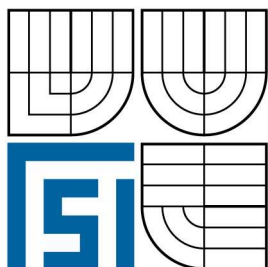


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ŠROUBU VOZOVÉHO KOLA PROTLAČOVÁNÍM

MANUFACTURING OF THE DISC WHEEL'S SCREW BY EXTRUSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

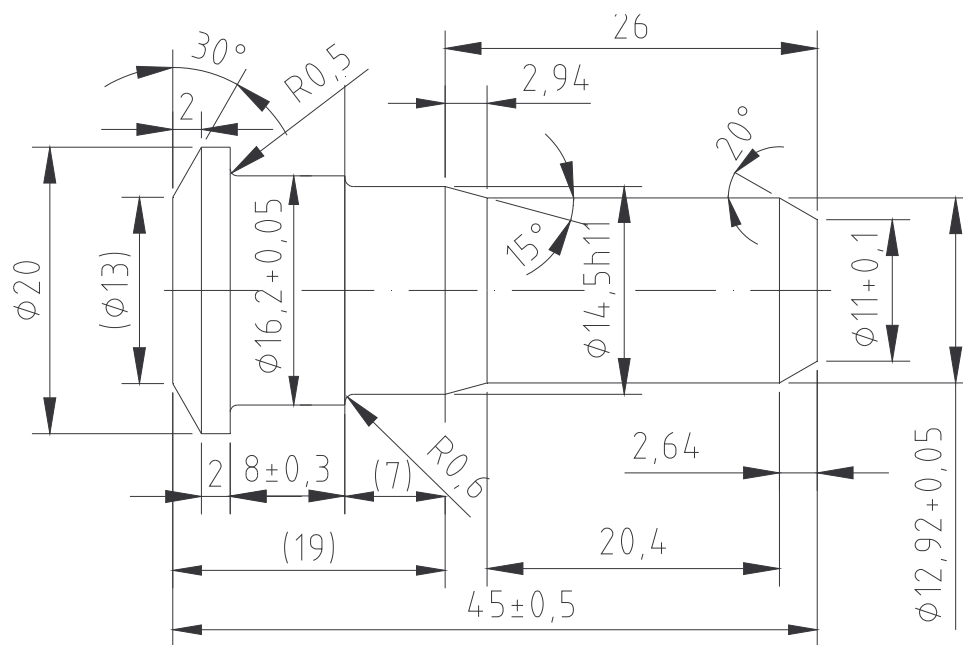
LUKÁŠ OSTŘÍŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV ŠLAIS

BRNO 2008

Zadaná součást: výrobní série 350 000 ks/rok



Anotace:

OSTŘÍŽEK LUKÁŠ: Výroba šroubu vozového kola objemovým tvářením. Bakalářská práce prezenčního bakalářského studia, 3. ročník, letní semestr, akademický rok 2007/2008, studijní skupina 3P/2 Strojírenství - Strojírenská technologie, FSI VUT Brno, ÚST odbor tváření kovů a plastů, květen 2008.

Tato práce řeší výrobní postup součásti "Šroub vozového kola" technologií protlačování za studena. Součást je z materiálu 13 240.3. Polotovarem je kruhový špalík o rozměrech Ø16h10-36 mm. Součást je vyhotovená ve 4 tvářecích operacích na postupovém automatu TPZ 12 výrobce ŠMERAL Brno, a. s.

Anotation:

Manufacturing of the disc wheel's screw by technology of solid forming. The Bachelor's degree project, 3rd form, summer semester, academic year 2007/2008, educational group 3P/2 Engineering - Manufacturing Technology, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Manufacturing Technology, Dept. of Metal Forming and Plastics, May 2008.

This project solves the manufacturing process of " Disc wheel's screw " part by technology of solid forming. Screw is made of 13 240.3 steel. Semifinished product has cylinder shape with dimensions of Ø16 - 36 mm. This part is made during four solid forming operations on the TPZ 12 multistage automatic machine manufactured by ŠMERAL Brno, a. s.

Klíčová slova:

Protlačování oceli za studena, objemové tváření, šroub vozového kola, protlačovací nástroje.

Key words:

Steel cold extrusion, solid forming, disc wheel's screw , tools for extrusion.

Bibliografická citace:

OSTŘÍŽEK, L. Výroba šroubu vozového kola protlačováním. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Šlais.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 23.5.2008

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Miroslavu Šlaisovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1. ÚVOD	13
2. FYZIKÁLNÍ PODSTATA TVÁŘENÍ.....	14
2.1 Pružná a plastická deformace	14
2.2 Poruchy v krystalické mřížce kovů.....	17
2.3 Plastická deformace polykrystalů.....	18
2.4 Tvařitelnost kovů.....	21
3. TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA.....	24
3.1 Pěchování	24
3.2 Protlačování.....	26
3.2.1 Druhy protlačování	27
3.2.2 Protlačovací nástroje.....	29
3.3 Povrchová úprava	32
3.4 Stroje určené k protlačování	33
4. NÁVRH TECHNOLOGIE	34
4.1 Výpočet objemu součásti	34
4.2 Určení polotovaru součásti	35
4.3 Výpočet výšky jednotlivých špalíků.....	36
4.4 Výpočet logaritmického přetvoření.....	40
4.5 Výpočet přetvárného odporu	42
4.6 Výpočet tvářecí síly a práce	45
5. VOLBA STROJE.....	50
6. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	51
7. ZÁVĚRY	55

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

1. ÚVOD

Tváření kovů se historicky vyvíjí už od doby bronzové, ale teorie tvářecích procesů je prakticky rozvíjena až od dvacátých let dvacátého století. Protlačování za studena nádob a trubek dříve nazývané stříkání za studena je známo asi od roku 1886 a patrně bylo poprvé užito ve Francii. Tímto způsobem se zpracovával převážně cín a olovo. Později bylo zjištěno, že se dá tímto způsobem zpracovávat také zinek, hliník a rovněž i určité druhy hliníkových slitin. Teprve na začátku třicátých let se přistoupilo k pokusům vyrábět náboje z oceli, čímž byl položen základ k protlačování oceli.

Převážná část tvářecích procesů probíhá za obecných dynamických podmínek. S pomocí experimentální a výpočtové techniky je umožněno modelování tvářecích procesů a matematický popis těchto dějů za reálných podmínek. Díky těmto metodám je možné stanovit skutečné optimální parametry tvářecích technologií, potřebných nástrojů a strojů. Rozvoj strojírenství směřuje k racionálnímu využívání materiálů a zlepšování ekonomických parametrů výroby. Na celosvětové produkci strojních a spojovacích součástí z kovů a slitin se významně podílejí technologie tváření a obrábění. Především tyto technologie splňují požadavky na velmi přesné součásti strojů a přístrojů v dopravní technice, ve vojenské i spotřební technice a energetice.

Technologie protlačování za studena je vysoce produktivní metoda výroby součástí různých – převážně rotačních a symetrických tvarů z kovových špalíků, desek, kotoučů, nebo polotovarů používaná převážně ve velkosériové a hromadné výrobě. Materiál je tvářen v průtláčnici tlakem průtláčnicku za současné změny průřezu. Tuto výrobní metodu porovnávám s metodou výroby součástí třískovým obráběním, kde je materiál z polotovaru odebírán nástrojem s danou geometrií ve formě třísek.

V bakalářské práci je mým úkolem navrhnout výrobní postup šroubu vozového kola metodou objemového tváření a to protlačováním za studena za pomoci vědomostí získaných ve tříletém studijním programu „strojírenská technologie“ na FSI VUT v Brně. Tato metoda je navržena s ohledem na optimální vlastnosti hotového výrobku a jeho zařazení do strojírenského provozu. Na základě tohoto zadání porovnávám tyto technologie co se týče využitelnosti materiálu a také ekonomickou stránkou výroby. Práce je rozdělena na část teoretickou a technologickou.

V teoretické části se zabývám fyzikální podstatou tvárné deformace a základními principy objemového tváření. Zařazuji také materiály a nástroje vhodné pro technologii protlačování za studena. Dále pak způsoby a možnosti využívání technologie včetně přípravy na výrobu. Uvádím také sortiment vyráběných součástí touto technologií a podávám přehled o výrobních strojích navržených této technologií.

V technologické části navrhuji vhodný polotovar součásti, ze kterého vycházím při dalších výpočtech. Navrhuji veškeré rozměry součásti v operačním cyklu, kontroluji také součást z hlediska pevnostního, což je jeden z dalších důvodů, který dělá tuto výrobní metodu efektivnější. V závěru je možno shlédnout technicko – ekonomické zhodnocení, ve které porovnávám již zmiňované technologie a celkové hodnocení technologie protlačování oceli za studena.

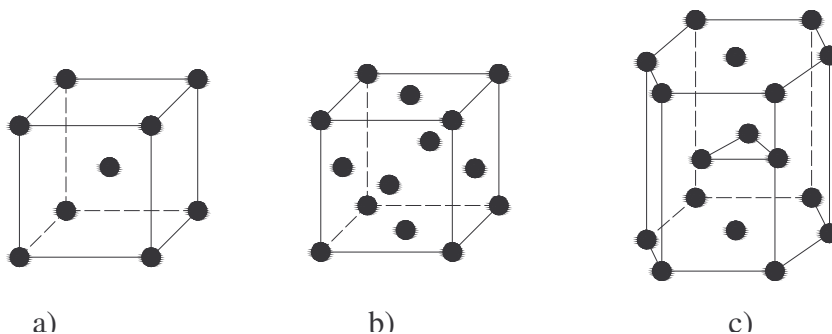
2. FYZIKÁLNÍ PODSTATA TVÁŘENÍ

2.1 Pružná a plastická deformace [1], [2], [9]

Pojem deformace tělesa zahrnuje změnu tvaru tělesa způsobenou vnějšími nebo vnitřními silami, aniž by došlo k porušení spojitosti materiálu. Při malém zatížení dochází jen k malým posunům atomů z jejich rovnovážných poloh v krystalové mřížce a k napínání meziatomových vazeb. To se v makroskopickém měřítku projevuje jako elastická deformace tělesa, která po odlehčení vymizí. U všech krystalických materiálů má elastická deformace jistou hranici – tzv. mez kluzu. Po jejím překročení dochází v materiálu k trvalým změnám vlivem působícího smykového napětí v krystalografických rovinách. Tento proces můžeme označit jako plastickou deformaci.

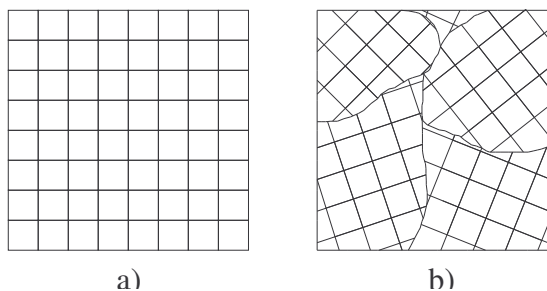
Krystalická stavba kovů

Přirozený stav pro uspořádání atomů u kovových materiálů je v krystalové mřížce. Tato mřížka je charakterizována pravidelností geometrického seskupení atomů, které využívají uspořádání s nejmenší hladinou energie. Základní uspořádání atomů kovů jsou v soustavě krychlové (kubické) a šesterečné (hexagonální) jak ukazuje obr.1. Kubická soustava může být prostorově středěná (b.c.c.) viz. obr.1a, nebo plošně středěná (f.c.c.) viz. obr.1b. V krychlové prostorově středěné mřížce krystalizuje například železo α , δ , chrom, wolfram, molybden a tantal. V krychlové plošně středěné mřížce krystalizuje železo γ , měď, hliník, olovo, stříbro, nikl, platina. V šesterečné mřížce je to pak hořčík, zinek, titan a berilium. Na krystalografickém uspořádání mřížky závisí tepelné, elektrické, magnetické a mechanické vlastnosti kovů.



Obr.1 Základní krystalové soustavy kovů [9]

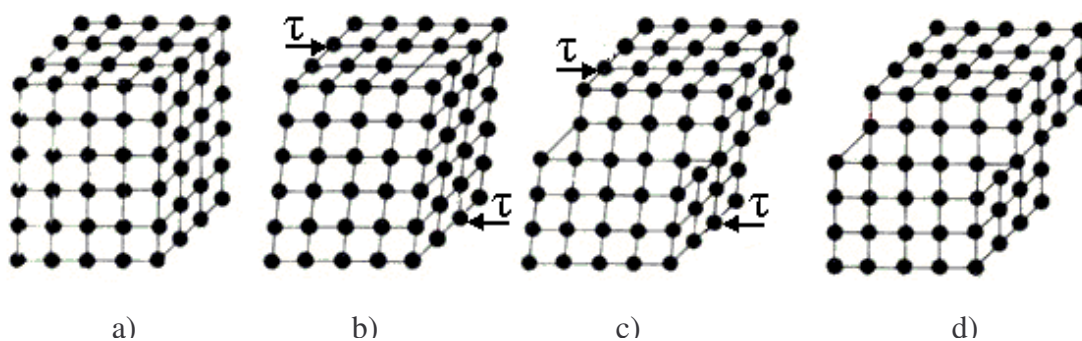
Tyto vlastnosti se často značně od sebe liší například podle toho v jaké krystalografické soustavě krystalizují. Primárně kov krystalizuje z kapalné do tuhé fáze. Sekundární krystalizace, při kterých se mění uspořádání krystalové mřížky nazýváme překrystalizací. Pokud se elementární buňka opakuje translačně v celém objemu, hovoříme o monokrystalu (obr.2a) (diamant, oxid křemičitý). Kovové materiály krystalizují ve formě polykrystalů (obr.2b), které jsou složeny z drobných zrn.



Obr.2 Schémata uspořádání krystalů [2]

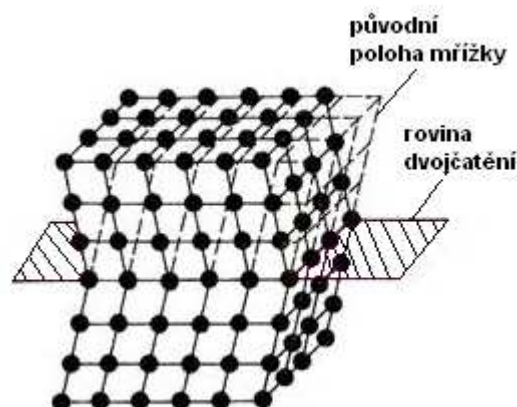
Mechanismy plastické deformace

Pružnou deformaci charakterizujeme jako navrácení zdeformovaného tělesa do původního stavu po odstranění působení vnějších zatížení a jednoznačnou závislostí mezi silami a deformacemi podle Hookova zákona. Plastická deformace je charakterizována nevratností děje při zachování krystalické struktury kovu. Tyto deformace mohou nastat buď na hranicích, nebo uvnitř zrn. Plastickou deformaci tedy vytváří dva mechanismy. Jsou to skluz a dvojčatění. V převážné většině zapříčiňuje plastickou deformaci skluz. Jak již bylo zjištěno při pokusech na monokrystalech skluz se řídí jistými zákonitostmi. Skluz nastává v rovině s největší hustotou atomů. Směr skluzu je totožný se směrem nejvíce obsahující atomy. Zmožných skluzových rovin a směrů se uplatní ty, ve kterých má skluzové napětí maximální hodnotu. Skluz nastává, když maximální skluzové napětí dosáhne kritické hodnoty. Vždy se rozvíjí ten mechanismus plastické deformace, který při daných podmínkách vyžaduje nejmenší napětí. Modelovou situací plastické deformace skluzem vidíme na obr.3. Výchozí krystal obr.3a je namáhán skluzovým napětím τ v následku čehož vzniká pružná deformace (obr.2.31b), které je v dalším kroku doprovázeno plastickou deformací a tvoří tak kombinovaně namáhaný krystal těmito deformacemi obr.3c. V závěru tohoto mechanismu vzniká nevratný děj ve formě plastické deformace obr.3d.



Obr.3 Schéma mechanismu plastické deformace skluzem [11]

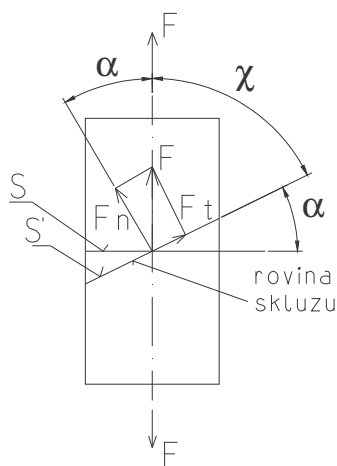
Dvojčatění by se dalo definovat jako natočení jedné části mřížky vůči druhé kolem roviny symetrie a vytváří zrcadlový obraz této části mřížky. Názorný model dvojčatění je zobrazen na obr.4. U polykrystalických kovů napomáhá dvojčatění k orientaci skluzových systémů ke skluzovým napětím a tím dopomáhá uskutečnění skluzů. Častěji se deformace dvojčatěním vyskytuje při tváření rázem a vzniká i žháním po plastické deformaci. K dvojčatění obvykle dochází v řadě rovnoběžných rovin.



