



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SOUČÁSTI "REGULAČNÍ ČLEN" PROTLAČOVÁNÍM

PRODUCTION OF COMPONENTS "CONTROL ELEMENT" EXTRUSION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN STŘÍBRNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK LIDMILA, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Stříbrný

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

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

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

Výroba součásti "regulační člen" protlačováním

v anglickém jazyce:

Production of components "control element" extrusion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součást s názvem „regulační člen“ je v současné době zhotovována obráběním s následným tepelným zpracováním. S ohledem na tvar součásti, použitý materiál a počet vyráběných kusů se jeví jako výhodné nahradit stávající postup výroby protlačováním. Cílem práce tak bude navrhnout a ověřit možnosti zhotovování součásti protlačováním a současně prověřit vhodnost stávajícího tepelného zpracování.

Cíle diplomové práce:

Práce bude obsahovat zhodnocení současného stavu výroby. Analýzu možností výroby součásti „regulační člen“ protlačováním. Návrh nového technologického postupu výroby s potřebnými technologickými propočty. Konstrukční návrh protlačovacího nástroje. Prověření dosažených hodnot tvrdosti v průřezu výrobků po tepelném zpracování. Technicko-ekonomické zhodnocení nového výrobního postupu.

Seznam odborné literatury:

1. ASM-Metals Handbook: Formig and Forging. Vol.14. USA ASM International, 2004. S.978. ISBN 0-87170-020-4
2. FOREJT, Milan, Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, 2006. 225s. ISBN 80-214-2374-9
3. LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření II. 1.vyd. UO Brno. 2008. 106 s. ISBN 978-80-7231-580-2
4. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. Speciální technologie tváření. Část II. 1. vyd. Brno: CERM, 2011. 155s. ISBN 978-80-214-4406-5
5. NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. 186 s. ISBN 80-214-04016.
6. FREMUNT, P., J. KREJČÍK a T. PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli (odborná kniha). 1. vyd. Brno: Dům techniky. 1994. 230 s.
7. KOTOUČ, Jiří, et al. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Praha: Vydavatelství CVUT, 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 29.10.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

STŘÍBRNÝ Jan: Výroba součásti “regulační člen“ protlačováním

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru Strojírenská technologie předkládá návrh technologie výroby regulačního členu protlačováním – dílce ze slitiny hliníku EN AW 6082. Na základě literární studie problematiky objemového tváření za studena a výpočtu, byl navržen postup výroby na jednu operaci. Polotovarem byl určen špalík nařezaný z tyče o průměru 43,5 mm a délce 17,4 mm. Výroba je navržena pro kolenový razicí lis LLR 400 (výrobce Šmeral Brno a.s.) o jmenovité síle 4000 kN. Průtlačník a průtlačnice jsou zhotoveny z nástrojové oceli 19 830.4 tepelně zpracované dle výkresové dokumentace.

Klíčová slova: Tváření, protlačování za studena, regulační člen, EN AW 6082

ABSTRACT

STŘÍBRNÝ Jan: Production of components “control element” extrusion

The project elaborated in frame of engineering studies branch Engineering technology submitted technology design of manufacturing a control element by extrusion – part of aluminium alloy EN AW 6082. On the base of literature study of the cold forming problems and calculations was designed procedure on one operation. Semi-finished product was chosen cut block rods with a diameter of 43.5 mm and length of 17,4 mm. The production is designed for toggle stamping press LLR 400 (producer Šmeral Brno a.s.) with a nominal force 4000 kN. Extrusion punch and extrusion die are made of steel alloy 19 830.4 heat-worked according to drawing documentation.

Keywords: Forming, cold extrusion, control element, EN AW 6082

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRÍBRNÝ, Jan. *Výroba součástí "regulační člen" protlačováním*. Brno, 2013. 56 s., CD.

Diplomová práce. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, 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 Brně dne 24.5.2013

.....
Jan STRÍBRNÝ

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi CSc. a Ing. Vlastimilu Karasovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD	- 10 -
1 ROZBOR SOUČÁSTI	- 11 -
1.1 Možnosti technologie výroby	- 12 -
2 TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA	- 13 -
2.1 Mechanismy plastické deformace	- 13 -
2.2 Přetvárné odpory a křivky zpevnění při deformaci	- 14 -
2.3 Princip protlačování a jeho způsoby	- 15 -
2.4 Technologičnost tvarů součástí	- 17 -
2.5 Použité výpočtové vztahy	- 17 -
2.6 Nástroje pro protlačování	- 19 -
2.6.1 Nástroje pro dopředné protlačování	- 20 -
2.6.2 Nástroje pro zpětné protlačování	- 21 -
2.7 Nástrojové materiály	- 22 -
2.8 Zvyšování životnosti nástrojů	- 22 -
2.9 Materiály vhodné k protlačování	- 23 -
3 PROTLAČOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU	- 23 -
3.1 Tepelné zpracování Al - slitin	- 25 -
3.2 Mazání polotovaru	- 27 -
3.3 Simulace protlačování	- 27 -
4 STROJE PRO PROTLAČOVÁNÍ ZA STUDENA	- 28 -
5 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ	- 29 -
6 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY ZADANÉ SOUČÁSTI	- 30 -
6.1 Návrh polotovaru a výpočet objemu součásti	- 31 -
6.2 Technologické varianty návrhu protlačování	- 33 -
6.3 Experimentální stanovení přetvárného odporu materiálu	- 37 -
6.3.1 Zhodnocení a výběr nejlepší varianty	- 39 -
6.4 Výpočet deformačních odporů a sil	- 39 -
6.5 Volba tvářecího stroje	- 45 -
6.6 Postupový list a schematický postup protlačování	- 45 -
6.7 Návrh sestavy nástroje	- 47 -
6.8 Materiálové zkoušky	- 48 -
7 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	- 52 -
7.1 Výpočet nákladů pro technologii obrábění	- 52 -
7.2 Výpočet nákladů pro technologii tváření - protlačování	- 54 -
8 ZÁVĚRY	- 57 -
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	
SEZNAM PŘÍLOH	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	

ÚVOD [2], [7]

Tváření patří ve strojírenském průmyslu mezi nejdůležitější technologie zpracování materiálů ve finální výrobek. Tento proces se uskutečňuje za pomoci tvářecí síly, vyvozené v převážné většině strojem, bez odebrání třísky. Podstatou tváření je plastická, tedy trvalá, deformace. Pro dosažení plastické deformace je nutné překonání meze kluzu tvářeného materiálu. V průběhu tváření se mění materiálové vlastnosti, proto je nutné před i po některých operacích zařadit tepelné zpracování.

Tvářecí technologie se rozdělují na tváření plošné a objemové, a mohou probíhat za tepla nebo za studena. Mezi plošné tváření se řadí stříhání, rovnání, ohýbání, tažení plechu a mezi objemové tváření se řadí kování, pýchování, protlačování.

V případě této práce se bude jednat o protlačování za studena. Protlačování za studena je velice rychle se rozvíjející technologie, jejíž hlavní předností jsou krátké výrobní časy, snížení nákladů, minimální odpad a menší počet operací. Mezi základní způsoby protlačování patří dopředné protlačování, zpětné, stranové a sdružené. Finální výrobek se nazývá průtlaček. Příklady součástí zhotovených protlačováním za studena jsou uvedeny na obr. 1.

Úkolem v průmyslu je vyrobit produkt co možná nejlevněji bez ztráty kvality. Neustále tedy dochází ke zlepšování techniky, aby byla výroba co nejproduktivnější.

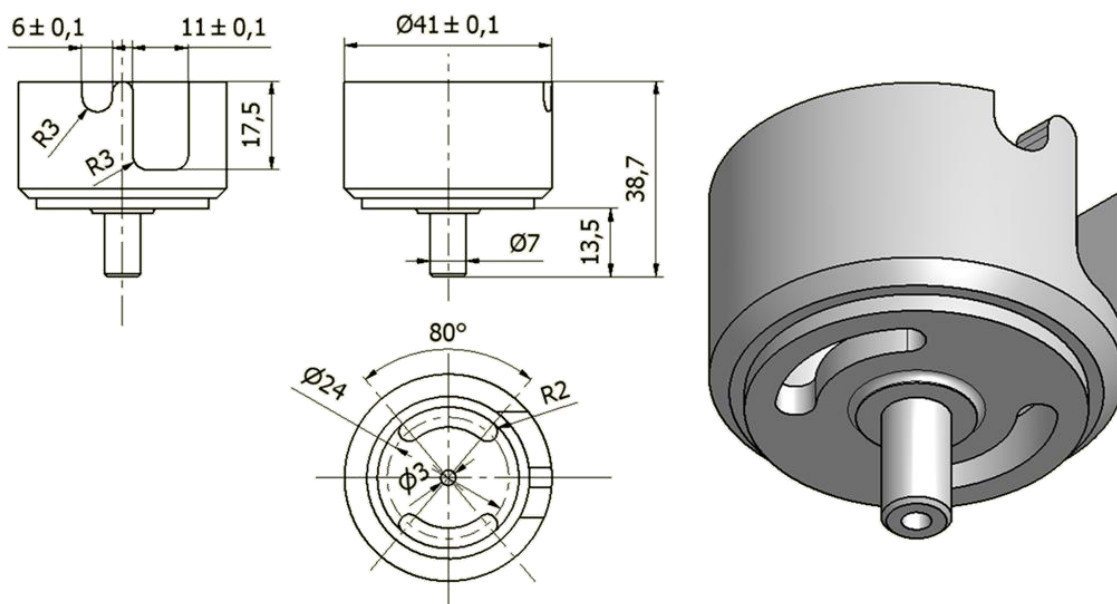


Obr. 1 Příklady průtlačku z kovů [2], [17]

1 ROZBOR SOUČÁSTI [6], [19]

Zadaná součást, včetně informativních rozměrů je zobrazena na obr. 2. Úplné rozměry jsou uvedeny na výkrese v příloze s označením DP-2013-001. Jedná se o komponentu ovládání v automobilu, jehož výroba probíhá v komerční firmě obráběním. Sériovost součásti je 300 000 kusů za rok. Materiál součásti je slitina hliníku AW 6082 (ČSN 42 4400), chemické složení tohoto materiálu je uvedeno v tab. 1. Tato slitina se vyznačuje dobrou tvárností, obrobitelností a svařitelností.

