



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA KRÁTKÉHO HŘÍDELE PROTLAČOVÁNÍM PRODUCTION OF SHORT SHAFT BY EXTRUSION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ HONDL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Hondl

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Výroba krátkého hřídele protlačováním

v anglickém jazyce:

Production of short shaft by extrusion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie sériové výroby krátkého hřídele z konstrukční oceli 12 122.3 objemovým tvářením za studena s důrazem na dopředné a zpětné protlačování.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracovat literární studii se zaměřením na technologii objemového tváření za studena.
2. Zhodnotit současný stav výroby součásti obdobného tvaru.
3. Navrhnout vlastní technologii výroby.
4. Vypracovat výkresovou dokumentaci postupového nástroje a doložit ji potřebnými výpočty
5. Zpracovat technické a ekonomické hodnocení navržené technologie.
6. Formulovat závěry a doporučení pro technickou praxi.

Seznam odborné literatury:

- 1.LANGE, Kurt, et al. Handbook of metal forming. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.
- 2.FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Milan Forejt; Design obálky: Ildikó Putzová. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
- 3.BABOR, Karel, CVILINEK, Augustin, FIALA, Jan. Objemové tváření ocelí. Vladimír Hašek; Eva Tamelová. 1. vyd. Praha : SNTL, 1967. 332 s. Strojírenská literatura; sv. 6006.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.10.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

HONDL Jiří: Výroba krátkého hřídele protlačováním.

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru Strojírenská technologie předkládá návrh postupu výroby hřídele z oceli 12 122.3 protlačováním. Na základě literární studie problematiky objemového tváření za studena a výpočtů byl navržen postup výroby ve čtyřech tvářecích operacích. Polotovarem byl určen ústřížek ze svitku drátu o průměru 18mm a délce 51,2mm. Výroba je navržena pro postupový automat TPZK 25 se jmenovitou silou 5 000kN českého výrobce a dodavatele strojního zařízení firmy Šmeral Brno. Nástroje jsou zhotoveny z nástrojové oceli, pro průtlačník a průtlačnici byla zvolena ocel 19 830.4, objímka je z oceli 19 733.4. Jako tepelné zpracování nástrojů bylo navrženo kalení a následné popuštění.

Klíčová slova: Tváření, protlačování za studena, hřídel, ocel 12 122.3

ABSTRACT

HONDL Jiří: Production of short shaft by extrusion.

The project prepared as part of the Master-degree studies in the Engineering technology concerns the technology design for manufacturing a short shaft by extrusion. On the basis of the study cold forming methods and problems and following technical calculations was designed a four steps process of forming. Semifinished product has a cylinder shape with a diameter of 18mm and a length of 51,2mm. The production is designed for automatic multistage press TPZK 25 with nominal pressing force of 5 000kN from Czech producer and supplier of machinery Šmeral Brno company. Tools are made of tool steel, extrusion punch and extrusion die is designed of 19 830.4 steel, and extrusion die's band is designed of 19 733.4 steel. Tools are designed to be improved by hardening and drawing.

Keywords: Forming, cold extrusion, shaft, 12 122.3 steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HONDL Jiří: *Výroba krátkého hřídele protlačováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 54s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

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 Jihlavě dne 25.5.2012

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu prof. Ing. Milanu Forejtovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce a za jeho velmi dobrý osobní přístup.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1 Úvod	9
2 Rozbor stávajících způsobů výroby	10
2.1 Výrobní možnosti	11
3 Technologie objemového tváření za studena	12
3.1 Princip protlačování a vliv materiálu	12
3.2 Vliv tření na tvářecí proces	12
3.3 Rozdělení technologických způsobů protlačování	13
3.3.1 Dopředné protlačování	13
3.3.2 Zpětné protlačování	14
3.3.3 Stranové protlačování	14
3.3.4 Kombinované protlačování	15
3.3.5 Hydrostatické protlačování	15
3.4. Nástroje pro protlačování	16
3.4.1 Nástroje pro dopředné protlačování	16
3.4.2 Nástroje pro zpětné protlačování	17
3.5 Materiály protlačovacích nástrojů	19
3.6 Stroje pro protlačování	21
3.7 Tvary vhodné pro protlačování	21
4 Návrh technologie výroby součásti	24
4.1 Určení polotovaru součásti	24
4.2 Možné varianty výroby součásti	26
4.3 Výpočet délek a objemů jednotlivých tvářených částí	31
4.4 Výpočet tvářecí síly a práce	34
4.5 Výpočet radiálního tlaku	41
4.6 Nástroj a výkresová dokumentace	43
4.7 Volba tvářecího stroje	45
4.8 Návrh výrobní linky	46
5 Technicko – ekonomické zhodnocení	47
5.1 Výroba objemovým tvářením	47
5.2 Výroba třískovým obráběním	48
6 Závěry	50

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam použitých zdrojů

Seznam příloh

1 Úvod

Tvářením kovů rozumíme technologický (výrobní) proces, při kterém dochází k požadované změně tvaru výrobku nebo polotovaru, příp. vlastností materiálu, v důsledku působení vnějších sil bez odběru třísek. Podstatou tváření je vznik plastických deformací, ke kterým dojde v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. Tento děj je provázen fyzikálními změnami a změnami struktury materiálu, což ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu.

Výhodami tváření jsou vysoká produktivita práce, vysoké využití materiálu a velmi dobrá rozměrová přesnost tvářených výrobků. Nevýhodou je vyšší cena strojů a nástrojů a omezení rozměry konečného výrobku. Ke tváření se hodí jen materiály tvárné (plastické), tj. takové, které mají dobrou tvárnost, čili schopnost změnit působením vnějších sil trvale svůj tvar, aniž by se porušila jeho soudržnost; částice hmoty se jen trvale přemísťují.

Z hlediska působení vnějších sil se tváření kovů dělí na:

- *tváření objemové*, při kterém deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému a patří sem válcování, kování, protlačování, tažení drátů.
- *tváření plošné*, při kterém převládají deformace ve dvou směrech. Patří sem tažení, ohýbání, stříhání, apod.



a) Výkovek – Vidlice kovaná M20 [15]



b) Protlaček - Protlačovaný profil [16]



c) Výlisek – Výlisek pro elektroprůmysl [17]

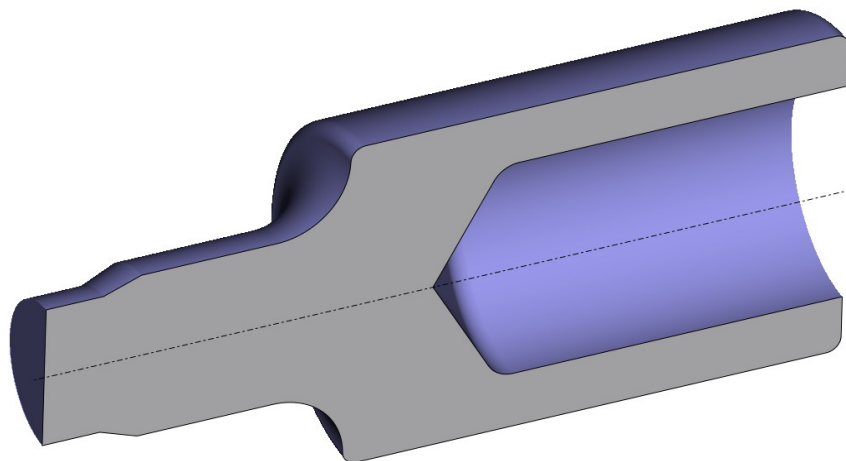


d) Ohýbaná součást – Trubka [18]

Obr. 1.1 Příklady tvářených součástí

2 Rozbor stávajících způsobů výroby

Zadaná součást je rotačního tvaru, jedná se o krátký hřídel z konstrukční oceli 12 122.3. Součást není nijak zvlášť členitá ani se nevyznačuje výraznými odlišnostmi od běžného tvaru hřídele. Rozměry hotového výrobku (vnější průměr 24mm a délka 56mm) dávají najevo, že výrobek je relativně malý a proto odpadají problémy s jeho manipulací.



Obr. 2.1 Model vyráběné součásti

Ocel 12 122 je ocel obvyklých jakostí vhodná ke tváření za studena a k chemicko tepelnému zpracování (cementování se střední pevností v jádře po kalení). Posuzujeme-li tuto ocel z hlediska obsahu uhlíku (0,13 - 0,2%), tak je tato ocel z tohoto hlediska vhodná k objemovému tváření za studena. K objemovému tváření se také používá v provedení 12 122.1R (s fosfátovaným povrchem nasyceným mýdlem a mazivem). Chemické složení této oceli a základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny níže v tab.2.1 a v tab 2.2.

Tab.2.1 Chemické složení oceli 12 122 [6]

Ocel ČSN 12 122	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]
	0,13 - 0,20	0,6 - 0,9	0,15 - 0,4	max 0,25

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti oceli 12 122 [6]

Mez kluzu R_{p0,2}	MPa	263,9
Mez pevnosti v tahu R_m	MPa	451,5
Tažnost A₅	%	38,8
Kontrakce Z	%	47,2

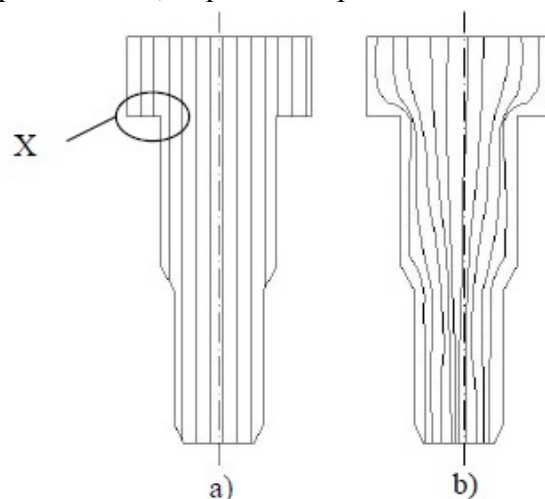
Podrobnější data k oceli 12 122.3 jsou uvedeny v příloze č.1. Jedná se o chemické složení, mechanické vlastnosti, strukturu a vyhodnocení tvaru vzorku po Taylorově testu, získané na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně.

2.1 Výrobní možnosti [1]

K výrobě součásti je možné využít dvě základní výrobní technologie, obrábění a tváření. Obrábění je jednoznačně vhodné pro kusovou výrobu, protože není nutné vyrábět drahou formu a nástroje. Obráběcí nástroje jsou většinou k dispozici ve výrobním podniku, případně je velmi snadné jejich rychlé dokoupení, dodavatelů je velké množství a každý se snaží nabídnout to nejlepší ze svého sortimentu, který je neustále vyvíjen a rozšiřován. V případě obrábění se také naskýtá možnost oddělit obrobek od základního materiálu až na obráběcí stroji (např. upichování) a odpadá tak operace dělení polotovaru v předvýrobě. Jako obráběcí stroj je možné využít běžně používané zařízení strojních dílen, jako univerzální (hrotový) soustruh, soustružnický automat nebo NC a CNC řízené soustruhy. V případě využití automatizovaných pracovišť je kladen důraz na tvar třísky, která má být co nejmenšího objemu z důvodu snadného odvádění od nástroje a následného zpracování (lisování).

Technologie tváření se řídí velmi známým pravidlem - zákonem stálosti objemu, což znamená, že objem tvářeného tělesa je roven objemu po přetvoření. V případě výroby zadané součásti je zřejmé, že prostým odhadem by obráběním vznikl odpad zhruba stejně hmotný, jako je samotná součást. Dalším důležitým faktem je, že přetvořený materiál má vyšší mez kluzu a mez pevnosti, takže lze pro daný účel použít méně hodnotného výchozího materiálu. Významné jsou také další vlastnosti, jako nepřerušovaný průběh vláken, zvýšení meze únavy a současně vznik příznivého systému pnutí. U třískového obrábění dochází během odebrání třísky k porušování průběhu vláken, viz obr. 2.2a – oblast X. Součást zhotovená objemovým tvářením má vlákna přizpůsobená tvaru součásti, viz obr. 2.2b. Také je velmi důležitá životnost nástrojů i produktivita, které jsou u tváření mnohem vyšší než u obrábění.

V případě sériové výroby dílce je tedy výhodnější hledat vhodný způsob výroby mezi možnostmi, které nabízí technologie tváření. Při pohledu na tvar součásti je zřejmé, že se bude jednat o objemové tváření a že zde nebude nutné používat nekonvenční metody, jako třeba elektromagnetické či elektrohydraulické tváření nebo tváření výbuchem trhaviny nebo plynu, ale že plně dostačující a zároveň také nejvhodnější metodou bude technologie protlačování. Rozměry součásti umožňují použít postupový tvářecí nástroj, ve kterém se budou kombinovat pýchování a dva základní způsoby protlačování, dopředné a zpětné.



Obr. 2.2 Průběh vláken tvářeného a obráběného tělesa
a) obráběná součást
b) tvářená součást

3 Technologie objemového tváření za studena [3], [4]

Výhody objemového tváření, reprezentované především značnou úsporou materiálu, snížením výrobních časů a potřebné energie, mají podstatný vliv na snížení výrobních nákladů při zlepšené kvalitě vyrobených součástí. Největších ekonomických efektů se dosahuje především objemovým tvářením za studena ve velkosériové a hromadné výrobě spojovacích a strojních součástí. Při objemovém tváření se výrazně mění tvar polotovarů za působení prostorové napjatosti, která vytváří podmínky pro velké plastické deformace – přetvoření, aniž dochází k porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Změna tvaru se dosáhne zpravidla kombinací různých základních způsobů tváření pýchováním a především různými způsoby protlačování. Převážně malé hmotnosti protlačovaných součástí dovolují zanedbat vliv setrvačných sil a rychlostí deformace a řešení provést analyticky za přibližně statických podmínek izotermických dějů.

3.1 Princip protlačování a vliv materiálu [4]

Protlačování je technologie, kterou můžeme provádět za tepla, za poloohřevu a za studena. Napjatost v přetvářeném elementu materiálu je trojosá, všestranné tlaková. Tvářený materiál se přemísťuje a jeho směr pohybu je určen konstrukcí nástroje – protlačovadla. Výrobek se nazývá protlaček. Tuto technologii je možno dělit do dvou skupin. První se týká výroby finálních výrobků, druhá výroby polotovarů (trubek, tyčí, profilů, apod.). Protlačování za studena je u lehkých a barevných kovů známo již přes 100 let. Tímto způsobem se vyráběly a vyrábějí např. tuby, nábojnice, apod. Zpětným protlačováním se také v současnosti vyrábějí bezešvé tlakové láhve na technické plyny.

Principem protlačování je deformace materiálu v důsledku působících sil do předem stanoveného směru s konečnými výhodnými mechanickými a rozměrovými vlastnostmi hotového výrobku. Protlačování je jedním z procesů, které přispěly k výraznému snížení vlastních nákladů ve výrobě, tedy i k racionalizaci výroby. Přesnost průtlačků je obvykle velmi vysoká ($\pm 0,05$ mm), takže není nutno před montáží průtlačky rozměrově upravovat. Také využití materiálu je vysoké, bývá 90 až 100 %.

Jakost a výchozí stav materiálu má výrazný vliv na technologii a proces protlačování. Vzhledem k velikosti přetvárných odporů jsou pro protlačování vhodné materiály s tažností větší než 10 % a kontrakcí větší než 50 % (oceli s obsahem uhlíku do 0,2 % C). Nevhodné jsou materiály, u kterých je nutno vynaložit specifický tvářecí tlak větší jak 2500 MPa a nebo nelze během jedné operace v důsledku chemického složení (tedy zpevnění) získat deformaci alespoň 25 %. Materiály s nízkou přetvárnou pevností, hliník a jeho slitiny, se dají protlačovat na jednu operaci. Oceli a ostatní kovy se protlačují na více operací. Někdy je potřeba provádět i mezioperační žíhání (nejdříve rekrystalizační a potom na měkko). Maximální redukce na jednu protlačovací operaci je omezena přípustným namáháním nástroje. Redukce u oceli např. s obsahem 0,1 % C je až 60 %. Před vlastním protlačováním je nutná úprava materiálu rovnáním a dělením na kaloty včetně tepelného zpracování. Následuje povrchová úprava.

3.2 Vliv tření na tvářecí proces [4], [7]

Při našich každodenních činnostech jsme doprovázeni jevem, který se nazývá tření. V případě většiny výrobních činností se jedná o nežádoucí jev a snažíme se ho minimalizovat, protože způsobuje opotřebení rotujících součástí, zvyšuje spotřebu energie nutné k dosažení trvalé deformace výrobku při tváření, způsobuje opotřebení nástrojů apod.

Tření ve tvářecím procesu výrazně ovlivňuje kvalitu výrobku a ekonomii výroby, a to zejména u ocelí – musí se provádět vhodná povrchová úprava, jinak dochází k suchému tření a zadření nástroje.

Povrchová úprava se skládá:

- z odstranění povrchových vad (otryskávání, broušení, moření u Al, ...),
- z chemického a mechanického čištění (omývání, sušení, ...),
- z fosfátování (fosfátovaný povrch má vysokou přilnavost k výchozímu materiálu, kterým je nejčastěji kotouč nebo kotouč s otvorem, tzv. kalota, což umožňuje mazání povrchu materiálu v důsledku pórovitosti fosfátované vrstvy při velkých tlacích, čehož bylo prvně použito ve 30 letech dvacátého století),
- z nanesení vrstvy maziva (např. ponořením do roztoku organického oleje a mýdla).

Velikost třecích sil dále závisí na drsnosti povrchu průtlačníku a průtlačnice a na jejich opotřebení v kritických místech. Někdy se jako mazivo u hutnického protlačování za tepla používá sklo vhodného chemického složení, které se při protlačování roztaví (nutnost odstranit sklovitou kůru). U neželezných kovů se používá tzv. košilka, tj. mezera mezi průtlačníkem a průtlačnicí o velikosti 2 až 4 mm, kam zateče materiál, který působí jako mazivo.

