéma jednotlivých operací při výrobě čepu

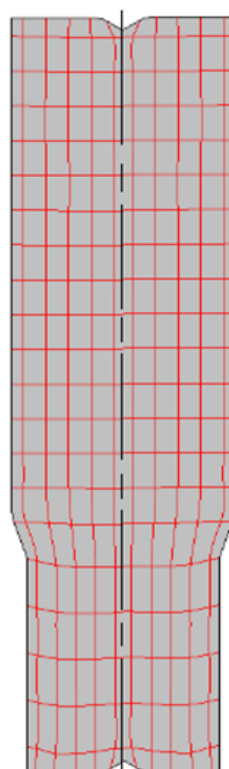
4.2 Výstupy z analýzy MKP

- Přetvoření

Vizualizace deformace je dobře vidět na obdélníkové síti a její deformaci v jednotlivých krocích, viz obr. 65.



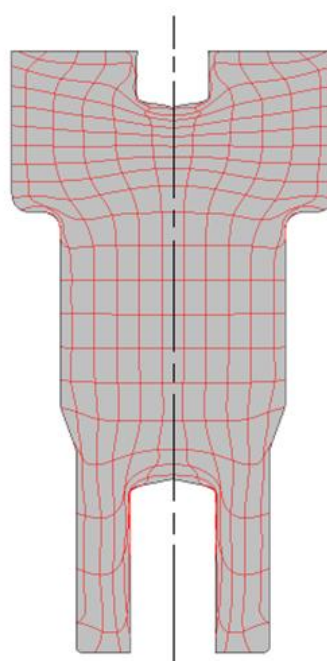
1. operace



2. operace



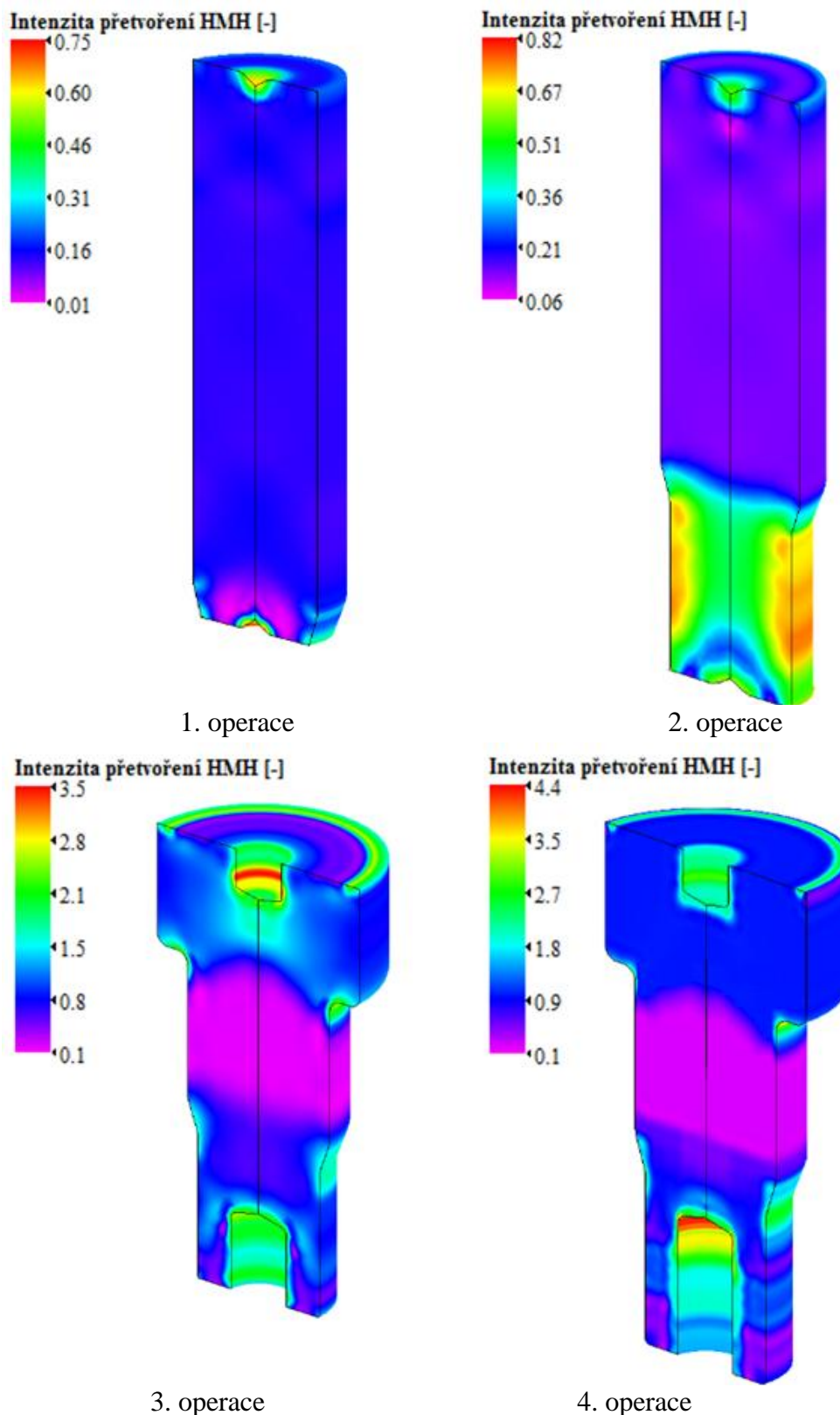
3. operace



4. operace

Obr. 65 vizualizace přetvoření v jednotlivých operacích při výrobě čepu