Obr.4 Schéma mechanismu plastické deformace dvojčatěním [11]

Skluzové napětí

Osově zatížený válcový monokrystal silou (obr.5) lze rozložit do normálového a tečného směru. Normálová složka vyvolává oddalování atomových rovin. K tomuto procesu je zapotřebí značně vysoké napětí, tudíž je deformace v tomto směru z fyzikálního hlediska nepravděpodobná. Skluzová složka napětí při dosažení kritické hodnoty je značně menší, než normálová složka napětí a přitom umožní potřebnou deformaci skluzem. Při jednoosé napjatosti bude potřebné normálové napětí nejmenší při dosažení úhlu sklonu skluzové roviny $\alpha = 45^\circ$ a aby vyvolalo plastickou deformaci, musí být i právě rovno mezi kluzu jak je vidět ve vztahu (2). Ideální napětí ve skluzové rovině lze podle obr.5 vyjádřit dle vztahu (1)



$$\tau_r = \frac{F}{S} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \chi \quad [1] \quad (1)$$

$$\sigma_{1\min} = Re = 2 \cdot \tau_r \quad [1] \quad (2)$$

Obr.5 Skluzové napětí u monokrystalu [2]

Kritické skluzové napětí

Nejmenší napětí potřebné k uskutečnění skluzu ve skluzovém systému se nazývá kritické skluzové napětí. Jeho hodnota je u dané krystalové mřížky dána funkcí teploty, rychlostí zatěžování, deformačním zpevněním a hranicemi zrn. Teoretické skluzové napětí uvažuje synchronní posuv celých atomových rovin vůči sobě. Hodnoty teoretického kritického skluzového napětí (3) jsou o několik řádů vyšší, než kritické skluzové napětí získané experimentálně.

$$\tau_{krit} = \frac{G}{2 \cdot \pi} \quad [2] \quad (3)$$

2.2 Poruchy v krystalické mřížce kovů [1], [2]

Některé vlastnosti krystalů závisí nejen na prostorovém uspořádání atomů a druhu jejich vazby, ale také na porušení pravidelnosti uspořádání atomů v krystalické mřížce a na chování těchto vad. V ideálním krystalu jsou atomy uloženy v místech minimální potenciální energie. Každá porucha krystalické mřížky tyto atomy z těchto poloh vychýlí a zvyšuje mřížkovou energii. Na základě tohoto procesu jsou atomy vytlačovány ze svých středních poloh a v mřížce vzniká pnutí spojené s distorzi mřížky. Podle velikosti a tvaru neuspořádanosti atomů v krystalické mřížce rozeznáváme tyto poruchy (obr.6):

1) Bodové

- vakance
- intersticie
- substitute

2) Čárové - dislokace

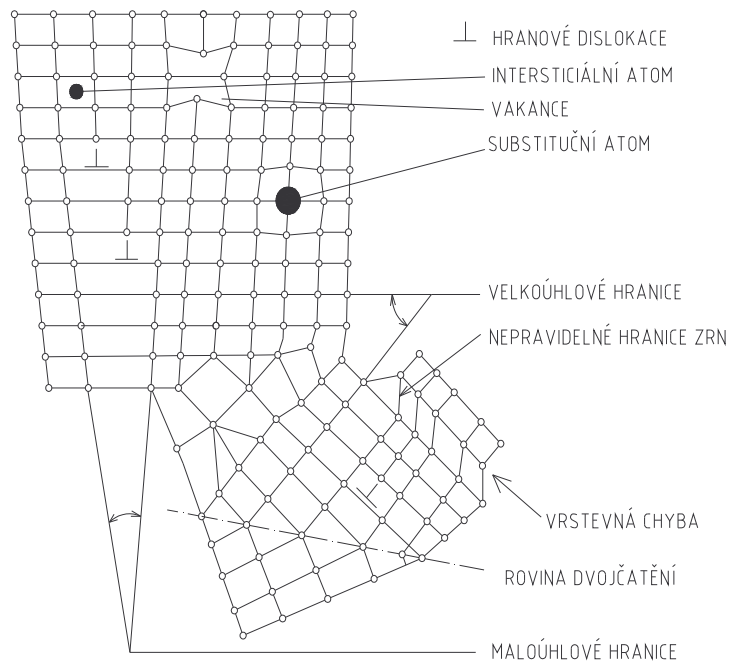
- hranové
- šroubové
- smíšené

3) Plošné

- hranice zrn
- vrstevné chyby
- plochy dvojčatění

4) Prostorové poruchy

- široké hranice zrn
- vměstky



Obr.6 Schéma vybraných poruch krystalické mřížky [2]

Čárové poruchy – dislokace

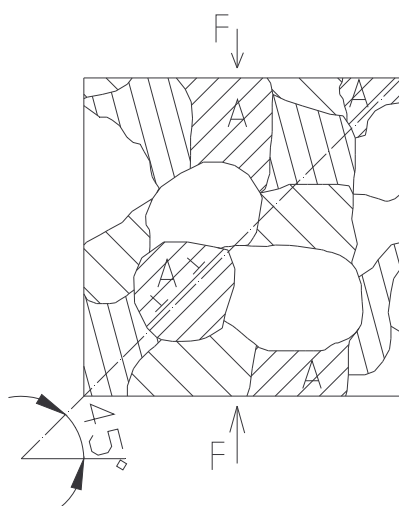
Čárové poruchy krystalické mřížky vznikají přesunutím (dislokováním) určitého množství atomů při skluzovém pohybu vzhledem k vrstvě sousední. Tyto poruchy jsou nejdůležitější pro mechanismus plastické deformace a nazývají se dislokace. Nejdůležitější mechanismy vzniku dislokací jsou:

- vznik růstové spirály na plochách rostoucího krystalu při krystalizaci kovů (šroubové dislokace)
- růst zrn a spojování subzrn s malouhlovou orientací v bloky krystalů (hranové dislokace)
- přeměna shluku vakancí (hranové dislokace)
- generování dislokací z Frank – Readových zdrojů v průběhu plastické deformace

Dislokace je charakterizována směrem a velikostí posunutí Burgersovým vektorem \vec{b} . Rozdíl v posunutí před a za dislokační čarou je konstantní stejně jako Burgersův vektor podél dislokační čáry. Orientace příslušného úseku dislokační čáry vůči určuje \vec{b} charakter dislokace a to hranové, šroubové a smíšené. Volné dislokace se v materiálu pohybují skluzem, nebo difuzí.

2.3 Plastická deformace polykrystalů [1], [2]

Skluz dislokací je základním mechanismem plastického přetvoření kovů. K pohybu dislokací dojde nejdříve v těch zrnech polykrystalického materiálu, jejichž mřížka je nejvhodněji orientovaná k působícímu maximálnímu smykovému napětí τ_{\max} v rovnoběžném směru s Burgersovým vektorem (obr.7). Jelikož maximální skluzové napětí τ_{\max} odpovídá natočení skluzové roviny o úhel $\alpha = 45^\circ$ dojde ke skluzu nejprve v těch zrnech, které jsou takto orientované. Jsou to zrna A na obr.7. Sousední zrna mění svoji orientaci a natáčejí se ve směru zrn A. Při vhodné orientaci polykrystalických zrn může dojít ke sklopení jedné části mřížky vůči druhé kolem roviny symetrie, kterému říkáme mechanické dvojčatění. Tímto procesem dochází k příznivější orientaci skluzových systémů vzhledem k napětí τ_{\max} . Tento děj se se zvyšujícím napětím rozšíří na ostatní zrna polykrystalu. Rozdíly v prostorové orientaci zrn se zmenšují a vlákna se stanou usměrněná. Vznikne deformační textura. Uplatnění tohoto mechanismu je závislé na teplotě a na pevnosti hranic zrn.

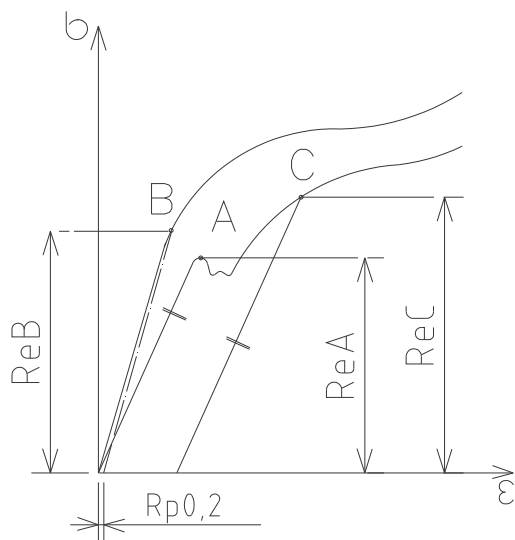


Obr.7 Schéma skluzu v polykrystalu [2]

Deformační zpevnění

Zpevnění se projevuje narůstajícím odporem materiálu proti přetvoření. Tento zpevňující proces se vyskytuje hlavně u tváření za studena při teplotách $T \leq 0,3 T_{\text{TAVENÍ}} [K]$. Nejzávažnějším projevem fyzikálního zpevnění je hustota dislokací.

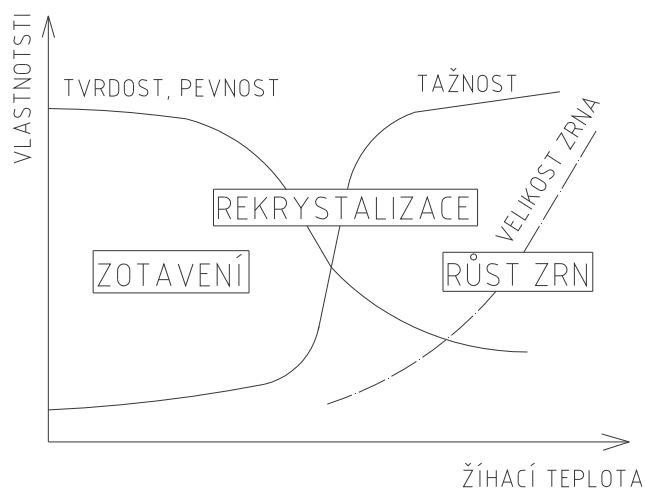
Každé zrno polykrystalu se deformuje vzájemně s deformací zrn sousedních. Aby mechanismus skluzových rovin mohl nastat, je zapotřebí několik různých skluzových systémů a to minimálně 5 na sobě nezávislých skluzových rovin. Řídícím mechanismem plastické deformace polykrystalů za studena je dislokační skluz jednotlivých zrn. Zpevnění je zvýšené o zpevnění na hranicích zrn. Křivky zpevnění polykrystalu určují závislost skutečných napětí na deformaci. Mezním stavem pro přechod z pružné do plastické deformace je mez kluzu. Mez kluzu může být buďto výrazná v bodě A (Re), nebo nevýrazná - okamžitou (smluvní - Rp0,2) v bodě B jak je ilustrováno na obr.8. Po přerušení zatěžování v plastické oblasti je mez kluzu definována právě touto okamžitou mezí kluzu po zpevnění viz. obr.8. Na mez kluzu má vliv především teplota a deformace.



Obr.8 Křivky zpevnění [2]

Zotavení a rekrytalizace

Deformačně zpevněná mikrostruktura kovového materiálu obsahuje protažená zrna ve směru deformace, krystalová mřížka je plná poruch - dislokací i bodových poruch. Důsledkem těchto změn je růst pevnosti materiálu a snižování tažnosti, což je schopnost materiálu podléhat plastické deformaci. Z termodynamického hlediska je deformovaná struktura nerovnovážná. Navrácením rovnováhy můžeme zapříčinit ohřevem. Procesy, které probíhají v takto upravované struktuře se též nazývají odpevňovací. Při těchto procesech mizí vlastnosti získané deformačním zpevněním. Závislosti vzniklé na růstu teploty žíhání dělíme na zotavení s polyganizací, rekrytalizace a růst zrn (obr.9)



Obr.9 Křivka závislosti žíhací teploty na vlastnostech materiálu [1]

Ke zotavení dochází ve vnitřní stavbě deformovaného krystalu v intervalu teplot $(0,25 \text{ až } 0,3) T_m$ (absolutní teplota tavení daného materiálu). Během zotavení dochází k postupnému vymizení bodových poruch a částečnému snížení hustoty dislokací a k jejich přeuspořádání. Za určitých podmínek se dislokace uvnitř zrn shromažďují tak, že vytváří stěny buněk (subzrn) tvaru polygonu, které jsou uvnitř takřka bez dislokací.

Primární rekrytalizace začíná při teplotách (0,35 až 0,45) T_m . Vzniká děj, při kterém dochází ke vzniku zárodků nedeformovaných zrn téže krystalické mřížky. Tyto zárodky postupně rostou až se vytvoří nová struktura nedeformovaných zrn. V této fázi výrazně klesá pevnost, dojde k eliminaci pnutí a zvýší se tažnost.

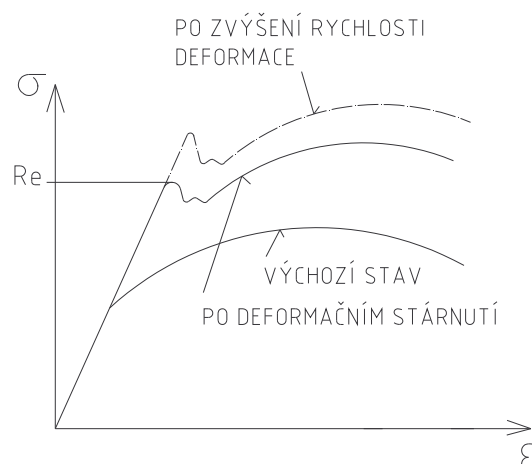
Sekundární rekrytalizace spočívá v růstu rekrytalizačních zrn s rostoucí teplotou a časem. Růst zrn probíhá migrací hranic větších zrn, které rostou na úkor malých. Rekrytalizace nerovnoměrně deformovaného kovu nastane tam, kde byl během tváření překročen potřebný stupeň přetvoření pro stanovenou teplotu rekrytalizace. Má-li proběhnout rekrytalizace i v méně přetvořených místech, musí se zvýšit teplota rekrytalizačního žhání. Zároveň vzniká nebezpečí zhrubnutí zrna, které má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti. Křehkost hrubozrnné struktury je způsobena vylučováním těžko rozpustitelných fází na hranicích zrn (oxidy, nitridy, karbidy).

Deformační stárnutí

Deformační stárnutí vzniká interakcí intersticiálně uložených cizích atomů v mřížce. Atomy dusíku a uhlíku se snaží difuzní cestou zaujmout nejvýhodnější energetickou polohu a přemísťují se do okolí dislokací, kde se hromadí. Proces stárnutí se uskutečňuje v několika etapách:

- 1) Interakcí podél dislokací se vytváří tzv. Cottrelovy atmosféry
- 2) Přeskupením cizích atomů dusíku a uhlíku do samotných zón kolem dislokací Guinier-Prestonovy zóny
- 3) Nukleací precipitátů nitridů a karbidů
- 4) růstem precipitátů

Průběh stárnutí je tedy závislý na přítomnosti a množství cizích atomů a vzhledem k difuznímu charakteru děje i na teplotě. Při stárnutí oceli tvářené za studena blokují volné dislokace atomy dusíku a uhlíku rozpuštěné ve feritu. Ke stárnutí jsou náchylné nízkouhlíkaté oceli s vyšším obsahem dusíku. Ohřevem po tváření na 200 až 250°C proces stárnutí urychlíme. Vliv stárnutí na mechanické vlastnosti je znázorněn na tahovém pracovním diagramu na obr.10. Horní výrazná mez kluzu je napětí potřebné k uvolnění a skluzu dislokací, které jsou obklopeny Cottrelovými atmosférami. S rostoucí rychlostí deformace se výrazně zvyšuje. Nežádoucí vliv stárnutí na tvářitelnost je možné odstranit buď snížením obsahu dusíku v oceli, nebo provedením malé plastické deformace k uvolnění dislokací, například válcováním za studena na rovnacích kladkách apod. Tímto způsobem dosáhneme odstranění skluzové prodlevy a materiál z hlediska schopnosti ke tváření renovujeme.



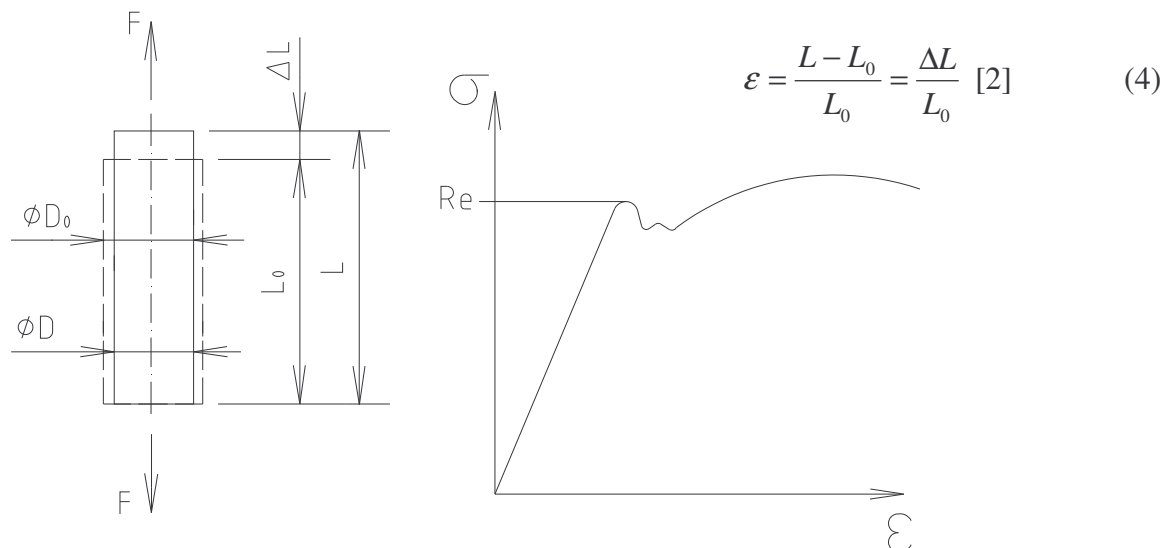
Obr.10 Vliv stárnutí na pracovní diagram nízkouhlíkaté oceli [2]

2.4 Tvařitelnost kovů [2]

Tvařitelnost kovů a slitin je schopnost trvale měnit tvar bez porušení tvářeného tělesa v daných technologických podmínkách. Tvařitelnost tedy představuje souhrn vlastností materiálu, nástroje a prostředí, které za daných termomechanických podmínek určují schopnost trvalé změny tvaru tvářeného tělesa bez porušení a umožňují tak vyrobit součást s požadovanými rozměry a vlastnostmi. Základní potřebnou vlastností tvářeného materiálu je plasticita definovaná velikostí plastického přetvoření do porušení tělesa v konkrétních termomechanických podmínkách tj. teploty, napjatosti a rychlosti plastické deformace .