Protože se stále více hledí na hospodárnost výroby, vznikl samostatný vědní obor, který se zabývá problematikou tření, opotřebení a mazání – tribologie.

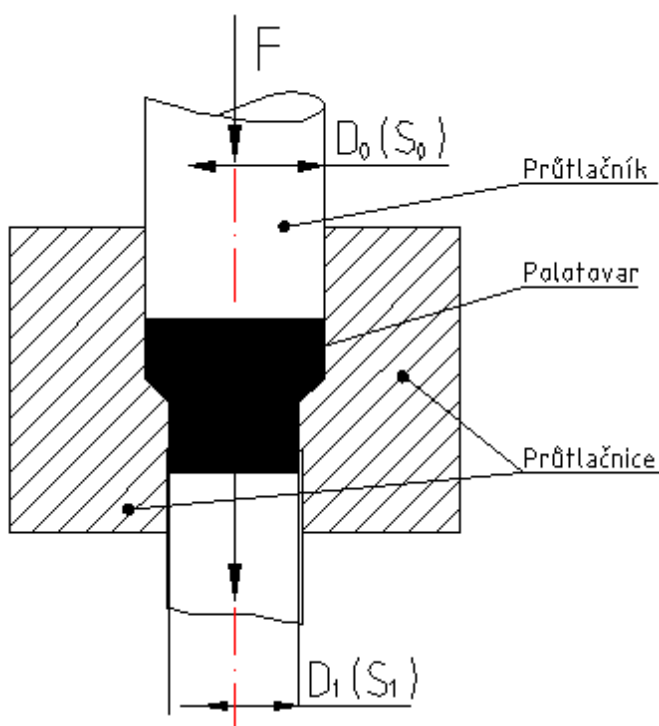
3.3 Rozdělení technologických způsobů protlačování

Podle směru a způsobu tečení materiálu v protlačovacím nástroji jsou rozeznávány tyto hlavní způsoby protlačování: dopředné, zpětné, stranové a sdužené.

3.3.1 Dopředné protlačování [1], [3], [4]

Dopředné (přímé) protlačování je základní technologií objemového tváření, při kterém kov vytéká z otvoru na výstupu z průtlačnice ve tvaru tyčí s různými průřezy. Při dopředném protlačování se materiál pohybuje ve stejném směru jako průtlačník. Výchozím polotovarem bývá kalota, získaná např. lisováním plechu nebo upichováním z tyčí. Používá se při tváření čepů, šroubů, pouzder, apod., tedy výrobků, u kterých není konstantní průřez.

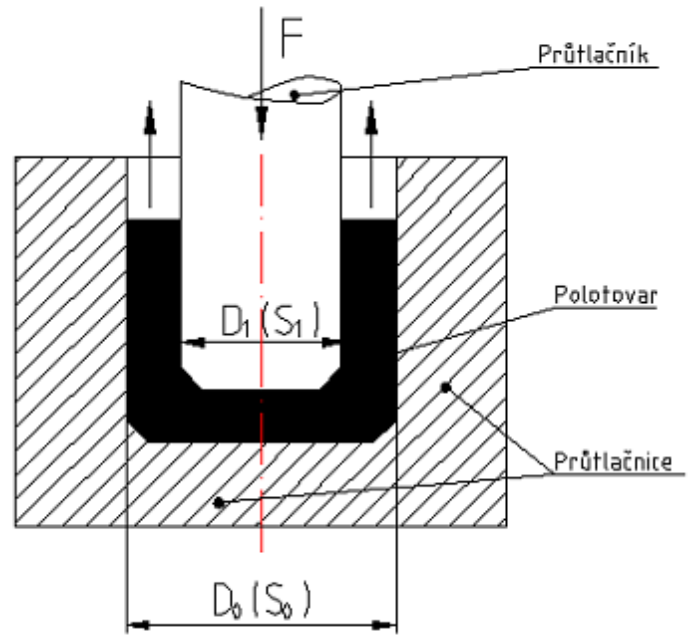
Při výrobě se velmi často dopředné protlačování sdužuje s pěchováním (při výrobě čepových součástí) nebo zpětným protlačováním (při výrobě miskovitých součástí). Výlisky zůstávají v dutině průtlačnice, odkud jsou odstraněny vyhazovačem nebo jedna součást protlačí druhou.



Obr. 3.1 Schéma technologie dopředného protlačování [4]

3.3.2 Zpětné protlačování [1], [5]

Při zpětném protlačování je výchozí materiál vložen do uzavřené průtlačnice a tlakem nástroje (průtlačníku) se zplastizuje. Během zpětného protlačování nastávají 3 fáze. V první fázi se plní mezera mezi stěnou průtlačnice a polotovarem. Ve druhé fázi dochází ke zpevnění materiálu pod průtlačníkem. Dochází ke tvorbě tzv. ohniska deformace. Ve třetí fázi je materiál pod průtlačníkem v plastickém stavu. Výchozí materiál je špalík, jehož výška je obvykle větší než polovina jeho průměru. Mezi průtlačníkem a průtlačnicí je mezera, ve které se materiál přemísťuje proti pohybu průtlačníku.

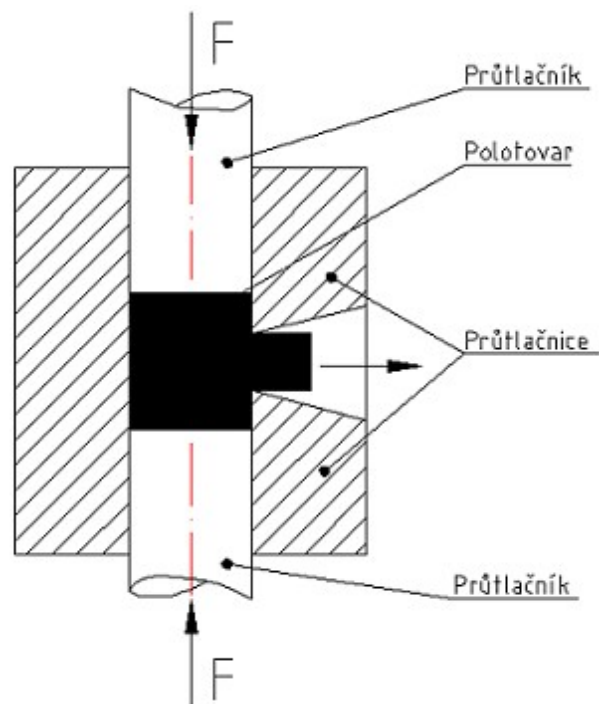


Obr. 3.2 Schéma technologie zpětného protlačování [4]

Součásti vyrobené touto technologií jsou kalíškového tvaru se dnem nebo průchozím otvorem, podle toho, zda byl polotovarem plný špalík nebo prstenec. Výlisky s plným dnem mohou mít různý průřez a různou tloušťku stěny. Nevýhodou této technologie je velký deformační odpor omezující funkční délku průtlačníku. Výlisky vyrobené touto technologií se používají v elektrotechnickém průmyslu, strojírenství, spotřebním průmyslu atd.

3.3.3 Stranové protlačování [5]

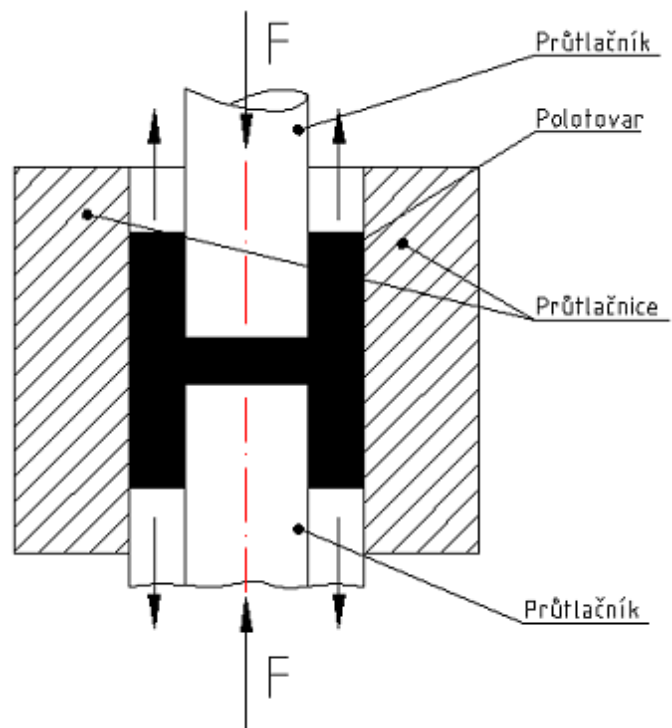
Tento způsob protlačování spočívá v tom, že se výchozí materiál vloží do průtlačnice, která je však dělená, a z obou stran je uzavřena průtlačníky tak, že se tvářený materiál přemísťuje pouze v radiálním směru (kolmém na osu průtlačníku) (viz. obr.3.3). Tato technologie se používá pro výrobu součástí s výstupky po obvodu, žeber, různě tvarově složitých přírub atd.



Obr. 3.3 Schéma technologie stranového protlačování [4]

3.3.4 Kombinované protlačování [5]

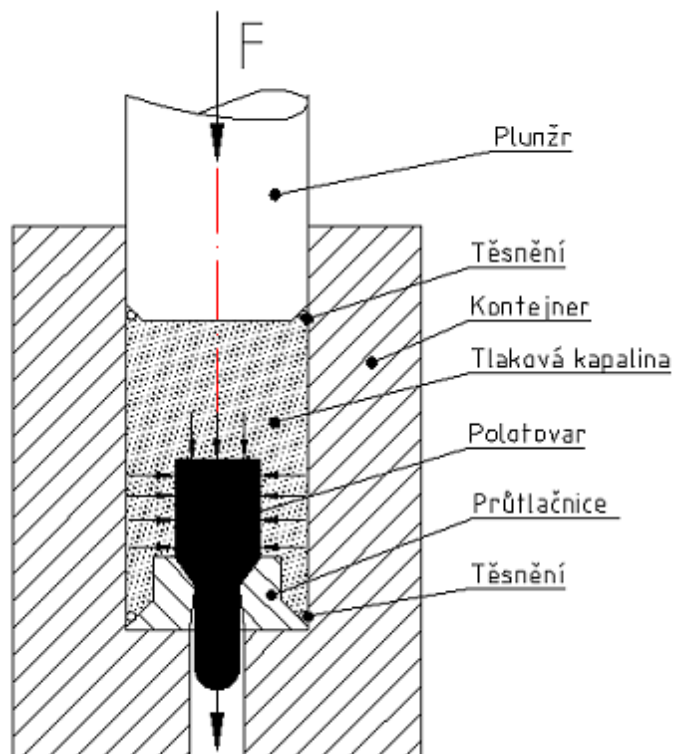
Tento způsob protlačování vznikne kombinací zpětného a dopředného protlačování. Část materiálu se přemísťuje před čelem průtlačníku a vyplňuje dutinu průtlačnice (dopředné protlačování) a část materiálu teče mezerou mezi průtlačníkem a průtlačnicí a vytváří tak stěnu nádoby (zpětné protlačování). Metoda je vhodná pro výrobu různě profilovaných součástí.



Obr. 3.4 Schéma technologie kombinovaného protlačování [4]

3.3.5 Hydrostatické protlačování [4]

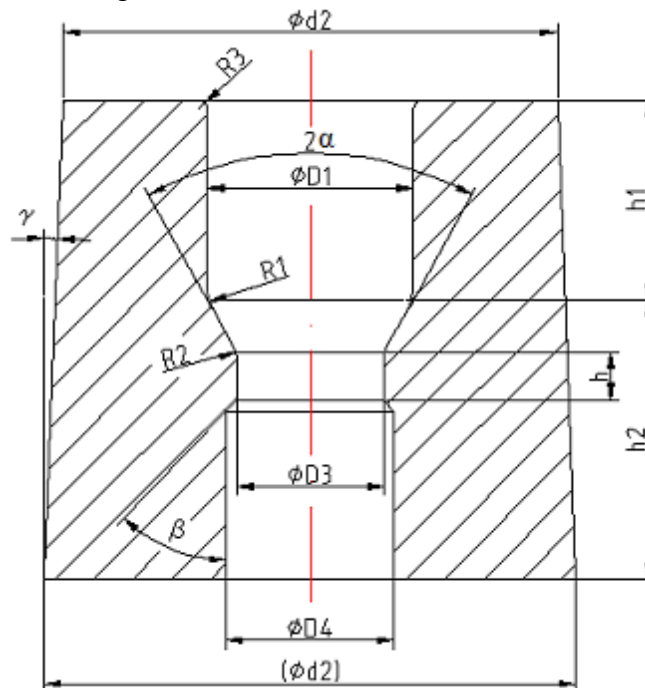
Hydrostatické protlačování je speciální druh protlačování, kdy je polotovár obklopen kapalinou o vysokém tlaku. Tím se v něm vytváří všestranné napětí a tvárnost materiálu se zvýší. Technologické možnosti hydrostatického protlačování jsou dnes již takové, že se může protlačovat již bez fosfatizační vrstvy, nebo např. výrobky plátované mědí. Hydrostatický tlak je až 3000 MPa. Přetvoření v jedné operaci může dosáhnout až 80 %.



Obr. 3.5 Schéma technologie hydrostatického protlačování [4]

c) Průtlačnice pro dopředné protlačování

Nejdůležitějším parametrem této průtlačnice je tvar a rozměry redukční části. Nejčastěji se používá redukční kužel. Tento kužel má významný vliv na velikost deformačního odporu. Válcová dutina pro uložení polotovaru má náběhový kužel nebo rádius pro snadnější zavedení polotovaru do válcového kontejneru. Výška tohoto kontejneru závisí na výšce polotovaru. Optimální je, aby horní okraj průtlačnice byl asi o 10 mm vyšší než horní okraj polotovaru z důvodů dobrého zavedení průtlačníku. Průměr kalibračního oka je dán průměrem součásti. Průtlačnice bývá odlehčena průměrem D_4 . Příčným dělením průtlačnice v oblasti přechodu mezi válcovým kontejnerem a redukčním kuzelem lze snížit vrubový účinek. Doporučený tvar průtlačnice ukazuje obr. 3.8 a její optimální rozměry jsou v tab. 3.1. Někdy jsou také používány objímky, které slouží ke zvýšení únosnosti průtlačnice. Zapouzdření průtlačnice je s přesahem buď na kuželovou plochu nebo s ohřevem objímky na válcovou plochu.



Obr. 3.8 Doporučený tvar průtlačnice pro dopředné protlačování [3]

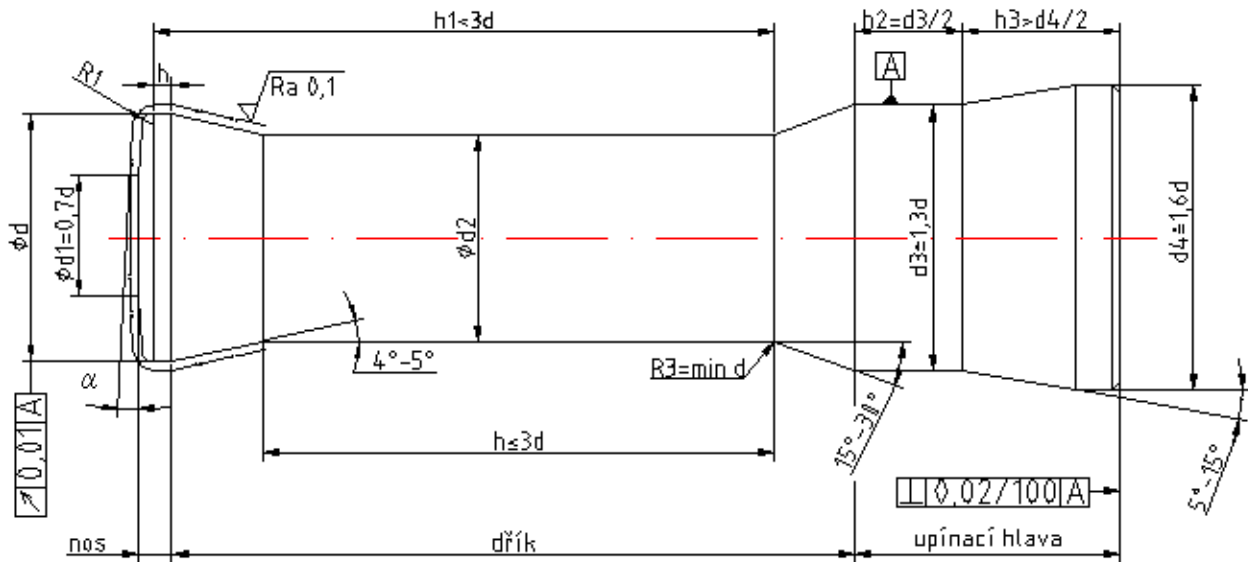
Tab. 3.1 Optimální rozměry průtlačnice [3]

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

3.4.2 Nástroje pro zpětné protlačování [3]

a) Průtlačník pro zpětné protlačování

Velmi důležitou částí průtlačníku pro zpětné protlačování je jeho čelo. Tvar čela totiž výrazně ovlivňuje průběh a velikost tvářecí síly. Čelo je obvykle mírného kuželovitěho tvaru a úhel α je nutné zvolit tak, aby vyhovoval tvaru průtlačku, ale i s přihlédnutím na tvářecí teplotu. Doporučený tvar průtlačníku ukazuje obr. 3.9, optimální rozměry ukazuje tab. 3.2.