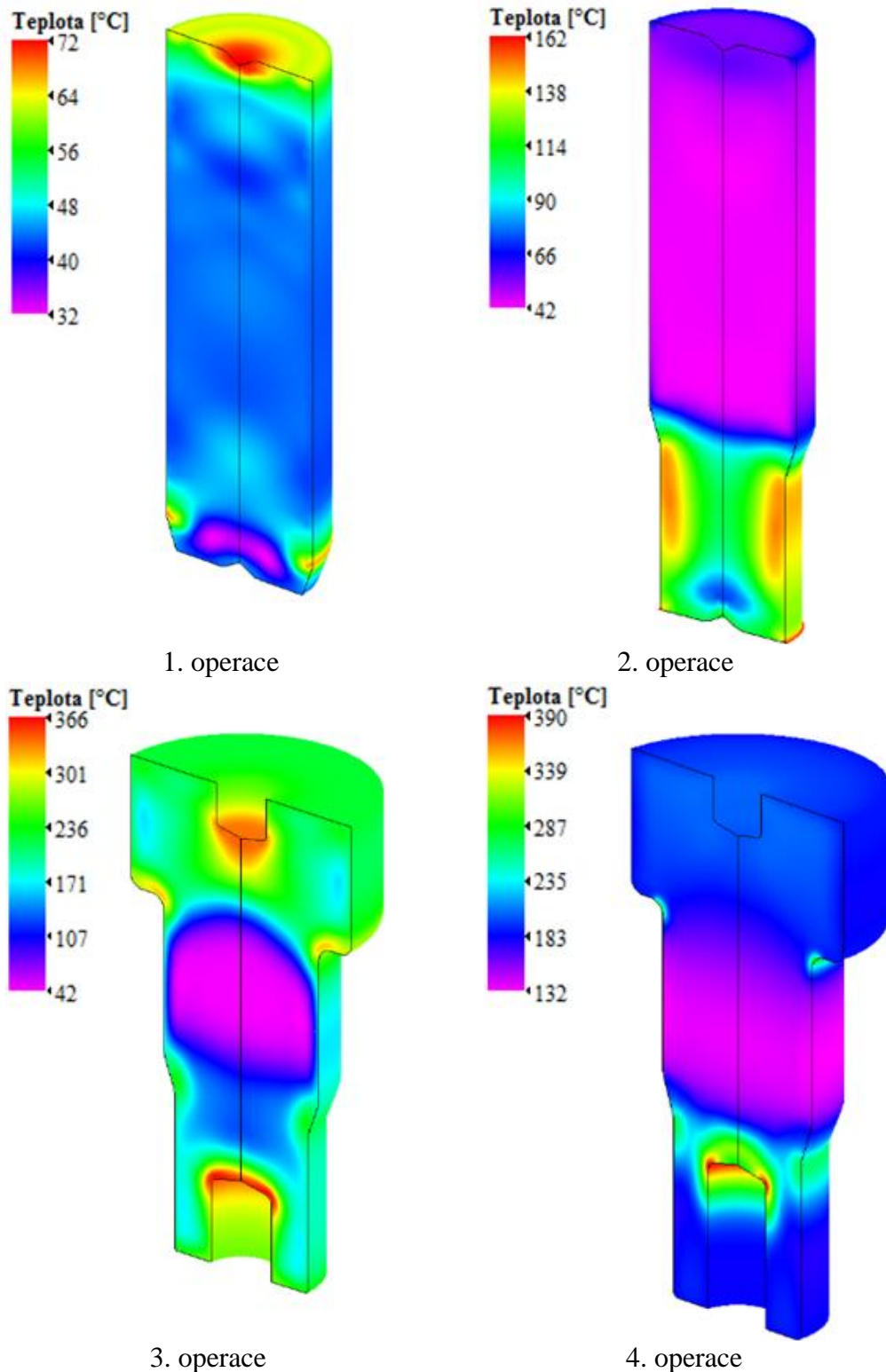
Z obr. 58 je zřejmé, že přetvoření není v celém objemu rovnoměrné. Největší přetvoření nastane v oblasti protlačovaných dutin. Pomocí MKP je možno určit velikost přetvoření v jednotlivých oblastech vyráběné součásti, viz obr. 66. Ačkoli je vidět že dosažená přetvoření překračují povolenou hodnotu, $\varphi = 1,29$, i trojnásobně, jsou tato přetvoření povolena, protože se jedná pouze o lokální extrém.