Charakteristiky deformace

Celková poměrná deformace při zatížení je složena z pružné a plastické složky. Jelikož deformace zjišťujeme až po odtížení, jde o poměrné deformace plastické (trvalé) a ve tváření je nazýváme poměrná přetvoření. Poměrné přetvoření (4) pro jednoosý tah můžeme stanovit dle schématu na (obr.11)



Obr.11 Pracovní tahový diagram [2]

Celková deformace válce s počáteční délkou L_0 probíhá po přírůstcích dL až do konečné délky L . Pro nekonečně malý přírůstek poměrného přetvoření můžeme napsat, že je roven i diferenciálnímu přírůstku logaritmické deformace.

$$d\varepsilon = d\varphi = \frac{dL}{L} \quad [2] \quad (5)$$

logaritmická deformace pro prodloužení bude:

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln L - \ln L_0 = \ln \frac{L}{L_0} \quad [2] \quad (6)$$

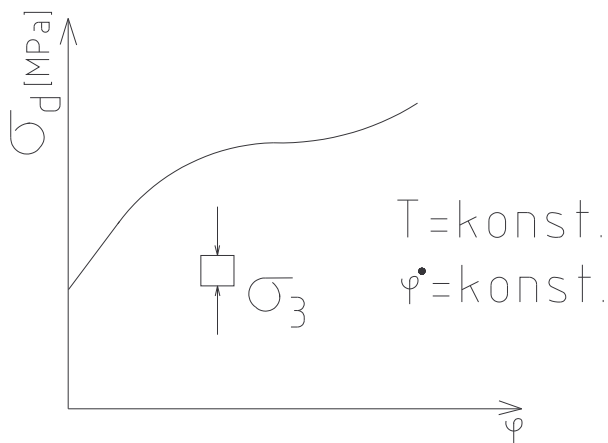
Přirozený přetvárný odpor

Přirozený přetvárný odpor je vnitřní odpor (napětí) materiálu proti působení vnějších sil za podmínek jednoosého stavu napjatosti, při kterém nastane počátek plastické deformace – přetvoření za daných termomechanických podmínek:

- chemické složení
- výchozí stav (R_e , R_m , ϵ , φ)
- teplota tváření (T)
- rychlost přetvoření ($\dot{\varphi}$)

Obecně přirozený přetvárný odpor charakterizuje vlastnost materiálu a můžeme ji vyjádřit funkcí $\sigma_p = f(\text{chem. Složení}, R_e, R_m, \varphi, T, \dot{\varphi})$

Závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritmické deformaci pro konstantní teplotu a konstantní rychlost přetvoření je na obr.12. Křivky přirozených přetvárných odporů získáváme buď experimentálně, nebo výpočtem. Experimentálně statisticky zpracované a analyticky vyjádřené regresní matematickou funkcí (polytropy, polynomu, racionálně lomené funkce apod.) Výpočtem matematickou aproximací pro dohodnuté převládající podmínky.



Obr.12 Závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritmické deformaci [2]

Deformační přetvárný odpor

Deformační (technologický) přetvárný odpor je přirozený přetvárný odpor zvětšený o vliv pasivních technologických odporů při změně tvaru tvářeného tělesa.

- vliv tření
- vliv změny geometrie tvaru
- vliv změny teplotních podmínek
- vliv napjatosti a změn nerovnoměrné napjatosti
- vliv lokálních změn rychlosti deformace při toku kovu

Tyto vlivy lze vyjádřit souhrnným součinitelem M , (7).

$$\sigma_D = \sigma_D(\sigma_p, M) \quad [2] \quad (7)$$

Z deformačního odporu lze stanovit tvářecí sílu, která je definovaná deformačním přetvárným odporem na čelní ploše v dotyku s nástrojem (8).

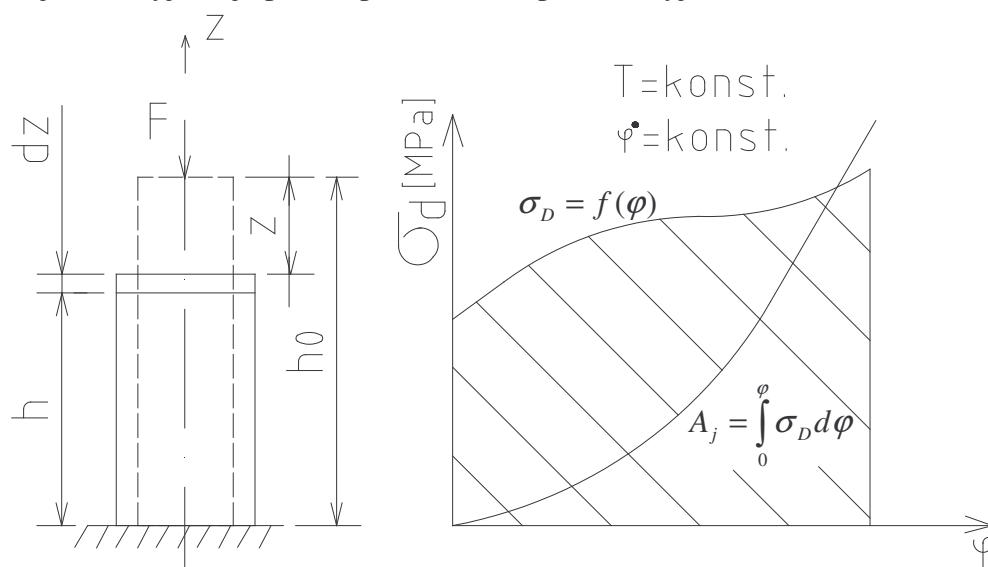
$$F_{TVÁŘECÍ} = \sigma_D \cdot S \quad [2] \quad (8)$$

Přetvárná práce

Práce deformační síly na celkové dráze je definována výrazem (9)

$$A = F_Z \cdot z = \int_0^z \sigma_D \cdot S \cdot dz = \int_0^z \sigma_D \cdot \frac{V}{h} \cdot dz = V \int_0^z \sigma_D \cdot d\varphi = A_j \cdot V \quad [2] \quad (9)$$

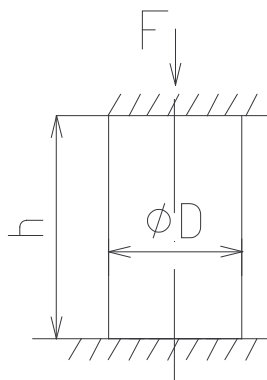
kde $d\varphi = dz/h$ a A_j [J/mm^3] představuje měrnou přetvárnou práci vztaženou na jednotku objemu a vyjadřuje plochu pod křivkou zpevnění vyjádřenou deformačním odporem obr. 13



Obr.13 Měrná přetvárná práce v závislosti na logaritické deformaci [2]

Objemová lisovatelnost

Je zkoumána především pěchovacími zkouškami, které prozatím nejsou normalizovány. Jejich cílem je získání křivky zpevnění, tj. závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritické deformaci (při jednoosé napjatosti, kdy součinitel tření na dotyku s pěchovníky je zanedbáván). Jedna z variant pěchovací zkoušky je znázorněna na obr. 14.



Obr.14 Pěchovací zkouška objemové lisovatelnosti [2]

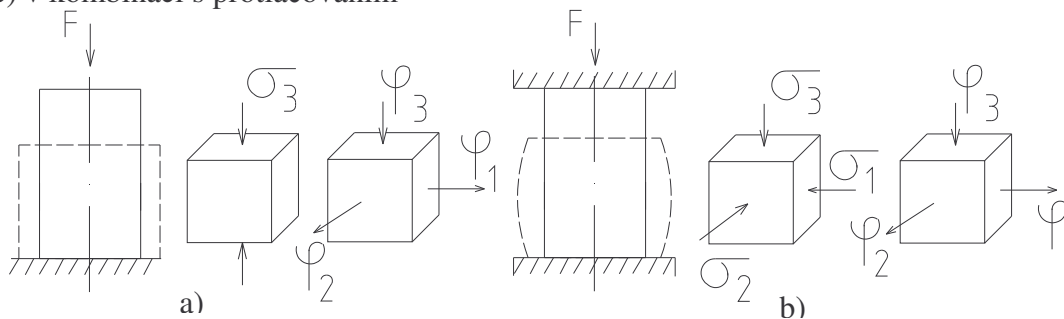
3. TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA

3.1 Pěchování [2], [3]

Pěchování je základní operací při objemovém tváření, při kterém zmenšujeme výšku polotovaru a zvětšujeme jeho průřez. Na obr. 15 vidíme schéma napjatosti a deformace pro ideální stav bez tření (obr. 15a) a reálný stav se třením (obr. 15b). Deformace v celém objemu je v důsledku tření nerovnoměrná, vzniká soudečkovitý tvar. K zabránění vzniku trhlin v oblasti největšího průměru se polotovar maže a funkční plochy nástrojů jsou leštěny.

Pěchování se využívá:

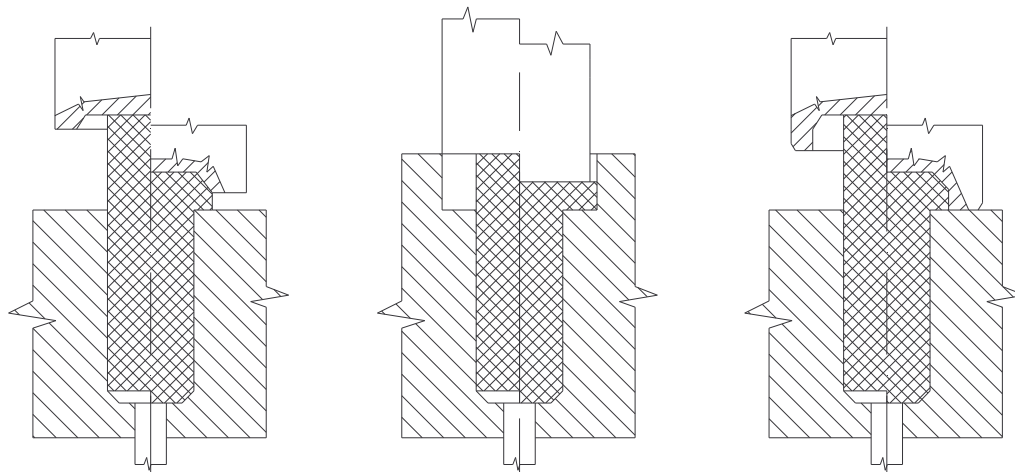
- jako samostatná operace při výrobě hlav šroubů, nýtů, čepů, matic, kuliček, tvarovaných osazení, apod.
- jako pomocná operace, např. kalibrace průměru a zarovnání nerovných čel špalíků dělených stříháním, které se následně protlačují
- v kombinaci s protlačováním



Obr.15 Mechanická schémata deformace při pěchování [2]

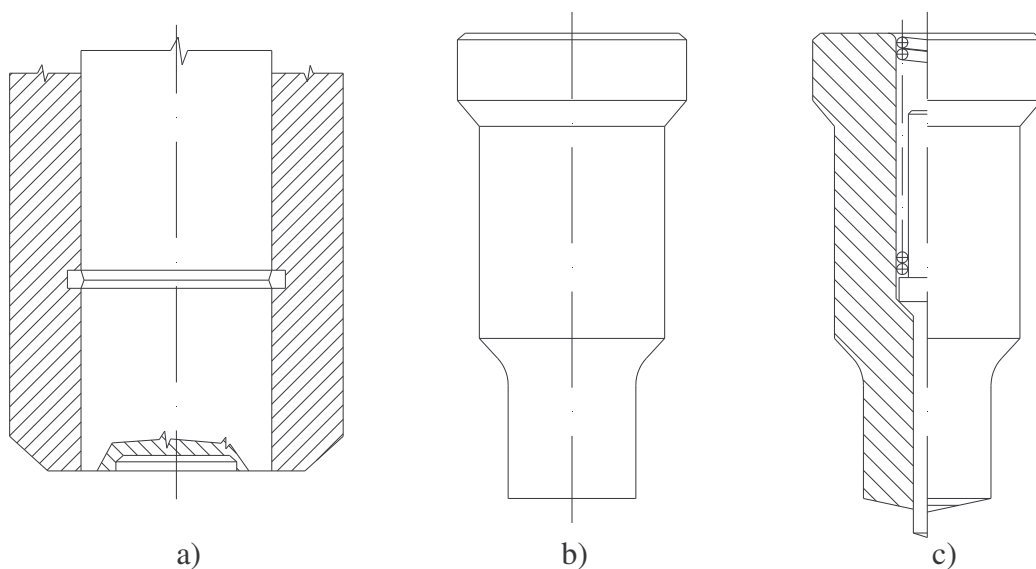
Charakteristiky a konstrukce pěchovacích nástrojů

Rozhodujícím podkladem pro návrh pěchovacího nástroje je technologický postup výroby, sestávající ze základních tvářecích operací, nebo jejich kombinací. Konstrukční řešení pěchovacích nástrojů bude rozdílné při použití jednooperačního kovacího stroje, lisu, pěchovacího automatu nebo víceoperačního stroje. Především se věnujeme funkčním pěchovacím nástrojům. Pěchovníky slouží k napěchování požadovaného tvaru (obr. 16), nebo k předpěchování polotovaru před dalším tváření.



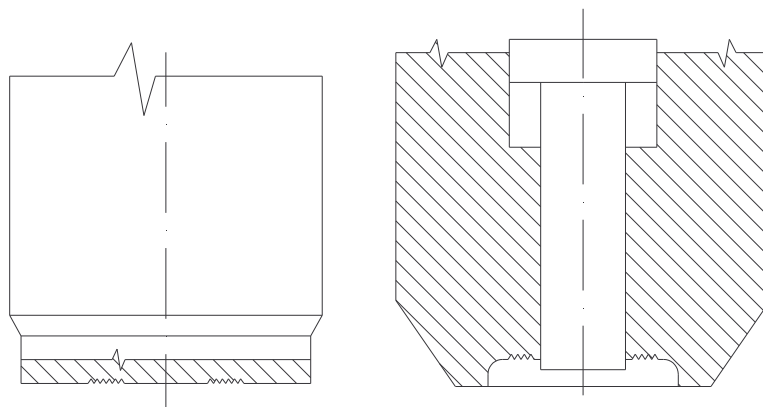
Obr.16 Schémata základních pěchovacích operací [2]

Typické příklady funkčních tvarů pýchovníků jsou na obr. 17. Vložkový pýchovník je na obr. 17a. Jeho pýchovací vložka je buďto z nástrojové oceli, nebo ze slinutých karbidů a je zapouzdřena s přesahem do objímky. Ocelová vložka je ve tvaru kužele na rozdíl od válcové vložky ze slinutých karbidů. Pro kalibraci čel ústřížků v průtlačnici se používá pýchovník s rovným čelem, obr.17b. Též se používá pýchovník se zahloubením ke středění polotovaru podle obr.17c. Odpružený kolík pomáhá zavádět polotovar na postupových strojích, nebo slouží pro stírání polotovarů z pýchovníku.



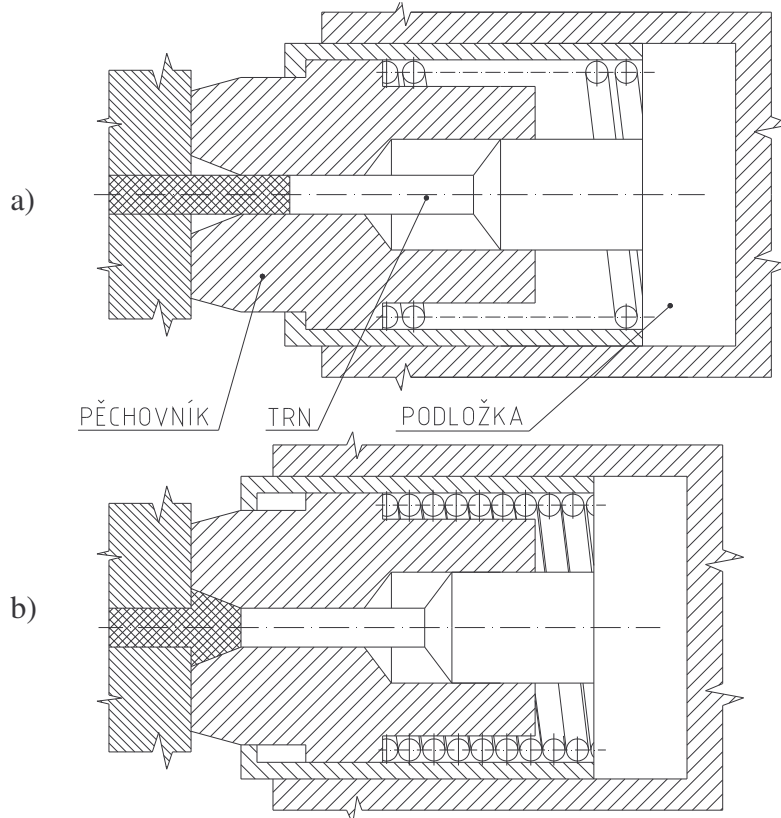
Obr.17 Typické příklady funkčních tvarů pýchovníků [2]

K usměrnění toku materiálu se někdy používají brzdné drážky. Dva příklady jsou na obr. 18.