Vzhledem ke značným materiálovým i výrobním nákladům spojeným s obráběním součásti z tyče, je úkolem diplomové práce navrhnout ekonomičtější výrobní postup, tj. vyrobít polotovar součásti protlačováním. Vzhledem k deformačnímu zpevnění, které se při protlačování projeví, bude třeba součást po protlačení tepelně zpracována na stav T6, tj. rozpouštěcím žháním a umělým stárnutím. Tímto tepelným zpracováním se dosáhne rovnoměrné struktury materiálu a také stejné tvrdosti v celém průřezu.



Obr. 2 Obrobená součást

❖ Vlastnosti materiálu:

- chemická stálost, odolnost proti korozi, dobrá tvárnost i obrobitelnost
- velmi dobrá tvařitelnost za teplot 450 – 500 °C

❖ Použití:

- tvarově složitě, tenkostěnné, duté výrobky, nýtované konstrukce
- výrobky pracující při teplotách od + 50 do -70° C
- součásti se střední pevností ($R_m = 300 \text{ MPa}$)
- potravinářský, letecký, automobilový, stavební průmysl

Tab. 1 Chemické složení AW 6082 [19]

Prvek		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ostatní	Al
Hm. [%]	min.	0,70	-	-	0,40	0,70	-	-	-	zbytek
	max.	1,40	0,50	0,1	1,00	1,20	0,2	0,05	0,10	

1.1 Možnosti technologie výroby

Součást je tvarově poměrně jednoduchá. Pro její výrobu lze zvolit několik způsobů výroby, úkolem je zvolit tu metodu, která bude ekonomicky přijatelná a produktivní. Mezi možné výrobní technologie můžeme zařadit:

➤ Obrábění

Touto metodou lze vyrobit součást do finální podoby s přesnými rozměry a dobrou kvalitou povrchu. Pro výrobu lze použít běžně dostupné nástroje a stroje. Nevýhodou této technologie je především časová náročnost a ztráta materiálu ve formě třísek. Jelikož bude k výrobě jednoho kusu spotřebována větší část materiálu, předpokládá se, že bude tato technologie méně produktivní.

➤ Kování

V případě této technologie by se jednalo o výrobu zápustkovým kováním. Tato metoda se vyznačuje svou rychlostí výroby, jakostí a mechanickými vlastnostmi bez výrazné spotřeby materiálu. K výrobě součásti je však nutné zhotovit nástroj, který bude tepelně a mechanicky namáhán, dále zajistit stroj a také mazání materiálu pomocí grafitových mazadel, které značně zatěžují ekologii provozu. Zajištění těchto požadavků na výrobu je značně nákladné, ale z hlediska hospodárnosti materiálu je tato metoda vhodná pro výrobu. Kování je však pro naše účely nepříznivé, jelikož předpokládáme dobrou tvárnost použitého materiálu, a tedy i možnost tváření bez ohřevu.

➤ Protlačování

Touto metodou lze vyrobit součást s maximálním využitím materiálu s přesnými rozměry, dobrými mechanickými vlastnostmi a jakostí materiálu. Tváření probíhá za studena, tedy pod rekrytalizační teplotou. V materiálu dochází k velkým plastickým deformacím bez porušení struktury. Pro výrobu je zapotřebí zhotovit nástroj, který je obvykle méně finančně nákladný jako u jiných technologií, a pořídit stroj. V tomto případě odpadá nutnost ohřevu, a z toho plynoucí finanční náklady.

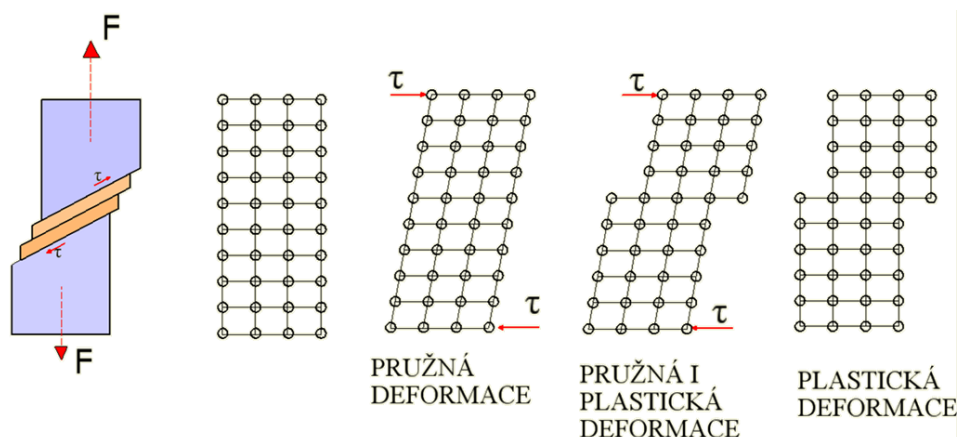
Po zvážení hledisek jako je sériovost, hospodárnost a mechanické vlastnosti materiálu, byla zvolena technologie protlačování. Tato technologie bude dále probrána v následujících kapitolách.

2 TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA [1], [18]

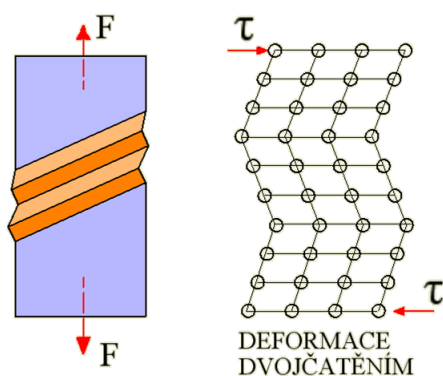
Objemové tváření materiálu je charakterizováno změnou tvaru za působení vnějších sil na polotovar. V našem případě se jedná o tváření za studena, tj. pod teplotou rekrytalizace při teplotě přibližně 20 °C a děje se za působení prostorové napjatosti. Ke zmíněným technologiím se řadí především protlačování a pýchování. Tyto dvě metody se vyznačují zejména vysokou úsporou materiálu. Některé ze způsobů protlačování budou blíže specifikovány v následujících podkapitolách.

2.1 Mechanismy plastické deformace [1], [4], [20]

Působením vnějších napětí na materiál se mění jeho původní tvar, říká se, že se materiál deformuje. Rozeznáváme deformaci pružnou a plastickou. Deformace pružná se vyznačuje tím, že se deformovaný materiál, po odstranění zdroje deformace, vrátí do původního stavu. Tento stav však trvá pouze do meze kluzu materiálu. Po překročení této meze vzniká plastická deformace. Ta zaručuje, že materiál se nevrátí do původního stavu, a změna je tedy trvalá. Deformace vzniká na hranicích zrn, nebo uvnitř těchto zrn. Při tvorbě plastické deformace rozeznáváme dva hlavní mechanismy tvorby, a to skluzem (Obr. 3) a dvojčatěním (Obr. 4).



Obr. 3 Znázornění pružné a plastické deformace skluzem [4]



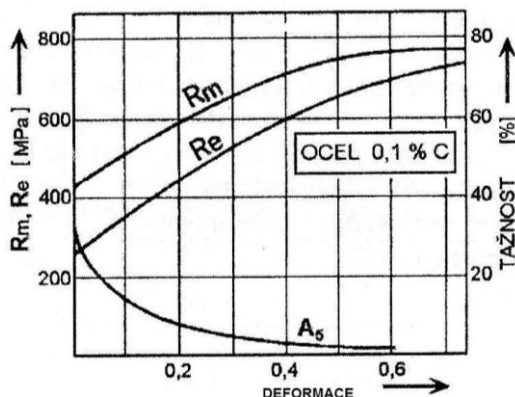
Obr. 4 Znázornění deformace dvojčatěním [4]

Vlivem plastické deformace se výrazně mění vlastnosti kovu. Při tváření za studena dochází především ke zpevnění, kdy postupně roste odpor proti dalšímu přetvoření, až nakonec dojde k úplnému vyčerpání plasticity materiálu. Původní Materiálové vlastnosti je možné obnovit ohřevem. Na obr. 5 je obecně znázorněn vliv deformace na pevnost v tahu, mez kluzu a tažnost. Se stoupajícím stupněm zpevnění také klesá houževnatost, což se může projevit

praskáním. Každý způsob tváření způsobí rozdílné zpevnění, jelikož druh deformace je rozdílný. Velikost zpevnění závisí především na redukovaném průřezu, na druhu tvářecí technologie a také na materiálu. V materiálu vzniká při nestejném zpevnění jednotlivých vrstev vnitřní pnutí. Jak již bylo uvedeno, zpevnění lze snížit ohřevem, tedy žiháním. Po dostatečném ohřátí kovu se začnou atomy kovu v mřížce pohybovat, tím se odstraní napjatost v kovu.