Obr. 66 rozložení přetvoření v jednotlivých krocích při výrobě čepu

- Teplota

Pomocí analýzy MKP lze také určit, jak se při procesu tváření bude měnit teplota polotovaru. Výsledky z analýzy na sebe krok za krokem navazují a tak není brána v potaz doba mezi operacemi, kdy se součást ochlazuje (avšak je pravděpodobné, že ztráty teplot by u postupového automatu nebyly velké). Rozložení teploty viz obr. 67.



Obr. 67 rozložení teploty v jednotlivých krocích při výrobě čepu

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [12]

Jak bylo již dříve naznačeno, vhodnou technologií pro hromadnou a sériovou výrobu je objemové tváření. Na rozdíl od obrábění je zde menší spotřeba materiálu, jsou zlepšeny některé mechanické vlastnosti výrobku a i produktivita je mnohem vyšší (v řádu statisíců kusů ročně). Pro zajištění stejné produktivity pomocí třískového obrábění, by bylo třeba použít více strojů. Tato kapitola se bude zabývat bližším rozbořem nákladů při použití technologií objemového tváření zastudena a třískového obrábění. U zvolené varianty byl stanoven tzv. rovnovážný bod, což je oblast kde se výrobní náklady vyrovnají ziskům (viz. obr. 56). Velikost plánované série je 500 000 ks/rok. Přehled nákladů na výrobu viz tab. 13.

Tab. 13 základní rozdělení nákladů

1. přímé náklady za materiál	Vlastní náklady výroby	Vlastní náklady výkonů	Úplné vlastní náklady výkonů	Výrobní cena	Prodejní cena
2. přímé náklady za mzdy					
3. přímé náklady za ostatní					
5. režie výrobní					
6. náklady odbytkové					
7. výnos					
8. odbytkové a obchodní přírážky a srážky					

5.1 Výroba součásti objemovým tvářením za studena [12]

Náklady přímé:

- Za materiál

$$PN_{\text{Mater}} = S \cdot C_M \cdot n_k = 0,05129 \cdot 30 \cdot 500\,000 = 769\,414 \text{ Kč} \quad (5.1)$$

kde: S je spotřeba materiálu [kg/ks],

C_M je cena materiálu [Kč/kg],

n_k je počet kusů za rok [ks].

- Za mzdy

$$PN_{\text{Mzdy}} = t_v \cdot M_t \cdot n_k = 1,517 \cdot 10^{-5} \cdot 600 \cdot 500\,000 = 45\,508 \text{ Kč} \quad (5.2)$$

$$t_v = t_A + t_B = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_{B1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,0091}{60} + \frac{0,03}{60 \cdot 20\,000} = 1,517 \cdot 10^{-5} \text{Nh}$$

kde: t_v je čas výroby [Nh],

M_t je mzda za hodinu práce [Kč/h],

t_{A1} je čas na výrobu jednoho kusu [Nmin],

t_{B1} je čas na přípravu jednoho kusu [Nmin],

d_v je počet kusů ve výrobní dávce [ks].

- Za el. energii

$$PN_{\text{Energ}} = P \cdot \eta_j \cdot t_{A1} \cdot C_E \cdot n_k = 55 \cdot 0,7 \cdot 0,0091 \cdot 5 \cdot 500\,000 = 875\,875 \text{ Kč} \quad (5.3)$$

kde: P je příkon stroje [kWh],

η_j je účinnost [-],

C_E je cena energie [Nmin],

d_v je počet kusů ve výrobní dávce [Kč/kWh].