Obr.18 Brzdné drážky u pýchovníků [2]

Na obr. 19 je znázorněna funkce odpruženého pēchovníku ve dvou krajních pracovních polohách. Tento způsob uspořádaní se používá k pēchování dlouhých dříků a umožňuje pēdpēchování až z výchozích rozměrů pro pēchovací poměr $L_0/D_0 > 2,3$. Na počátku pēchování, viz obr.3.24a, je větší část dříku polotovaru zasunuta do dutiny pēchovníku, takže volná pēchovaná délka $L_0/D_0 < 2,3$. V průběhu zdvihu beranu je materiál vytlačován trnem do kuželové pēdpēchovací dutiny. Takto je možné pēchovat polotovary až do poměru $L_0/D_0 = 6$ ve dvou rázech.



Obr.19 Funkce odpruženého pēchovníku ve dvou polohách [2]

3.2 Protlačování [2], [3]

Výhody objemového tváření, reprezentované především značnou úsporou materiálu, snížením výrobních časů a potřebné energie, mají podstatný vliv na snížení výrobních nákladů součástí. Největších ekonomických efektů se dosahuje 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, aniž dochází k porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Změna tvaru se dosáhne zpravidla kombinací různých základních způsobů tváření pēchováním a různými způsoby protlačování. Podle směru a způsobu tečení materiálu v protlačovacím nástroji lze rozeznávat tyto způsoby protlačování a to dopředné obr.20a , zpětné obr.20b, stranové obr 20c a sdružené obr.20d.

3.2.1 Druhy protlačování [2], [3]

Dopředné protlačování

Při dopředném protlačování materiál teče ve směru pohybu průtlačníku otvorem průtlačnice. Vznikají součásti plné i duté s přírubou či bez příruby. Záleží na tvaru výchozí polotovaru (špalík, kalíšek, trubka, prstavec).

Zpětné protlačování

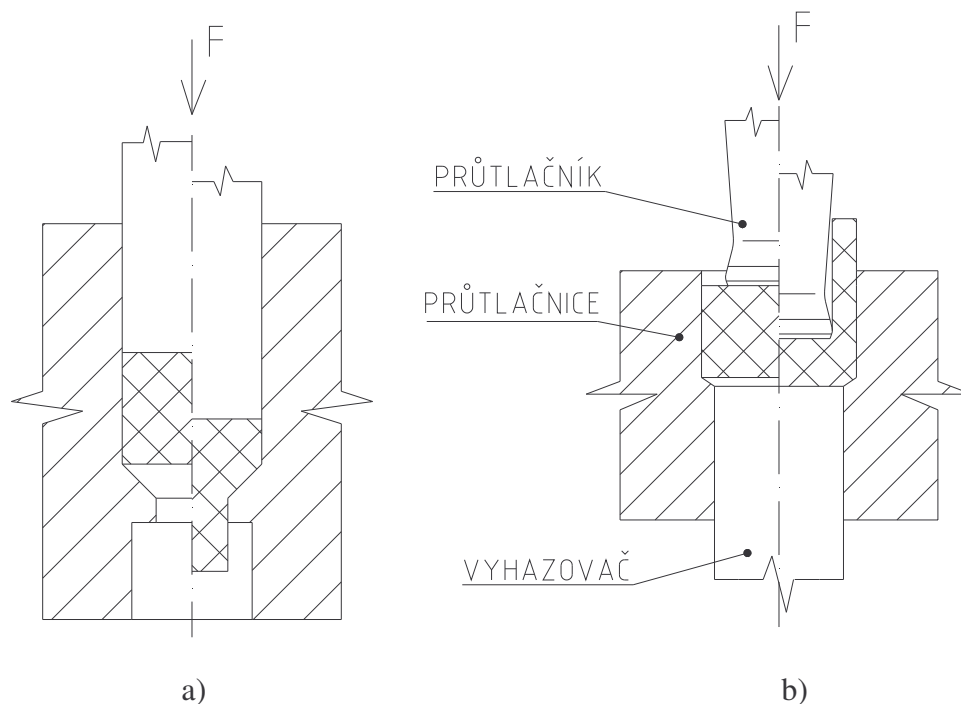
Při zpětném protlačování se materiál pohybuje proti směru průtlačníku. Výchozím polotovarem je špalík (kalota) kruhového nebo čtvercového průřezu, vznikající součást má zpravidla tvar kalíšku. Obecně se rozděluje na: zpětné protlačování volné, kdy je průtlačník vtlačován do válcového polotovaru, jehož vnější stěny jsou volné; zpětné protlačování usměrněné, kdy je polotovar omezen stěnami průtlačnice. Ve strojírenské praxi je převážně užíváno protlačování usměrněné.

Stranové protlačování

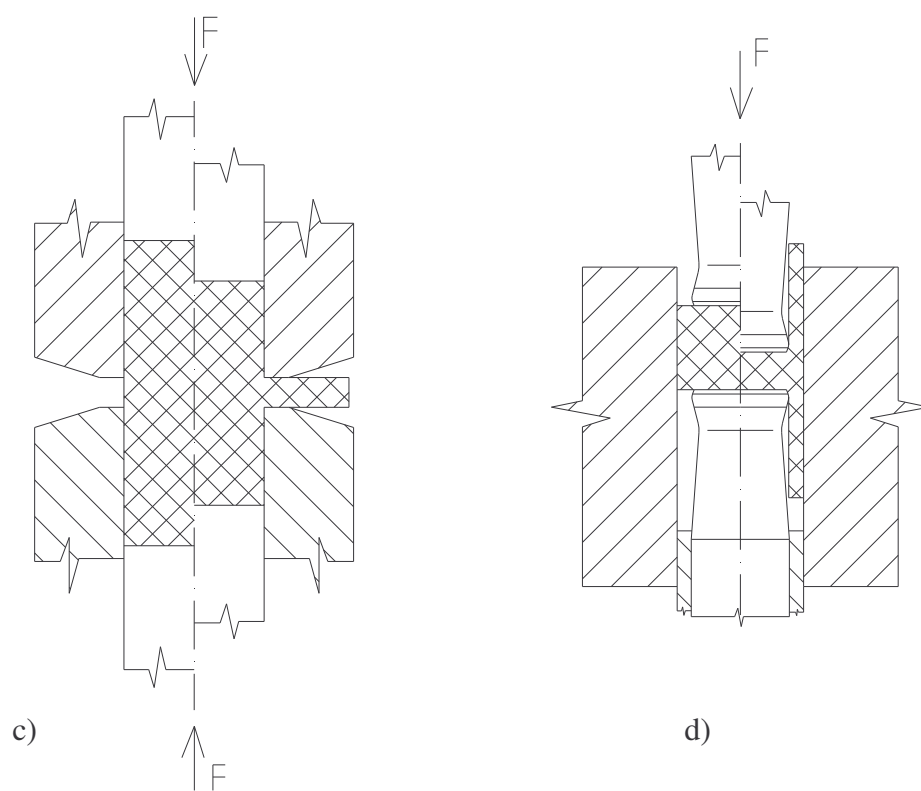
Stranové protlačování se uskutečňuje přemísťováním materiálu ve směru kolmém k podélné ose polotovaru. Vytváří se tak výstupky na obvodu určité části vylisku.

Sdružené (obousměrné) protlačování

Sdružené protlačování je kombinací zpětného a dopředného protlačování. Materiál teče ve směru i proti směru pohybu průtlačníku.



Obr.20 Schémata hlavních způsobů protlačování [5]



Obr.20 Schémata hlavních způsobů protlačování [5]

Druhy protlačovaných součástí:



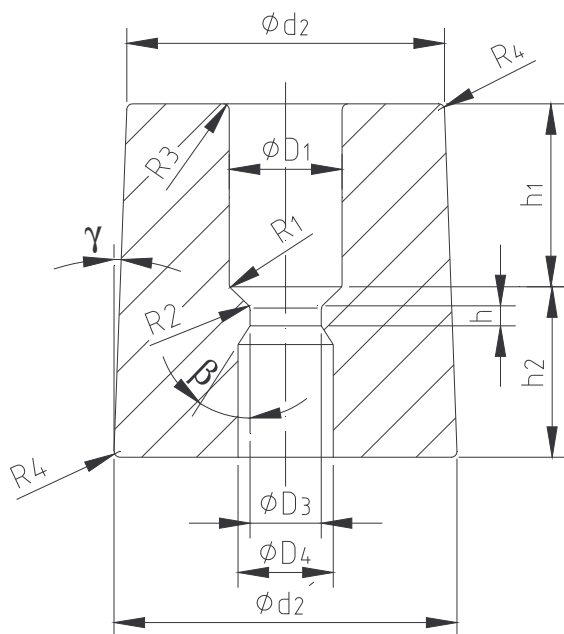
Obr.21 Typy protlačovaných součástí

3.2.2 Protlačovací nástroje [2], [3]

Hospodárnost protlačování je dána životností nástroje. Nástroje nejsou většinou vystaveny pouze jednoduchému tlakovému a tahovému namáhání, nýbrž namáhání stoupá v průběhu pracovního cyklu vždy v určitém okamžiku od nuly až na maximální hodnotu. Při protlačování se většina nástrojů poruší únavovým lomem. Náhlý lom nastane, jestliže je nástroj špatně zkonstruovaný, nebo potřebná síla přestoupí přípustné zatížení nástrojů. K porušení nástrojů opotřebením díky mimořádně dobrému mazání potřebnému k protlačování dochází málokdy. Materiál nástrojové oceli musí mít vysokou odolnost vůči tlakovému a rázovému zatížení, dostatečnou houževnatost, vysokou odolnost proti opotřebením, vysokou popouštěcí teplotu a dobrou obrobiteľnosť. Při zpracování nástrojové oceli musí být materiál dobře prokovaný. Měl by být dodáván vyžíhaný, aby byla zaručena jeho nejlepší obrobiteľnosť a vhodná výchozí struktura pro pozdější kalení. Po obrábění je doporučeno nástroj vyžíhat žháním na odstranění vnitřního pnutí. V dalším kroku se nástroj kalí s rychlým ochlazením a popouští pro zvýšení houževnatosti a odstranění vnitřního pnutí.

Průtlačnice pro dopředné protlačování

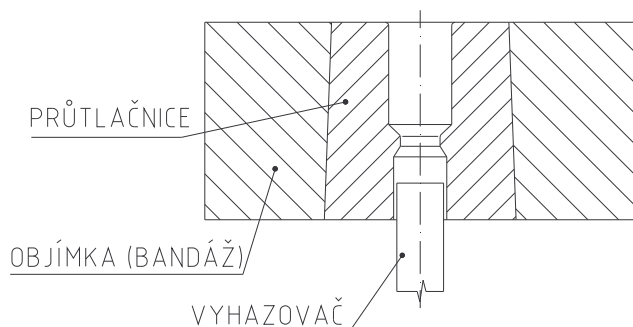
Nejdůležitějším geometrickým parametrem průtlačnice pro dopředné protlačování je tvar redukční části. Nejčastěji používaným tvarem je redukční kužel, který je výrobně nejjednodušší. Redukční kužel ovlivňuje velikost deformačního odporu. Osvědčený tvar průtlačnice pro dopředné protlačování je na obr. 22. Válcová dutina průtlačnice má z důvodů snadnějšího zavádění polotovaru náběhový kužel nebo rádius. Na obr. 23 můžeme vidět systém upnutí průtlačnice jednou objímkou. Tohoto upnutí se využívá díky zvýšené únosnosti průtlačnice. Do objímky je průtlačnice zapouzdřena s přesahem na kuželovou plochu, nebo s ohřevem objímky na plochu válcovou. Na obr. 24 je příčně dělená průtlačnice v oblasti přechodu válcové části v kuželovou, čímž lze snížit vrubový účinek. Obě části průtlačnice musí mít těsný styk kvůli zabíhání materiálu do dělící roviny.



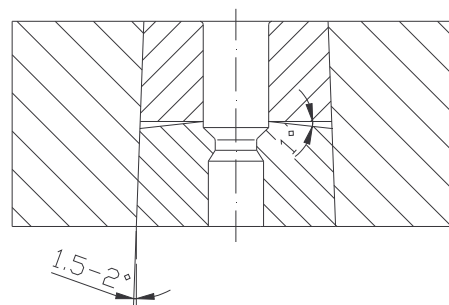
Obr.22 Průtlačnice pro dopředné protlačování [2]

Teplota tváření	20°C
D_4	$D_3 + (0,1 \text{ až } 0,2)$
H	$0,5 \sqrt{D_3}$
2α	30° až 90°
R_1	$(D_1 - D_3)/2$
R_2	$(0,05 \text{ až } 0,1)D_3$
R_3	$0,15 D_1$
h_2	Min 0,7 D_1
γ	1° až 2°
β	5° až 10°

Tabulka 1. Geometrické parametry průtlačnic [2]



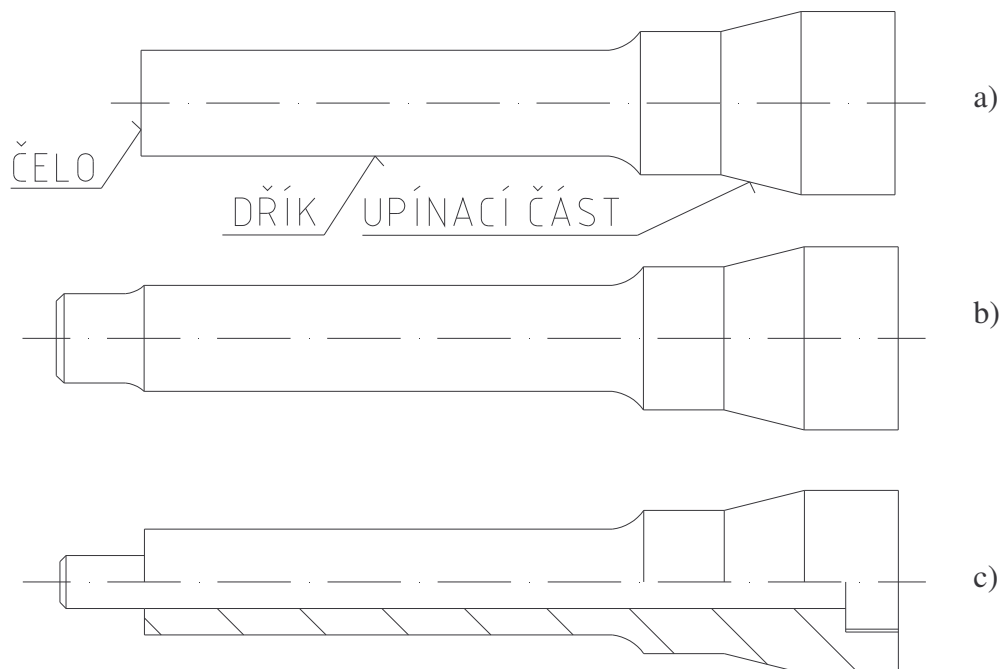
Obr.23 Zapouzdření složené průtlačnice s jednou objímkou [2]



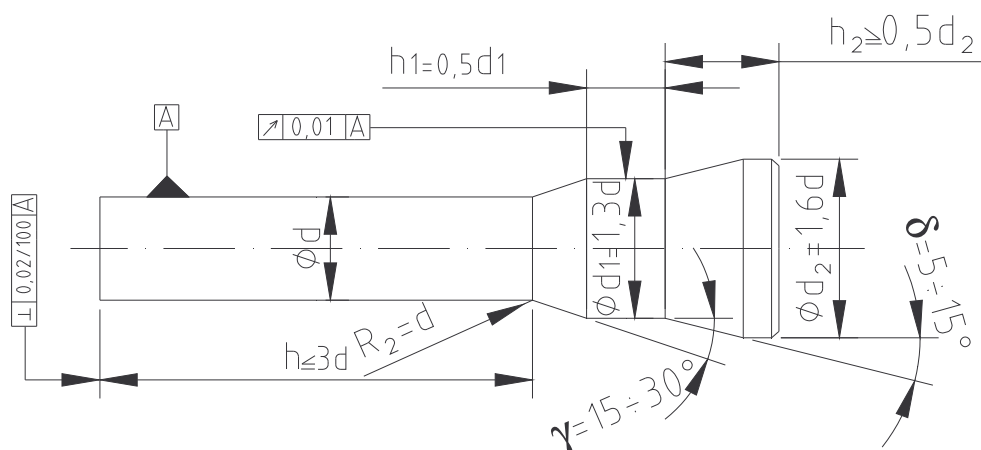
Obr.24 Příčně dělená průtlačnice s jednou objímkou [2]

Průtlačníky pro dopředné protlačování

Průtlačníky pro dopředné protlačování mají obvykle tvar dle obr.25. Pro protlačování plných součástí jsou zpravidla z jednoho kusu s upínací částí – kuželovou, nebo válcovou hlavou. Přejechod mezi dříkem a upínací částí musí být pozvolný, aby se zabránilo koncentraci napětí. Tvar průtlačníků pro dopředné protlačování plných průřezů je na obr. 25a. Tvary průtlačníků pro protlačování dutých součástí jsou znázorněny na obr. 25b,c. Při výrobě průtlačníků je potřeba dodržet tolerance kolmosti, rovnoběžnosti a házivosti a také konečnému opracování, což zahrnuje lapování funkční broušené plochy.