V materiálové struktuře nastávají při ohřevu dva děje:

- zotavení – probíhá za nízkých teplot, jejím účelem je odstranit vnitřní pnutí a některé poruchy v mřížce, mechanické vlastnosti se zatím nemění,
- rekrytalizace – ohřev na teploty vytvářející nová krystalová zrna, deformovaná struktura se obnovuje na nedeformovanou a mění se mechanické vlastnosti. Především klesá tvrdost, pevnost a zpevnění se úplně odstraní.



Obr. 5 vliv deformace na mechanické vlastnosti [4]

2.2 Přetvárné odpory a křivky zpevnění při deformaci [1], [4], [20]

Jak již bylo uvedeno, při tváření protlačováním za studena vzniká v kovu zpevnění, což se projeví v rozdílných mechanických vlastnostech materiálu, především změnou tvrdosti a pevnosti. Tuto závislost jsme schopni ověřit experimentálně při provedení pýchovací zkoušky. Za pomoci této zkoušky se získá závislost spýchované výšky zkušebního tělesa na síle, která byla nutná k přetvoření tohoto tělesa. Z těchto údajů lze vypočítat napětí (2.1) a logaritmické přetvoření (2.2). Z těchto údajů se následně sestrojí křivka zpevnění. Výsledný tvar válečku je obvykle soudečkovitý, tohoto se dá využít při zjišťování vlivu tření na průběh tváření. Schéma zkušebního válečku je zobrazeno na obr. 6.

$$\sigma = \frac{F}{S} [\text{MPa}] \quad (2.1)$$

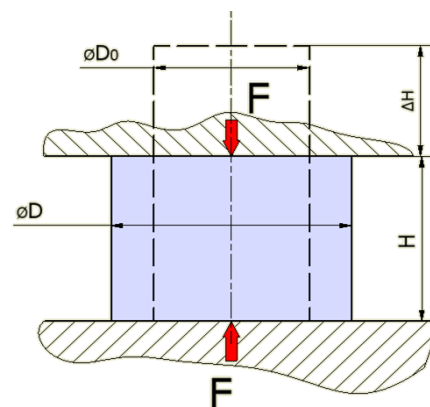
kde Fsíla [kN]
 Sobsah [mm²]

$$\varphi = \ln \frac{H_0}{H} [-] \quad (2.2)$$

kde H_0původní výška [mm]
 Hkonečná výška [mm]

Rozeznáváme dva druhy přetvárných odporů:

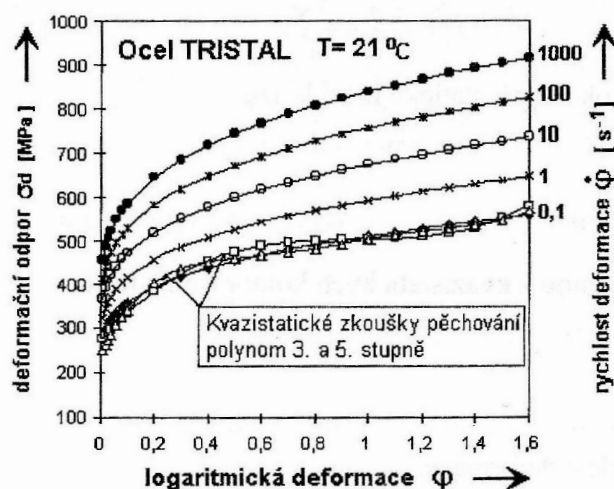
- ❖ σ_p – přirozený přetvárný odpor je vnitřní odpor materiálu proti působení vnějších sil za podmínek jednoosé napjatosti, při kterém nastane počátek plastické deformace. Do této závislosti jsou zahrnuty vlastnosti jako chemické složení, teplota, velikost přetvoření a rychlost přetvoření. Diagram přirozeného přetvárného odporu je zobrazen na obr. 8.



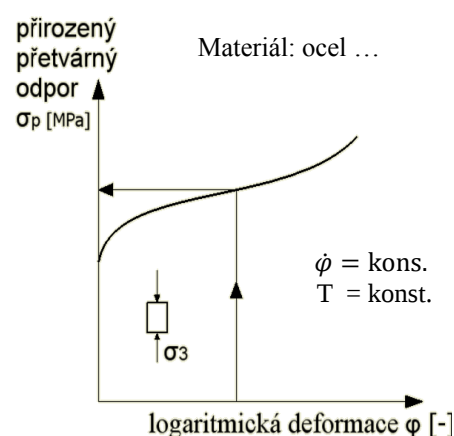
Obr. 6 Spýchovaný váleček [4]

- ❖ σ_d – **deformační odpor** je přirozený přetvárný odpor zvětšený o vliv pasivních technologických odporů, jako je: vliv tření, změny geometrie tvaru, změny teplotních podmínek, a změny rychlosti přetvoření. Příklad závislosti deformačního odporu na logaritmické deformaci a zahrnutým účinkem rychlosti deformace je zobrazen na obr. 7.

Tyto křivky umožňují, po přenesení hodnoty logaritmického přetvoření na křivku zpevnění, stanovit hodnotu přetvárného odporu. V případě křivek zpevnění deformačních odporů je to obdobné. Pro přesnější stanovení napětí lze hodnoty zpevnění proložit příslušným polynomem a tento polynom vyjádřit regresní funkcí, do kterých se dosadí hodnota logaritmického přetvoření.



Obr. 7 Diagram vlivu rychlosti přetvoření na velikost deformačního odporu oceli TRISTAL[4]

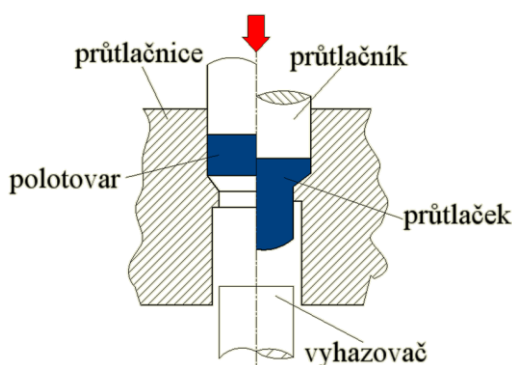


Obr. 8 Diagram závislosti přirozeného přetvárného odporu na logaritmické deformaci [4]

2.3 Princip protlačování a jeho působoby [1], [18]

Princip této technologie spočívá ve výrazné změně tvaru za působení síly vyvozené zpravidla lisem. Kov ve formě polotovaru je postupně stlačován v prostoru mezi průtláčnicí a průtláčnicí. Protlačovaný kov se přemisťuje cestou nejmenšího odporu a vytváří se výrobek, tzv. průtláček. Výchozím polotovarem bývá obvykle špalík, nebo tzv. kalota, která se získá vystřižením z plechu nebo dělením z tyče. Mezi největší výhody zde můžeme zařadit: úsporu materiálu, snížení výrobních časů, menší odpad, menší počet pracovních operací a snížení energií.

Z hlediska přemisťování kovu rozeznáváme tyto druhy protlačování:



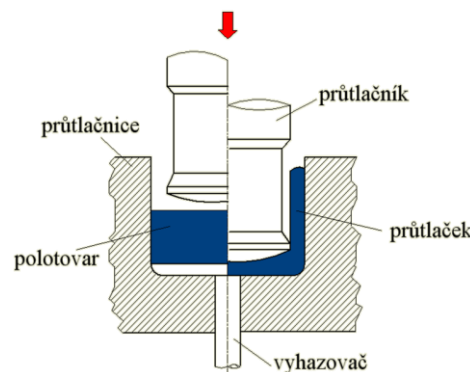
Obr. 9 Dopředné protlačování [1]

a) Dopředné protlačování

U dopředného protlačování (obr. 9) se kov přemisťuje ve směru působení průtláčnicku. Materiál odchází ven z nástroje ve tvaru kruhového průřezu nebo profilu. Tato metoda patří k nejpoužívanějším a často bývá při výrobě kombinovaná například s přechováním nebo zpětným protlačováním, například u výrobků čepového tvaru.

b) Zpětné protlačování

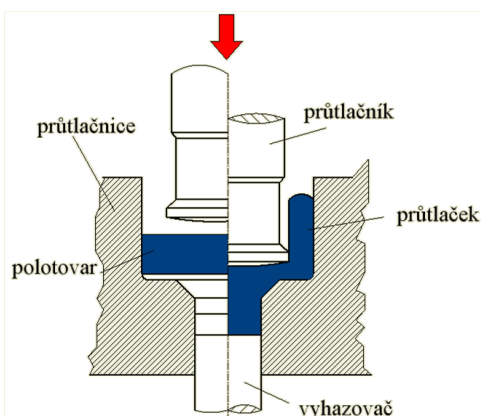
Při variantě protlačování zpětného (obr. 10) materiál odchází mezerou mezi průtlačnicí a průtlačníkem a je přemísťován proti směru působení průtlačníku. Konečný tvar po protlačení má tvar kalíšku. Průtlaček následně po protlačení ulpívá, díky pružné deformaci, na průtlačníku. Pro stržení průtlačku z průtlačnice používáme tzv. stírače.