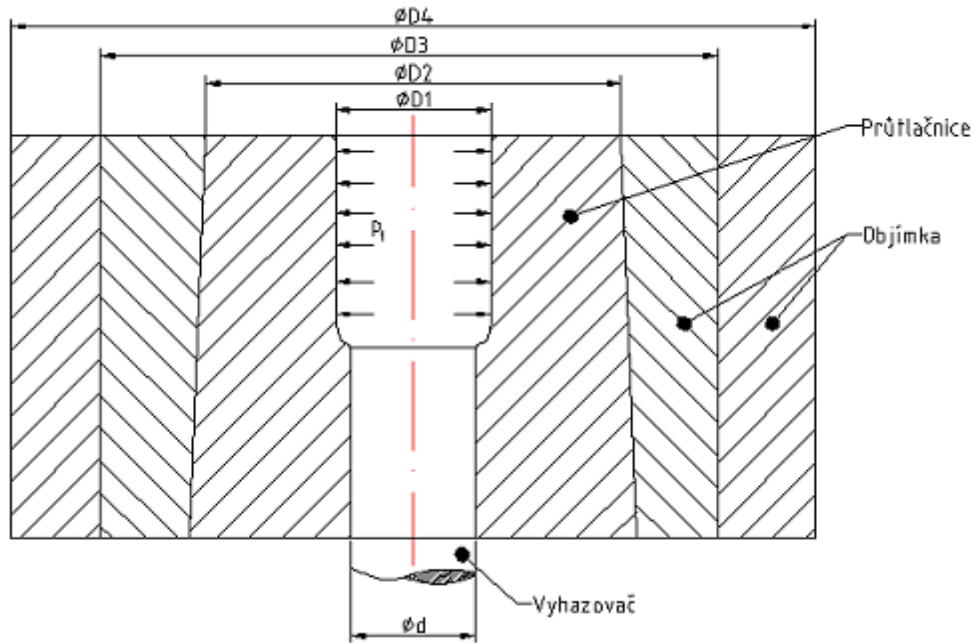
Obr. 3.9 Doporučený tvar průtlačníku pro zpětné protlačování [3]

Tab. 3.2 Optimální rozměry průtlačníků pro zpětné protlačování [3]

	Teplota zpětného protlačování		
	20°C	200 až 400°C	400 až 700°C
d	d-(0,1 až 0,2)	d-(0,2 až 0,5)	d-(0,3 až 0,6)
h	0,5.d	2 až 3 mm	3 až 5mm
α	5 až 8°C	5 až 15°C	5 až 15°C
R1	(0,05 až 0,1).d	1 až 3 mm	1 až 4 mm
d1	$d-(2.R1+0,2.d) = 0,7.d$		

b) Průtlačnice pro zpětné protlačování

Při zpětném protlačování nejčastěji vznikají součásti kalíškovitého tvaru. Tvar této protlačované součásti určuje tvar a rozměry funkční dutiny průtlačnice. Horní část otvoru průtlačnice je opatřen buď zaoblením nebo náběhem ve tvaru kužele, které slouží pro snadné zavedení polotovaru do tohoto otvoru. Snížení koncentrace radiálního napětí ovlivňuje zaoblení R_1 . Povrch dutiny je broušen a lapován. Radiálním předpětím pomocí objímků lze zvýšit únosnost průtlačnice. Průtlačnici bez objímky lze použít pro radiální tlak menší než 1000 MPa. Typické tvary průtlačnic a jejich pouzdření objímkami ukazuje obr. 3.10 a tab. 3.3.



Obr. 3.10 Tvar průtlačnice pro zpětné protlačování [3]

Tab. 3.3 Geometrické parametry průtlačnic [3]

Radiální tlak [MPa]	Průtlačnice	
	S jednou objímkou	Se dvěma objímkami
	1000 až 1600	1600 až 2000
Poměrné průměry	$D_2 / D_1 = 2$ až $2,2$	$D_2 / D_1 = 1,6$ až $1,8$
	$D_3 / D_2 = 2$ až $2,3$	$D_3 / D_1 = 2,2$ až $3,2$
	$D_3 / D_1 = 4$ až $5,5$	$D_4 / D_1 = 4$ až 6
Stykový průměr	$D_2 = \sqrt{D_3 \cdot D_1}$	-
Přesah [mm] D_2	(0,0055 až 0,0075) D_2	(0,004 až 0,005) D_2
Přesah [mm] D_3	-	(0,003 až 0,004) D_3

3.5 Materiály protlačovacích nástrojů [1]

Hospodárnost protlačování za studena je určena životností a cenou nástrojů. Při použití nevhodných ocelí k protlačování klesá životnost protlačovacích nástrojů. Z toho plyne důležitost jejich správné konstrukce a výběru vhodné nástrojové oceli. Při protlačování se velká většina nástrojů poruší únavovým lomem. Náhlý lom vznikne, pokud je špatná konstrukce nástroje nebo pokud tvářecí síla překročí dovolené zatížení nástrojů. K poruše nástrojů opotřebením dochází jen zřídka, protože nástroje jsou při protlačování velmi dobře mazány.

Správné zhotovení protlačovacích nástrojů má tři důležité etapy:

1. správná volba nástrojových ocelí
2. zpracování těchto ocelí
3. výpočet a konstrukce nástrojů

Požadavky na nástrojové oceli bývají velmi vysoké a obvykle se požadují tyto vlastnosti:

- a) odolnost proti tlakovému a rázovému zatížení
- b) dostatečná houževnatost
- c) odolnost proti opotřebení
- d) velká popouštěcí teplota
- e) dobrá obrobiteľnosť

Při volbě materiálu nástrojů se doporučuje volit nástrojovou ocel podle druhu oceli, která bude protlačována, podle způsobu protlačování (zpětné, dopředné, kombinované, stranové), podle velikosti deformace a obtížnosti tvaru vyráběné součásti. V každém případě se výběr nástrojové oceli řídí podle zatížení, kterým má být nástroj vystaven. Nejčastěji používané nástrojové oceli můžeme vidět v tab. 3.4. Základní vlastnosti nástrojových materiálů pro průtlačnice a objímky jsou uvedeny v příloze č.2.

Tab. 3.4 Nástrojové oceli pro objemové tváření [1]

Použití	Ocel dle ČSN	Chemické složení						
		C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W
Průtlačníky	19 436	1,95	0,50	0,50	12,00	...	0,15	...
	19 437	1,90	0,30	0,30	12,00	...	0,21	0,75
	19 800	0,80	0,50	0,50	4,00	...	1,85	8,75
	19 810	1,25	0,50	0,50	4,40	...	4,00	11,00
	19 824	0,70	0,20	0,25	4,15	...	1,30	17,50
	19 820	0,80	0,20	0,25	4,15	...	1,35	17,50
	19 733	0,56	0,22	1,02	1,10	...	...	1,90
Průtlačnice	19 721	0,30	0,35	0,32	2,35	...	0,20	9,25
	19 733	0,56	0,22	1,02	1,10	...	...	1,90
	19 614	0,55	0,45	0,45	0,75	2,55	0,60	...
	19 436	1,95	0,50	0,50	12,00	...	0,15	...
	19 437	1,90	0,30	0,30	12,00	...	0,21	0,75
	19 824	0,70	0,20	0,25	4,15	...	1,30	17,50
	19 826	0,80	0,20	0,25	4,15	...	1,30	17,50
	19 810	1,27	0,50	0,50	4,40	...	4,00	11,00
19 191	1,25	0,27	0,30	...	...	...	...

K protlačování se používají buď lisy různé konstrukce nebo také speciální protlačovací stroje. Pracovní diagramy tvářecích strojů jsou základním ukazatelem pro výběr vhodného stroje. Stroj volíme podle předem vypočítané tvářecí síly a práce. Stroje, které se používají k protlačování se dělí do tří základních skupin:

1. Mechanické lisy
2. Hydraulické lisy
3. Speciální stroje

Mechanické lisy

Tyto lisy jsou vhodné zejména pro výrobu velkých výlisků, na jejichž výrobu je zapotřebí značné tvářecí síly. Dále pro výlisky s maximálně dvěma tvářecími operacemi. Mezi výhody mechanických lisů patří zejména jejich tuhost, která má vliv na účinnost stroje, kvalitu výlisků a životnost nástrojů. Mezi tyto lisy patří zejména klikové, kolenové a výstředníkové lisy.

Klikové lisy jsou poháněny výkonným elektromotorem, jehož pohyb je uskutečněn pomocí převodu ozubených kol, spojky, klikového hřídele a ojnice s beranem lisu. V beranu lisu je upevněn tvářecí nástroj. Lis má obvykle dvojstojanovou konstrukci.

Kolenový lis je poháněn rovněž elektromotorem. Kroučící moment je přenášen na setrvačnickou spojku a klikovým hřídelem na kolenové ústrojí. Toto ústrojí pohybuje beranem lisu. Stojan tohoto lisu bývá ocelový odlitek. Tento typ lisu je určen pro poměrně malý zdvih a malou tvářecí práci. Jsou však vhodné pro určité tvářecí operace pro jejich charakteristickou špičku síly na konci zdvihu.

U výstředníkového lisu pohybuje beranem výstředník, který je přes spojku poháněn elektromotorem. Konstrukce lisu je jedno- nebo dvojstojanová.

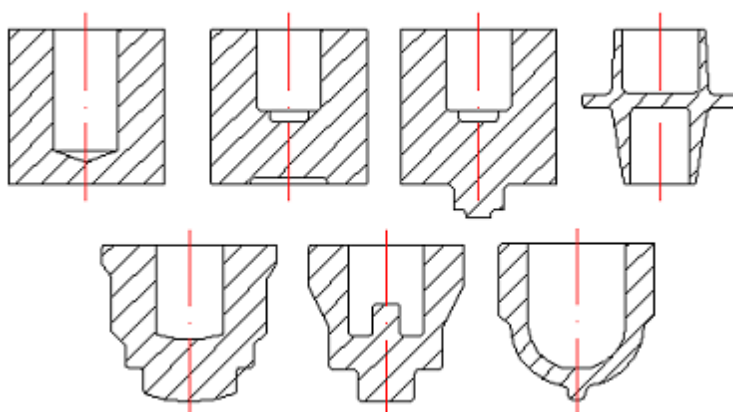
Hydraulické lisy

Beranem u těchto lisů pohybuje píst. Tento píst je poháněn tlakovou kapalinou z akumulátoru nebo přímo z čerpadla. Nejčastěji používaná kapalina je voda nebo hydraulický olej. Tyto lisy jsou určeny především pro protlačování rozměrných a především dlouhých výlisků. Dosahuje se na nich velkých tvářecích sil na dlouhé pracovní dráze. Výhodou oproti klikovým lisům je využití jmenovité tvářecí síly po dobu celého zdvihu. Nevýhodou je však malý počet zdvihů a malá pracovní rychlost.

3.7 Tvary vhodné k protlačování [1], [2]

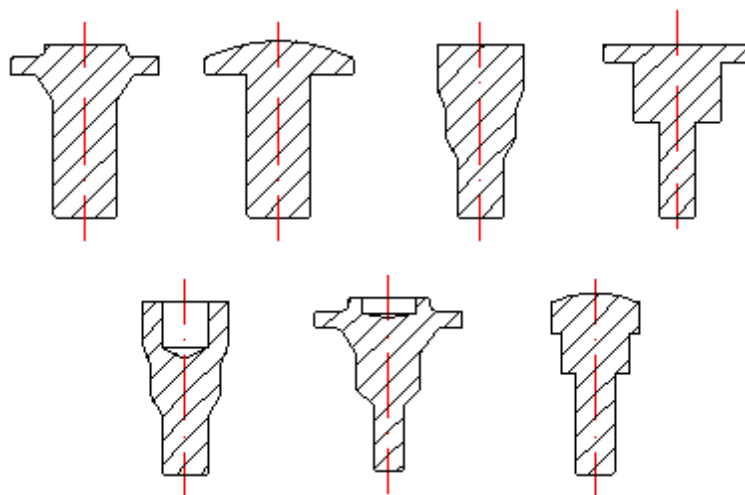
Součásti pro objemové tváření mohou být symetrické, nesymetrické, jednoduchého i složitějšího tvaru. Lze je vytvořit základními metodami (protlačování, pýchování) nebo jejich kombinacemi. Podle tvarových znaků je lze rozdělit do několika základních skupin:

a) součásti kalíškového tvaru (viz obr. 3.11) – tyto typy součástí jsou většinou vyráběny dopředným a zpětným protlačováním.



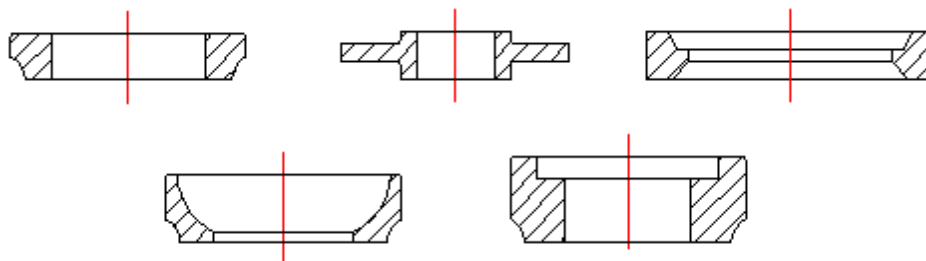
Obr. 3.11 Součásti kalíškového tvaru [1]

b) součásti čepového tvaru (viz obr. 3.12) – tyto typy součástí jsou ve většině případů vyráběny pěchováním, stranovým a dopředným protlačováním.



Obr. 3.12 Součásti čepového tvaru [1]

c) nízké rotační součásti s průchozím otvorem (viz obr. 3.13)



Obr. 3.13 Nízké rotační součásti [1]

V některých případech je možno vyrobit i součásti nesymetrické. K zavedení takové výroby je nutné provést řadu zkoušek. Také je možno do průtlačků vlisovat nebo nalisovat různé označení, výstupky, vypoukliny atd. Při návrhu vhodné technologie je nutné si uvědomit, že součásti určené pro stejné účely budou mít jiný tvar a rozměry při jejich výrobě jinou technologií než objemovým tvářením (obrábění, odlévání, svařování).

Tvar vyráběné součásti musíme volit s ohledem na: [1]

a) nahromadění materiálu – nutno vyhnout se nesymetrickému nahromadění materiálu a nebezpečným změnám příčného průřezu a náhlým přechodům od tenkých k tlustým stěnám. Při ponechání těchto přechodů musíme provést patřičné zaoblení těchto míst. V průběhu protlačování může materiál vybočovat. Toto tzv. „zaskřípnutí“ působící proti toku materiálu vede ke vzniku trhlin a prasklin, což způsobuje nadměrné namáhání nástrojů a snížení jejich životnosti.

b) náhlé přechody – vyráběná součást by neměla obsahovat žádné náhlé přechody, ostré hrany a rohy. Tyto prvky vedou ke zvýšení odporu toku materiálu. Všechny tyto prvky je nutno zaoblit.

c) místní zúžení

d) tvar – jelikož se nástroje skládají z průtlačníku, průtlačnice a vyhazovače, je výroba některých součástí určitého tvaru nemožná, např. vnější stěny výlisku musí být rovnoběžné se směrem pohybu nástroje.

e) kuželovitost – při výrobě kuželových součástí záleží na úhlu kužele. Je-li úhel kužele příliš velký, je rozdělení sil při tvářením nevýhodné. V tomto případě je výhodnější vyrobit součást válcovou a kužel vyrobit dodatečným obrobením.

f) otvory – jsou při protlačování omezeny minimálním průměrem. Otvory by při protlačování neměly být menší než 10 mm.

Rozměry součástí: [2]

Teoreticky není pro rozměry vyráběné součásti žádné omezení, avšak ve skutečnosti jsou rozměry protlačovaných součástí omezeny měrným tlakem nástrojů a tvářecí silou, kterou je třeba vynaložit a tudíž i tvářecím strojem. Dnes mohou být vyráběny součásti protlačované za studena až do průměru 160 mm a délky až 1500 mm. U dutých těles jsou výlisky omezeny tloušťkou stěny (minimální tloušťka stěny až 0,1 mm).

Výlisek malých rozměrů nelze vyrábět hospodárně na tvářecích strojích s velkou jmenovitou silou a dlouhou dráhou beranu. Z tohoto důvodu se výroba takto malých součástí řídí hlavně podle výrobních strojů, které jsou k dispozici.

4 Návrh technologie výroby součásti [1], [5], [12]

Shrnutí základních poznatků:

Součást svým tvarem a rozměry vyhovuje technologii objemového tváření a není třeba žádných konstrukčních úprav ani dodatečného jiného opracování. Technologický postup umožňuje vyrobit součást ve třech tvářecích operacích. Délka polotovaru $L > d$, proto se může pro přípravu polotovaru použít stříhání. Po stříhání se doporučuje ústřížek kalibrovat.