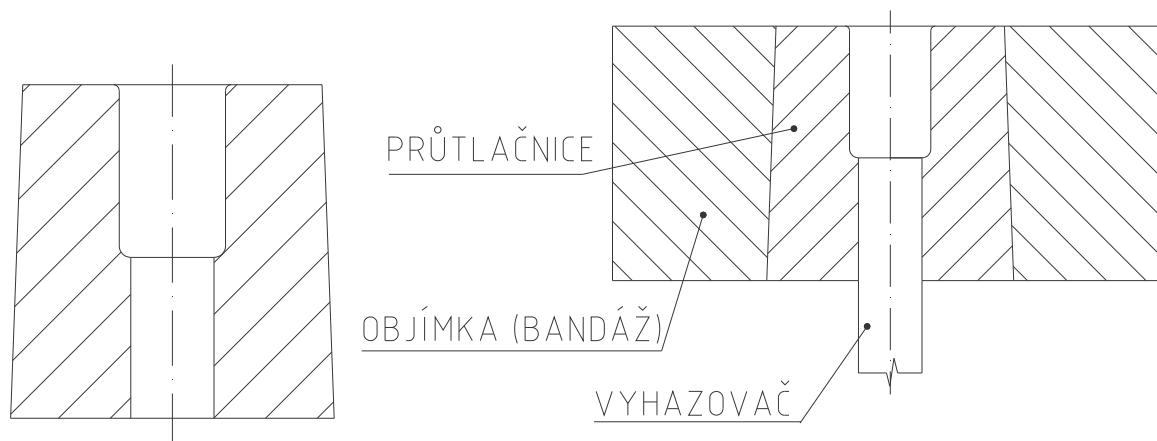
Obr.25 Tvary průtlačníků a jejich části [2]



Obr.26 Doporučené rozměry průtlačníků [2]

Průtlačnice pro zpětné protlačování

Funkční dutina průtlačnic pro zpětné protlačování je dána tvarem protlačované součásti. Ústí pracovní dutiny je buď zaobleno, nebo s kuželovým náběhem pro usnadnění zavádění polotovaru obdobně jako u dopředného protlačování. Otevření dutiny smírnou kuželovitostí (asi 1:1000) je potřebné k zabránění osových tahů při vyhazování průtlačků. Funkční povrch dutiny je broušen a lapován. Průtlačnice pro zpětné protlačování a pýchovnice mají přibližně stejný tvar. Únosnost průtlačnic se zvyšuje radiálním předpětím pomocí jedné, nebo více objímek viz. obr. Montáž složených průtlačnic se provádí buď zalisováním na kuželovou plochu případně s podchlazením průtlačnice.



Obr.27 Průtlačnice pro zpětné protlačování [2]

Obr.28 Zapouzdření složené průtlačnice s jednou objímkou [2]

Průtlačníky pro zpětné protlačování

Tvar čela průtlačníku pro zpětné protlačování je rozhodující a podstatně ovlivňuje velikost a průběh protlačovací síly. Osvědčený tvar průtlačníku je na obr.28. Čelní plocha je mírně kuželovitého tvaru. Úhel kuželovité části se volí nejen s ohledem na tvar průtlačku, ale především s ohledem na tvářecí teplotu. Tření mezi povrchem průtlačníku a stěnou vystupujícího kalíšku se významně sníží odlehčením průtlačníku za čelní fasetou.



Obr.29 Doporučený tvar průtlačníku pro zpětné protlačování [2]

Materiály protlačovacích nástrojů

Doporučené materiály protlačovacích nástrojů jsou vysokovýkonné nástrojové oceli, nebo slinuté karbidy wolframu. Průtlačnice bývá tepelně zpracována na 60 - 62 HRC v závislosti na druhu oceli. Průtlačníky by měly dosahovat tvrdosti 62 – 63 HRC a měly by mít vysokou mez kluzu. Slinuté karbidy wolframu se používají pro rozměrovou stálost a zaručenou životnost nástrojů. Přehled používaných nástrojových ocelí ukazuje tabulka 2.

Tabulka 2. [3]

Druh protlačování	Materiál průtlačníku	Materiál průtlačnice
Dopředné	19 614	19 356
	19 642	19 405
	19 474	
Zpětné	19 436	19 356
	19 614	19 436
	19 655	19 614

3.3 Povrchová úprava polotovaru [3]

Správná povrchová úprava je rozhodující pro hospodárnost procesu protlačování a pro kvalitu protlačovaných výrobků. K povrchové úpravě výchozího materiálu, polotovarů a hotových protlačovaných výrobků patří:

- 1) Odstranění vad povrchu mechanicky, např. broušením, tryskáním, loupáním, leštěním.
- 2) Čištění, odmašťování, oplachování a vymývání, chemicky, nebo mechanicky.
- 3) Odstraňování okují a moření, chemicky nebo mechanicky.
- 4) Ve spojitosti s jinými způsoby předběžného zpracování materiálu, např. žíhání v ochranném plynu, solné lázni, nebo ve vakuu.

- 5) Vytváření zvláštních nosných povlaků pro mazivo, jako je např. fosfatizace, černění apod.
- 6) Nanášení maziva, např. nanášení mýdla, oleje, mazání tukem apod.

První 4 případy povrchové úpravy zvyšují jakost povrchu a zarovávají jej. Slouží k přípravě úprav 5, 6, které vytvářejí povrchové povlaky. Povrchová úprava se řídí způsobem a velikostí stupně deformace. Protlačování tedy vyžaduje důkladnou povrchovou úpravu na rozdíl od jiných tvářecích technologií (vtlačování, lisování dna, pěchování).

3.4 Stroje určené k protlačování [3]

K protlačování se používá buď lisů různé konstrukce, nebo speciálních protlačovacích strojů. Stroje používané k protlačování se dělí na:

1) Mechanické lisy

- a) Klikové lisy. Lis je poháněn elektromotorem, který zpravidla pohybuje pomocí převodu ozubených kol, spojky, klikového hřídele a ojnice beranem lisu, v němž je upevněn nástroj (průtlačník). Lis je většinou dvoustojanové konstrukce.
- b) Kolenové lisy. Lis je poháněn elektromotorem. Kroutící moment se přenáší na setrvačnickou spojku a klikovým hřídelem na kolenové ústrojí, které pohybuje beranem. Stojanem bývá ocelový odlitek rámové konstrukce.
- c) Výstředníkové lisy. Beranem lisu pohybuje výstředník, který je uváděn v pohyb přes spojku elektromotorem. Lis může mít jednostojanovou, nebo dvoustojanovou konstrukci.

2) Hydraulické lisy

U hydraulických lisů beranem pohybuje píst. Tento píst je poháněn buďto tlakovou kapalinou z akumulátoru, nebo přímo z čerpadla. Jako pracovní kapaliny se může použít vody, nebo hydraulického oleje.

3) Speciální stroje

Na tyto stroje jsou kladeny mnohostranné požadavky ve formě různých mezioperací, povrchových úprav, podávání polotovarů a výrobků, mazání atd. K nejrozšířenějším strojům z této řady patří postupové lisy. Postupový lis je zpravidla vybaven plně automatickým podáváním zhotovující součást v několika pracovních operacích bez jakékoli úpravy mezi nimi. Jako výchozího materiálu se pro tento lis využívá povrchově upraveného vyžíhaného materiálu ve formě drátu, nebo tyče.

4. NÁVRH TECHNOLOGIE

4.1 Výpočet objemu součásti

Při výpočtu objemu součásti vycházím ze základních matematických vzorců pro výpočet objemu válce a komolého kužele. Součást si rozdělím na více těles viz. obr. 30 a po vypočtení objemu těchto těles a jejich sečtení dostanu celkový objem součásti. Z tohoto objemu potom vypočítám hmotnost součásti dosazením do známého vzorce pro výpočet hmotnosti tělesa.

$$\text{Objem válce: } V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v \quad [mm^3] \quad (10)$$

$$\text{Objem komolého kužele: } V = \frac{\pi \cdot v}{3} \cdot (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) \quad [mm^3] \quad (11)$$

$$\text{Objem součásti: } V = \sum V_i = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 \quad [mm^3] \quad (12)$$

Výpočet objemu V_1 ze (11):

$$V_1 = \frac{\pi \cdot 2}{3} \cdot (10^2 + 10 \cdot 6,5 + 6,5^2) = 434 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_2 ze (10):

$$V_2 = \frac{\pi \cdot 20^2}{4} \cdot 2 = 638 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_3 ze (10):

$$V_3 = \frac{\pi \cdot 16,05^2}{4} \cdot 8 = 1618 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_4 ze (10):

$$V_4 = \frac{\pi \cdot 14,5^2}{4} \cdot 7 = 1162 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_5 ze (11):

$$V_5 = \frac{\pi \cdot 2,9}{3} \cdot (14,5^2 + 14,5 \cdot 12,9 + 12,9^2) = 431 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_6 ze (10):

$$V_6 = \frac{\pi \cdot 12,9^2}{4} \cdot 20,4 = 2666 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_7 ze (11):

$$V_7 = \frac{\pi \cdot 2,6}{3} \cdot (12,9^2 + 12,9 \cdot 11 + 11^2) = 295 \text{ mm}^3 \quad (19)$$

Výpočet objemu součásti ze (12):

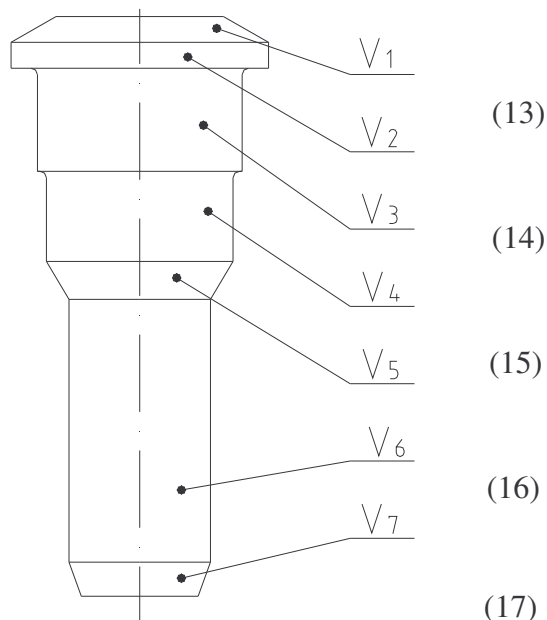
$$V_c = (434 + 638 + 1618 + 1162 + 431 + 2666 + 295) = 7244 \text{ mm}^3 \quad (20)$$

Výpočet hmotnosti součásti:

$$\rho \dots\dots\dots \text{ hustota oceli } \rho = 7800 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$m \dots\dots\dots \text{ hmotnost [kg]}$$

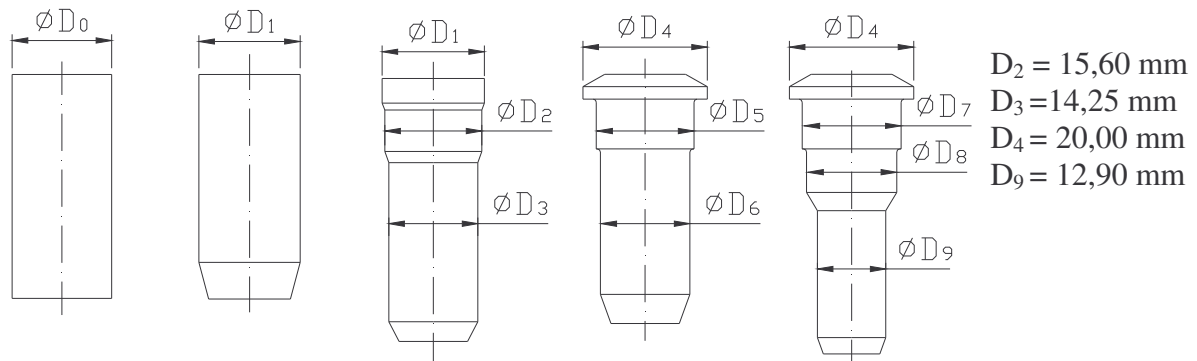
$$m = \rho \cdot V = 7800 \cdot 10^{-9} \cdot 7244 = 0,056 \text{ kg} \quad (21)$$



Obr.30 Schéma počítaných objemů součásti

4.2 Určení polotovaru součásti:

Pro zjednodušení výpočtu a navržení rozměrů polotovaru budeme počítat s průměry D_2 , D_3 , D_4 , D_9 , protože ostatní průměry se liší o malou hodnotu, tudíž výsledné přetvoření bude zanedbatelné. Při výpočtu součásti dále vycházíme z požadavku na rovnoměrné zpevnění hlavy a dřívku součásti, tím pádem i stejného logaritmického přetvoření.



Obr.31 Technologický postup protlačení součásti.

$$\varphi_{HLAVY} = \varphi_{DŘÍKUD9} \quad [-] \quad (22)$$

$$\varphi = \ln \frac{D_{KONEČNÝ}^2}{D_{VÝCHOZÍ}^2} \quad [-][2] \quad (23)$$

Ze (22) a (23) vypočteme D_1 :

$$\ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_3^2} + \ln \frac{D_3^2}{D_9^2} \Rightarrow D_1 = \sqrt[4]{D_4^2 \cdot D_9^2} = \sqrt[4]{20^2 \cdot 12,95^2} = 16,07 \text{ mm} \quad (24)$$

→ volím $D_1 = 16,2 \text{ mm}$

Průměr polotovaru volím $D_0 = 16 \text{ mm}$. Výchozí polotovar tedy bude tyč $\phi 16 \text{ h}10$

Výpočet výšky válce ze (10) :

$$h = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad (25)$$

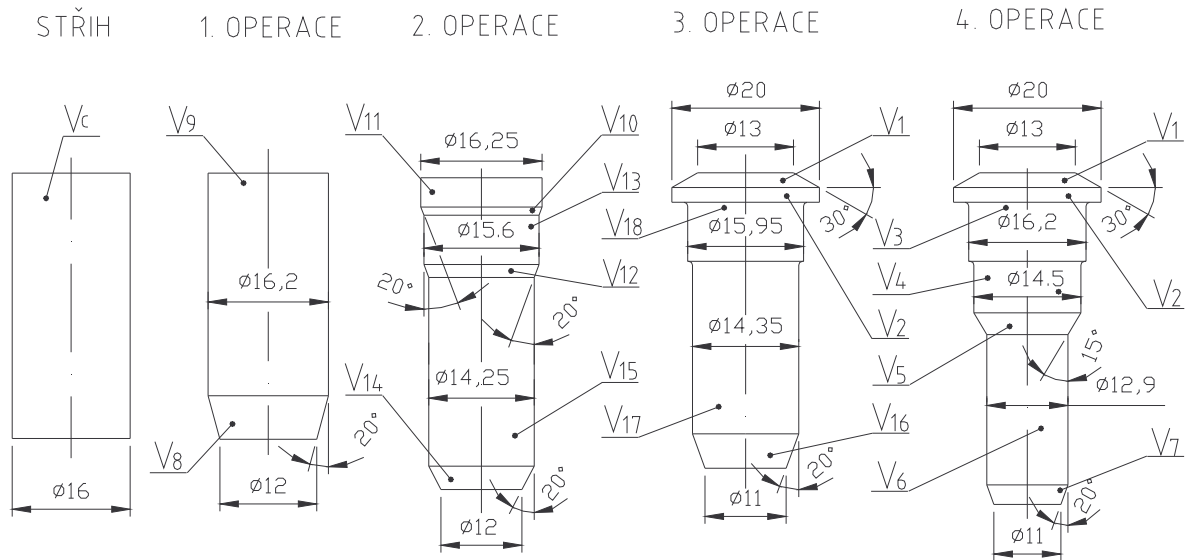
Výška polotovaru ze (25):

$$h_0 = \frac{4 \cdot 7244}{\pi \cdot 16^2} = 36,03 \approx 36 \text{ mm} \quad (26)$$

Výsledný rozměr polotovaru tedy bude $\phi 16 \text{ h}10\text{-}36$. Výška polotovaru byla zaokrouhlena s ohledem na technologii dělení materiálu stříháním s přesností $\pm 0,2 \text{ mm}$

4.3 Výpočet výšky jednotlivých špalíků:

Vycházím ze znalosti všech rozměrů a tudíž i objemu hotové součásti (4. operace). Tento objem jsem spočítal v rovnici (20). Při výpočtu jednotlivých délek v daných operacích vycházím ze znalostí objemů $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$ a V_C . viz. rovnice (13 ÷ 20)



Obr.32 Schéma výpočtu délek špalíků pomocí objemů

1.operace

$$h_{11} = \frac{16,2 - 12}{2 \cdot \tan 20^\circ} = 5,7 \text{ mm}$$

Výpočet objemu komolého kužele V_8 ze (11):

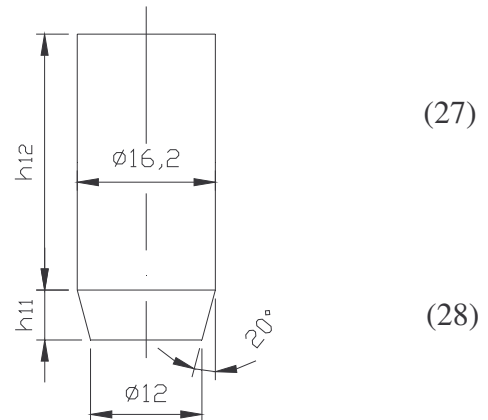
$$V_8 = \frac{\pi \cdot 5,7}{3} \cdot (8,1^2 + 8,1 \cdot 6 + 6^2) = 896 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_9 :

$$V_9 = V_C - V_8 = 7244 - 896 = 6348 \text{ mm}^3$$

Výpočet výšky h_{12} ze (10):

$$h_{12} = \frac{4 \cdot V_9}{\pi \cdot 16,2^2} = \frac{4 \cdot 6348}{\pi \cdot 16,2^2} = 30,8 \text{ mm}$$