Obr. 10 Zpětné protlačování [1]

c) Sdružené protlačování

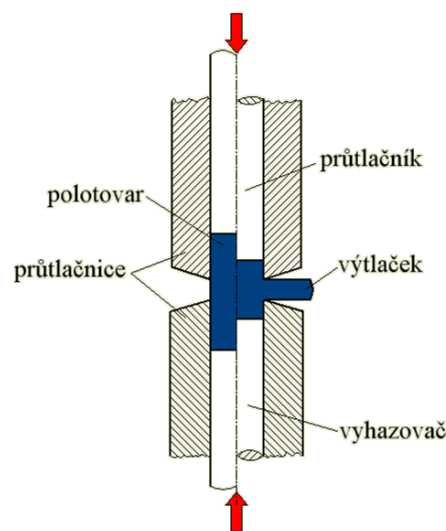
Jak už z názvu plyne, jedná se o kombinaci dvou předcházejících metod. Materiál zpravidla ulpívá v průtlačnici, proto bude zapotřebí využít vyhazovač. Pokud by ulpíval i na průtlačníku, bude využit i stírač. Tok materiálu je ve směru i v protisměru působení průtlačníku. Pohyb průtlačníku a vyhazovače musí být souběžný a seřízený tak, aby nedošlo k nerovnoměrnému protlačení. Schéma sdruženého protlačování je na obr. 11.



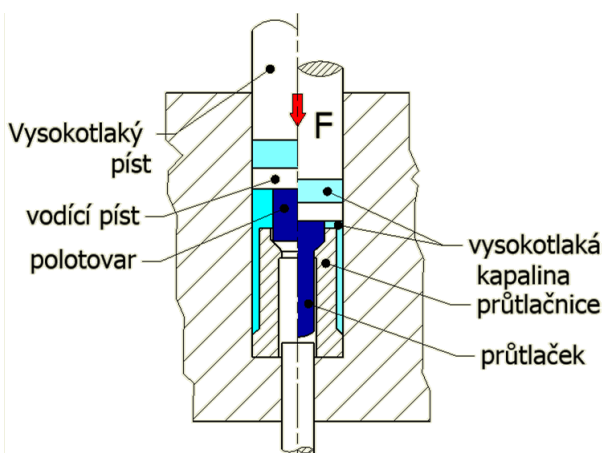
Obr. 11 Sdružené protlačování [1]

d) Stranové protlačování

Technologie stranového protlačování (obr. 12) spočívá v použití dělené průtlačnice a dvou průtlačníků. Polotovar je vložen do průtlačnice, a průtlačníky je vytlačován ven ve směru kolmém na osu průtlačníku. Tohoto způsobu se využívá k tvorbě výstupků či žeber v průtlačku.



Obr. 12 Stranové protlačování [1]



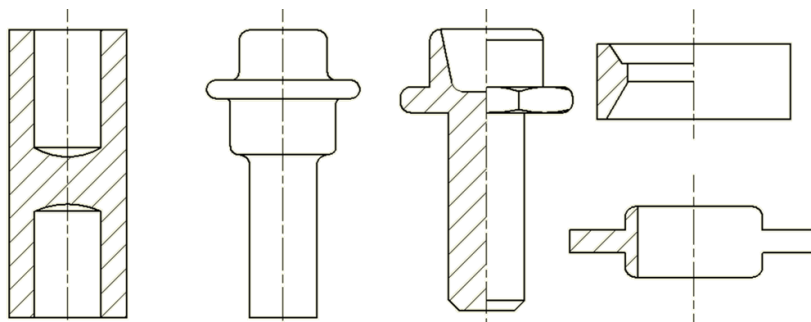
Obr. 13 Schéma hydrostatického protlačování [1]

e) Hydrostatické protlačování

Jedná se o protlačování s využitím kapaliny, která přenáší sílu. Kapalina, která je využívána, je pod tlakem, a obklopuje materiál polotovaru. Kapalina vniká v malém množství do oblasti styku nástroje a polotovaru a snižuje tak tření. Schéma hydrostatického protlačování je zobrazeno na obr. 13.

2.4 Technologičnost tvarů součástí [1], [3]

Součásti, které jsou vhodné k protlačování za studena, mají zpravidla symetrický tvar. Jsou to obvykle součásti tvaru kalíšku, čepů a rotačních částí s průchozím otvorem. Některé druhy tvarů průtlaku jsou uvedeny na obr. 14.



Obr. 14 Některé typy protlačovaných součástí [1]

2.5 Použité výpočtové vztahy

Základním vztahem, pro hodnocení změny průřezu je výpočet přetvoření. Tyto vypočítané hodnoty jsou dále využívány pro vypočítání deformačního napětí.

a) Protlačování dopředné (obr. 15)

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} \quad (2.3)$$

kde φlogaritmické přetvoření [-]
 S_0počáteční průřez [mm²]
 Skonečný průřez [mm²]
 D_0počáteční průměr [mm]
 D_1konečný průměr [mm]

$$\varepsilon = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} \quad (2.4)$$

kde εpoměrná deformace [-]

Maximální rychlost přetvoření v osové směru:

$$\dot{\varphi}_z = 2 \cdot v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \cdot \tan \alpha \quad (2.5)$$

kde v_0rychlost nástroje [m/s]
 R_0počáteční poloměr [mm]
 Rkonečný poloměr [mm]
 αúhel redukčního kužele [°]

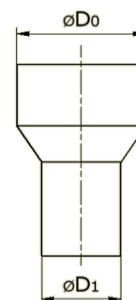
Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\dot{\varphi}_r = -\frac{\dot{\varphi}_z}{2} \quad (2.6)$$

Výpočet deformačního odpor pro dopředné plné protlačování dle Feldmanna:

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\hat{\alpha}} \right) \ln \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f_2 \frac{D_3 \cdot L_3}{D_2^2} \sigma_{ps} + 4f_1 \frac{L_1}{D_2} \sigma_p \quad (2.7)$$

kde σ_{ps}střední přetvárný odpor [MPa]
 f_1, f_2koeficienty tření [-]
 $\hat{\alpha}$úhel redukčního kužele [rad]



Obr. 15 Dopředné protlačování

D_2počáteční průměr v zásobníku [mm]
 D_3konečný průměr v očku [mm]
 L_1délka průtlačku v zásobníku [mm]
 L_3délka průtlačku v očku [mm]
 σ_{p1}přetvárný odpor [MPa]

Schéma k rovnici (2.7) je uvedeno na obr. 17. Schematické zobrazení středního přetvárného odporu je uvedeno v obr. 18.

b) Zpětné protlačování (obr. 16)

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - d^2} \quad (2.8)$$

kde dvnitřní průměr průtlačku [mm]

$$\varepsilon = \frac{d^2}{D_0^2} \quad (2.9)$$

Maximální rychlost přetvoření v osové směru

$$\dot{\varphi}_z = - \frac{v_0}{R \cdot \tan \alpha + b_0} \quad (2.10)$$

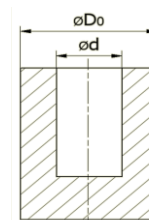
kde b_0tloušťka dna průtlačku [mm]

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

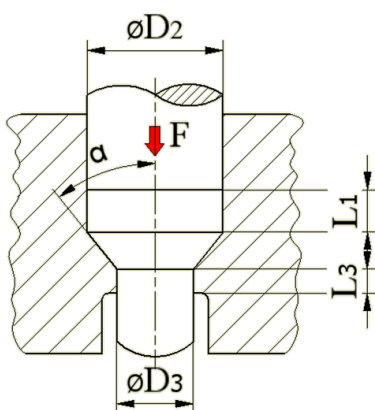
$$\dot{\varphi}_r = \frac{v_0}{2 \cdot (R \cdot \tan \alpha + b_0)} \quad (2.11)$$

Deformační odpor pro zpětné protlačování dle Siebela:

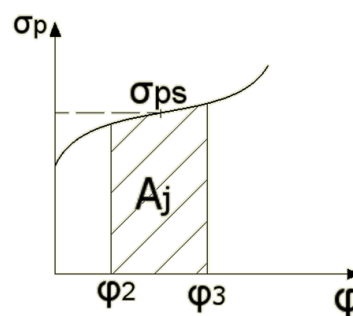
$$\sigma_d = 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{D_0^2}{d^2} \left(\log \frac{D_0^2}{D_0^2 - d^2} + \frac{D_0^2}{D_0^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D_0^2 - d^2} \right) \quad (2.12)$$



Obr. 16 Zpětné protlačování



Obr. 17 Geometrický model dopředného protlačování [4]