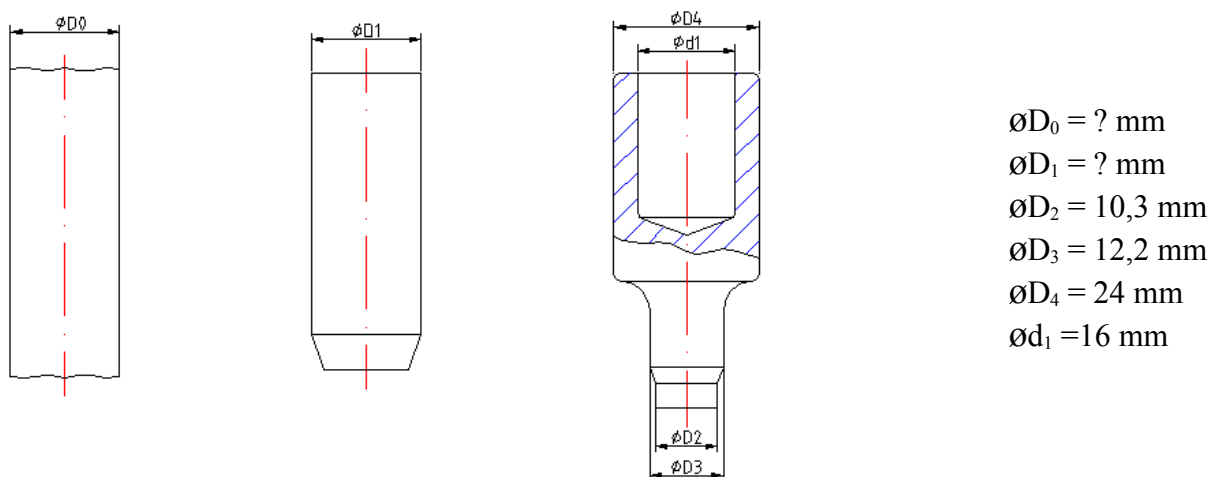
Při určování technologického postupu je nutné počítat se zasouváním jednotlivých polotovarů do následujících průtlačnic. Tato vůle se volí podle zkušenosti a počítá se zpět od konečného výlisku k výchozímu polotovaru. Rozměry polotovarů z každé jednotlivé tvářecí operace je nutno stanovit na základě stálosti objemu jednotlivých částí i celého výlisku.

Protlačování je možné provádět s průtlačnicí s redukčním kuzelem nebo bez něho. Nejmenší protlačovací tlaky lze očekávat při dobrém mazání (fosfátovaný povrch + mýdlový prášek a olej) pro redukční úhly $20^\circ - 30^\circ$. Redukční úhel značně ovlivňuje velikost deformačního odporu. Nejčastěji používaným tvarem redukční části je kužel, který je výrobně nejjednodušší.

Ke zvýšení únosnosti průtlačnice jsou používány objímky (bandáže), do nichž je průtlačnice zapouzdřena s přesahem buď na kuželovou plochu nebo s ohřevem objímky na kuželovou plochu. Používané přesahy se pohybují v rozmezí $4,5 - 5,5 \mu\text{m}$ na milimetr stykového průměru. Zděrování průtlačnic umožňuje vytvořit celek, který snese vysoké namáhání a zajišťuje jejich snadnou vyměnitelnost. Tyto průtlačnice lze použít pro vnitřní tlaky do 1600 MPa . Přesné rozměry průtlačnic a zděří se zjišťují pomocí výpočetní techniky v závislosti na vnitřním tlaku, materiálu nástroje a jeho tepelném zpracování.

Při návrhu technologie výroby je třeba brát v potaz různé varianty výroby. Protože jako vhodná technologie bylo již ze začátku určeno dopředné a zpětné protlačování za studena, je třeba pro tyto varianty navrhnout polotovar a dále se podle kladů a záporů rozhodnout pro nejhodnější způsob výroby. Pro tento případ je již nutné vypočítat objemy a délky špalíků, logaritmická přetvoření, rychlosti deformace, na základě kterých se stanoví deformační odpory, dále také potřebnou tvářecí sílu a práci.

4.1 Určení polotovaru součásti



Obr. 4.1 Postup pro výpočet polotovaru

$$\Phi_{\text{dířku}} = \Phi_{\text{hlavy}} \quad (4.1)$$

$$\Phi = \ln \frac{D_{\text{konečný}}^2}{D_{\text{výchozí}}^2} \quad (4.2)$$

Z uvedených vzorců lze vypočítat D_1 :

$$\Phi_{\text{dířku}} = \Phi_{\text{hlavy}}$$

$$\ln \frac{D_1^2}{D_9^2} + \ln \frac{D_9^2}{D_8^2} = \ln \frac{D_{10}^2}{D_1^2} + \ln \frac{D_{10}^2}{D_{10}^2 - d_2^2} \Rightarrow D_1 = 18,0 \text{ mm} \quad (4.3)$$

$$\ln \frac{18^2}{12,2^2} + \ln \frac{12,2^2}{10,3^2} = \ln \frac{24^2}{18^2} + \ln \frac{24^2}{24^2 - 16^2} \quad (4.4)$$

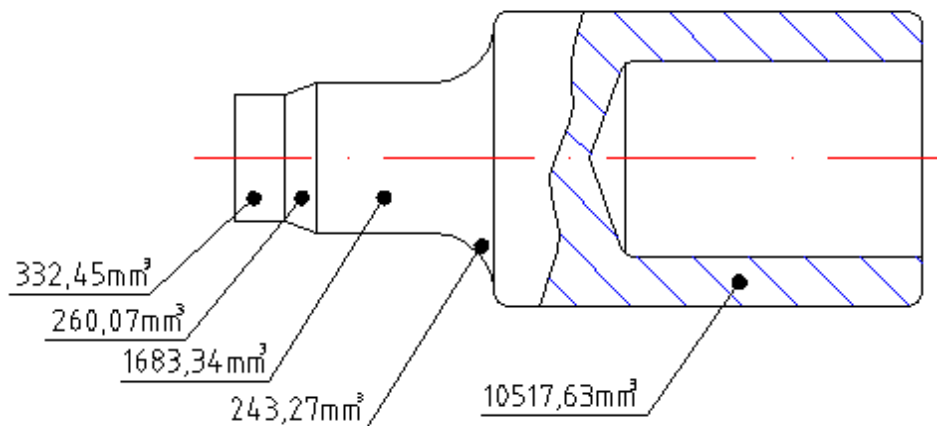
$$0,777 + 0,387 = 0,576 + 0,588$$

$$1,164 = 1,164$$

Skutečné deformace různých částí výrobku musí být co nejvíce shodné, aby došlo v každém místě výrobku ke stejnému zpevnění.

Výchozí polotovár je proto zvolen $D_0 = \text{Ø}18\text{h}10$.

Výpočet výšky válce (délka polotovaru)



Obr. 4.2 Výpočet objemu součásti

Celkový objem materiálu součásti je dle programu SOLID WORKS 2008 $1,3036 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$, dokazování pomocí matematických vztahů není součástí této práce.

$$h_0 = \frac{4 \cdot V_0}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 13036}{\pi \cdot 18^2} = 51,2 \text{ mm} \quad (4.5)$$

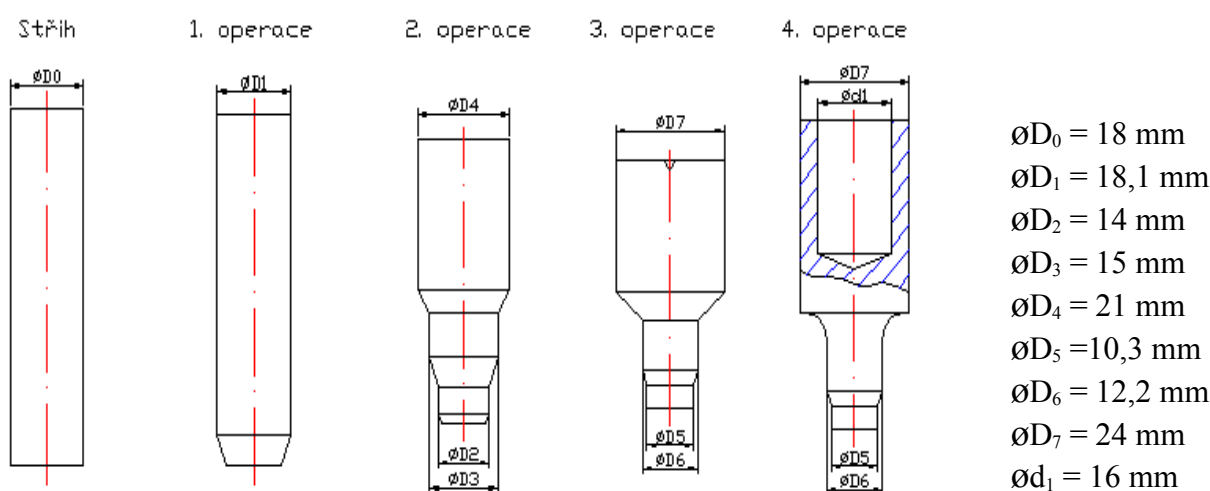
Polotovár je tedy dán těmito rozměry: $D_0 = \text{Ø}18\text{h}10$ a délka $h = 51,2 \text{ mm}$.

4.2 Možné varianty výroby součásti

a) varianta I:

Ustřížení polotovaru z tyče kruhového průřezu o průměru $D_0 = 18 \text{ mm}$

1. operace – Zarovnání čel po ustřížení a předpěchování na průměr D_1 , vytvoření středícího otvoru pro další operace.
2. operace – Dopředné protlačení průměrů D_2 a D_3 , zároveň částečné spěchování průměru D_4 .
3. operace – Dopředné protlačení průměrů D_5 a D_6 a spěchování průměru D_7 .
4. operace – Zpětné protlačení průměru d_1 .



Obr. 4.3 Schéma technologického postupu varianty I

Výpočet logaritmických přetvoření v jednotlivých operacích pro variantu I:

1. předpěchování:

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{18,1^2}{18^2} = 0,011 \quad (4.6)$$

2. dopředné protlačení dříku D_2 a D_3 a spěchování hlavy D_4

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_3^2} = \ln \frac{14^2}{15^2} = -0,138 \quad (4.7)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{15^2}{18,1^2} = -0,375 \quad (4.8)$$

$$\varphi_4 = \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{21^2}{18,1^2} = 0,297 \quad (4.9)$$

3. dopředné protlačení dřívku D_5 a D_6 a spěchování hlavy D_7

$$\varphi_5 = \ln \frac{D_5^2}{D_6^2} = \ln \frac{10,3^2}{12,2^2} = -0,338 \quad (4.10)$$

$$\varphi_6 = \ln \frac{D_6^2}{D_3^2} = \ln \frac{12,2^2}{15^2} = -0,413 \quad (4.11)$$

$$\varphi_7 = \ln \frac{D_7^2}{D_4^2} = \ln \frac{24^2}{21^2} = 0,267 \quad (4.12)$$

4. zpětné protlačení hlavy d_1

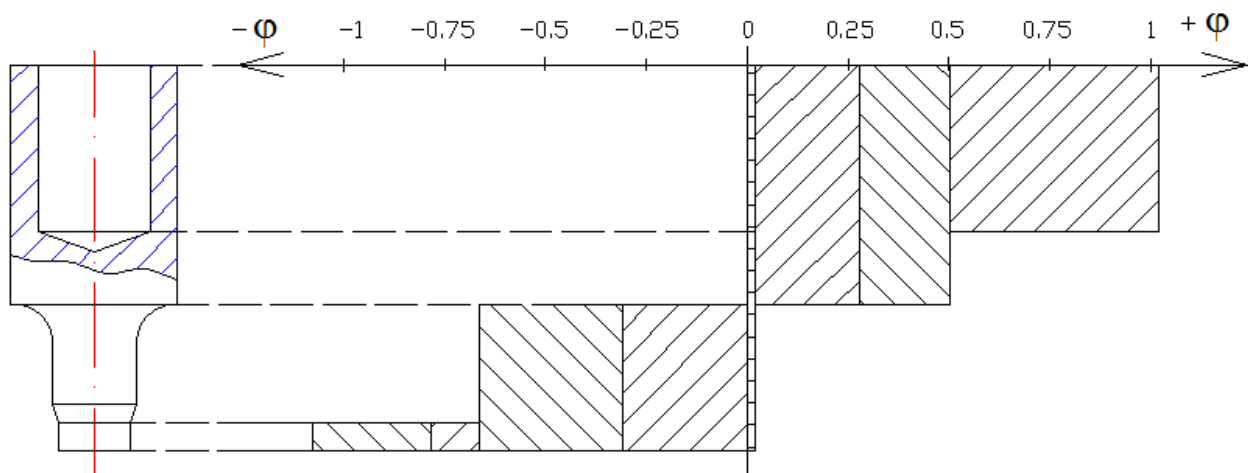
$$\varphi_8 = \ln \frac{D_8^2}{D_8^2 - d_1^2} = \ln \frac{24^2}{24^2 - 16^2} = 0,588 \quad (4.13)$$

Celkové přetvoření daných částí protlačku:

$$\varphi_{\text{hlavy}} = |\varphi_1| + |\varphi_4| + |\varphi_7| + |\varphi_8| = |0,011| + |0,297| + |0,267| + |0,588| = 1,163 \quad (4.14)$$

$$\varphi_{\text{dřívku } D_5} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_5| = |0,011| + |-0,138| + |-0,338| = 0,487 \quad (4.15)$$

$$\varphi_{\text{dřívku } D_6} = |\varphi_1| + |\varphi_3| + |\varphi_6| = |0,011| + |-0,375| + |-0,413| = 0,799 \quad (4.16)$$

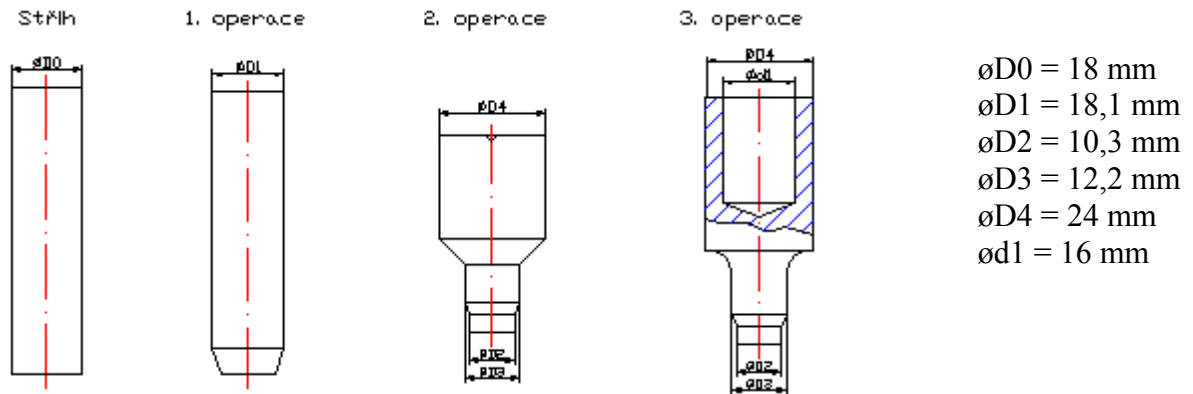


Obr. 4.4 Grafické znázornění hodnot logaritmického přetvoření variant I

b) varianta II:

Ustřížení polotovaru z tyče kruhového průřezu o průměru $D_0 = 18 \text{ mm}$

1. operace – Zarovnání čel po ustřížení a předpěchování na průměr D_1 , vytvoření středícího otvoru pro další operace.
2. operace – Dopředné protlačení průměrů D_2 a D_3 , zároveň spěchování průměru D_4 .
3. operace – Zpětné protlačení průměru d_1 .



Obr. 4.5 Schéma technologického postupu varianty II

Výpočet logaritmických přetvoření v jednotlivých operacích pro variantu II:

1. předpěchování:

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{18,1^2}{18^2} = 0,011 \quad (4.17)$$

2. dopředné protlačení dříku D_2 a D_3 a spěchování hlavy D_4

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_3^2} = \ln \frac{10,3^2}{12,2^2} = -0,338 \quad (4.18)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{12,2^2}{18,1^2} = -0,778 \quad (4.19)$$

$$\varphi_4 = \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{24^2}{18,1^2} = 0,564 \quad (4.20)$$

3. zpětné protlačení hlavy d_1

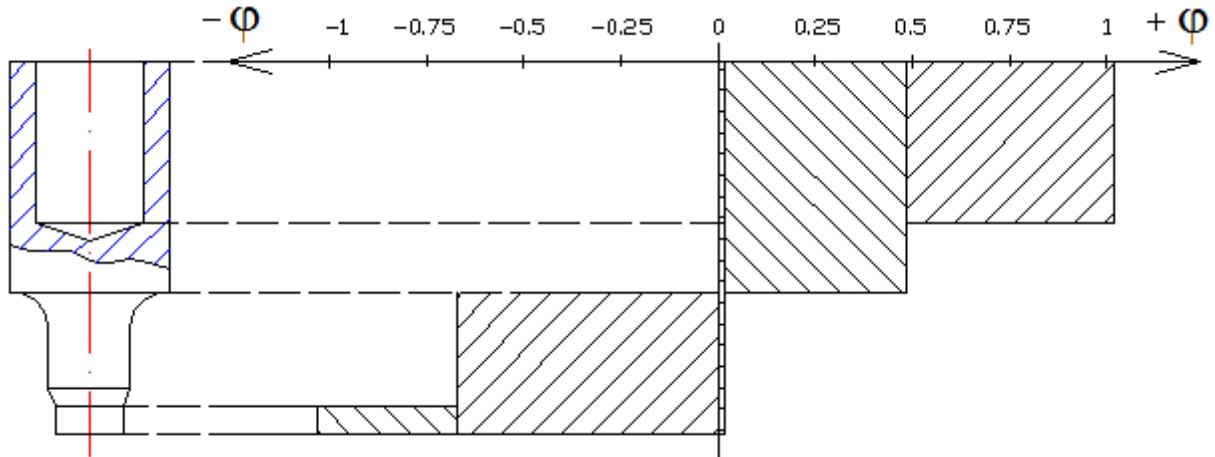
$$\varphi_5 = \ln \frac{D_4^2}{D_4^2 - d_1^2} = \ln \frac{24^2}{24^2 - 16^2} = 0,588 \quad (4.21)$$

Celkové přetvoření daných částí protlačku:

$$\varphi_{\text{hlavy}} = |\varphi_1| + |\varphi_4| + |\varphi_5| = |0,011| + |0,564| + |0,588| = 1,163 \quad (4.22)$$

$$\varphi_{\text{dířku D2}} = |\varphi_1| + |\varphi_3| = |0,011| + |-0,338| = 0,349 \quad (4.23)$$

$$\varphi_{\text{dířku D3}} = |\varphi_1| + |\varphi_2| = |0,011| + |-0,788| = 0,799 \quad (4.24)$$