- Celkové přímé náklady

$$PN_{\text{celkem}} = PN_{\text{Mater}} + PN_{\text{Mzdy}} + PN_{\text{Energ}} \quad (5.5)$$

$$PN_{\text{celkem}} = 769\,414 + 45\,508 + 875\,875 = 1\,690\,797 \text{ Kč}$$

Jelikož nejsou známy všechny režijní náklady, není možné přesně stanovit celkové výrobní náklady. Proto jsou vypočítané náklady ještě navýšeny o odhadované provozní náklady dílny.

$$PN_{\text{celkem}} = 2\,000\,000 \text{ Kč}$$

- Fixní náklady:

V tomto případě se jedná o náklady na nástroje a na jejich údržbu

$$N_{\text{Fix}} = 300\,000 \text{ Kč}$$

- Náklady celkové:

$$N_{\text{celkem}} = PN_{\text{celkem}} + N_{\text{Fix}} = 2\,000\,000 + 300\,000 = 2\,300\,000 \text{ Kč}$$

- Celkové náklady na vyrobení jednoho dílce

$$N_{\text{Kus}} = \frac{N_{\text{celkem}}}{n_k} = \frac{2\,300\,000}{500\,000} = 4,60 \text{ Kč}$$

- Zisk 100 % za rok výroby součástí

$$Z_{100} = \frac{(PN_{\text{celkem}} + N_{\text{Fix}}) \cdot 100}{100} = \frac{(2\,000\,000 + 300\,000) \cdot 100}{100} = 2\,300\,000 \text{ Kč}$$

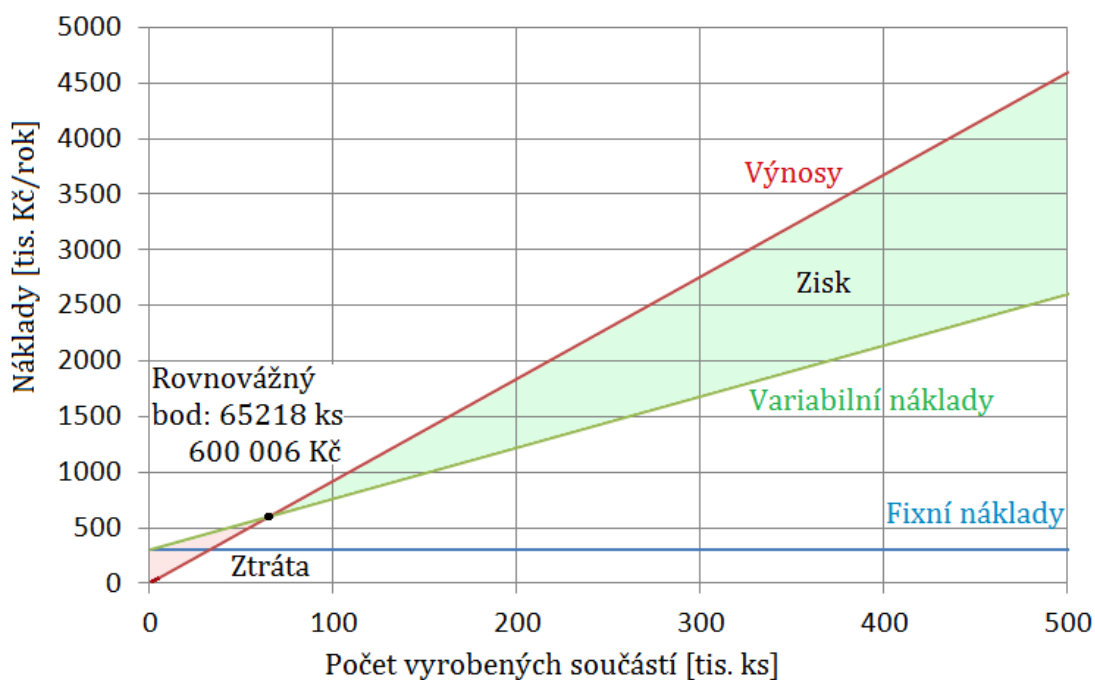
- Cena za kus při zisku 100 %

$$C_{100} = \frac{N_{\text{celkem}} + Z_{100}}{n_k} = \frac{2\,300\,000 + 2\,300\,000}{500\,000} = 9,20 \text{ Kč}$$

- Cena za kus při zisku 100 %

$$RB = \frac{N_{\text{Fix}}}{C_{100} - N_{\text{Kus}}} = \frac{300\,000}{9,20 - 4,60} = 65\,218 \text{ ks}$$

Na obr. 68 je graf zobrazující rovnovážný bod, ten dává znát při jakém počtu kusů začne daná výroba vykazovat zisk.