Obr. 18 Křivka zpevnění a určení středního přetvárného odporu [4]

c) Výpočet síly

$$F = \frac{\sigma_d}{S} \quad (2.13)$$

d) Výpočet přetvárného odporu

❖ Dle **Johnson-Cookovi** rovnice pro BCC materiály:

$$\sigma_p = (A + B \cdot \varphi^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)\right] \quad (2.14)$$

kde	A.....	mez kluzu stanovená z kvazistatických testů	[MPa]
	n.....	exponent zpevnění	[-]
	m.....	exponent citlivosti na rychlost deformace	[MPa]
	B.....	modul zpevnění	[MPa]
	C.....	koeficient citlivosti na rychlost deformace	[-]
	T ₀	teplota okolí	[K]
	T _m	teplota materiálu	[K]
	$\dot{\varphi}$	rychlost deformace	[s ⁻¹]
	$\dot{\varphi}_0 = 1$	referenční rychlost přetvoření	[s ⁻¹]

❖ Dle **Zerilli a Armstronga** pro FCC materiály:

$$\sigma = \sigma_0 + C_2 \cdot \varphi^n \cdot [\exp(-C_3 \cdot T + C_4 \cdot T \cdot \ln \dot{\varphi})] \quad (2.15)$$

kde	σ_0	mez kluzu	[MPa]
	C ₂ , C ₃ , C ₄	materiálové koeficienty	[-]
	T.....	teplota okolí	[K]

e) Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu

$$\sigma_{ps} = \frac{1}{\varphi_3 - \varphi_2} \int_{\varphi_2}^{\varphi_3} \sigma_p \cdot d\varphi = \frac{1000 \cdot A_j}{\varphi_3 - \varphi_2} \quad (2.16)$$

kde	A _j	měrná přetvárná práce	[J.mm ⁻³]
-----	----------------------	-----------------------	-----------------------

Schéma křivky k rovnici (2.16) je uvedeno na obr. 18.

2.6 Nástroje pro protlačování [1], [4], [10]

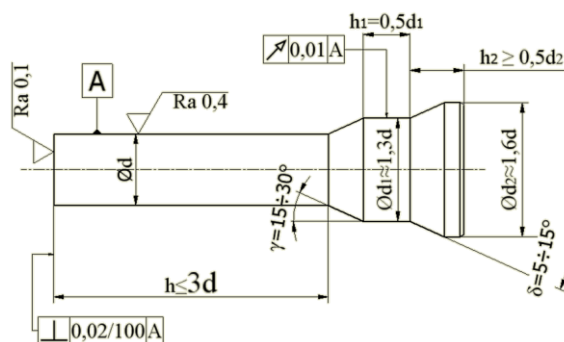
Tvářecí nástroje mají velký vliv na kvalitu a hospodárnost výroby. Při konstrukci nástrojů je nutné dodržovat některé zásady, jako jsou: dostatečná tuhost nástroje, souosost nástroje, spolehlivé vyhazování a stírání průtlačku, jednoduchost a vyměnitelnost funkčních částí, správná volba materiálu nástroje, zajištění dobrého chlazení a mazání. Pro konstrukci nástrojů jsou stěžejní rozměry výchozího polotovaru a konečného průtlačku, materiál průtlačku, přetvárná síla a typ tvářecího stroje.

Konstrukci nástroje se musí věnovat dostatečná pozornost. Špatná konstrukce může způsobit prasknutí nástroje a tím i prodražení výroby. Nástroj musí tedy splňovat určitá kritéria, ať už technologická, konstrukční nebo bezpečnostní, která musí být dodržena. Od volby správného nástroje se očekává dlouhá životnost, která je závislá na několika faktorech, jako jsou:

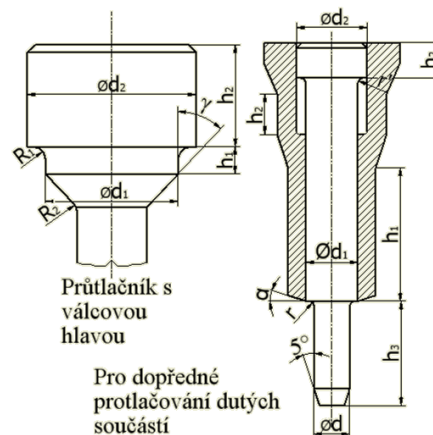
- druh materiálu průtlačku
- způsob protlačování
- tepelné zpracování polotovaru
- mazání
- seřízení nástroje
- volba nástrojového materiálu
- tuhost a přesnost stroje
- povrchová úprava polotovaru

2.6.1 Nástroje pro dopředné protlačování [4], [10]

Průtlačníky bývají vyrobeny z jednoho kusu, a mohou mít buď kuželovou, nebo válcovou hlavu. Pro dopředné duté protlačování se používá dělený průtlačník. Pro vyloučení koncentrace napětí na přechodu mezi upínací částí a dříkem volíme pozvolné zvětšování průměru průtlačníku. Některé tvary průtlačníků jsou uvedeny na obr. 19 a obr. 20.

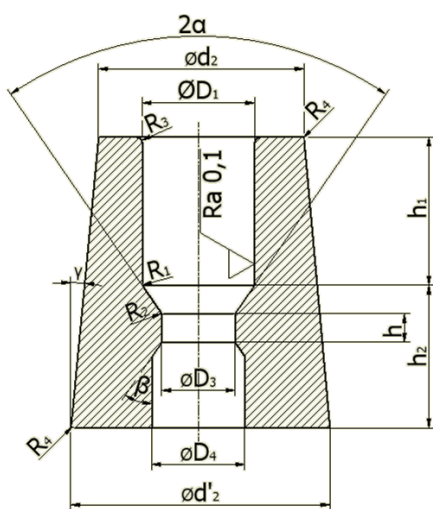


Obr. 19 Průtlačník pro dopředné plné protlačování [4]

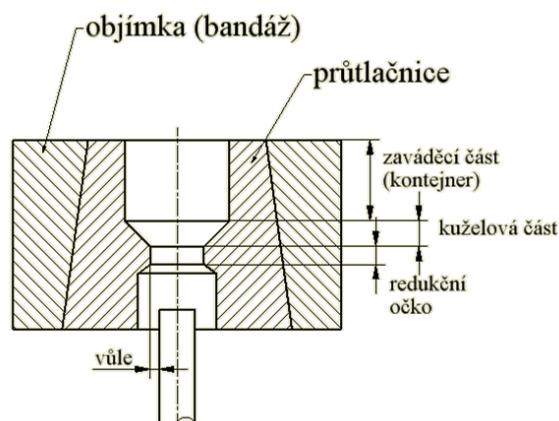


Obr. 20 Další druhy průtlačníků [13]

Průtlačnice pro dopředné protlačování (Obr. 21) jsou vystavené velkému tlaku a jsou náchylné k praskání. Pro delší životnost a vyměnitelnost průtlačnice se používají objímky (Obr. 22) do kterých je průtlačnice vložena, nebo ji lze navrhnout složenou ze dvou částí. Nejčastější tvar redukční části je kužel. Pro snadnější vkládání je vstupní část opatřena rádiusem nebo úhlem. Úhel 2α může mít rozměry pro ocel v rozmezí $40 - 130^\circ$ a pro lehké kovy až 180° . Pokud je úhel 2α vyšší, roste síla na protlačení, ale naproti tomu klesá síla na vyražení.



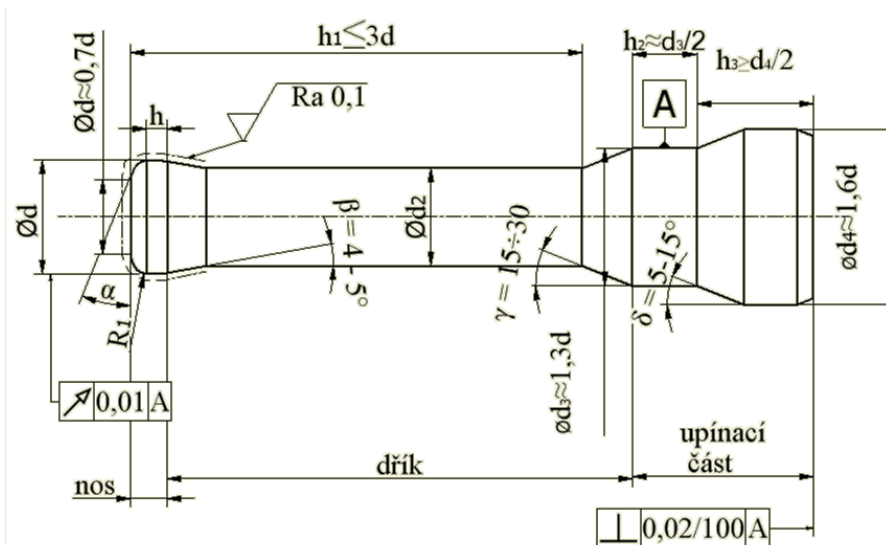
Obr. 21 Průtlačnice [4]



Obr. 22 Průtlačnice v objímce [4]

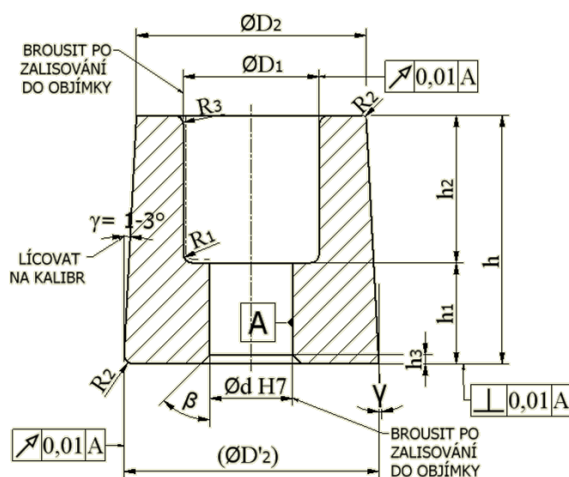
2.6.2 Nástroje pro zpětné protlačování [4], [13]

Návrh tvaru **průtlačníků** pro zpětné protlačování je důležitý z hlediska protlačovací síly. Ovlivňuje její průběh a velikost. Obvykle jsou průtlačníky namáhány na tlak a často také při stírání průtlačku na ohyb a tah. Aby se zmenšilo tření při tečení materiálu a také snížila stírací síla je průtlačník opatřen fazetkou. Příklad průtlačníku je zobrazen na obr. 23.