Obr. 33 Schéma protlačku no 1. operaci

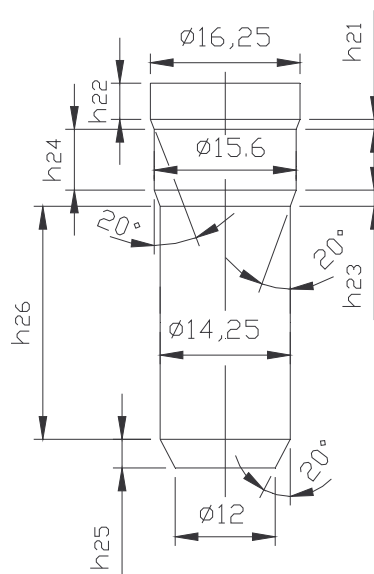
2.operace

Výpočet výšek špalíků h_{21} , h_{22} , h_{23} :

$$h_{21} = \frac{16,25 - 15,6}{\operatorname{tg} 20^\circ} = 1,2 \text{ mm} \quad (31)$$

$$h_{23} = \frac{15,6 - 14,25}{\operatorname{tg} 20^\circ} = 2,5 \text{ mm} \quad (32)$$

$$h_{25} = \frac{14,25 - 12}{\operatorname{tg} 20^\circ} = 3,1 \text{ mm} \quad (33)$$



Obr.34 Schéma protlačku po 2. operaci

$$V_{10} + V_{11} = V_1 + V_2 = 434 + 638 = 1072 \text{ mm}^3 \quad (34)$$

Výpočet objemu komolého kužele V_{10} ze (11):

$$V_{10} = \frac{\pi \cdot 1,2}{3} \cdot (8,1^2 + 8,1 \cdot 7,8 + 7,8^2) = 121 \text{ mm}^3 \quad (35)$$

Výpočet objemu V_{11} :

$$V_{11} = V_1 + V_2 - V_{10} = 434 + 638 - 121 = 941 \text{ mm}^3 \quad (36)$$

Výpočet výšky h_{22} ze (10):

$$h_{22} = \frac{4 \cdot V_{11}}{\pi \cdot 16,25^2} = \frac{4 \cdot 941}{\pi \cdot 16,25^2} = 4,5 \text{ mm} \quad (37)$$

$$V_{12} + V_{13} = V_3 = 1618 \text{ mm}^3 \quad (38)$$

Výpočet objemu komolého kužele V_{12} ze (11):

$$V_{12} = \frac{\pi \cdot 2,5}{3} \cdot (7,1^2 + 7,1 \cdot 7,8 + 7,8^2) = 436 \text{ mm}^3 \quad (39)$$

Výpočet objemu V_{13} :

$$V_{13} = V_3 - V_{12} = 1618 - 436 = 1212 \text{ mm}^3 \quad (40)$$

Výpočet výšky h_{24} ze (10):

$$h_{24} = \frac{4 \cdot V_{13}}{\pi \cdot 15,6^2} = \frac{4 \cdot 1212}{\pi \cdot 15,6^2} = 6,3 \text{ mm} \quad (41)$$

$$V_{14} + V_{15} = V_4 + V_5 + V_6 + V_7 = 1162 + 431 + 2666 + 295 = 4554 \text{ mm}^3 \quad (42)$$

Výpočet objemu komolého kužele V_{14} ze (11):

$$V_{14} = \frac{\pi \cdot 3,1}{3} \cdot (6^2 + 6 \cdot 7,13 + 7,13^2) = 420 \text{ mm}^3 \quad (43)$$

Výpočet objemu V_{15} :

$$V_{15} = V_4 + V_5 + V_6 + V_7 - V_{14} = 4554 - 420 = 4140 \text{ mm}^3 \quad (44)$$

Výpočet výšky h_{26} ze (10):

$$h_{26} = \frac{4 \cdot V_{15}}{\pi \cdot 14,25^2} = \frac{4 \cdot 4140}{\pi \cdot 14,25^2} = 25,9 \text{ mm} \quad (45)$$

3.operace

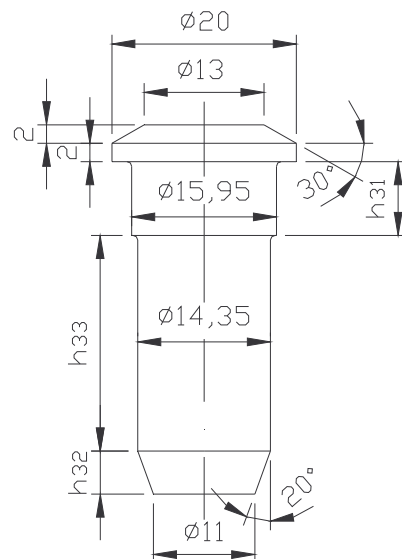
Pro 3. operaci volím výšku hlavy stejnou jako ve 4. operaci

$$h_{32} = \frac{14,35 - 11}{\text{tg } 20^\circ} = 4,9 \text{ mm} \quad (46)$$

$$V_{18} = V_3 = 1618 \text{ mm}^3 \quad (47)$$

Výpočet výšky h_{31} ze (10):

$$h_{31} = \frac{4 \cdot V_3}{\pi \cdot 15,95^2} = \frac{4 \cdot 1618}{\pi \cdot 15,95^2} = 8,24 \text{ mm} \quad (48)$$



Obr. 35 Schéma protlačku po 3. operaci

$$V_{16} + V_{17} = V_4 + V_5 + V_6 + V_7 = 4554 \text{ mm}^3 \quad (49)$$

Výpočet objemu komolého kužele V_{16} ze (11):

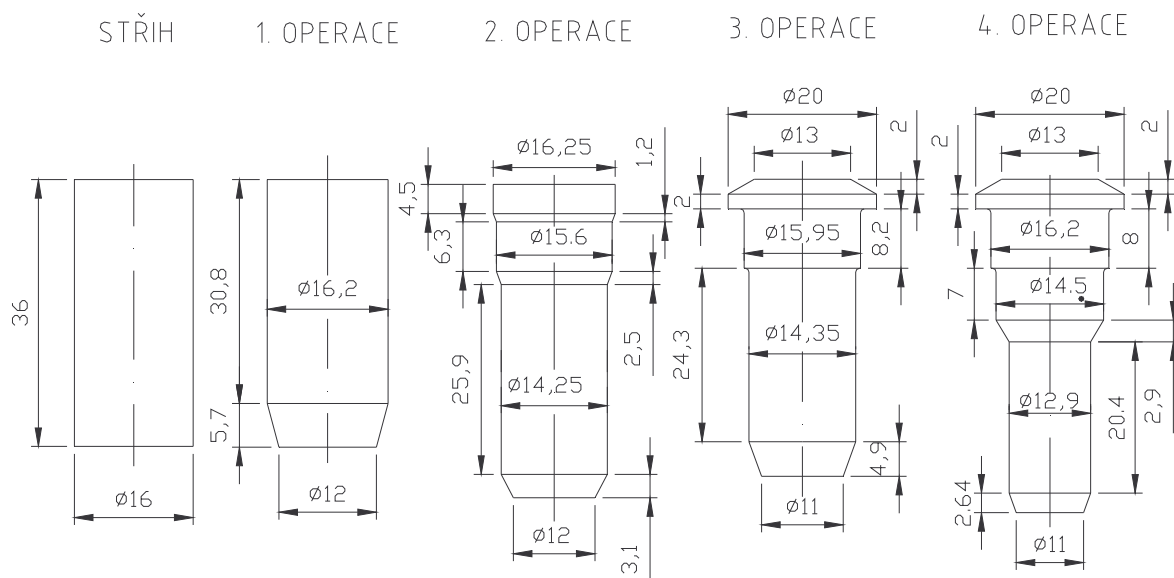
$$V_{16} = \frac{\pi \cdot 4,9}{3} \cdot (5,5^2 + 5,5 \cdot 7,18 + 7,18^2) = 622 \text{ mm}^3 \quad (50)$$

Výpočet objemu V_{17} :

$$V_{17} = V_4 + V_5 + V_6 + V_7 - V_{16} = 4554 - 622 = 3932 \text{ mm}^3 \quad (51)$$

Výpočet výšky h_{26} ze (10):

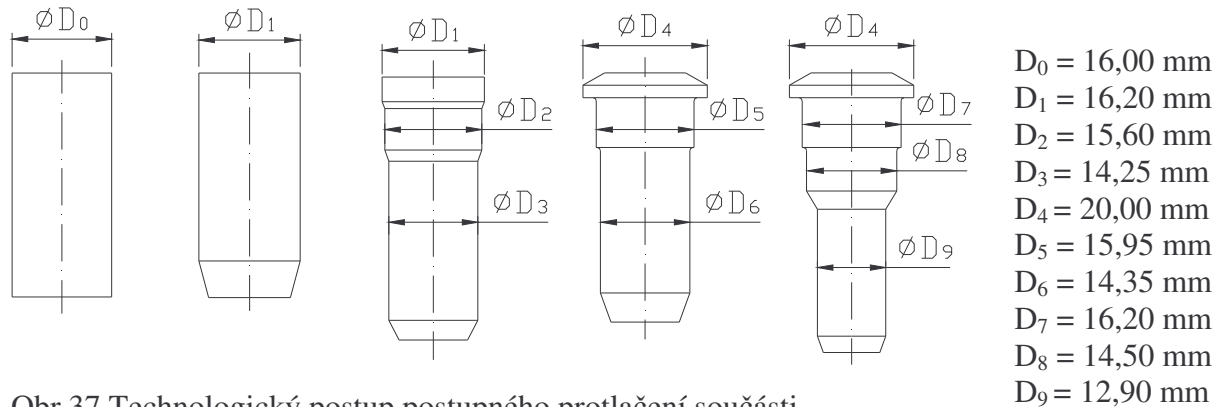
$$h_{33} = \frac{4 \cdot V_{17}}{\pi \cdot 14,35^2} = \frac{4 \cdot 3932}{\pi \cdot 14,35^2} = 24,3 \text{ mm} \quad (52)$$



Obr.36 Schéma technologického postupu se zakótováním všech délek ve všech operacích

4.4 Výpočet logaritmického přetvoření :

Jelikož znám všechny rozměry součásti mohu vypočítat hodnoty logaritmických přetvoření ve všech operacích. Budu vycházet ze vzorce (5).



Obr.37 Technologický postup postupného protlačení součásti.

1. Operace - předpěchování

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{16,2^2}{16^2} = 0,025 \quad (53)$$

2. Operace - dopředné protlačování dříků ϕD_2 a ϕD_3

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{15,6^2}{16,2^2} = -0,075 \quad (54)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{14,25^2}{16,2^2} = -0,256 \quad (55)$$

3. Operace - pěchování hlavy ϕD_4 a dříků ϕD_5 , ϕD_6

$$\varphi_4 = \ln \frac{D_4^2}{D_1^2} = \ln \frac{20^2}{16,2^2} = 0,420 \quad (56)$$

$$\varphi_5 = \ln \frac{D_5^2}{D_2^2} = \ln \frac{15,95^2}{15,6^2} = 0,044 \quad (57)$$

$$\varphi_6 = \ln \frac{D_6^2}{D_3^2} = \ln \frac{14,35^2}{14,25^2} = 0,013 \quad (58)$$

4. Operace - dopředné protlačování dříku ϕD_7 a kalibrace dříků ϕD_8 , ϕD_9

$$\varphi_7 = \ln \frac{D_7^2}{D_5^2} = \ln \frac{16,2^2}{15,95^2} = 0,030 \quad (59)$$

$$\varphi_8 = \ln \frac{D_8^2}{D_6^2} = \ln \frac{14,5^2}{14,35^2} = 0,020 \quad (60)$$

$$\varphi_9 = \ln \frac{D_9^2}{D_6^2} = \ln \frac{12,92^2}{14,35^2} = -0,210 \quad (61)$$

Výsledné logaritmického přetvoření:

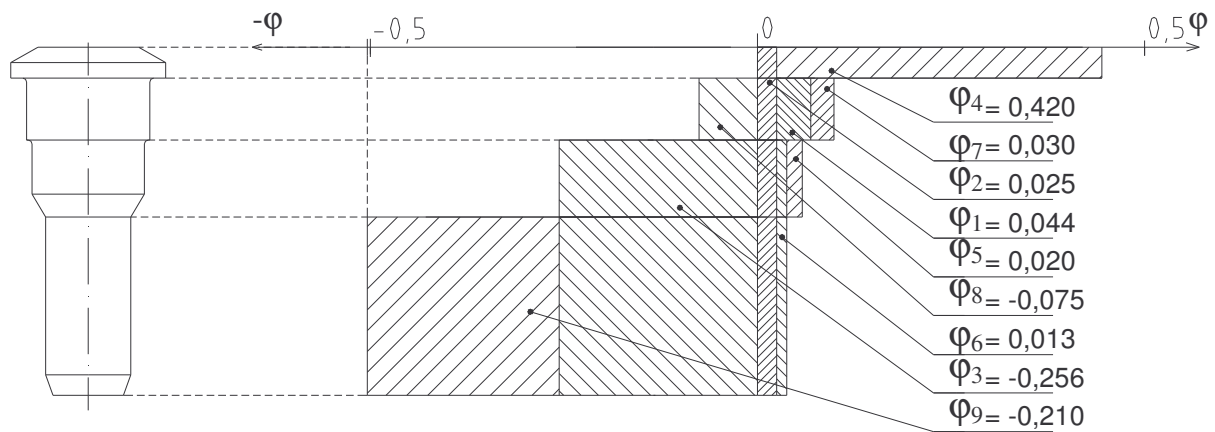
Na základě vypočtených jednotlivých přetvoření mohu určit přetvoření v poslední operaci sečtením daných přetvoření.

$$\varphi_{HLAVY} = |\varphi_1| + |\varphi_4| = |0,025| + |0,42| = 0,445 \quad (62)$$

$$\varphi_{DŘÍKUD7} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_5| + |\varphi_7| = |0,025| + |-0,075| + |0,044| + |0,03| = 0,174 \quad (63)$$

$$\varphi_{DŘÍKUD7} = |\varphi_1| + |\varphi_3| + |\varphi_6| + |\varphi_8| = |0,025| + |-0,256| + |0,013| + |0,02| = 0,314 \quad (64)$$

$$\varphi_{DŘÍKUD7} = |\varphi_1| + |\varphi_3| + |\varphi_6| + |\varphi_9| = |0,025| + |-0,256| + |0,013| + |-0,21| = 0,504 \quad (65)$$

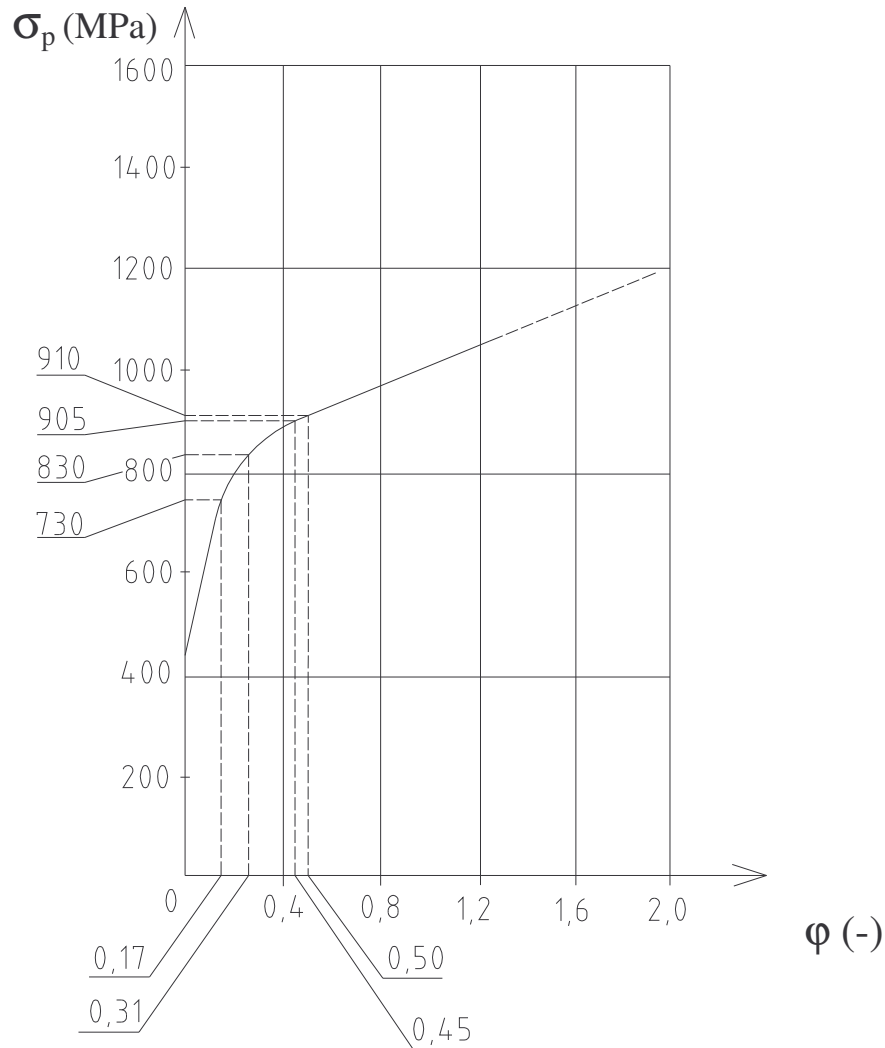


Obr.38 Diagram logaritmických přetvoření v daných průřezech součásti

4.5 Určení přetvárných odporů

Aproximace přetvárného odporu

Z níže vloženého grafu odečtu hodnoty přetvárného odporu závislé na poměrném přetvoření. Graf je ofocen z výzkumné práce řešící součásti z materiálu 13 240.