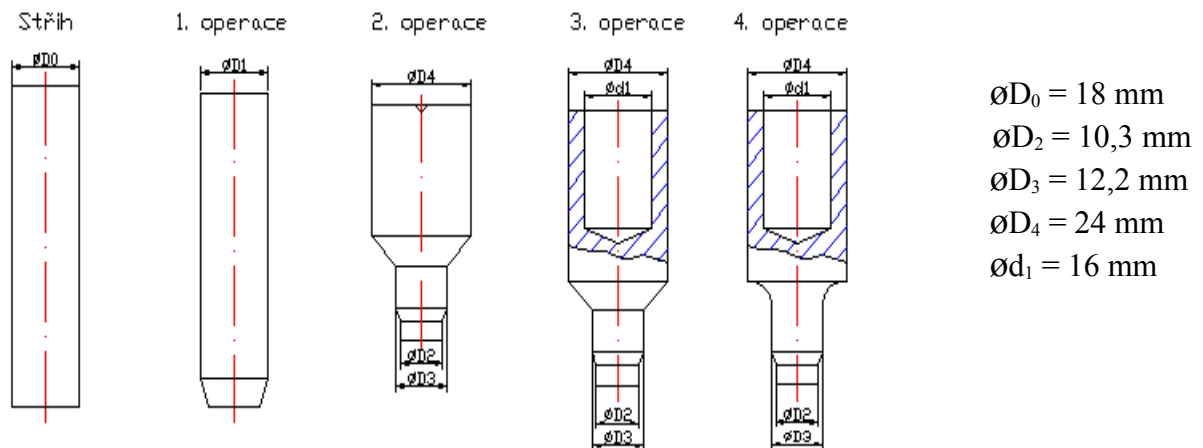


Obr. 4.6 Grafické znázornění hodnot logaritmického přetvoření variant I

c) varianta III:

Ustřížení polotovaru z tyče kruhového průřezu o průměru $D_0 = 18$ mm

1. operace – Zarovnání čel po ustřížení a předpěchování na průměr D_1 , vytvoření středícího otvoru pro další operace.
2. operace – Dopředné protlačení průměrů D_2 a D_3 , zároveň spěchování průměru D_4 .
3. operace – Zpětné protlačení průměru d_1 .
4. operace – Kalibrace protlačku

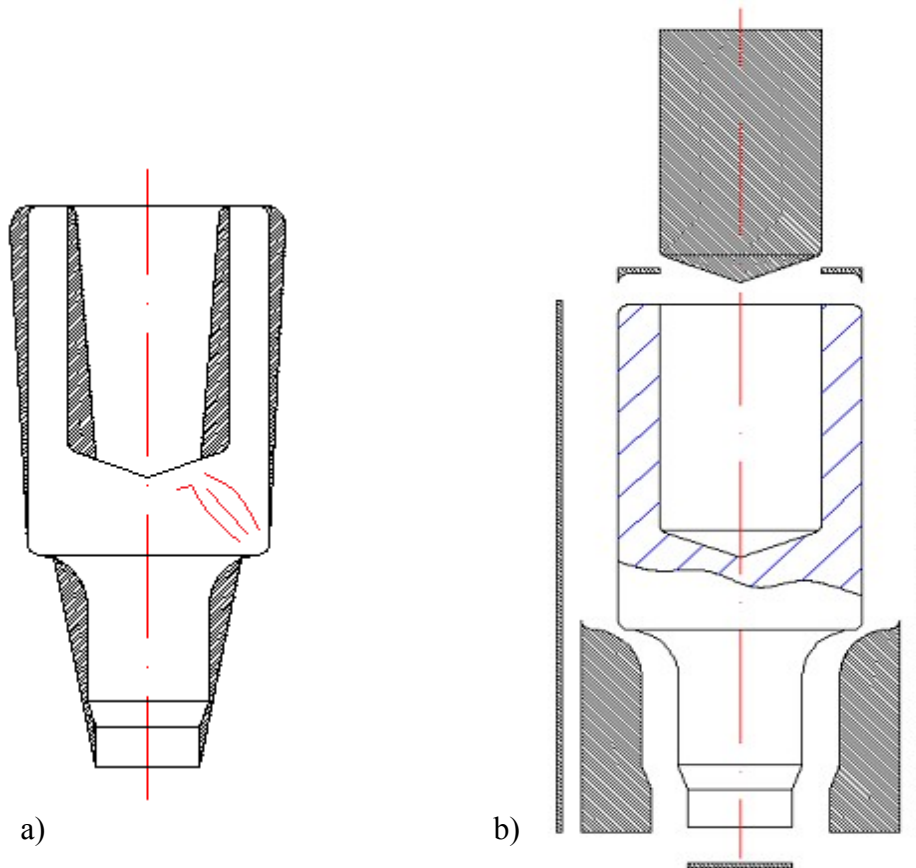


Obr. 4.7 Schéma technologického postupu varianty III

Varianta III je rozšířením varianty II o kalibraci protlačku, proto jsou výsledná logaritmická přetvoření prakticky shodná.

d) varianta IV:

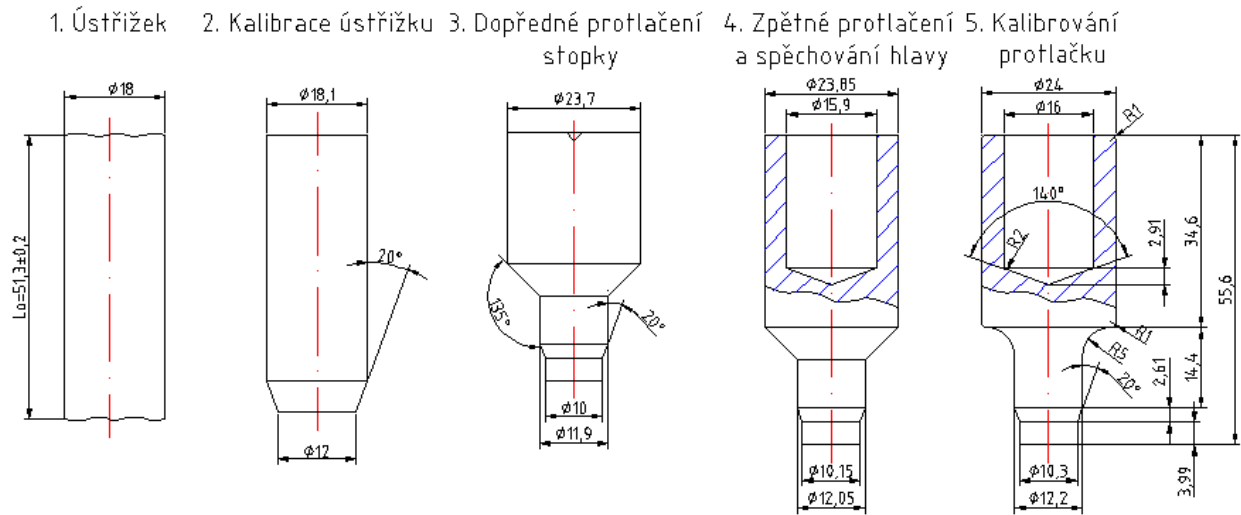
Protože bylo uvažováno i s možností výroby jinou technologií, jsou zde uvedeny také součásti získané zápusťkovým kovááním a třískovým obráběním. V případě kováání je možné, že z důvodu koncentrace napětí se budou v naznačeném místě projevovat trhliny, další nevýhodou je nutnost výkovek dále obrábět. Z náčrtu pro obrábění je zřejmé, že velkou nevýhodou je mimo jiné množství prakticky nevyužitelného odpadu. S těmito způsoby výroby nebude dále pracováno.



Obr. 4.8 Výroba součásti a) kovááním
b) obráběním

Srovnání variant a výběr nejvhodnější

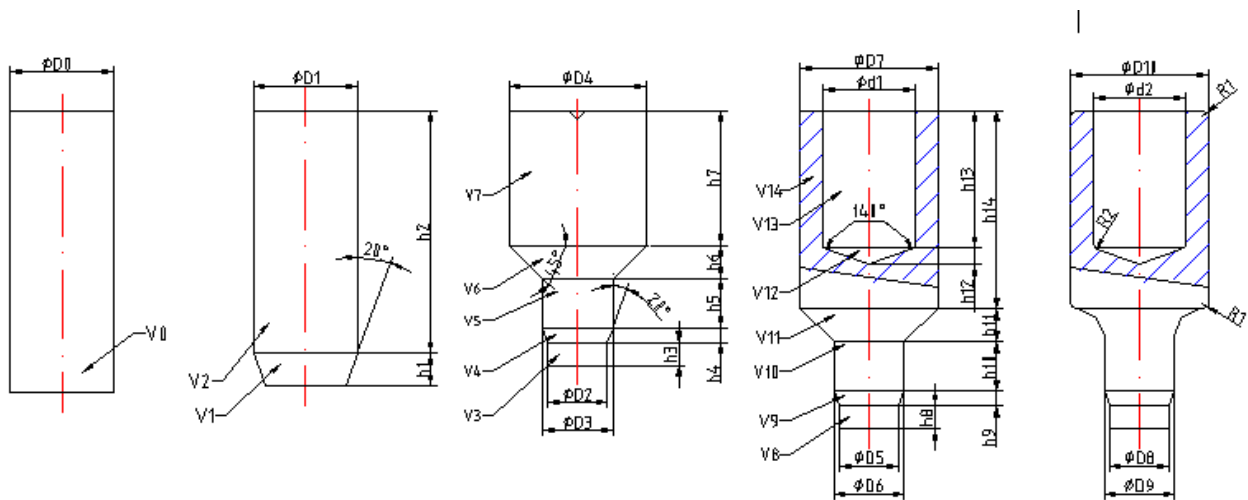
Zpevnění součásti v celém objemu je třeba mít co nejvíce rovnoměrné. Při srovnání výsledných přetvoření je zřejmé, že zpevnění hlavy a dřívku je prakticky stejné u všech variant. Proto bylo rozhodnuto součást vyrábět variantou III na čtyři tvářecí operace, kdy konečné rozměry budou získány kalibrací protlačku.



Obr. 4.9 Technologický postup výroby součásti dle varianty III

4.3 Výpočet délky a objemu jednotlivých tvářených částí

Při výpočtech délkových rozměrů ve všech operacích se vychází z toho, že objem součásti zůstává v každé operaci konstantní.



Obr. 4.10 Schéma výpočtu jednotlivých délek částí protlačku pomocí objemů

Operace 1 – kalibrace ústřížku a předpěchování

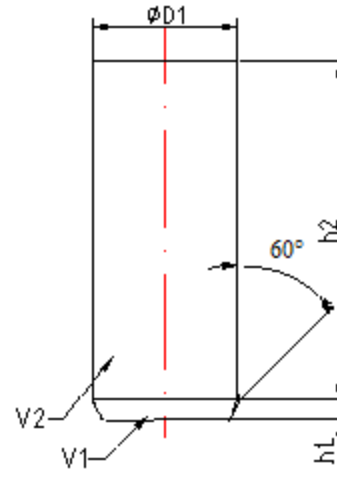
$$h_1 = \frac{18,1 - 14}{2 \cdot \tan 60^\circ} = 1,18 \text{ mm}$$

$$V_1 = \frac{\pi \cdot h_1}{3} \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) =$$

$$= \frac{\pi \cdot 1,18}{3} \cdot (9,05^2 + 9,05 \cdot 7 + 7^2) = 240 \text{ mm}^3$$

$$V_2 = V_0 - V_1 = 13\,036 - 240 = 12\,796 \text{ mm}^3$$

$$h_2 = \frac{4 \cdot V_2}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot 12\,796}{\pi \cdot 18,1^2} = 49,7 \text{ mm}$$



Operace 2 – dopředné protlačování dříku a spěchování hlavy

$$h_3 = 3,75 \text{ mm}$$

$$V_3 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot h_3 = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 3,75 = 294,5 \text{ mm}^3$$

$$h_4 = 2,35 \text{ mm}$$

$$V_4 = \frac{\pi \cdot 2,35}{3} \cdot (5,95^2 + 5,95 \cdot 5 + 5^2) = 221,8 \text{ mm}^3$$

$$h_5 = 8,58 \text{ mm}$$

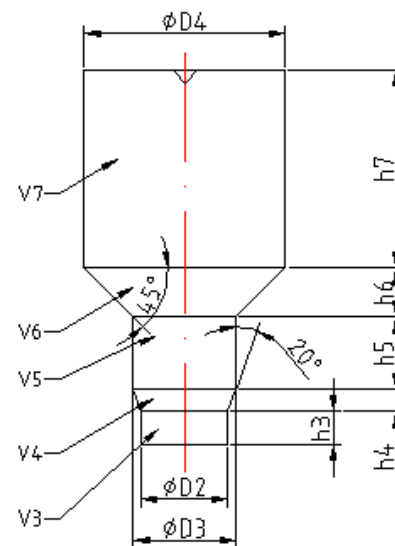
$$V_5 = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \cdot h_5 = \frac{\pi \cdot 11,9^2}{4} \cdot 8,58 = 954,3 \text{ mm}^3$$

$$h_6 = 5,83 \text{ mm}$$

$$V_6 = \frac{\pi \cdot 5,83}{3} \cdot (11,8^2 + 11,8 \cdot 5,95 + 5,95^2) = 1\,494,8 \text{ mm}^3$$

$$V_7 = V_0 - V_3 - V_4 - V_5 - V_6 = 13\,036 - 294,5 - 221,8 - 954,3 - 1\,494,8 = 10\,070,6 \text{ mm}^3$$

$$h_7 = \frac{4 \cdot V_7}{\pi \cdot D_4^2} = \frac{4 \cdot 10\,070,6}{\pi \cdot 23,7^2} = 22,83 \text{ mm}$$



Operace 3 – zpětné protlačení hlavy

$$h_8 = 3,85 \text{ mm}$$

$$V_8 = \frac{\pi \cdot D_5^2}{4} \cdot h_8 = \frac{\pi \cdot 10,15^2}{4} \cdot 3,85 = 311,5 \text{ mm}^3$$

$$h_9 = 2,47 \text{ mm}$$

$$V_9 = \frac{\pi \cdot 2,47}{3} \cdot (6,03^2 + 6,03 \cdot 5,08 + 5,08^2) = 240 \text{ mm}^3$$

$$h_{10} = 8,7 \text{ mm}$$

$$V_{10} = \frac{\pi \cdot D_6^2}{4} \cdot h_{10} = \frac{\pi \cdot 12,05^2}{4} \cdot 8,7 = 992,2 \text{ mm}^3$$

$$h_{11} = 5,95 \text{ mm}$$

$$V_{11} = \frac{\pi \cdot 5,95}{3} \cdot (11,9^2 + 11,9 \cdot 6,03 + 6,03^2) = 1\,556 \text{ mm}^3$$

$$h_{12} = 2,75 \text{ mm}$$

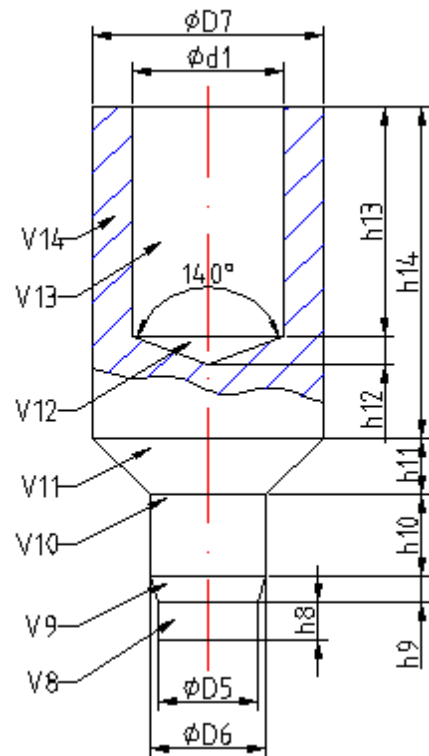
$$V_{12} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot h_{12} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot 7,95^2 \cdot 2,75 = 182 \text{ mm}^3$$

$$h_{13} = 23,85 \text{ mm}$$

$$V_{13} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot h_{13} = \frac{\pi \cdot 15,9^2}{4} \cdot 23,85 = 4\,735,6 \text{ mm}^3$$

$$V_{14} = V_0 - V_8 - V_9 - V_{10} - V_{11} = 13\,036 - 311,5 - 240 - 992,2 - 1\,556 = 9\,936,3 \text{ mm}^3$$

$$V_{12} + V_{13} + V_{14} = \frac{\pi \cdot D_7^2}{4} \cdot h_{14} \Rightarrow 14\,854 = \frac{\pi \cdot 23,85^2}{4} \cdot h_{14} \Rightarrow h_{14} = 33,25 \text{ mm}$$



4.4 Výpočet tvářecí síly a práce

Při výpočtu rychlosti deformace v každé operaci je nutné nejdříve spočítat rychlost pohybu nástroje v_0 . Tato rychlost je závislá na druhu použitého stroje a je dána vztahem:

$$v_0 = \frac{s}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot n \cdot h_{\text{beranu}}}{t \cdot 10^3} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (4.25)$$

kde s je celková dráha beranu
 n je počet zdvihů beranu za minutu

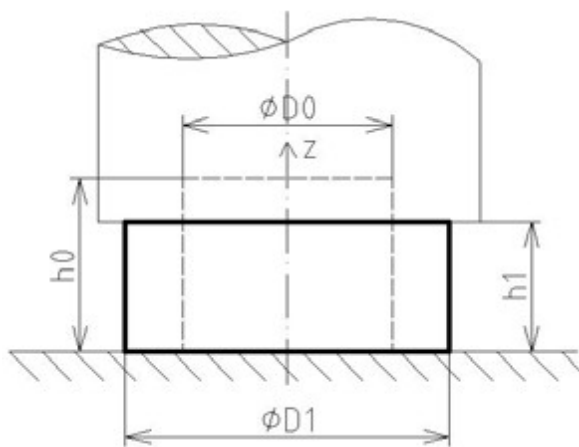
$$v_0 = \frac{s}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 55 \cdot 220}{60 \cdot 10^3} = \underline{0,403 \text{ m s}^{-1}} \quad (4.26)$$

Tato vypočítaná rychlost bude dále vystupovat ve výpočtech rychlosti deformace pro každou operaci.