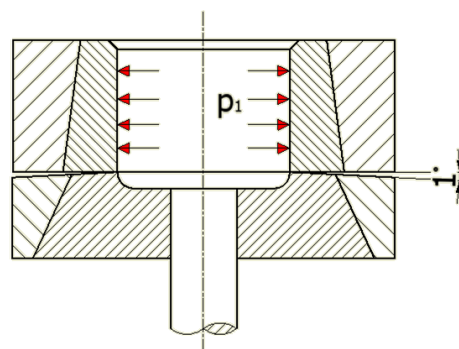


Obr. 23 Průtlačník pro zpětné protlačování [4]

Průtlačnice pro zpětné protlačování jsou dvojího druhu, dělené nebo celistvé. Dělené průtlačnice (Obr. 25) jsou složeny ze dvou částí, přičemž ve spodní části se nachází dno průtlačku včetně přechodového rádiusu a v horní části plášť průtlačku. Dělené průtlačnice jsou používány z hlediska menšího namáhání převážně pro nezelezné kovy. Celistvé průtlačnice (Obr. 24) jsou schopné snášet větší tlaky a jsou používány převážně pro ocel.



Obr. 24 Průtlačnice pro zpětné protlačování [4]



Obr. 25 Průtlačnice dělená [4]

2.7 Nástrojové materiály [1], [5]

Na nástrojové materiály jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska mechanických vlastností, jako je dostatečná pevnost v tlaku, houževnatost a vysoká odolnost proti opotřebení. Významným ukazatelem při návrhu nástroje je jeho trvanlivost. Případná porucha nástroje či výměna funkčních částí komplikuje proces výroby, proto je nutné věnovat návrhu materiálu značnou pozornost. Druh nástrojového materiálu je volen podle počtu kusů v sérii, druhu tvářeného materiálu, tvaru, velikosti součásti a velikosti deformace. Dalším důležitým hlediskem, u nástrojů pro protlačování za studena, je tepelné zpracování. U nástrojů z oceli se jako tepelné zpracování používá žíhání s následným kalením pro zvýšení tvrdosti. Pro nástroje se využívají nástrojové oceli a slinuté karbidy, obvykle wolframu a kobaltu.

- **Oceli pro průtlačníky:** 19 314 (1.2510), 19 315, 19 426, 19 569, 19 572, 19 820 (1.3333), 19 830 (1.3343)
- **Oceli pro průtlačnice:** 19 436, 19 550, 19 569, 19 735 (TENAX H), 19 655 (1.2767), 19820 (1.3333), 19 830 (1.3339)
- **Bandáže průtlačnic:** 19 550, 19740
- **Vyhazovač:** 19 314(1.2510), 19 569, 19 820 (1.3333), 19 830 (1.3343)
- **Prášková metalurgie:** vanadis 4, vanadis 4 extra, vanadis 30, vancron 40

2.8 Zvyšování životnosti nástrojů [12]

Jedním ze způsobů zvyšování životnosti tvářecích nástrojů je nanášení povlaků. Jedná se o tenké vrstvy o vysoké tvrdosti v řadech jednotek až desítek mikrometrů. Proces povlakování se dá rozdělit na dva způsoby:

- CVD (Chemical Vapour Deposition)
- PVD (Physical Vapour Deposition)

CVD – jak již z anglického názvu plyne, jedná se o chemické povlakování z plynné fáze. Cílem je vytvoření vrstvy o tloušťce 6 – 10 μm , která bude odolávat adheznímu opotřebení. Proces probíhá za působení vyšších teplot a chemických reakcí mezi povlakem a nástrojovým materiálem. K nanášení se používají povlaky typu karbidů (karbid titanu - TiC), nitridů (nitrid titanu - TiN), nebo jejich kombinace (karbonitrid titanu – TiCN). Pro zdárné nanášení povlakové vrstvy je nutné, aby měl povrch nástroje dostatečnou tepelnou vodivost a nízkou drsnost.



Obr. 26 Pvlakovací centrum pro PVD [15]

PVD – jedná se o nanášení vrstvy pomocí fyzikálních procesů. Proces může probíhat napařováním, napařováním, iontovým povlakováním a iontovou implantací. Vlastnosti výsledného povrchu jsou podobné jako u CVD povlaků, proces se však uskutečňuje při nižších teplotách.

Po nanášení povlaku na nástroj se několika násobně zvyšuje životnost. Příklad povlakovacího centra pro PVD povlaky je na obr. 26.

2.9 Materiály vhodné k protlačování [1], [3]

Pro technologii protlačování jsou vhodné oceli i neželezné kovy. Při návrhu materiálu se nejčastěji klade za požadavek nízká mez kluzu, malé zpevnění a dostatečná tvárnost.

- ❖ **Ocel** je velmi rozšířeným materiálem pro strojírenské součásti a pro protlačování se hodí převážně pro velké série. Tvárnost oceli se zjišťuje pýchovacími zkouškami. Stupeň deformace zásadně ovlivňuje chemické složení a struktura materiálu. Významný vliv na tvárnost ocelí má uhlík. Jestliže procentuální obsah uhlíku v kovu roste, klesá tvárnost. Nejlépe se tvářejí oceli s obsahem uhlíku pod 0,25%. Dalšími prvky, které ovlivňují tvárné vlastnosti oceli je křemík, mangan, síra, fosfor, kyslík, dusík, a chrom.
 - Křemík – je charakteristický zvyšováním tvrdosti, pevnosti, meze kluzu, a zmenšováním tažnosti a vrubové houževnatosti.
 - Mangan – se také podílí na snížení tvárnosti ocelí
 - Síra – škodlivá, snižuje houževnatost
 - Fosfor – způsobuje křehkost materiálu
 - Kyslík – nežádoucí, s uhlíkem vytváří bubliny, odstraňujeme dezoxidací
 - Dusík – způsobuje stárnutí
 - Chrom – zvětšuje tvrdost, zmenšuje tvárnost
- ❖ **Neželezné kovy** vhodné k protlačování se dají rozdělit na chemicky čisté a slitiny.
 - **Chemicky čisté kovy** lze nejlépe protlačovat. Nevyžadují použití velké síly na deformaci, snesou vysoký stupeň deformace a dosahují dobré jakosti. Mezi chemicky čisté kovy vhodné k protlačování řadíme olovo, měď, cín, hliník, stříbro. Nejsnadněji protlačovaným kovem za studena je čistý hliník. Jeho procentuální zastoupení v materiálu se pohybuje kolem 99,5 až 99,8%. K protlačování se lépe hodí hliník měkký, ale obvykle má tvrdost 17 až 25 HB.
 - **Slitiny neželezných kovů** mají, oproti čistým kovům, odlišné mechanické vlastnosti. Přídavné prvky ve slitinách mění jejich chování při deformaci. Při tváření dochází ke zvyšování tvrdosti vyšším stupněm zpevnění, více se zahřívají, a rychleji opotřebovávají materiál protlačovacích nástrojů. Mezi nejvýznamnější neželezné kovy vhodné k protlačování patří slitiny hliníku. Legující prvky mají významný vliv na schopnost protlačování. Vlastnosti a jejich problematika jsou popsány v následující kapitole.

3 PROTlačOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU [12], [16], [18]

Hliník je třetí nejrozšířenější prvek na zemské kůle. Vyskytuje se v mnoha minerálech, jako je korund, spinel, kyanit. Nejlépe využitelný je v rudě zvané bauxit. Mezi hlavní výhody tohoto prvku patří: nízká hmotnost, korozní odolnost, elektrická a tepelná vodivost.

Slitiny hliníku jsou doprovázeny prvky, jako je zinek, hořčík, křemík, měď a další. Toto označování je specifikováno v normách pro tváření hliníku a jeho slitin ČSN EN 573-1 až 3 a jeho základní zařazení do skupin dle prvků je uvedeno v tab. 2.