Obr. 68 Rovnovážný bod při výrobě čepu objemovým tvářením

5.2 Výroba součásti třískovým obráběním [12]

Náklady přímé:

- Za materiál

$$PN_{\text{Mater}} = S \cdot C_M \cdot n_k = 0,09371 \cdot 30 \cdot 500\,000 = 1\,405\,706 \text{ Kč}$$

- Za mzdy

$$PN_{\text{Mzdy}} = t_v \cdot M_t \cdot n_k = 1,517 \cdot 10^{-5} \cdot 600 \cdot 500\,000 = 3\,762\,500 \text{ Kč}$$

$$t_v = t_A + t_B = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_{B1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,75}{60} + \frac{0,5}{60 \cdot 200} = 1,2542 \cdot 10^{-2} \text{ Nh}$$

- Za el. energii

$$PN_{\text{Energ}} = P \cdot \eta_j \cdot t_{A1} \cdot C_E \cdot n_k = 10 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 5 \cdot 500\,000 = 15\,000\,000 \text{ Kč}$$

- Celkové přímé náklady

$$PN_{\text{celkem}} = PN_{\text{Mater}} + PN_{\text{Mzdy}} + PN_{\text{Energ}}$$

$$PN_{\text{celkem}} = 769\,414 + 45\,508 + 875\,875 = 20\,168\,206 \text{ Kč}$$

Jelikož nejsou známy všechny režijní náklady, není možné přesně stanovit celkové výrobní náklady. Proto jsou vypočítané náklady ještě navýšeny o odhadované provozní náklady dílny.

$$PN_{\text{celkem}} = 20\,300\,000 \text{ Kč}$$

- Fixní náklady:

V tomto případě se jedná o náklady na nástroje a na jejich údržbu

$$N_{\text{Fix}} = 60\,000 \text{ Kč}$$

- Celkové náklady na výrobu jednoho dílce

$$N_{\text{Kus}} = \frac{PN_{\text{celkem}} + N_{\text{Fix}}}{n_k} = \frac{20\,300\,000 + 60\,000}{500\,000} = 40,72 \text{ Kč}$$

6 ZÁVĚRY

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit návrh pro velkosériovou výrobu čepu z oceli 11 320 5R. Velikost ročně vyráběné série je 500 000 ks. Úvodní část práce se zabývá volbou vhodné technologie výroby a jejím následným detailnějším rozbohem. Vzhledem k velkému objemu výroby a k požadované přesnosti, byla jako nejvhodnější postup navržena technologie tváření za studena.

V následující části práce je řešen návrh výroby pomocí této technologie. Byly navrženy celkem 3 varianty možné výroby, z nichž jako nejvhodnější byla zvolena varianta II. U této varianty není přetvoření rovnoměrné, byla však volena s ohledem na následnou operaci výroby závitů tvářením. Navíc je u této varianty možné vyrobít součást na čtyři tvářecí operace, což je o jednu méně než u ostatních variant. Z těchto důvodů se zvolená varianta jeví jako nejvhodnější. Jako polotovar slouží drát s průměrem 14 mm. Byla také určena celková síla potřebná na tváření ($F = 724 \text{ kN}$) a zvolen vhodný tvářecí stroj, kterým byl postupový automat CM 4-5 ECO značky HATEBUR (jmenovitá síla stroje je 1 700 kN). Dále byl navržen postupový nástroj, a dodána výkresová dokumentace pro nástroje finální operace. Radiální tlak působící na průtláčnici vyšel v rozmezí $1000 \div 1600 \text{ MPa}$, což znamená nutnost zapouzdření do jedné objímky. Optimální parametry nástroje byly zjištěny pomocí programu OPTIM97. Pro jednotlivé kroky výroby byla provedena analýza metodou konečných prvků. Tímto způsobem bylo možné zjistit nárůst teploty polotovaru v průběhu tváření, byly také určeny lokální extrémy přetvoření v jednotlivých krocích.