A. Výpočet rychlosti deformace

1. operace - kalibrace ústřížku a předpěchování

Při spěchování polotovaru na průměr D_1 bude největší rychlost deformace při výšce přechovaného špalíku h_1 .



$$\begin{aligned} \text{ø}D_0 &= 18 \text{ mm} \\ \text{ø}D_1 &= 18,1 \text{ mm} \\ h_0 &= 51,2 \text{ mm} \\ h_1 &= 50,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

Obr. 4.11 Geometrický model přechování [8]

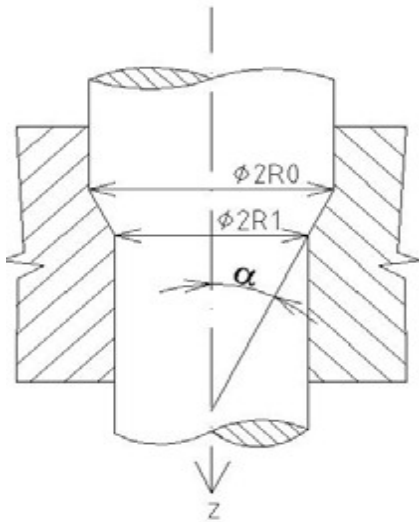
Maximální rychlost přetvoření v osovém směru:

$$\varphi_z = \frac{v_0}{h_1} = \frac{0,403}{0,0508} = \underline{7,9 \text{ s}^{-1}} \quad (4.27)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\varphi_r = - \frac{\varphi_z}{2} = - \frac{7,9}{2} = \underline{-3,95 \text{ s}^{-1}} \quad (4.28)$$

2. operace – dopředné protlačování dříku a spěchování hlavy



a) $R_0 = 9,05 \text{ mm}$
 $R_1 = 6,02 \text{ mm}$
 $\alpha = 45^\circ$

b) $R_0 = 6,02 \text{ mm}$
 $R_1 = 5,1 \text{ mm}$
 $\alpha = 20^\circ$

Obr. 4.12 Geometrický model dopředného protlačování [8]

a) Dřík D_2

Maximální rychlost přetvoření v osové směru:

$$\varphi_z = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{R_0^2}{R_1^3} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 2 \cdot 0,403 \cdot \frac{0,00602^2}{0,0051^3} \cdot \operatorname{tg} 20 = \underline{80,1 \text{ s}^{-1}} \quad (4.29)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\varphi_r = - \frac{\varphi_z}{2} = - \frac{80,1}{2} = \underline{-40 \text{ s}^{-1}} \quad (4.30)$$

b) Dřík D_3

Maximální rychlost přetvoření v osové směru:

$$\varphi_z = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{R_0^2}{R_1^3} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 2 \cdot 0,403 \cdot \frac{0,00905^2}{0,00602^3} \cdot \operatorname{tg} 45 = \underline{302,6 \text{ s}^{-1}} \quad (4.31)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\varphi_r = - \frac{\varphi_z}{2} = - \frac{302,6}{2} = \underline{-151,3 \text{ s}^{-1}} \quad (4.32)$$

c) Hlava D_4

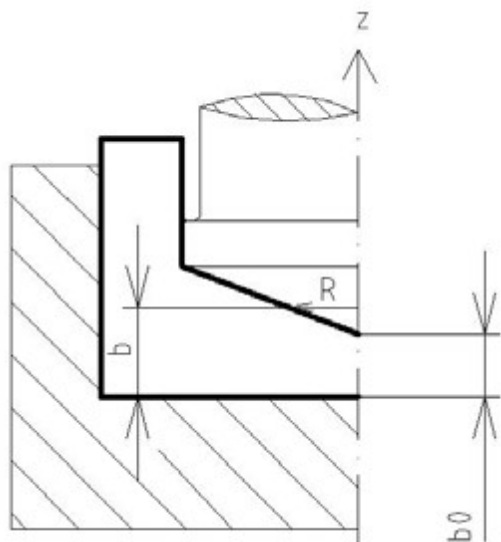
Maximální rychlost přetvoření v osové směru:

$$\varphi_z = \frac{v_0}{h_1} = \frac{0,403}{0,0228} = \underline{17,7 \text{ s}^{-1}} \quad (4.33)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\varphi_r = - \frac{\varphi_z}{2} = - \frac{17,7}{2} = \underline{-8,85 \text{ s}^{-1}} \quad (4.34)$$

3. operace – zpětné protlačení hlavy



$$\begin{aligned} R &= 0 \text{ mm} \\ \alpha &= 20^\circ \\ b_0 &= 10,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

Obr. 4.13 Geometrický model zpětného protlačování [8]

Maximální rychlost přetvoření v osovém směru:

$$\varphi_z = - \frac{v_0}{R \cdot \text{tg}\alpha + b_0} = - \frac{0,403}{0 \cdot \text{tg}20 + 0,0106} = \underline{-38 \text{ s}^{-1}} \quad (4.35)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\varphi_r = \frac{v_0}{2 \cdot R \cdot \text{tg}\alpha + b_0} = \frac{0,403}{2 \cdot 0 \cdot \text{tg}20 + 0,0106} = \underline{19 \text{ s}^{-1}} \quad (4.36)$$

Jelikož tvářecí děj v každé operaci není děj kvazistatický, musí se při výpočtech uvažovat s rychlostmi deformace v dané operaci. Se zvyšující se rychlostí deformace narůstá přirozený přetvárný odpor materiálu. Pro výpočet přetvárných odporů lze použít polytropu, polynom 3. a 5. stupně nebo konstitutivní rovnici Johnson – Cook (JC). S touto rovnicí bude dále pracováno a její zpracování, získané počítačovou simulací kompresního testu programem MKP LS DYNA 3D na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně, je přílohou č.2. Základní parametry, které jsou potřebné ve výpočtech, jsou uvedeny v tab. 4.1.

Materiálový model JC byl vyvinut v 80. letech pro studium rázu, průstřelu a problematiky výbušnin a záhy se stal velice populární pro studium problému vysokých rychlostí deformace a vysokých přetvoření. Jedním z důvodů bylo to, že Johnson a Holmquist publikovali materiálová data pro nejpoužívanější materiály a pro uživatele tak odpadla náročná fáze identifikace materiálových parametrů. [9]

Zpevnění tohoto materiálového modelu je závislé na rychlosti deformace podle vztahu

$$\sigma_p = (\sigma_0 + B \cdot \dot{\varphi}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varphi}^*) \cdot [1 - (T^*)^m] \quad [\text{MPa}] \quad (4.37)$$

kde σ_0 , B, C, n, m představuje 5 experimentálně stanovených parametrů.

Homologická teplota je dána vztahem

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad [\text{K}, \text{°C}] \quad (4.38)$$

kde T_0 je referenční teplota (teplota okolí) při statické mezi kluzu $\sigma = \sigma_0$
 T_m je teplota tavení

Tab. 4.1 Parametry konstitutivní rovnice JC pro ocel 12 122.3 [6]

σ_0	460
B	506
C	0,05
n	0,35
m	0,7
T_0	20
T_m	1500
T	23

B. Výpočet tvářecí síly

Homologická teplota bude pro všechny varianty stejná, proto je vypočítána předem.

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \frac{23 - 20}{1520 - 20} = 0,002 \Rightarrow (T^*)^m = \underline{0,013 \text{ °C}} \quad (4.39)$$

0. operace - stříh

Zadané hodnoty:

$$D_0 = 18 \text{ mm}$$

$$h = 51,2 \text{ mm}$$

$$R_m = 452 \text{ MPa}$$

Střižná síla:

$$F = (1,15 - 1,30) \cdot S \cdot \tau_{ps} \quad [\text{N}] \quad (4.40)$$

kde τ_{ps} je deformační odpor ve stříhu; $\tau_{ps} = 0,8 \cdot R_m$ [MPa]

$$F_1 = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \tau_{ps} = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot 18^2}{4} \cdot 0,8 \cdot 452 = 94\,515 \text{ N} = \underline{120 \text{ kN}} \quad (4.41)$$

1. operace - kalibrace ústřížku a předpěchování

Znamé hodnoty:

$$\varphi = 0,011$$

$$D_0 = 18 \text{ mm}$$

$$D_1 = 18,1 \text{ mm}$$

$$h_0 = 51,2 \text{ mm}$$

$$h_1 = 50,8 \text{ mm}$$

$$\Delta H = 0,4 \text{ mm}$$

$$f = 0,04$$

$$\varphi^* = 7,9 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor dle vztahu 5.4 pro $\varphi = 0,011$:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \varphi^*) \cdot [1 - (T^*)^m] = \\ &= (460 + 506 \cdot 0,011^{0,35}) \cdot (1 + 0,05 \cdot \ln 7,9) \cdot [1 - 0,013] = \underline{613 \text{ MPa}}\end{aligned}\quad (4.42)$$

Deformační odpor podle Siebla: [2]

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot d}{h}\right) = 613 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 18,1}{50,8}\right) = \underline{616 \text{ MPa}}\quad (4.43)$$

Pěchovací síla:

$$F_2 = \sigma_d \cdot S = 616 \cdot \frac{\pi \cdot 18,1^2}{4} = \underline{158,5 \text{ kN}}\quad (4.44)$$

Pěchovací práce:

$$A_2 = F \cdot \Delta H = 158\,500 \cdot 0,004 = \underline{634 \text{ J}}\quad (4.45)$$

2. operace – dopředné protlačování dříku a spěchování hlavy

a) Dřík D₂

Zadané hodnoty:

$$\varphi = 0,338$$

$$D_0 = 11,9 \text{ mm}$$

$$D_1 = 10 \text{ mm}$$

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

$$f = 0,04$$

$$\varphi^* = 80,1 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor dle vztahu 5.4 pro $\varphi = 0,338$:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \varphi^*) \cdot [1 - (T^*)^m] = \\ &= (460 + 506 \cdot 0,338^{0,35}) \cdot (1 + 0,05 \cdot \ln 80,1) \cdot [1 - 0,013] = \underline{970 \text{ MPa}}\end{aligned}\quad (4.46)$$

Deformační odpor podle Feldmanna: [2]

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sigma_p \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \cdot \ln \frac{D_1^2}{D_3} + \frac{2}{3} \cdot \alpha \right] + 4 \cdot f_2 \cdot \frac{D_3 \cdot l_3}{D_1^2} \cdot \sigma_p + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{l_1}{D_1} \cdot \sigma_p = \\ &= 970 \cdot \left[\left(1 + \frac{0,04}{1,047} \right) \cdot \ln \frac{11,9^2}{10} + \frac{2}{3} \cdot 1,047 \right] + 4 \cdot 0,04 \cdot \frac{10 \cdot 8,58}{11,9^2} \cdot 970 + \\ &+ 4 \cdot 0,04 \cdot \frac{22,8}{11,9} \cdot 970 = \underline{1\,180 \text{ MPa}}\end{aligned}\quad (4.47)$$

Protlačovací síla:

$$F_3 = \sigma_d \cdot S = 1\,180 \cdot \frac{\pi \cdot 18,1^2}{4} = \underline{303 \text{ kN}}\quad (4.48)$$

Protlačovací práce:

$$A_3 = F \cdot \Delta H = 303\,000 \cdot 0,004 = \underline{1\,212 \text{ J}}\quad (4.49)$$

b) Dřík D_3

Zadané hodnoty:

$$\varphi = 0,778$$

$$D_0 = 18,1 \text{ mm}$$

$$D_1 = 11,9 \text{ mm}$$

$$h = 8,58 \text{ mm}$$

$$f = 0,04$$

$$\varphi^* = 302,6 \text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor dle vztahu 5.4 pro $\varphi = 0,778$:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \varphi^*) \cdot [1 - (T^*)^m] = \\ &= (460 + 506 \cdot 0,778^{0,35}) \cdot (1 + 0,05 \cdot \ln 302,6) \cdot [1 - 0,013] = \underline{1\,174 \text{ MPa}}\end{aligned}\quad (4.50)$$

Deformační odpor podle Feldmanna: [2]

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sigma_p \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \right] + 4 \cdot f_2 \cdot \frac{D_3 \cdot l_3}{D_1^2} \cdot \sigma_p + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{l_1}{D_1} \cdot \sigma_p = \\ &= 1174 \cdot \left[\left(1 + \frac{0,04}{0,697} \right) \cdot \ln \left(\frac{18,1}{11,9} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,697 \right] + 4 \cdot 0,04 \cdot \frac{11,9 \cdot 8,58}{18,1^2} \cdot 1174 + \\ &+ 4 \cdot 0,04 \cdot \frac{22,8}{18,1} \cdot 1174 = \underline{1\,878 \text{ MPa}}\end{aligned}\quad (4.51)$$

Protlačovací síla:

$$F_4 = \sigma_d \cdot S = 1\,878 \cdot \frac{\pi \cdot 18,1^2}{4} = \underline{483\text{ kN}} \quad (4.52)$$

Protlačovací práce:

$$A_4 = F \cdot \Delta H = 483\,000 \cdot 0,00858 = \underline{4\,144\text{ J}} \quad (4.53)$$

c) Hlava D₄

Znamé hodnoty:

$$\varphi = 0,564$$

$$D_0 = 18,1\text{ mm}$$

$$D_1 = 23,7\text{ mm}$$

$$h_1 = 22,8\text{ mm}$$

$$\Delta H = 8\text{ mm}$$

$$f = 0,04$$

$$\varphi^* = 17,7\text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor dle vztahu 5.4 pro $\varphi = 0,564$:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \varphi^*) \cdot [1 - (T^*)^m] = \\ &= (460 + 506 \cdot 0,564^{0,35}) \cdot (1 + 0,05 \cdot \ln 17,7) \cdot [1 - 0,013] = \underline{983\text{ MPa}} \end{aligned} \quad (4.54)$$

Deformační odpor podle Siebla: [2]

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot d}{h}\right) = 983 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 23,7}{22,8}\right) = \underline{1\,105\text{ MPa}} \quad (4.55)$$

Pěchovací síla:

$$F_5 = \sigma_d \cdot S = 1\,105 \cdot \frac{\pi \cdot 23,7^2}{4} = \underline{487\text{ kN}} \quad (4.56)$$

Pěchovací práce:

$$A_5 = F \cdot \Delta H = 487\,000 \cdot 0,008 = \underline{3\,896\text{ J}} \quad (4.57)$$

3. zpětné protlačení hlavy

Znamé hodnoty:

$$\varphi = 0,588$$

$$D_0 = 23,85\text{ mm}$$

$$D_1 = 24\text{ mm}$$

$$h = 24\text{ mm}$$

$$f = 0,04$$

$$\varphi^* = 38\text{ s}^{-1}$$

Přirozený přetvárný odpor dle vztahu 5.4 pro $\varphi = 0,588$:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \varphi^*) \cdot [1 - (T^*)^m] = \\ &= (460 + 506 \cdot 0,588^{0,35}) \cdot (1 + 0,05 \cdot \ln 38) \cdot [1 - 0,013] = \underline{1\,024 \text{ MPa}}\end{aligned}\quad (4.58)$$

Deformační odpor dle Siebla: [2]

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sigma_p \cdot 1,152 \cdot \frac{D^2}{d^2} \cdot \left(\log \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{D^2}{D^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right) \\ \sigma_d &= 1024 \cdot 1,152 \cdot \frac{24^2}{16^2} \cdot \left(\log \frac{24^2}{24^2 - 16^2} + \frac{24^2}{24^2 - 16^2} \cdot \log \frac{24^2}{16^2} + \log \frac{16^2}{24^2 - 16^2} \right) = \\ &= 2947 \cdot (0,255 + 1,8 \cdot 0,352 - 0,097) = \underline{2\,332 \text{ MPa}}\end{aligned}\quad (4.59)$$

Protlačovací síla:

$$F_6 = \sigma_d \cdot S = 2\,332 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = \underline{469 \text{ kN}}\quad (4.60)$$

Protlačovací práce:

$$A_6 = F \cdot \Delta H = 469\,000 \cdot 0,024 = \underline{11\,256 \text{ J}}\quad (4.61)$$

Celková tvářecí síla:

$$F_c = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 = 120 + 158 + 303 + 483 + 487 + 469 = \underline{2\,020 \text{ kN}}\quad (4.62)$$

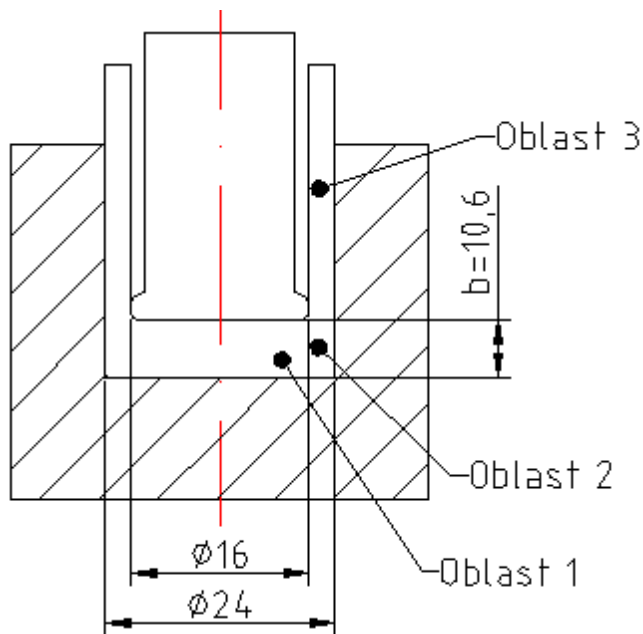
Celková tvářecí práce:

$$A_c = A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 = 634 + 1\,212 + 4\,144 + 3\,896 + 11\,256 = \underline{21\,142 \text{ J}}\quad (4.63)$$

4.5 Výpočet radiálního tlaku

Při návrhu nástroje pro zpětné protlačování se vychází z radiálního tlaku, který působí na stěny lisovnice. Jak již bylo uvedeno, při radiálním tlaku do 1000 MPa není nutné objímku používat. Při radiálním tlaku 1000 až 1600 MPa je nutné dimenzovat lisovnici pro jednu objímku a při radiálním tlaku 1600 až 2000 MPa se už musí použít objímky dvě.