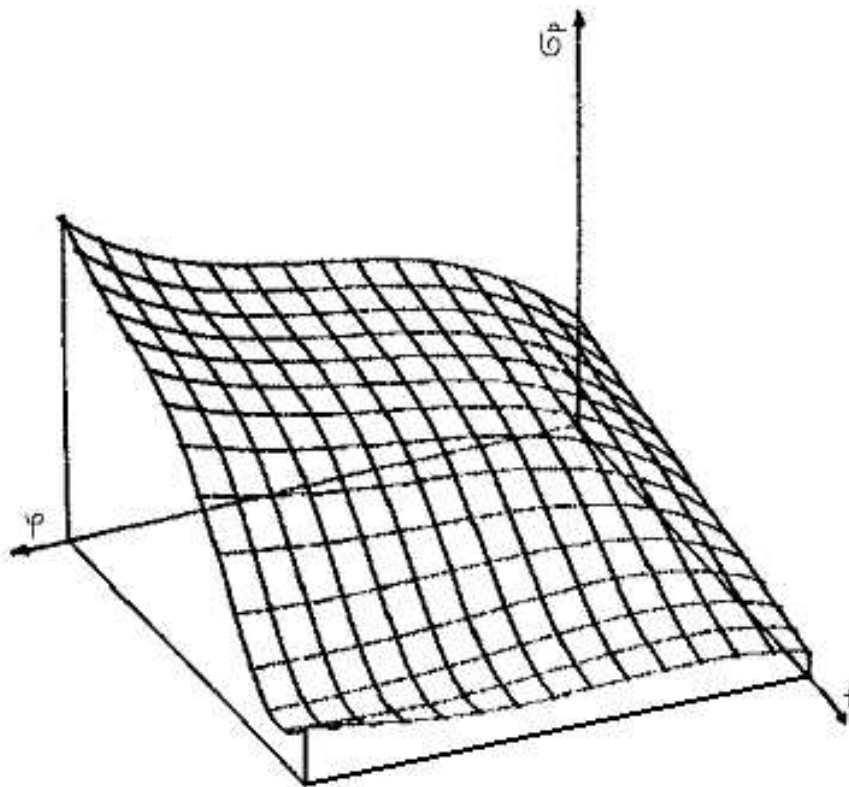


Obr.39 Křivka přetvárného odporu pro materiál 13 240.

Tabulka 3. Teoretický aproximovaný přetvárný odpor součásti:

Místo	ϕ aproximované [-]	σ_p [MPa]
Hlava	0,445	905
Dřík ϕD_7	0,174	730
Dřík ϕD_8	0,314	830
Dřík ϕD_9	0,504	910

Výpočet přetvárného odporu



Obr.40 Graf závislosti přetvárného odporu pro materiál 13 240 na teplotě a logaritmičtém stupni přetvoření [6]

Jelikož není možné provést experiment, ve kterém bych mohl změřit teploty v daných tvářecích operacích, použiji při výpočtu přetvárného odporu konstantní teplotu $t = 21 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnotu logaritmičtého přetvoření a zvolenou teplotu dosadím do vzorce pro výpočet přetvárného odporu (66).

$$\begin{aligned} \sigma_p = & 5,498106183 \cdot 10^2 \cdot t^0 \cdot \varphi^0 - 5,708774306 \cdot 10^{-1} \cdot t^1 \cdot \varphi^0 + 1,724563902 \cdot 10^3 \cdot t^0 \cdot \varphi^1 - \\ & - 1,833733031 \cdot 10^3 \cdot t^0 \cdot \varphi^2 + 7,943999034 \cdot 10^2 \cdot t^0 \cdot \varphi^3 + 1,765331733 \cdot 10^{-9} \cdot t^4 \cdot \varphi^2 - \\ & - 1,027525506 \cdot 10^{-1} \cdot t^1 \cdot \varphi^5 - 2,763523380 \cdot 10^{-10} \cdot t^5 \cdot \varphi^1 + 4,251410100 \cdot 10^{-13} \cdot t^6 \cdot \varphi^1 + \\ & + 5,173302700 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 \cdot \varphi^1 - 2,063168840 \cdot 10^{-16} \cdot t^7 \cdot \varphi^1 [\text{MPa}] \end{aligned} \quad (66)$$

Přetvárný odpor hlavy

$$\varphi = 0,445$$

$$\begin{aligned} \sigma_p = & 5,49810618310^2 \cdot 21^0 \cdot 0,445^0 - 5,70877430610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,445^0 + 1,72456390210^3 \cdot 21^0 \cdot 0,445^1 - \\ & - 1,83373303110^3 \cdot 21^0 \cdot 0,445^2 + 7,94399903410^2 \cdot 21^0 \cdot 0,445^3 + 1,76533173310^{-9} \cdot 21^4 \cdot 0,445^2 - \\ & - 1,02752550610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,445^5 - 2,76352338010^{-10} \cdot 21^5 \cdot 0,445^1 + 4,25141010010^{-13} \cdot 21^6 \cdot 0,445^1 + \\ & + 5,17330270010^{-8} \cdot 21^4 \cdot 0,445^1 - 2,06316884010^{-16} \cdot 21^7 \cdot 0,445^1 = 920 \text{MPa} \end{aligned} \quad (67)$$

Přetvárný odpor dřívku ϕD_7

$$\varphi = 0,174$$

$$\begin{aligned} \sigma_p = & 5,49810618310^2 \cdot 21^0 \cdot 0,174^0 - 5,70877430610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,174^0 + 1,72456390210^3 \cdot 21^0 \cdot 0,174^1 - \\ & - 1,83373303110^3 \cdot 21^0 \cdot 0,174^2 + 7,94399903410^2 \cdot 21^0 \cdot 0,174^3 + 1,76533173310^{-9} \cdot 21^4 \cdot 0,174^2 - \quad (68) \\ & - 1,02752550610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,174^5 - 2,76352338010^{-10} \cdot 21^5 \cdot 0,174^4 + 4,25141010010^{-13} \cdot 21^6 \cdot 0,174^4 + \\ & + 5,17330270010^{-8} \cdot 21^4 \cdot 0,174^1 - 2,06316884010^{-16} \cdot 21^7 \cdot 0,174^1 = 750MPa \end{aligned}$$

Přetvárný odpor dřívku ϕD_8

$$\varphi = 0,314$$

$$\begin{aligned} \sigma_p = & 5,49810618310^2 \cdot 21^0 \cdot 0,314^0 - 5,70877430610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,314^0 + 1,72456390210^3 \cdot 21^0 \cdot 0,314^1 - \\ & - 1,83373303110^3 \cdot 21^0 \cdot 0,314^2 + 7,94399903410^2 \cdot 21^0 \cdot 0,314^3 + 1,76533173310^{-9} \cdot 21^4 \cdot 0,314^2 - \quad (69) \\ & - 1,02752550610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,314^5 - 2,76352338010^{-10} \cdot 21^5 \cdot 0,314^4 + 4,25141010010^{-13} \cdot 21^6 \cdot 0,314^4 + \\ & + 5,17330270010^{-8} \cdot 21^4 \cdot 0,314^1 - 2,06316884010^{-16} \cdot 21^7 \cdot 0,314^1 = 850MPa \end{aligned}$$

Přetvárný odpor dřívku ϕD_9

$$\varphi = 0,504$$

$$\begin{aligned} \sigma_p = & 5,49810618310^2 \cdot 21^0 \cdot 0,504^0 - 5,70877430610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,504^0 + 1,72456390210^3 \cdot 21^0 \cdot 0,504^1 - \\ & - 1,83373303110^3 \cdot 21^0 \cdot 0,504^2 + 7,94399903410^2 \cdot 21^0 \cdot 0,504^3 + 1,76533173310^{-9} \cdot 21^4 \cdot 0,504^2 - \\ & - 1,02752550610^{-1} \cdot 21^1 \cdot 0,504^5 - 2,76352338010^{-10} \cdot 21^5 \cdot 0,504^4 + 4,25141010010^{-13} \cdot 21^6 \cdot 0,504^4 + \quad (70) \\ & + 5,17330270010^{-8} \cdot 21^4 \cdot 0,504^1 - 2,06316884010^{-16} \cdot 21^7 \cdot 0,504^1 = 930MPa \end{aligned}$$

Tabulka 4. Teoretický vypočtený přetvárný odpor:

Místo	φ teoretické [-]	σ_p [MPa]
Hlava	0,445	920
Dřík ϕD_7	0,174	750
Dřík ϕD_8	0,314	850
Dřík ϕD_9	0,504	930

Vyšší hodnoty u vypočtených přetvárných odporů přičítám použití dvou různých literatur, ze kterých jsem diagram a vzorec čerpal. Hodnoty z grafu byly odečteny pomocí aproximace. Po odečtení hodnot přetvárného odporu z grafu lze usoudit, že požadovaná pevnost 950 ÷ 1000 MPa nebude v celém podélném průřezu dosažena. Součást se tedy bude muset dále tepelně zpracovávat např. kalením.

4.6 Výpočet tvářecí síly a práce

Při výpočtu pýchovací síly vycházím z rovnice (71). Hodnoty přetvárných odporů pro dané operace a dané přetvoření odečítám z diagramu na obr.40. Výpočet sil pro 2. operaci a protlačovací sílu pro redukci dřívku ve 4. operaci jsem vypočítal s pomocí programu „PROTLAČOVÁNÍ“, který je dostupný na počítačích Ústavu strojírenské technologie, FSI. Tento program neuvažuje zpevnění z předchozích operací, tudíž jsem vycházel vždy z polotovaru a výsledná síla dané operace je rovna součtu dílčích tvářecích sil.

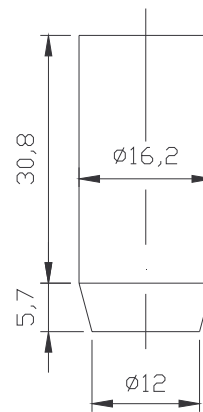
Vzorec pro výpočet pýchovací síly [8]:

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) \quad (71)$$

1.operace-předpýchování :

Zadané hodnoty:

$D_0 = 16 \text{ mm}$
 $D_1 = 16,2 \text{ mm}$
 $\Delta H = 0,0005 \text{ mm}$
 $\varphi = 0,025$
 $\sigma_P = 440 \text{ Mpa}$
 $h = 36 \text{ mm}$
 $f = 0,04$



Obr.41 1.operace

Deformační odpor:

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) = 440 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 16}{36}\right) = 442 \text{ MPa} \quad (72)$$

Pýchovací síla:

$$F_1 = \sigma_D \cdot S = 442 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 88,8 \text{ kN} \quad (73)$$

Pýchovací práce:

$$A_1 = F \cdot \Delta H = 88870 \cdot 0,0005 = 44 \text{ J} \quad (74)$$

2.operace – redukce dřívků $\phi 15,6$ a $\phi 14,2$

Dřík $\phi 15,6$ mm

Zadané hodnoty:

Materiál – 13 240.3

Součinitel tření $f = 0,04$

Vrcholový úhel 20°

$T = 25^\circ\text{C}$

Rozměry polotovaru: $D_0 = 16,2$ mm

$l_0 = 36,5$ mm

Protlačované rozměry: $D_1 = 16,2$ mm

$D_2 = 16,2$ mm

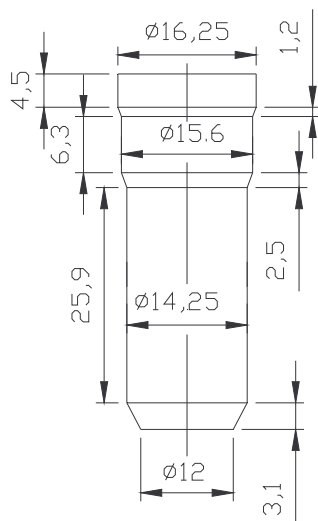
$D_3 = 15,6$ mm

$l_1 = 4,5$ mm

$l_2 = 1,2$ mm

Protlačovací síla: $F_{21} = 13\,120$ N

Práce: $A_{21} = 54$ J



(75)

(76)

Obr.42 2.operace

Dřík $\phi 14,2$ mm

Zadané hodnoty:

Materiál – 13 240.3

Součinitel tření $f = 0,04$

Vrcholový úhel 20°

$T = 25^\circ\text{C}$

Rozměry polotovaru: $D_0 = 16,2$ mm

$l_0 = 36,5$ mm

Protlačované rozměry: $D_1 = 16,2$ mm

$D_2 = 16,2$ mm

$D_3 = 14,25$ mm

$l_1 = 6,3$ mm

$l_2 = 2,5$ mm

Protlačovací síla: $F_{22} = 38\,000$ N

(77)

Protlačovací práce: $A_{22} = 30$ J

(78)

Celková síla pro 2.operaci: $F = F_{21} + F_{22} = 13\,120 + 38\,000 = 51,12$ kN

(79)

Celková práce pro 2.operaci: $A_2 = A_{21} + A_{22} = 54 + 30 = 84$ J

(80)

3.operace-pěchování hlavy, dříku $\phi 15,95$ a dříku $\phi 14,35$

Obr.43 3.operace

Pěchování hlavy

$$D_0 = 16,2 \text{ mm}$$

$$D_1 = 20 \text{ mm}$$

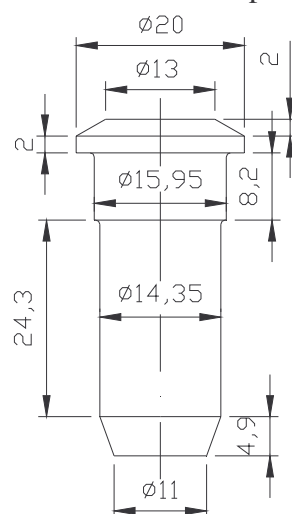
$$\Delta H = 2,1 \text{ mm}$$

$$\varphi = 0,445$$

$$\sigma_P = 920 \text{ MPa}$$

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

$$f = 0,04$$



Deformační odpor:

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) = 920 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 16,2}{4}\right) = 969 \text{ MPa} \quad (81)$$

Pěchovací síla:

$$F_{31} = \sigma_D \cdot S = 969 \cdot \frac{\pi \cdot 16,2^2}{4} = 199\,730 \text{ N} \quad (82)$$

Pěchovací práce:

$$A_{31} = F \cdot \Delta H = 199\,730 \cdot 0,0021 = 419 \text{ J} \quad (83)$$

Pěchování dříku $\phi 15,95$

$$D_0 = 15,6 \text{ mm}$$

$$D_1 = 15,95 \text{ mm}$$

$$\Delta H = 0,3 \text{ mm}$$

$$\varphi = 0,044$$

$$\sigma_P = 450 \text{ MPa}$$

$$h = 8,2 \text{ mm}$$

$$f = 0,04$$

Deformační odpor:

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) = 450 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 15,6}{8,2}\right) = 473 \text{ MPa} \quad (84)$$

Pěchovací síla:

$$F_{32} = \sigma_D \cdot S = 473 \cdot \frac{\pi \cdot 15,6^2}{4} = 90\,406 \text{ N} \quad (85)$$

Pěchovací práce:

$$A_{32} = F \cdot \Delta H = 90\,406 \cdot 0,003 = 271 \text{ J} \quad (86)$$

Pěchování dřívku $\phi 14,35$

$D_0 = 14,25 \text{ mm}$
 $D_1 = 14,35 \text{ mm}$
 $\Delta H = 0,1 \text{ mm}$
 $\varphi = 0,013$
 $\sigma_P = 415 \text{ MPa}$
 $h = 29,2 \text{ mm}$
 $f = 0,04$

Deformační odpor:

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) = 415 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 14,25}{4}\right) = 435 \text{ MPa} \quad (87)$$

Pěchovací síla:

$$F_{33} = \sigma_D \cdot S = 435 \cdot \frac{\pi \cdot 14,25^2}{4} = 69\,375 \text{ N} \quad (88)$$

Pěchovací práce:

$$A_{33} = F \cdot \Delta H = 69\,375 \cdot 0,001 = 69 \text{ J} \quad (89)$$

$$\text{Celková síla pro 3.operaci: } F_3 = F_{31} + F_{32} + F_{33} = 199 + 90,4 + 69,4 = 359 \text{ kN} \quad (90)$$

$$\text{Celková práce pro 3.operaci: } A_3 = A_{31} + A_{32} + A_{33} = 419 + 271 + 69 = 759 \text{ J} \quad (91)$$

4.operace-protlačování dřívku $\phi 12,9$ a pěchování dřívků $\phi 16,2$, $\phi 14,5$

Protlačování dřívku $\phi 12,9$

Zadané hodnoty:

Materiál – 13 240.3
Součinitel tření $f = 0,04$
Vrcholový úhel 20°
Protlačovací teplota $T = 25^\circ\text{C}$