Závěrem bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, kde byla srovnávána výroba technologiemi objemového tváření a obrábění. Potvrdilo se, že pro tak velkou sérii se pomocí technologie objemového tváření výroba značně zefektivní a výrobní cena jednoho kusu bude oproti obrábění zlomková. Cena za kus vyrobený tvářením je 4,60 Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. VÁVRA, Roman. *Vyhodnocení pechovací zkoušky*. BRNO, 2015. BP. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Jan Řiháček.
2. BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. *Objemové tváření ocelí*. Praha: SNTL, 1967. Řada strojírenské literatury. ISBN 80-214-2854-9.
3. BLAŠČÍK, František. *Konstruktúra tvárniaceho náradia. Náradie pre objemové tvárnenie*. Košice: VST, 1966.
4. BLAŠČÍK, František a Karol POLÁK. *Teória tvárnenia: celoštátna vysokoškolská učebnica pre strojnícke fakulty vysokých škôl*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1987. Edícia strojárskkej literatúry (Alfa).
5. ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 9788001055502.
6. DRASTÍK, František a Jiří ELFMARK. *Plastometry a tvařitelnost kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977.
7. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 1. BRNO: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-2032-4.
8. 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. ISBN 9788021447479.
9. *ESW GROUP* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.esw-group.eu/pg-cold-forming-cz.php>
10. FELDMANN, Heinz D. *Protlačování oceli: určeno pro technology a konstruktéry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
11. FOREJT, Milan. *Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2004 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu.htm
12. FOREJT, Milan. *Oborový projekt 2* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm>
13. FOREJT, Milan. *Vybrané statě z teorie tváření* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2010 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm>
14. FOREJT, Milan, Humár ANTON, Píška MIROSLAV a Libor JANÍNEK. *Experimentální metody* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm>
15. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 8021423749.
16. GAJDOŠ, František. *Teorie tváření*. BRNO: Vysoké učení technické, 1987.
17. *HATEBUR* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.hatebur.com/hatebur-de/index.php>

18. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 9781107004528.
19. HÝSEK, Rudolf. *Machines de formage Tchécoslovaques pour métaux et matières plastiques*. Praha: Strojimport, 1962.
20. J - VST, s.r.o. [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.j-vst.wz.cz/>
21. KOBAYASHI, Shiro, Soo-Ik. OH a Taylan. ALTAN. *Metal forming and the finite-element method*. New York: Oxford University Press, 1989. ISBN 0195044029.
22. LANGE, Kurt. *Handbook of metal forming*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 1995. ISBN 0872634574.
23. LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 9788073611118.
24. LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 9788074943058.
25. *Mechanické vlastnosti oceli* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2510831/>
26. MICHNA, Štefan a Nataša NÁPRSTKOVÁ. *Tváření*. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012. ISBN 9788074144455.
27. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 8021404019.
28. PFROGNER, František a Alois MOJŽÍŠ. *Základy teorie a technologie tváření kovů*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1981.
29. POČTA, Bohumil. *Základy teorie tváření kovů: učebnice pro hutnické fakulty*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1966.
30. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 8072042831.
31. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2015 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm>
32. *SFS intec* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www.sfsintec.biz/mo/cz/cs/web/technologies___products/production_technologies/cold_forming/cold_forming_1.html
33. STOROŽEV, Michail Vasil'jevič a Jevgenij Aleksandrovič POPOV. *Teória tvárnenia kovov*. Bratislava: Alfa, 1978. Edícia strojárskiej literatúry (Alfa). ISBN 80-214-2784-9.
34. *Technická univerzita Liberec* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/05.htm
35. *UČÍME V PROSTORU* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2315
36. *Závitování* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.zavitovani.cz/vyroba-vnitřních-zavitu/tvareni-zavitu>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Přetvárná práce	[J]
A _A	Aproximační konstanta	[-]
A _T	Tažnost materiálu	[%]
b	Ohnisko deformace	[mm]
B	Experimentálně zjištěný parametr pevnosti	[-]
C	Parametr citlivosti materiálu na rychlost deformace	[-]
D, d	Průměr	[mm]
E	Modul pružnosti	[MPa]
f ₁₋₃	Součinitel tření	[-]
f _{stř}	Střední hodnota součinitele tření	[-]
F _m	Síla na mezi pevnosti	[N]
F _{Pěch}	Pěchovací síla	[N]
F _{protl}	Protlačovací síla	[N]
F _R	Radiální síla	[N]
F _S	Střížná síla	[N]
h	Výška	[mm]
L ₀	Počáteční délka	[mm]
L ₁	Neprotlačená délka	[mm]
L ₃	Výška kalibračního oka průtlačnice	[mm]
L _U	Konečná délka	[mm]
m	Koeficient teplotního odpevnění	[-]
n	Exponent zpevnění	[-]
n _{zd}	Počet zdvihů za minutu	[-]
P	Výkon	[kW]
p ₁	Radiální tlak	[MPa]
p ₂	Kontaktní tlak	[MPa]
\bar{p}_2	Kontaktní předpětí	[MPa]
\dot{p}_2	Zvětšení kontaktního tlaku od p ₁	[MPa]
R, r	Poloměr	[mm]
r ₂	Poloměr průtlačnice	[mm]
R _e	Výrazná mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[Mpa]
R _{p0,2}	Nevýrazná mez kluzu	[Mpa]
s	Dráha beranu	[mm]
S	Okamžitý obsah průřezu	[mm ²]
S ₀	Počáteční obsah průřezu	[mm ²]
S _U	konečný obsah průřezu	[mm ²]
t	Čas	[s]
T	Teplota	[°C]
T''	Vliv teploty na přetvárný odpor materiálu	[°C]
T ₀	Teplot statické meze kluzu	[°C]
T ₁	Teplota ohřevu objímky	[°C]
T ₂	Teplota podchlazení lisovnice	[°C]
T _{POP}	Teplota popouštěcí	[°C]