Při výpočtu radiálního tlaku se používají vztahy podle Dippera [3]. Deformační odpor potřebný k výpočtu tvářecí síly je ale počítán podle Siebelova vztahu, který je vhodný pro kalíšky s tloušťkou stěny větší než je desetina průměru. Proto je nutné porovnat vypočtený deformační odpor dle Siebela s deformačním odporem dle Dippera. Tímto srovnávacím koeficientem se vynásobí radiální tlak vypočtený dle Dippera a získá se tak radiální tlak pro Siebela.



Obr. 4.14 Zpětné protlačování podle Dippera [3]

Logaritmická přetvoření v jednotlivých oblastech podle Dippera:

$$\varphi_1 = \ln \frac{h_0}{b} = \ln \frac{15,9}{10,6} = 0,405 \quad (4.64)$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8,8}\right) = 0,405 \cdot \left(1 + \frac{16}{8,4}\right) = 0,607 \quad (4.65)$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_1 = 0,607 - 0,405 = 0,202 \quad (4.66)$$

$$\varphi_{2s} = \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} = \frac{0,405 + 0,607}{2} = 0,506 \quad (4.67)$$

Přirozený přetvárný odpor dle JC konstitutivní rovnice pro φ_1 a φ_{2s} :

$$\begin{aligned} \sigma_{p1} &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \varphi^*) \cdot [1 - (T^*)^m] = \\ &= (460 + 506 \cdot 0,405^{0,35}) \cdot (1 + 0,05 \cdot \ln 38) \cdot [1 - 0,013] = \underline{965 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (4.68)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p2s} &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \varphi^*) \cdot [1 - (T^*)^m] = \\ &= (460 + 506 \cdot 0,506^{0,35}) \cdot (1 + 0,05 \cdot \ln 38) \cdot [1 - 0,013] = \underline{862 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (4.69)$$

Deformační odpor podle Dippera:

$$f_1 = 0,7$$

$$f_2 = 0,5$$

$$\begin{aligned} \sigma_{dDipper} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f_1 \cdot d}{b}\right) + \sigma_{p2s} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2s} \cdot b}{D-d}\right) &= 965 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,7 \cdot 16}{10,6}\right) + \\ + 862 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10,6}{24-16}\right) &= \underline{3\,308 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (4.70)$$

Radiální tlak dle Dippera:

$$\sigma_{r2} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot f_{2s} \cdot b}{D-d}\right) = 965 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 10,6}{24-16}\right) = \underline{2\,557 \text{ MPa}} \quad (4.71)$$

Porovnání deformačního odporu podle Dippera a Siebela:

$$\frac{\sigma_{dDipper}}{\sigma_{dSiebel}} = \frac{3308}{2332} = 1,42 \quad (4.72)$$

Tímto poměrem lze vydělit radiální tlak získaný ze vztahu podle Dippera a výsledkem bude hledaný odhad radiálního tlaku pro deformační odpor podle Siebela:

$$\sigma_{r2Siebel} = \frac{\sigma_{dDipper}}{1,42} = \frac{2557}{1,42} = \underline{1\,800 \text{ MPa}} \quad (4.73)$$

Radiální tlak na stěnu průtláčnice pro 3. tvářecí operaci vyšel 1800 MPa. Proto bude nutné lisovnici zapouzdřit do dvou objímek.

4.6 Nástroj a výkresová dokumentace

Součástí této práce je zpracování těchto výkresů:

- sestava postupového nástroje č.v. DP – 05 – 2012 – 01
- kusovník sestavy nástroje č.v. DP – 05 – 2012 – 02
- průtláčnice pro druhou operaci – dopředné protlačení stopky č.v. DP – 05 – 2012 – 03
- průtláčnicku pro třetí operaci – zpětné protlačení hlavy č.v. DP – 05 – 2012 – 04
- výkres součásti č.v. DP – 05 – 2012 – 05

a) průtláčnick

Návrh průtláčnicku vychází z české normy ČSN 22 7005 „Protlačování ocelí za studena“. Jsou zde mimo jiné stanoveny formální postupy určování technologických parametrů dopředného protlačování. Jde zejména o deformaci, protlačovací tlak a sílu atd. Materiál průtláčnicku je zvolen ČSN 19 830. Mechanické vlastnosti udává tab. 4.2.

Tab. 4.2 Nástrojové oceli pro objemové tváření [10]

Materiál	HRC	E	Rm	Rp0,2	σ_{dov}
19830	62	220000	1665	1480	1425

Rozměrový výpočet:

$$d = 15,9 \text{ h7} = 15,9_{0,015}^0 \text{ mm}$$

$$d_1 = 0,7 \cdot d = 0,7 \cdot 15,9 = 11,1 \text{ mm}$$

$$d_2 = d_1 - (0,1 \text{ až } 0,2) = 15,9 - 0,2 = 15,7 \text{ mm}$$

$$d_3 = 1,3 \cdot d_1 = 1,3 \cdot 15,9 = 20,7 \text{ mm}$$

$$d_4 = 1,6 \cdot d_1 = 1,6 \cdot 15,9 = 25,4 \text{ mm}$$

$$R_1 = 2 \text{ mm}$$

$$R_2 = 0,3 \cdot (d_4 - d_3) = 0,3 \cdot (25,4 - 20,7) = 1,4 \text{ mm}$$

$$R_3 = \min d_1 = 20 \text{ mm}$$

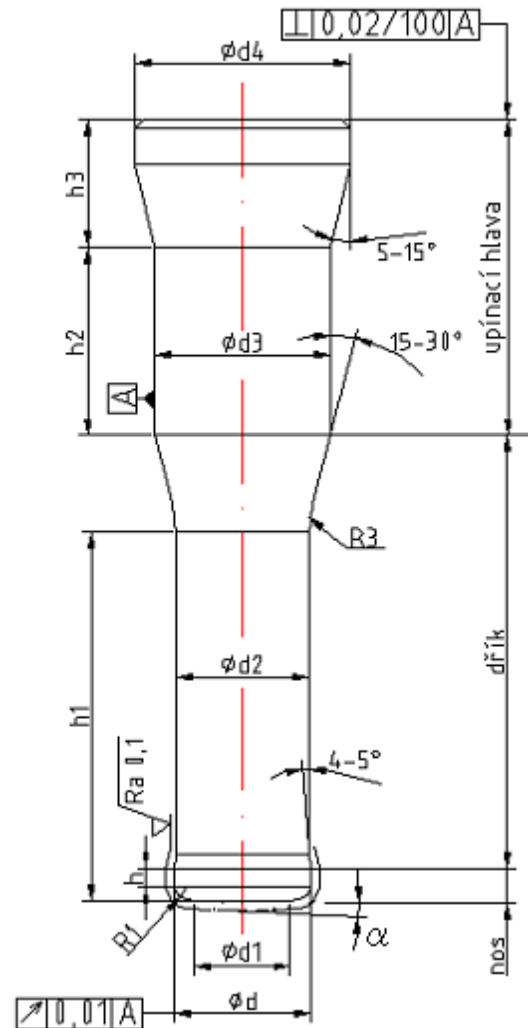
$$h = 0,5 \cdot \sqrt{D_1} = 0,5 \cdot \sqrt{15,9} = 2 \text{ mm}$$

$$h_1 = 3 \cdot d_1 = 3 \cdot 15,9 = 45 \text{ mm}$$

$$h_2 = \frac{d_3}{2} = \frac{20,7}{2} = 10,4 \Rightarrow (22 \text{ mm})$$

$$h_3 \cong \frac{d_4}{2} = \frac{25,4}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$\alpha_{20^\circ\text{C}} = 5^\circ \text{ až } 8^\circ \Rightarrow \alpha = 5^\circ$$



Obr. 4.15 Určení rozměrů průtlačníku pro zpětné protlačování dle ČSN 22 7005 [10]

Upínací část průtlačníku, sloužící k jeho upevnění v pouzdře, musí být dlouhá minimálně 20 mm. Proto je rozměr h_2 zvětšen na 22mm.

Dílenský výkres průtlačníku viz přílohu č.5.

b) průtlačnice

Návrh průtlačnice opět vychází z české normy ČSN 22 7005 „Protlačování ocelí za studena“. Dimenzování průtlačnic se řeší jako namáhání tlustostěnné nádoby vnitřním protlačovacím tlakem. Jednoplášťové průtlačnice ve většině případů protlačování pevnostně nevyhovují. Běžné je bandážování zděremi, umožňuje přenést extrémní namáhání při hospodárném využití materiálu průtlačnice a při snadném způsobu montáže. Armovaný celek se provádí jako dvou až trojdílný ($\alpha = 1^\circ - 3^\circ$).

Materiál průtlačnice je opět zvolen ČSN 19 830, průtlačnice bude mít jednu objímku. Rozměry průtlačnice vychází z polotovaru. Materiál objímky je zvolen ČSN 19 733. Základní vlastnosti materiálů, použitých na průtlačnici a objímku, jsou uvedeny v příloze č.3.

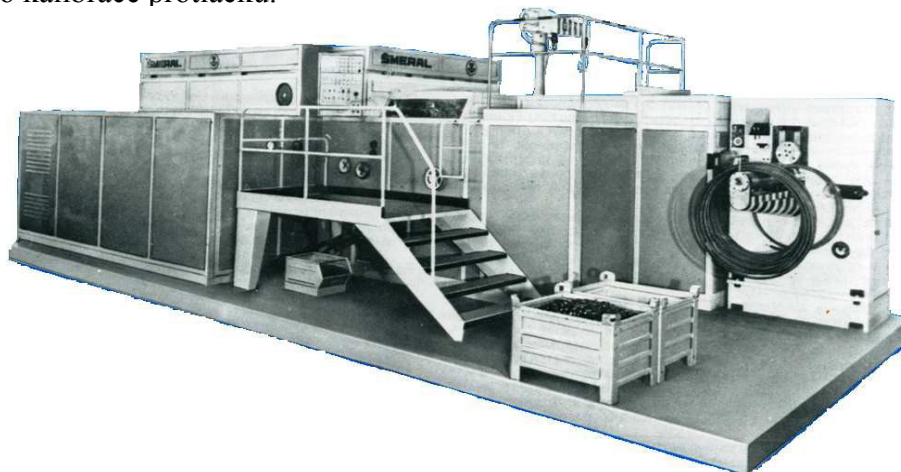
Rozměrový výpočet pro průtlačnici a objímku byl proveden v programu OPTIM97 na počítači umístěném v laboratoři Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně. Podrobné výsledky jsou uvedeny v příloze č.4. Podle těchto výsledků byl navržen výkres pro průtlačnici, který je přílohou č.6.

4.7 Volba stroje

Polotovary lze dělit různými způsoby: stříháním, řezáním, lámáním, rozbrušováním apod. V případě, že je firma vybavena mechanickým lisem pro postupové tváření, je nejvhodnější způsob dělení polotovaru stříhání. Je to velmi rychlý způsob dělení, ekonomický a prakticky bezodpadní.

V případě postupového tváření je vhodné použít tvářecí automat. Na českém trhu je velmi dobře známý výrobce a dodavatel tvářecích strojů a zařízení firma Šmeral, která zde působí již od roku 1861. V jejím sortimentu je možné nalézt stroje a technologie pro mnoho způsobů výroby, v tomto případě byl zvolen postupový tvářecí automat TPZK 25. Tento stroj zaručuje nejmenší jmenovitou sílu 5 000 kN (500 tun), je zde tedy dostatečná rezerva pro celkovou tvářecí sílu.

Na tomto stroji budou prováděny všechny operace při výrobě součástí, od ustříhnutí polotovaru do kalibrace protlačku.



Obr. 4.17 Postupový tvářecí automat TPZK 25

Technologické určení stroje [11]

Automat TPZK 25 je určen pro víceoperační objemové tváření strojních součástí, po úpravě je možné na nich tvářet i z jednotlivých ústřížků. Nejčastěji vyráběné součásti mají svorníkový charakter, jako šrouby se šestihlannou hlavou a podobné součásti vyráběné za studena. Uplatnění stroje je především v automobilovém a spotřebním průmyslu.

Konstrukční provedení [11]

- pětipostupový, se čtyřmi vodorovnými lisovnicemi uspořádaných vedle sebe
- opatřen kladkovou rovňáčkou drátu, dvěma páry podávacích kladek s pneumatickým přitlačováním, přestavitelnou narážkou s indikací krátkého ústřížku a stříhacím ústrojím
- mezioperační přenášečí zařízení má časově regulovatelné otevírání a zavírání kleštín
- přesné vedení beranu na tuhém stojanu je zajištěno valivými elementy
- lisovnice jsou upevněny v tělese na stojanu a jsou opatřeny vyrážeci
- lisovníky jsou upnuty ve stavitelných držácích na beranu a jsou rovněž opatřeny vyrážeci
- elektrická výzbroj je v samostatné skříni mimo stroj

Základní data [11]

Jmenovitý průměr zpracovávaného materiálu	mm	25
Maximální pevnost materiálu	MPa	600
Jmenovitá síla	kN	5000
Výkon elektromotoru	kW	74
Maximální délka výlisku	mm	130
Zdvih beranu	mm	220

4.8 Návrh výrobní linky [13], [14]

Polotovary jsou do výroby dodány ve formě tyčí a k jejich zpracování v konečný výrobek je nutné mít provoz vybaven určitým počtem strojů a zařízení:

1. Zavážecí rošt a válečkový dopravník – umožňuje zavážení a přijímání svazků tyčí ze vstupního skladu a jejich rozdělování.
2. Rovnačka - rovnání tyčí probíhá na patnáctiválcové rovnačce s pěti dolními poháněnými pracovními válci a s deseti horními nepoháněnými válci. Pohon pracovních válců je od jednoho elektromotoru přes rozvodnou převodovku. Pro rovnání tyčí s průměrem nad 50 mm se používá devět válců na vstupu do rovnačky, ostatní válce tyč ohýbají v rámci pružných deformací. Pro rovnání tyčí s průměrem 50 mm a méně je možné použít všech 15 válců nebo 9 posledních v rovnačce. Stejná obvodová rychlost na poháněných válcích je zajištěna převodem v převodovce. Dalšími kroky je kontrola křivosti tyčí, a jestliže je to nutné, následuje přerovnání, dělení tyčí na obchodní délky, odhrocení konců tyče, značení tyčí.
3. Kontrola povrchových vad - defektoskopická kontrola výskytu povrchových vad je prováděna metodou vířivých proudů. Měřicí jednotka je koncipována jako samostatná elektronická jednotka s vlastním mikroprocesorovým řízením a zpracováním signálů.
4. Kontrola výskytu vnitřních vad - pro kontrolu výskytu vnitřních vad je použita ultrazvuková metoda. Dle tvaru zkoušených tyčí se do osy linky zasouvá příslušná sekce snímačů. Ultrazvukové kanály jsou koncipovány jako samostatné elektronické jednotky s vlastním mikroprocesorovým řízením a zpracováním signálů.
5. Kontrola chemického složení - kontrola vývalku na chemické složení materiálu je prováděna metodou magnatest a v toku linky následuje označení povrchových i vnitřních vad a odchylek od předepsaného chemického složení.
Vadné tyče jsou podle druhu vady vyřazeny.
6. Tvářecí automat TPZK 25 – zde již probíhá vlastní výroba součástí, kdy prvním krokem je ustřížení polotovaru na míru. Následující kroky jsou zpracovány výše.
Přesun polotovarů mezi jednotlivými operacemi zajišťuje kleštinový podavač, který je vybaven pro každou pozici snímači kontroly bezpečného uchopení polotovaru.
Jak již bylo zmiňováno, výrobu i vlastnosti hotového protlačku výrazně ovlivňuje tření. Extrémní plošné tlaky mezi nástrojem a obrobkem si vyžadují inteligentní maziva, která jsou schopna vytvářet během procesu tváření vrstvy maziva odolávající vysokému tlaku, aby se zabránilo předčasnému opotřebení, zadírání nebo dokonce rozlomení nástrojů. I při zkušenostech výrobce maziv je vždy nutné s doporučeným přípravkem provést testy před jeho zavedením do procesu.
7. Pásový dopravník – zajišťuje vnesení výrobku z pracovního prostoru stroje a jeho umístění např. do stohovací bedny.