Rozměry polotovaru: $D_0 = 16,2 \text{ mm}$
 $l_0 = 36,5 \text{ mm}$

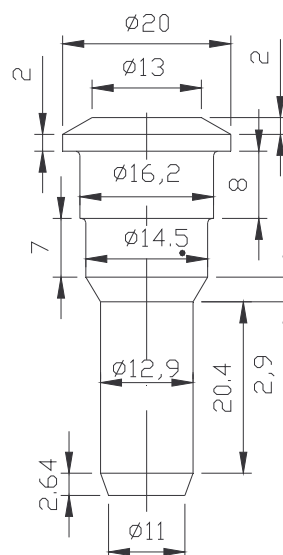
Protlačované rozměry: $D_1 = 16,2 \text{ mm}$
 $D_2 = 16,2 \text{ mm}$
 $D_3 = 12,9 \text{ mm}$
 $l_1 = 19 \text{ mm}$
 $l_2 = 2,9 \text{ mm}$

Protlačovací síla:

$$F_{41} = 58\,030 \text{ N} \quad (92)$$

Protlačovací práce:

$$A_{41} = 540 \text{ J} \quad (93)$$



Obr.44 4.operace

Pěchování dřívku $\phi 16,2$

$D_0 = 15,95$ mm, $D_1 = 16,2$ mm
 $\Delta H = 0,3$ mm, $\varphi = 0,03$
 $\sigma_P = 460$ MPa, $h = 8$ mm
 $f = 0,04$

Deformační odpor:

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) = 460 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 15,95}{4}\right) = 484 \text{ MPa} \quad (94)$$

Pěchovací síla:

$$F_{42} = \sigma_D \cdot S = 484 \cdot \frac{\pi \cdot 15,95^2}{4} = 96\,707 \text{ N} \quad (95)$$

Pěchovací práce:

$$A_{42} = F \cdot \Delta H = 96\,706 \cdot 0,003 = 290 \text{ J} \quad (96)$$

Pěchování dřívku $\phi 14,5$

$D_0 = 14,35$ mm, $D_1 = 14,5$ mm
 $\Delta H = 0,1$ mm, $\varphi = 0,02$
 $\sigma_P = 425$ Mpa, $h = 7$ mm
 $f = 0,04$

Deformační odpor:

$$\sigma_D = \sigma_P \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h}\right) = 450 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,04 \cdot 14,35}{4}\right) = 445 \text{ MPa} \quad (97)$$

Pěchovací síla:

$$F_{43} = \sigma_D \cdot S = 445 \cdot \frac{\pi \cdot 14,35^2}{4} = 71\,970 \text{ N} \quad (98)$$

Pěchovací práce:

$$A_{43} = F \cdot \Delta H = 71\,970 \cdot 0,001 = 72 \text{ J} \quad (99)$$

$$\text{Celková síla pro 4.operaci: } F_4 = F_{41} + F_{42} + F_{43} = 58 + 97 + 72 = 227 \text{ kN} \quad (100)$$

$$\text{Celková práce pro 4.operaci: } A_4 = A_{41} + A_{42} + A_{43} = 540 + 290 + 72 = 902 \text{ J} \quad (101)$$

$$\text{Celková protlačovací síla: } F_c = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 88,8 + 51,12 + 359 + 227 = 726 \text{ kN} \quad (102)$$

$$\text{Celková protlačovací práce: } A_c = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 44 + 84 + 759 + 790 = 1677 \text{ J} \quad (103)$$

5. VOLBA STROJE [7]

Na základě vypočtené protlačovací síly volím výrobním strojem postupový automat **TPZ 12 PQYZ**

Tabulka 5. Technické údaje:

Velikost šroubu	mm	M10 - M12
Délka dřívku šroubu	mm	16
Výchozí materiál – max. průměr	mm	25-125
pevnost	[MPa]	600
Délka ústřížku	mm	25 - 125
Jmenovitá síla	MN	2
Počet zdvihů	min ⁻¹	48 – 75 (96)
Zdvih beranu	mm	200
Výkon hlavního elektromotoru	kW	40
Celkový příkon	kW	43
Celkové rozměry automatu:		
délka	mm	4 800
šířka	mm	2 550
výška	mm	2 750
Hmotnost	kg	23 000

Technologické určení: pro tváření součástí svorníkového charakteru, např. šroubů se šestihrannou hlavou a podobných součástí z drátů za studena. Ve spojení se samostatnou hrotičkou, válcovačkou závitů, zaváděcí skříní a odvíjecím zařízením tvoří linky na výrobu úplných šroubů včetně závitů.

Konstrukční provedení: pětistupňový, se čtyřmi vodorovnými lisovnicemi uspořádanými svisle nad sebou. Automat je opatřen kladkovou rovnačkou drátu, dvěma páry podávacích kladek s pneumatickým přitlačováním, přestavitelnou narážkou a stříhacím ústrojím s otevřeným nožem a přidržovačem. Mezioperační přenášeč zařízení s odpruženými kleštinami přenáší výlisky po oblouku v rovině rovnoběžné s čelem lisovnic. Lisovnice jsou upevněny v tělese na stojanu a jsou opatřeny vyrážeci. Lisovnice jsou upnuty ve stavitelných držácích opatřeny rovněž vyrážeci. Elektrická výzbroj je v samostatné skříní mimo stroj.

Uspořádání pohonu: elektromotor, klínové řemeny, setrvačnick s vestavěnou třecí lamelovou spojkou a brzdou, klikový mechanismus – beran. Pohon ostatních ústrojí a mechanismů je odvozen od vaček a výstředníků na podélném a svislém rozvodovém hřídeli.

Spouštění a ovládání: elektropneumatické – tlačítka a přepínačem pracovních režimů na ovládacím panelu, na němž jsou rovněž signální světla pro indikaci funkcí stroje. Seřizování některých funkčních prvků se ovládá pákami a ručními kolečky.

Mazání: olejové, ústřední, tlakové s tlakovým mazacím čerpadlem, některá místa tukem a olejem, ručním mazacím nářadím. Nástroje jsou mazány a chlazeny samostatným systémem.

6. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Výroba objemovým tvářením

(A) Náklady na materiál:

$$N_{MAT} = s \cdot C_m \cdot n = 0,056 \cdot 69 \cdot 350000 = 1\,352\,400 \text{ Kč} \quad (104)$$

s..... spotřeba materiálu na jednici (kg/ks)

C_m.....cena materiálu bez DPH (Kč/kg) www.boden.cz

n.....počet kusů vyráběné součásti za rok (ks/rok)

(B) Náklady na mzdy:

$$N_{MZDY} = t \cdot M_t \cdot n = 0,0002784 \cdot 500 \cdot 350000 = 48\,709 \text{ Kč} \quad (105)$$

$$t = \frac{0,0167}{60} + \frac{0,0167}{60 \cdot 3000} = 0,0002783 \text{ hod} \quad (106)$$

t.....celkový výrobní čas jednoho kusu $t = t_{A1} + \frac{t_{B1}}{d_v}$ (hod)

t_{A1}.....výrobní čas jednoho kusu (hod)

t_{B1}.....přípravný čas jednoho kusu (hod)

d_v.....počet kusů v dávce (-)

M_t.....hodinová mzda (Kč/hod)

n.....počet kusů vyrobených za rok (-)

(C) Náklady na energii:

$$N_{ENERGIE} = P \cdot \eta \cdot t_{AI} \cdot C_E \cdot n = 90 \cdot 0,7 \cdot 0,0002783 \cdot 5 \cdot 350000 = 30\,682 \text{ Kč} \quad (107)$$

Využití stroje:

$$\eta = \frac{\text{počet.kusů.za.směnu}_{SKUTEČNÝ}}{\text{počet.kusů.za.směnu}_{TEORETICKÝ}} \cdot 100 = 50 \div 90\% \quad \text{volím } 70\% \quad (108)$$

P.....příkon elektromotoru (kW)

η využití stroje (-)

t_{AI}výrobní čas jednoho kusu (hod)

C_Ecena energie (Kč/kWh)

n.....počet kusů (-)

(D) Celkové náklady:

$$N_{CELKOVÉ} = N_{MAT} + N_{MZDY} + N_{ENERGIE} = 1352400 + 48709 + 30682 = 1\,431\,791 \text{ Kč} \quad (109)$$

(E) Náklady na jednici:

$$N_J = \frac{N_{CELKOVÉ}}{n} = \frac{1431791}{350000} = 4,1 \text{ Kč} \quad (110)$$

n.....počet vyráběných kusů (-)

$N_{CELKOVÉ}$ celkové náklady (Kč)

Výroba třískovým obráběním

(A) Náklady na materiál:

$$N_{MAT} = s \cdot C_m \cdot n = 0,15 \cdot 69 \cdot 350000 = 3\,622\,500 \text{ Kč} \quad (111)$$

s..... spotřeba materiálu na jednici (kg/ks)

předpokládaný polotovar $\phi 22 \times 45$

hmotnost polotovaru pro obrábění 0,15 kg

C_mcena materiálu bez DPH (Kč/kg)

n.....počet kusů vyráběné součásti za rok (ks/rok)

(B) Náklady na mzdy:

$$N_{MZDY} = t \cdot M_t \cdot n = 0,042 \cdot 120 \cdot 350000 = 1\,764\,000 \text{ Kč} \quad (112)$$

$$t = \frac{1,5}{60} + \frac{1}{60 \cdot 1} = 0,042 \text{ hod} \quad (113)$$

t.....celkový výrobní čas jednoho kusu $t = t_{A1} + \frac{t_{B1}}{d_v}$ (hod)

t_{A1}výrobní čas jednoho kusu (hod)

t_{B1}přípravný čas jednoho kusu (hod)

d_vpočet kusů v dávce (-)

M_thodinová mzda (Kč/hod)

n.....počet kusů vyrobených za rok (-)

(C) Náklady na energii:

$$N_{ENERGIE} = P \cdot \eta \cdot t_{A1} \cdot C_E \cdot n = 20 \cdot 0,7 \cdot 0,042 \cdot 5 \cdot 350000 = 1\,029\,000 \text{ Kč} \quad (114)$$

Využití stroje:

$$\eta = \frac{\text{počet.kusů.za.směnu}_{SKUTEČNÝ}}{\text{počet.kusů.za.směnu}_{TEORETICKÝ}} \cdot 100 = 50 \div 90\% \quad \text{volím } 70\% \quad (115)$$

P.....příkon elektromotoru (kW)

η využití stroje (-)

t_{A1}výrobní čas jednoho kusu (hod)

C_Ecena energie (Kč/kWh)

n.....počet kusů (-)

(D) Celkové náklady:

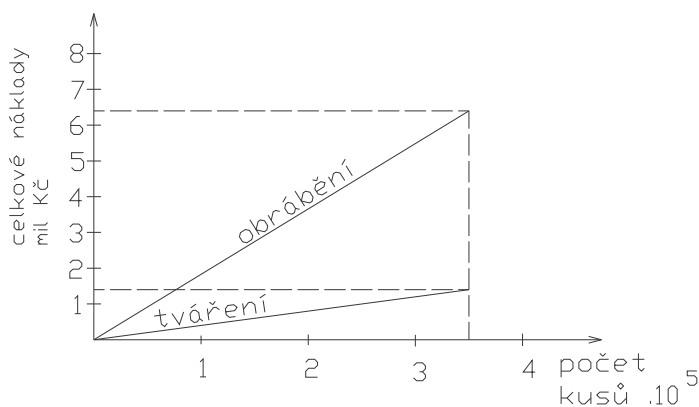
$$N_{CELKOVÉ} = N_{MAT} + N_{MZDY} + N_{ENERGIE} = 3622500 + 1764000 + 1029000 = 6\,415\,500 \text{ Kč} \quad (116)$$

(E) Náklady na jednici:

$$N_J = \frac{N_{CELKOVÉ}}{n} = \frac{6415500}{350000} = 18,3 \text{ Kč} \quad (117)$$

n.....počet vyráběných kusů (-)

$N_{CELKOVÉ}$ celkové náklady (Kč)



Obr.45 Graf technicko-ekonomického zhodnocení pro obrábění a tváření součásti

7. ZÁVĚRY

Cílem práce bylo navržení technologického postupu výroby šroubu vozového kola technologií objemového tváření za studena - protlačováním. Pro srovnání s jinou technologií jsem vybral technologii třískového obrábění - soustružení. Pokud porovnáme tyto dvě technologie z hlediska pevnostního, dojdeme k závěru kvalitnějšího výrobku zhotoveného právě metodou objemového tváření za studena. Vlákna protlačované součásti nejsou přerušena narozdíl od metody třískového obrábění. Materiál se při tváření zpevní přičemž vlákna zůstávají zachována neporušená. Tato technologie tedy dodává výrobkům značně kvalitnější mechanické vlastnosti, než technologie třískového obrábění.

V mé práci navrhuji technologický postup vytvarování součásti v pěti krocích na postupovém tvářecím automatickém lisu. V první fázi zhotovení součásti je odstřížen polotovár z drátu navinutého ve svitku. Tento polotovár jsem vypočítal pomocí zákona o zachování objemu, který zůstává stejný ve všech operacích. Výchozí polotovár bude tedy ocelový špalík z materiálu 13 240.3 o rozměrech $\phi 16h10 \times 36$ mm. Pěchováním a protlačováním se v dalších čtyřech operacích vytvaruje konečný tvar součásti. Pro tyto operace jsem vypočítal za pomoci vypočítaných logaritmických přetvoření základní přetvárný odpor. Přetvárný odpor jsem aproximoval z grafu pro zmíněný materiál a také počítal pomocí racionálně lomené funkce. Na základě určeného přetvárného odporu jsem zjistil, že k rovnoměrnému zpevnění nedojde v celé délce šroubu a navrhuji tedy pro dosažení požadovaných mechanických vlastností tepelné zpracování součásti kalením.

Dále jsem vypočítal celkovou sílu potřebou k vyhotovení součásti. Na základě vypočtené síly jsem zvolil za výrobní stroj pěti postupový tvářecí automat TPZ12 PQYZ vyráběný firmou ŠMERAL Brno.

V závěru práce jsem vypracoval technicko-ekonomické zhodnocení. Z tohoto zhodnocení vyplývá, že při výrobě požadovaných 350 000 kusy ročně bude cena součásti zhotovené technologií objemového tváření 4,1 Kč za jednici. Při výrobě součásti třískovým obráběním by byla cena jednice 18,3 Kč. Úspora celkových nákladů při výrobě součásti tvářením za studena tedy bude přibližně 5 mil. Kč. Pro hromadnou výrobu dané součásti je tedy technologie protlačování optimálním řešením.

Seznam použitých zdrojů

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. vyd. Brno : CERM, 2003. 505 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [2] FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno : CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] FELDMANN, Heinz D. *Protlačování oceli*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1962. 196 s.
- [4] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 1.vyd. Brno : CERM, 2004.167 s. ISBN 80-214-2764-7.
- [5] DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno : CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [6] BENEŠ, Milan, MAROŠ, Bohumil. *Křivky přetvárných odporů ocelí*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1986. 228 s.
- [7] HÝSEK, Rudolf. *Tvářecí stroje 1973*. Praha : SNTL, 1974. 588 s.
- [8] FOREJT, Milan. *Teorie tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno : VUT, 1991. 187 s. ISBN 80-214-0294-6.
- [9] http://material.karlov.mff.cuni.cz/people/janecek/studenti/Fyzika_materialu1/P2.PDF
- [10] <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/index.htm>
- [11] http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#011

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotka	Význam
α, χ	[°]	Úhel
ε	[-]	Poměrné prodloužení
ε^\bullet	[s ⁻¹]	Rychlost poměrné poměrného
η	[-]	Účinnost
φ	[-]	Logaritmické přetvoření
φ^\bullet	[s ⁻¹]	Rychlost logaritmického přetvoření
ρ	[kg/m ³]	Hustota
σ_{lmin}	[MPa]	Minimální tahové napětí
σ_D	[MPa]	Deformační přetvárný odpor
σ_P	[MPa]	Základní přetvárný odpor
τ_{krit}	[MPa]	Teoretické kritické skluzové napětí
τ_r	[MPa]	Teoretické skluzové napětí
A	[J]	Práce
A_C	[J]	Celková práce
A_j	[J/mm ³]	Měrná přetvárná práce
C_E	[Kč/kWh]	Cena energie
C_M	[Kč/kg]	Cena materiálu
d	[mm]	Průměr
d_y	[-]	Počet kusů v dávce
F	[N]	Síla
F_C	[N]	Celková síla
F_T	[N]	Tečná síla
$F_{tvářecí}$	[N]	Tvářecí síla
F_N	[N]	Normálová síla
G	[Mpa]	Modul pružnosti ve smyku
h	[mm]	Výška
l	[mm]	Délka
l_0	[mm]	Délka výchozí
l_1	[mm]	Délka konečná
M	[-]	Souhrnný součinitel deformačního odporu
M_t	[Kč/hod]	Hodinová mzda
m	[kg]	Hmotnost
$N_{celkové}$	[Kč]	Celkové náklady
$N_{energie}$	[Kč]	Náklady na energii
N_j	[Kč]	Náklady na jednici
N_{mat}	[Kč]	Náklady na materiál
N_{mzdy}	[Kč]	Náklady na mzdy
n	[-]	Počet kusů
s	[kg]	Spotřeba materiálu na jednici
t	[hod]	Strojní čas
t_{A1}	[hod]	Strojní čas výrobní
t_{B1}	[hod]	Strojní čas vedlejší
V	[mm ³]	Objem
v	[mm]	Výška

Seznam příloh:

Příloha 1. Výkres sestavy nástroje	3-3P2-001
Příloha 2. Kusovník	3-3P2-001/01
Příloha 3. Výkres součásti	3-3P2-001/02
Příloha 4. Výkres průtlačníku	3-3P2-001/03
Příloha 5. Výkres průtlačnice	3-3P2-001/04
Příloha 6. Materiálové listy	