T_{TAV}	Teplot tavení	[°C]
T_{REK}	Celková tažná práce	[°C]
v_0	Rychlost	[m/s]
V	Objem	[mm ³]
X_{1-2}	Kořeny diskriminantu	[-]
Z	Kontrakce vzorku	[%]
α	Úhel sklonu průtlačníku	[rad]
$\bar{\alpha}$	Úhel kuželu průtlačnice	[rad]
α_r	Koeficient tepelné roztažnosti	[-]
$2\Delta r$	Přesah sestavy průtlačnice	[mm]
$2\Delta r_1$	Stažení funkčního Ø lisovnice	[mm]
$2\Delta r_2$	Stažení vnějšího Ø lisovnice	[mm]
$2\Delta r_{22}$	Roztažení vnitřního Ø objímky	[mm]
$2\Delta r_s$	Kontaktní přesah	[mmf]
ΔS	Rozdíl průřezů	[mm ²]
ε	Poměrné přetvoření	[-]
μ	Poissonovo číslo	[-]
σ_d	Deformační odpor materiálu	[MPa]
σ_o	Mez kluzu zjištěná kompresním testem	[MPa]
σ_p	Přetvárný odpor materiálu	[MPa]
σ_{ps}	Střední přetvárný odpor materiálu	[MPa]
σ_r	Radiální napětí	[MPa]
σ_t	Tečné napětí	[MPa]
σ_z	Osové napětí	[MPa]
$\sigma_{z,stř}$	Střední osové napětí	[MPa]
σ_i	okamžité napětí	[MPa]
σ_k	napětí na mezi kluzu	[MPa]
τ_f	Tření dle coulomba	[MPa]
τ_s	Napětí ve stříhu	[MPa]
φ	Logaritmické přetvoření	[-]
$\dot{\varphi}$	Rychlost logaritmické deformace	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady součástí vyráběných protlačováním [9], [20], [32]	9
Obr. 2 sestava šlapátka jízdního kola	10
Obr. 3 Schéma základních druhů čepových sestav [35].....	10
Obr. 4 Vyráběná součást	11
Obr. 5 Obráběný kus	13
Obr. 6 Schéma kovacího nástroje [34]	13
Obr. 7 Schéma dopředného protlačování [34]	14
Obr. 8 Průběh vláken zobrazený v řezu součástí	15
Obr. 9 Metalografický výbrus feriticko-perlitické oceli [1].....	16
Obr. 10 Lom vzniklý při pěchování tělesa [1]	16
Obr. 11 Diagram vlivu přetvoření na mechanické vlastnosti mat. [15]	16
Obr. 12 Vliv teploty na obnovu mechanických vlastností [15].....	17
Obr. 13 Křivky zpevnění s výraznou a nevýraznou mezí kluzu [25].....	18
Obr. 14 Pěchování volné a uzavřené [15]	19
Obr. 15 Dopředné protlačování plných a dutých těles [15]	19
Obr. 16 Stranové protlačování [15].....	20
Obr. 17 Zpětné protlačování [15].....	20
Obr. 18 Sdružené protlačování [15]	21
Obr. 19 schéma napjatosti pro pěchování válcového tělesa [15]	22
Obr. 20 rozložení osového napětí dle Siebela [15]	23
Obr. 21 dopředné protlačování [15]	24
Obr. 22 model zpětného protl. [15].....	24
Obr. 23 Funkční tvary pěchovníků [15]	25
Obr. 24 Tvar dutiny pěchovníku [15].....	25
Obr. 25 Konstrukce pěchovacích nástrojů [15].....	26
Obr. 26 Model pěchovacího automatu - třířáz [15].....	26
Obr. 27 Průtláčnice dopředného protlačování [15]	27
Obr. 28 Dělené průtláčnice pro dopředné protlačování [15].....	28
Obr. 29 Základní druhy průtláčníků pro dopředné protlačování [15]	28
Obr. 30 Schéma zpětného protlačování [15].....	29
Obr. 31 Doporučená geometrie a rozměry průtláčníku zpětného protlačování [15].....	29
Obr. 32 Model zpětné průtláčnice s objímkami [15]	30
Obr. 33 Modely součásti typu čepu [2]	33
Obr. 34 Modely součásti typu kalíšku [2]	34
Obr. 35 Modely nízkých rotačně symetrických součástí [2].....	34
Obr. 36 Modely součástí nesymetrických tvarů [2]	34
Obr. 37 Příklady vhodných a nevhodných tvarů při návrhu součástí [10].....	35
Obr. 38 Příklady vhodných a nevhodných tvarů při návrhu součástí [22].....	37
Obr. 39 Postupový automat od firmy HATEBUR [17]	37
Obr. 40 Součást se základními rozměry	38
Obr. 41 schéma postupu pro volbu polotovaru	38
Obr. 42 schéma postupu tváření pro I. variantu	39
Obr. 43 grafické znázornění rozložení napětí pro I. variantu.....	40
Obr. 44 schéma postupu tváření pro II. variantu.....	41
Obr. 45 grafické znázornění rozložení napětí pro II. variantu	42
Obr. 46 schéma postupu tváření pro III. variantu	42
Obr. 47 grafické znázornění rozložení napětí pro III. variantu	43
Obr. 48 tvářecí závitník [36]	44