5 Technicko – ekonomické zhodnocení

5.1 Výroba objemovým tvářením

a) náklady na materiál:

$$N_{\text{mat}} = s \cdot C_m \cdot N \quad [\text{Kč}] \quad (5.1)$$

kde s je spotřeba materiálu na jednici [kg/ks]
 C_m je cena materiálu bez DPH [Kč/kg]
 n je počet kusů vyráběné součásti za rok [ks/rok]

$$N_{\text{mat}} = s \cdot C_m \cdot N = 0,102 \cdot 60 \cdot 200\,000 = \underline{1\,224\,000\text{Kč}} \quad (5.2)$$

b) náklady na mzdy:

$$N_{\text{mzdy}} = t \cdot M_t \cdot n \quad [\text{Kč}] \quad (5.3)$$

kde t je celkový výrobní čas jednoho kusu [hod]
 t_{A1} je výrobní čas jednoho kusu [hod]
 t_{B1} je přípravný čas jednoho kusu [hod]
 d_v je počet kusů v dávce [-]
 M_t je hodinová mzda [Kč/hod]
 n je počet kusů vyráběné součásti za rok [ks/rok]

$$t = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_{B1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,02}{60} + \frac{0,005}{60 \cdot 2750} = \underline{0,000333 \text{ hod}} \quad (5.4)$$

$$N_{\text{mzdy}} = t \cdot M_t \cdot N = 0,000333 \cdot 450 \cdot 200\,000 = \underline{29\,970 \text{ Kč}} \quad (5.5)$$

c) náklady na energii:

$$N_{\text{energie}} = P \cdot \eta \cdot t \cdot C_E \cdot n \quad [\text{Kč}] \quad (5.6)$$

kde η je využití stroje [-]
 P je příkon elektromotoru [KW]
 C_E je cena energie [Kč/kWh]

$$\eta = \frac{\text{počet kusů za směnu – skutečný}}{\text{počet kusů za směnu – teoretický}} \cdot 100 = (50 - 90 \%) = \underline{75\%} \quad (5.7)$$

$$N_{\text{energie}} = P \cdot \eta \cdot t \cdot C_E \cdot n = 78 \cdot 0,75 \cdot 0,000333 \cdot 6 \cdot 200\,000 = \underline{23\,377 \text{ Kč}} \quad (5.8)$$

d) celkové náklady:

$$N_{\text{CELKOVÉ}} = N_{\text{MAT}} + N_{\text{MZDY}} + N_{\text{ENERGIE}} = 1\,224\,000 + 29\,970 + 23\,377 = \underline{1\,277\,347 \text{ Kč}} \quad (5.9)$$

e) jednicové náklady:

$$N_J = \frac{N_{\text{celkové}}}{n} = \frac{1\,277\,347}{200\,000} = \underline{6,38 \text{ Kč}} \quad (5.10)$$

5.2 Výroba třískovým obráběním

a) náklady na materiál:

$$N_{\text{mat}} = s \cdot C_m \cdot N \quad [\text{Kč}] \quad (5.11)$$

kde s je spotřeba materiálu na jednici [kg/ks]
 C_m je cena materiálu bez DPH [Kč/kg]
 n je počet kusů vyráběné součásti za rok [ks/rok]

$$N_{\text{mat}} = s \cdot C_m \cdot N = 0,227 \cdot 60 \cdot 200\,000 = \underline{2\,724\,000\text{Kč}} \quad (5.12)$$

b) náklady na mzdy:

$$N_{\text{mzdy}} = t \cdot M_t \cdot n \quad [\text{Kč}] \quad (5.13)$$

kde t je celkový výrobní čas jednoho kusu [hod]
 t_{A1} je výrobní čas jednoho kusu [hod]
 t_{B1} je přípravný čas jednoho kusu [hod]
 d_v je počet kusů v dávce [-]
 M_t je hodinová mzda [Kč/hod]
 n je počet kusů vyráběné součásti za rok [ks/rok]

$$t = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_{B1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,75}{60} + \frac{0,25}{60 \cdot 250} = \underline{0,0125 \text{ hod}} \quad (5.14)$$

$$N_{\text{mzdy}} = t \cdot M_t \cdot N = 0,0125 \cdot 180 \cdot 200\,000 = \underline{450\,000 \text{ Kč}} \quad (5.15)$$

c) náklady na energii:

$$N_{\text{energie}} = P \cdot \eta \cdot t \cdot C_E \cdot n \quad [\text{Kč}] \quad (5.16)$$

kde η je využití stroje [-]
 P je příkon elektromotoru [KW]
 C_E je cena energie [Kč/kWh]

$$\eta = \frac{\text{počet kusů za směnu} - \text{skutečný}}{\text{počet kusů za směnu} - \text{teoretický}} \cdot 100 = (50 - 90 \%) = \underline{75\%} \quad (5.17)$$

$$N_{\text{energie}} = P \cdot \eta \cdot t \cdot C_E \cdot n = 20 \cdot 0,75 \cdot 0,0125 \cdot 6 \cdot 200\,000 = \underline{225\,000 \text{ Kč}}$$

d) celkové náklady:

$$N_{\text{CELKOVÉ}} = N_{\text{MAT}} + N_{\text{MZDY}} + N_{\text{ENERGIE}} = 2\,724\,000 + 450\,000 + 225\,000 = \underline{3\,399\,000 \text{ Kč}} \quad (5.18)$$

e) jednicové náklady:

$$N_J = \frac{N_{\text{celkové}}}{n} = \frac{3\,399\,000}{200\,000} = \underline{17 \text{ Kč}} \quad (5.19)$$

Pro srovnání obou výrobních technologií je u té vhodnější dobré vypočítat tzv. rovnovážný bod, tedy místo kde se náklady na výrobu vyrovnají výnosům. Protože se uvažuje strojní dílna vybavená potřebnými stroji, budou se zahrnovat do výpočtu jen předpokládané náklady na nástroje bez režii, které jsou opět záležitostí samotného podniku.

Náklady na nástroje:

$$N_n = 200\,000 \text{ Kč}$$

Zisk 20% z jedné součásti za rok:

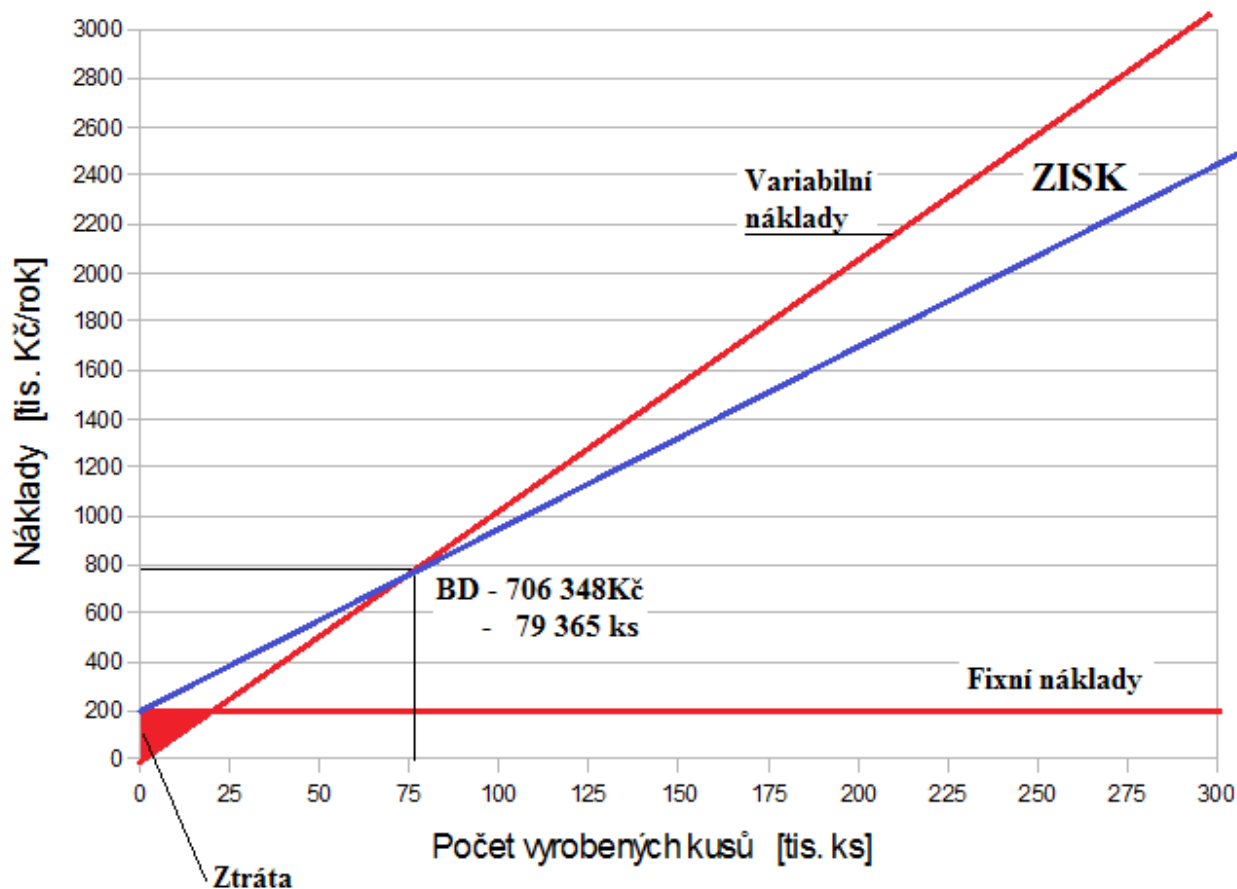
$$Z_{20\%} = \frac{Nc + Nn \cdot 20}{100} = \frac{1277347 + 200000 \cdot 20}{100} = 295\,469 \text{ Kč} \quad (5.20)$$

Cena jednoho kusu při zisku 20%:

$$C_{ks20\%} = \frac{Nc + Nn + Z20}{n} = \frac{1277347 + 200000 + 295\,469}{200000} = 8,9 \text{ Kč} \quad (5.21)$$

Rovnovážený bod:

$$RB = \frac{Nn}{C_{ks} - N_{ks}} = \frac{200000}{8,9 - 6,38} = 79\,365 \text{ ks} \quad (5.22)$$



Obr. 5.1 Plánované náklady při výrobě zadané součásti tvářením

6 Závěry

Hlavním cílem této diplomové práce byl návrh a zpracování technologického postupu výroby krátkého hřídele objemovým tvářením. Předpokládalo se, že součást byla dosud vyráběna třískovým obráběním, které je ovšem stále možné využít pro kusovou výrobu této součásti. Největší přínos využití tvářením při výrobě součásti je prakticky bezodpadní výroba a také zlepšení mechanických vlastností výrobku ve srovnání s polotovarem i obrobkem.

Teoretická část práce se zaměřuje na technologii protlačování a dává možnost hlouběji poznat jeho druhy, nástroje a také stroje.

V další části práce bylo zpracováno posouzení možných způsobů výroby kování v záпустce, protlačováním a obráběním. Srovnání bylo provedeno z hlediska nákladů na materiál a času výroby. Z tohoto srovnání nejlépe vyšla varianta s objemovým tvářením – protlačováním, proto byl tento postup zvolen pro další řešení výroby.

Návrh technologie výroby se týká přímo součásti. Byl zde proveden výpočet pro určení polotovaru, dále délky a rozměry jednotlivých špalíků pro každou tvářecí operaci, nutné pro výrobu nástroje. Uvedené výsledné logaritmické přetvoření ukazuje na stejné přetvoření dvou hlavních částí výrobku – kalíškovité hlavy a stopky. Tvářecí síla byla spočítána pro operaci dělení polotovaru a dále pro každou operaci tvářením. Celková tvářecí síla byla rozhodující pro volbu stroje. Tímto byl navržen tvářecí postupový automat české firmy Šmeral TPZK 25, jehož jmenovitá síla 5000 kN je zcela dostačující. Dělení materiálu je prováděno stříháním také na tomto automatu.

Výkresová dokumentace byla zpracována pro kompletní lisovnici ve druhé tvářecí operaci, pro průtlačník pro zpětné protlačování ve třetí tvářecí operaci a pro celkovou sestavu nástroje. Rozměry průtlačníku byly stanoveny dle normy ČSN 22 7005, rozměry průtlačnice a objímky byly navrženy pomocí programu OPTIM97. Sestava nástroje odpovídá požadavkům a omezením stroje.

Návrh technologické linky předkládá nutné strojní vybavení pro automatizovaný provoz sériové výroby součásti. Vady materiálu jsou kontrolovány řadou snímačů, neboť nelze do tvářecího stroje pustit polotovar, který by mohl zapříčinit havárii.

Technicko – ekonomické zhodnocení bylo provedeno pro dvě základní možnosti výroby, tedy pro protlačování a třískové obrábění. Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se počtem kusů se tvářením jeví jako úspornější a rychlejší způsob. Velkou roli zde také hraje výroba nebo nákup tvářecí formy a zejména nákup stroje. V práci bylo uvažováno pouze s náklady na formu, cena nových strojů nebyla v hodnocení započítána, protože se předpokládá vybavenost strojní dílny těmito stroji. Při sérii 200 000 ks za rok se tzv. rovnovážného bodu dosáhne při nákladech na nástroj 200 000 Kč již při výrobě cca 79 000 ks.

Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Legenda	Jednotky
α, β, γ	Úhel	[°]
H, h, l	Délka	[mm]
D, d	Průměr	[mm]
R, r	Poloměr	[mm]
π	Ludolfovo číslo	[-]
φ	Logaritmické přetvoření	[-]
ln	Přirozený logaritmus	[-]
V	Objem	[mm ³]
v_0	Rychlost pohybu beranu (nástroje)	[m.s ⁻¹]
s	Dráha beranu (nástroje)	[m]
n	Počet zdvihů	[-]
t	Čas	[s]
φ_z	Rychlost deformace ve směru osy z	[s ⁻¹]
φ_r	Rychlost deformace v radiálním směru	[s ⁻¹]
σ_p	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_d	Deformační odpor	[MPa]
σ_{r2}	Radiální tlak	[MPa]
T, t	Teplota	[°K, °C]
A, B, C	Koeficienty konstitutivní rovnice	[-]
F	Síla	[N]
A	Práce	[J]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
τ_{ps}	Deformační odpor ve stříhu	[MPa]
f	Součinitel tření	[-]
p	Tlak	[Pa]
N _{mat}	Náklady na materiál	[Kč]
N _{mzdy}	Náklady na mzdy	[Kč]
N _{energie}	Náklady na energii	[Kč]
N _{celkové}	Celkové náklady	[Kč]
N _j	Jednicové náklady	[Kč]
N _n	Náklady na nástroje	[Kč]
η	Účinnost	[%]

Seznam použitých zdrojů

1. BABOR, Karel; CVILINEK, Augustin; FIALA, Jan. *Objemové tváření ocelí*. Vladimír Hašek; Eva Tamelová. 1. vyd. Praha : SNTL, 1967. 332 s. Strojírenská literatura; sv. 6006.
2. FELDMANN, Heinz D. *Protlačování oceli*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1962. 196 s.
3. FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2010. 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
4. LENFELD, P. *Technologie II - 1. část, tváření kovů*. Skripta, TU Liberec, prosinec 2005, 110 stran, ISBN 80-7372-020-5
5. DVOŘÁK, Milan, et al. *Technologie II*. 3.vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
6. FOREJT, Milan. *Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace : Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu [online]*. [s.l.], 2004. 5 s. Grant ČR. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření. Dostupné z WWW: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12122.3.pdf
7. FOREJT, Milan, HUMÁR Anton, PÍŠKA Miroslav, JANÍNEK Libor. *EXPERIMENTÁLNÍ METODY. Sylabus*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření. Říjen 2003.
8. FOREJT, Milan. *Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření*. In The 2nd International Conference FORM'95. Volume 1. Brno: TU Brno, PC-DIR Co.Ltd, 1995. s. 77-82. ISBN: 80-214-0664-X.
9. BOŘKOVEC, Jan; SUCHÁNEK, Miroslav; *Výpočtové modely tvárného porušování kovu v simulaci technologických procesů*. Volně dostupné na http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/explicitni_mkp/frvs.pdf
10. LIENVEBER, Jan, VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. [s.l.] : [s.n.], 2003. 868 s. ISBN 80-86490-74-2.
11. BENEŠ, Milan, et al. *Poradenská příručka .33 : křivky přetvárných odporů oceli*. 1. vyd. Praha 4 : TEVÚH, 1982. 362 s.
12. LANGE, Kurt, et al. *Handbook of metal forming*. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.
13. ŽĎAS, a.s. *Linka na úpravu tyčí průměru 18 – 95mm*. ŽĎAS, a.s Žďár nad Sázavou, volně dostupné na www.zdas.cz
14. LUBRICANT s.r.o. *Objemové tváření za studena*. LUBRICANT s.r.o. Plzeň, volně dostupné na www.lubricant.cz

15. KOMAP DĚDOV s.r.o. Teplice nad Metují, volně dostupné na www.dedov.cz
16. ARCELORMITTAL TECHNOTRON s.r.o. Frýdek Místek,
volně dostupné na www.technotron.cz
17. KOMAS, spol. s r.o. Opava – Komárov, volně dostupné na www.komas.cz
18. HERDING TŽP, spol. s r.o. Nehvizdy, volně dostupné na www.herding.cz

Seznam příloh

Příloha č.1 – Materiálový list oceli 12 122.3 po vyhodnocení na Taylorově testu na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně

Příloha č.2 – Parametry Johnson – Cookovy konstitutivní rovnice, získané počítačovou simulací kompresního testu programem MKP LS DYNA 3D na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně

Příloha č.3 – Vlastnosti materiálů vhodných pro výrobu protlačovacích nástrojů

Příloha č.4 – Vypočtené hodnoty rozměrů a průběhy napětí pro lisovnici ve druhé tvářecí operaci pomocí programu OPTIM97

Příloha č.5 – Výkres průtlačníku pro zpětné protlačování č.v. DP – 05 – 2012 – 04

Příloha č.6 – Výkres průtlačnice pro dopředné protlačování č.v. DP – 05 – 2012 – 03

Příloha č.7 – Výkres sestavy nástroje č.v. DP – 05 – 2012 – 01

Příloha č.8 – Kusovník sestavy nástroje č.v. DP – 05 – 2012 – 02

Příloha č.9 – Výkres součásti č.v. DP – 05 – 2012 – 05