Všechny uvedené slitiny v tab. 2 by měli mít dobrou tvařitelnost jak za studena, tak i za tepla. U všech těchto slitin lze měnit mechanické, chemické i fyzikální vlastnosti pomocí chemického složení, tepelného zpracování a parametry tváření.

Největší pozornost z hlediska vlastností je zaměřena na pevnost. Čistý hliník má nízké pevnostní vlastnosti, proto se pro pevnostní konstrukce využívá převážně slitin. Jed-

Tab. 2 Rozdělení podle ČSN EN 573-1 [12]

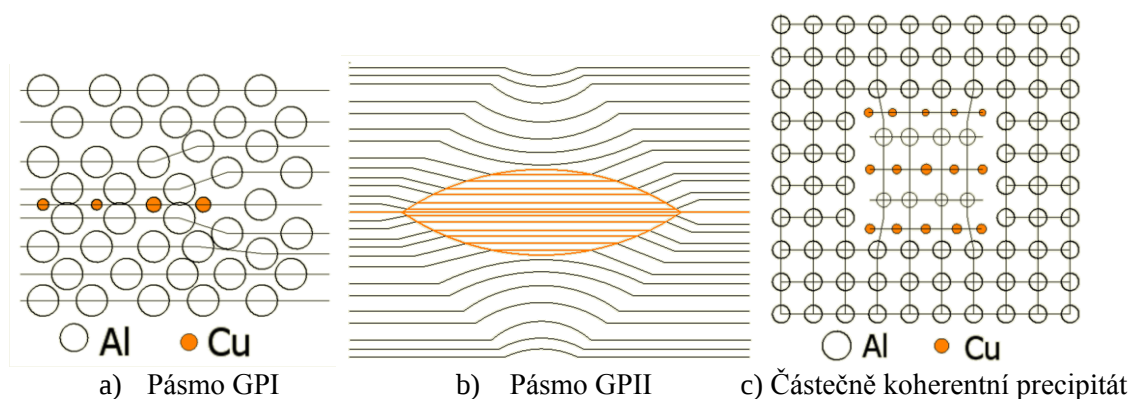
Hlavní legující prvek	Označení série
Hliník čistoty 99.0%	1000
Měď	2000
Mangan	3000
Křemík	4000
Hořčík	5000
Hořčík a křemík	6000
Zinek	7000
Jiné prvky	8000
Nepoužitá skupina	9000

nou z možností jak zvýšit pevnost je tedy přidání atomů legujícího prvku do prvku základního. Atomy vstupují intersticiálně nebo substitučně do mřížky základního kovu a tento kov zpevňují. Další možnosti zpevňování kovu je **precipitační vytvrzování**. Tento způsob je spojený s tepelným zpracováním. Precipitací je nazýván rozpad přesyceného tuhého roztoku za teplot nižších, než je teplota solidu pro určitou slitinu. Pro vznik přesyceného tuhého roztoku jsou nutné křivky změny rozpustnosti legujících prvků a dostatečně rychlá doba ochlazování. Princip precipitačního vytvrzování byl objeven nezávisle Guinierem a Prestonem v roce 1938. Zjistili, že na mono-

krystalech Al - Cu vznikají destičkovité oblasti bohaté na měď.

Proces vytvrzení je složen ze dvou po sobě jdoucích operací a jsou to: rozpouštěcí žihání a umělé stárnutí. Rozpouštěcí žihání je důležitý proces, jelikož je nutné se dostat při ohřevu s teplotou nad křivku změny rozpustnosti a přitom nepřekročit teplotu solidu. Pokud by došlo k překročení této teploty, tak zhrubne zrna a tato slitina je znehodnocena. Obecně platí, že tato teplota by měla být okolo 10°C pod teplotou solidu. Výdrž na této teplotě se odvíjí od počtu kusů a druhu materiálu. Ochlazování je potřeba získat přesycený tuhý roztok a zabránit vyloučení fází na hranicích zrn. Pokud by při nesprávném ochlazování došlo k segregaci, slitina by neměla dobré mechanické ani korozní vlastnosti. Další operací je stárnutí. Stárnutí se rozděluje dle okolního prostředí na přirozené (na vzduchu při běžné teplotě např. 20°C) a umělé (při zvýšené teplotě). Po rozpouštěcím žihání je tedy slitina ochlazena a následně ponechána na okolní teplotě. Na této teplotě dochází v přesyceném tuhém roztoku k difuzi atomů prvku přísady. Atomy se shromažďují a tvoří shluky, dochází ke koherentním precipitacím, která jsou označena jako **Guinier-Prestonova pásma I (GPI)** (Obr. 27a). Následně vznikají destičkové útvary, které se nazývají **Guinier-Prestonova pásma II (GPII)** (Obr. 27b). Po vytvoření těchto dvou pásem je stárnutí ukončeno. Při zvýšené teplotě stárnutí a delší časové prodlevě dochází k většímu růstu pásem a objevují se **částečně koherentní fáze** (Obr. 27c) a při zvýšení objemu této fáze se sníží tvrdost. Tomuto stavu se říká přestárnutí slitiny.

Technologie tváření je založena na principu změny tvaru, bez porušení materiálu. Při působení převážně tlakových deformací se dosahuje výrazně většího přetvoření. Mezi technologie, kde převládají tlakové deformace, se řadí protlačování, kování a válcování. Odpor materiálu proti přetvoření je reprezentován deformačním odporem. Tento odpor lze získat z pěchovacích zkoušek, kdy se předem připravený váleček slisuje na určitou výšku h_i . Výstupem z této zkoušky je závislost působení síly na deformované výšce vzorku. Z těchto hodnot lze získat charakteristiky jako je již zmiňovaný deformační odpor materiálu, rychlost deformace, logaritmické přetvoření, deformační práci a lze také zkoumat tribologické vlastnosti mazadel při tváření. Při této zkoušce je také důležitým faktorem teplota, jelikož tváření probíhá za studena nebo za tepla.



Obr. 27 Znázornění schémat probíhajících při vytvrzování ve slitině [16]

3.1 Tepelné zpracování Al - slitin [7], [12]

Tepelné zpracování kovu se provádí za účelem zlepšení, nebo dosažení mechanických a strukturních vlastností. Teplotní cyklus při tepelném zpracování Al-slitin je složen ze dvou fází:

- žíhání,
- vytvrzování.

❖ **Žíhání** – tento způsob tepelného zpracování se provádí, zejména když je potřeba zlepšit mechanické vlastnosti po některém ze způsobu tváření. Princip žíhání spočívá v ohřevu na žíhací teplotu, výdrži na této teplotě určitou dobu a různě dlouhé či pomalé době ochlazování.

- **Rekrystalizační žíhání** – provádí se po tváření za studena, kdy dochází za působení teploty k přeměně z deformované struktury na novou nedeformovanou. V materiálu dochází také ke snížení pevnostních a zvýšení plastických vlastností. Materiál lze tedy po tomto žíhání opět tvářet. Pro tento způsob žíhání se běžně používají žíhací teploty v rozmezí 250 – 500 °C. Volba této teploty však závisí na druhu materiálu a způsobu žíhání.
- **Žíhání ke snížení pnutí** – tento způsob zpracování se nachází pod teplotou rekrystalizace a to nejčastěji v rozsahu teplot od 300 do 400 °C.
- **Stabilizační žíhání** – provádí se za účelem stabilizování struktury a vlastností materiálu. Užívá se v případech, kdy má slitina pracovat při zvýšené teplotě. Teplota stabilizačního žíhání se nachází výše než maximální teplota při provozu součásti tj. 240 – 350 °C.
- **Homogenizace** – úkolem tohoto tepelného zpracování je odstranění nebo snížení chemické heterogenity za působení zvýšené teploty. Tento děj se děje pomocí difuzních procesů a může být jednostupňová nebo dvoustupňová. Doba žíhání se odvíjí od chemického složení a struktury materiálu. Některé prvky jsou méně schopny difundovat, jako je např. Mn, Cr, Fe. Uvedené prvky značně komplikují proces chemické homogenity.
- **Žíhání na měkko** – cílem toho způsobu tepelného zpracování je snížení tvrdosti před samotným zpracováním. Jelikož po tepelném zpracování dochází k přirozenému stárnutí, je nutné vyžíhané kusy co nejdříve zpracovat.

- ❖ **Vytvrzování** – tímto způsobem tepelného zpracování lze měnit mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti. Tyto vlastnosti lze však měnit pouze v případě, že má daná slitina v rovnovážném diagramu výraznou změnu rozpustnosti na teplotě. Přesycený tuhý roztok α a jeho křivky rozpustnosti mají tedy velký vliv na vytvrzování slitin hliníku.

Vytvrzování zahrnuje dva základní body, které se navzájem ovlivňují, a jejich výsledek je závislý na dodržení jejich postupu.