Obr. 49 detaily objemů součástí	45
Obr. 50 detaily počítaných objemů dutin a úkosů.....	45
Obr. 51 polotovar při ustřižení a v 1. operaci.....	46
Obr. 52 polotovar ve 2. operaci.....	46
Obr. 53 polotovar ve 3. operaci.....	47
Obr. 54 polotovar ve 4. operaci.....	47
Obr. 55 schéma pěchování [13].....	48
Obr. 56 schéma dopředného protlačování [13]	49
Obr. 57 schéma zpětného protlačování [13].....	50
Obr. 58 stroj CM 4 – 5 ECO HATEBUR [17]	54
Obr. 59 schema složené lisovnice a objímky [12]	55
Obr. 60 schéma pěchovníku	56
Obr. 61 schéma vyhazovače.....	57
Obr. 62 závislost deformačního odporu na přetvoření pro různé rychlosti.....	59
Obr. 63 závislost deformačního odporu na přetvoření	60
Obr. 64 schéma jednotlivých operací při výrobě čepu.....	60
Obr. 65 vizualizace přetvoření v jednotlivých operacích při výrobě čepu.....	61
Obr. 66 rozložení přetvoření v jednotlivých krocích při výrobě čepu	62
Obr. 67 rozložení teploty v jednotlivých krocích při výrobě čepu.....	63
Obr. 68 Rovnovážný bod při výrobě čepu objemovým tvářením	65

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Zahraniční ekvivalentní značení oceli 11 320 5R [11]	11
Tab. 2 Chemické složení oceli 11 320 5R [11]	12
Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 11 320 5R [11].....	12
Tab. 4 doporučené rozměry dutiny pýchovníku [15]	25
Tab. 5 doporučené rozměry průtláčnice dopředného protlačování [15].....	27
Tab. 6 doporučené rozměry průtláčníku zpětného protlačování [15]	30
Tab. 7 materiály vhodné pro protlačovací nástroje [23]	32
Tab. 8 materiály vhodné pro protlačování [8].....	33
Tab. 9 Parametry pro Johnson-Cookovu konstitutivní rovnici	48
Tab. 10 Parametry CM 4-5 ECO.....	54
Tab. 11 parametry pro výpočet v OPTIM97	55
Tab. 12 výstup z programu OPTIM97	56
Tab. 13 základní rozdělení nákladů.....	64

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Podrobné řešení pēchování dle Siebela [15]
- Příloha 2 Výpočet rozměrů polotovaru v jednotlivých operacích
- Příloha 3 Určení ohniska deformace [33]
- Příloha 4 Parametry postupového lisu CM 4 – 5 ECO HATEBUR [17]
- Příloha 5 schémata sestav jednotlivých operací
- Příloha 6 Výpočet z programu OPTIM97.EXE [13]
- Příloha 7 schéma polotovarů v jednotlivých operacích
- Příloha 8 Kontrola součásti na smyk a ohyb
- Příloha 9 Rozměrové tolerance

SEZNAM VÝKRESŮ

OTOČNÝ ČEP	DP_153332-00
PRŮTLAČNICE_4	DP_153332-01
PĚCHOVNÍK_4	DP_153332-02
VYHAZOVAČÍ_TRN_4	DP_153332-03
POSTUPOVÝ_NÁSTROJ	DP_153332-04
KUSOVNÍK_01	DP_153332-05
KUSOVNÍK_02	DP_153332-06
KUSOVNÍK_03	DP_153332-07