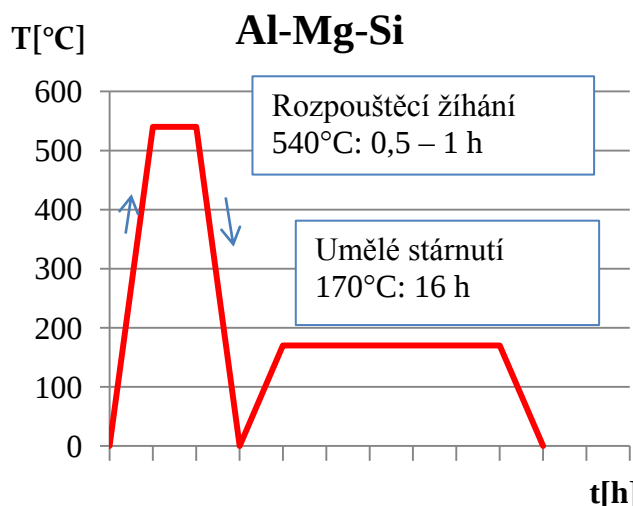
- **Rozpouštěcí žíhání** – zahrnuje ohřev na rozpouštěcí teplotu. Tato teplota významně ovlivňuje rozpouštění přísadových prvků v matici. Pokud bude teplota nízká, nedojde ke smíšení prvků a pokud bude vysoká, může dojít k natavení hranic zrn a k následnému zhrubnutí zrna. Po ohřevu následuje doba prodlevy, při které dochází k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku. Doba prodlevy je dána tloušťkou materiálu a neměla by se zbytečně prodlužovat z důvodu zhoršení materiálových vlastností. Ochlazování probíhá do vody při teplotách závisejících na složitosti tvaru tj. od 20°C do 80 °C. Úkolem je získání přesyceného tuhého roztoku a zabránění segregaci fází. V tomto stavu se slitina vyznačuje nízkými mechanickými vlastnostmi.
- **Stárnutí** – rozdělujeme na tváření umělé (za zvýšených teplot) a přirozené (za pokojové teploty). Při stárnutí se mění mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti. Princip stárnutí je založen na rozpadu přesyceného tuhého roztoku a lze jím dosáhnout vysokých pevnostních vlastností. Od okamžiku, kdy je v materiálu získán přesycený tuhý roztok, probíhají v materiálu změny struktury, které ovlivňují jeho vlastnosti. Při vyšší teplotě stárnutí se rychleji dosáhne pevnostních vlastností. Volbou teploty a času lze tedy korigovat mechanické vlastnosti materiálu.

Tepelné zpracování slitin Al-Mg-Si

Tyto slitiny jsou schopné vytvrzování. Slitiny s převládajícím obsahem Mg se vyznačují vyšší korozivzdorností a horší tvařitelností oproti slitinám s přebytkem Si. Slitiny s vyšším obsahem Si jsou charakteristické zvýšenou pevností a zhoršenou svařitelností. Teplota rozpouštěcího žíhání se nachází v intervalu teplot 500 – 540°C.

Umělé stárnutí se uskutečňuje při teplotách 160 – 180°C. Pokud chceme získat co nejlepší mechanické vlastnosti, mělo by následovat neprodleně po ochlazení z rozpouštěcího žíhání, nebo určitou dobu po rozpouštěcím žíhání, obvykle 10 hodin.

V našem případě jde o slitinu AW 6082 ve stavu T6, což je ve stavu rozpouštěcího žíhání a umělého stárnutí. Schéma grafu pro tepelné zpracování slitiny Al – Mg – Si je na obr. 28.



Obr. 28 Teplotní cyklus pro tváření slitin Al-Mg-Si

3.2 Mazání polotovaru [11], [18]

Mazání je důležitou součástí před zahájením protlačování kovů. Mezi nejdůležitější úkoly maziva patří:

- zajištění požadovaného tření a tím i snížení třecích sil
- separace tvářeného kovu a nástrojového materiálu
- zajištění snadného nanášení
- snadné odstranění z povrchu
- nesmí působit agresivně na povrch nástroje a tvářeného materiálu
- hygienická nezávadnost
- tepelná stálost
- cenová dostupnost

K mazání se využívá různých druhů olejů, kovových mýdel a tuků. Před nanesením maziva musí být povrch kovu dostatečně odmaštěn a zbaven nečistot a třísek po dělení z tyčí. Výhodná jsou maziva, která jsou rozpustná ve vodě, snižují náročnost výrobního cyklu. Pro zlepšení přilnavosti nanášené vrstvy maziva na povrch se v některých případech využívá fosfátování. Pro hliníkové slitiny se často používá stearan zinečnatý. Jedná se o bílý prášek, který se nanáší na polotovar omíláním.

3.3 Simulace protlačování

Simulace slouží obecně pro ověření podmínek výroby součásti, dosažení finanční úspory a předejití případné vady při výrobě, jako je nezatečení materiálu, nebo vytvoření přeložky. Pomáhá nám určit kritická místa, ve kterých se hromadí napětí nebo zvyšuje teplota. Simulační programy se nejvíce využívají v oblasti automobilové výroby. Každý výrobní proces provází, pro správné zadání simulace, sled operací.

Jsou to:

- ❖ Konstrukční návrh geometrického modelu, zadání dat (import z CAD) (Preprocessing)
- ❖ Výpočtová simulace technologických procesů (Processing)
- ❖ Zhodnocení výsledků ze simulační analýzy (Postprocessing)

Nejčastěji využívanou výpočtovou metodou je metoda konečných prvků. Obecně je z pohledu výroby součásti časově a finančně nejnákladnější její vývoj. Simulační programy tedy pomáhají ulehčit a ušetřit vynaložené náklady na tento proces. Hlavními výhodami použití simulačního programu je tedy:

- ❖ Snížení výrobních nákladů a časů na vývoj
- ❖ Zvýšení produktivity práce
- ❖ Zjištění možných vad

4 STROJE PRO PROTlačOVÁNÍ ZA STUDENA [1], [3], [8], [18]

Pro protlačování za studena se jako stroje používají lisy. Při správné volbě lisu hraje největší roli:

- počet vyrobených kusů
- rozměry součásti (nástroje)
- dosažená tvářecí síla

Významné hledisko volby správného stroje hraje také cena stroje, jelikož se od ní odvíjí také konečná cena výrobku. Mezi nejpoužívanější typy pro tuto technologii řadíme mechanické nebo hydraulické lisy.

❖ **Mechanické lisy** jsou jedny z nejpoužívanějších tvářecích strojů. Slouží pro různé operace plošného i objemového tváření za tepla i za studena. Princip funkce těchto lisů spočívá ve vyvození síly za pomoci mechanických převodů. Mechanické lisy se dělí dle použitého mechanismu na:

- klikové
- koleno - pákové
- výstředníkové
- hřebenové
- šroubové
- ohraňovací atd.

Z mechanických lisů se pro protlačování za studena nejvíce hodí klikové a koleno – pákové lisy. Mechanické lisy oproti hydraulickým dosahují vyšších rychlostí tváření. Jako nevýhoda mechanických lisů je omezená výška zdvihu.

Princip klikového lisu je založen na klikovém mechanismu. Kliková hřídel přenáší pomocí ojnice rotační pohyb na pohyb přímočarý. Klikové lisy mají konstantní zdvih. Lze použít pro mnoho operací ať už plošného či objemového tváření.

Princip přenášení síly na beran spočívá také v klikovém mechanismu. K přenosu jsou však použity ojnice tři.

❖ **Hydraulické lisy** mohou být dle uspořádání rozděleny na:

- svislé
- vodorovné
- kombinované

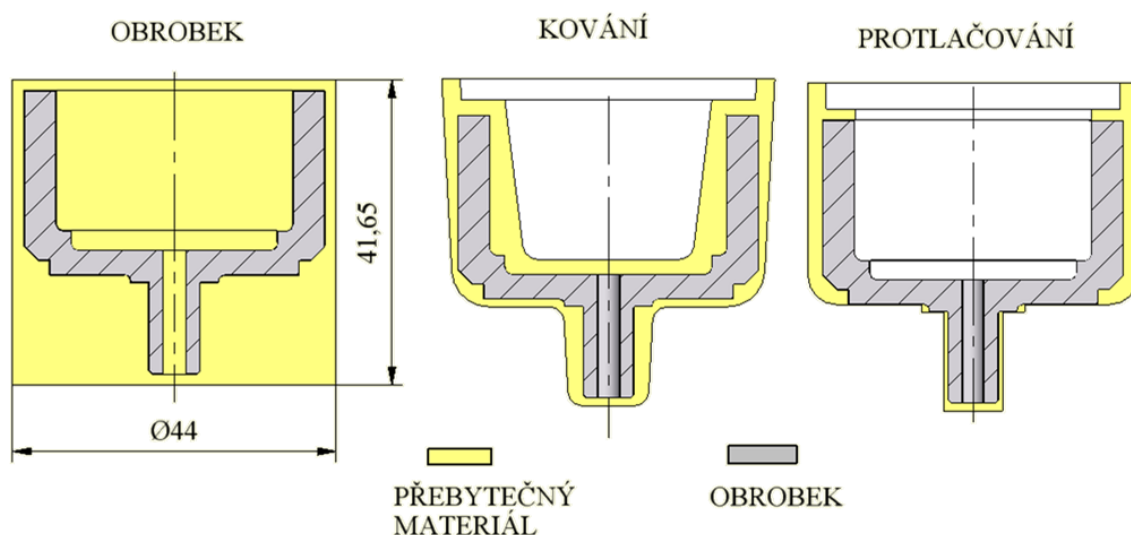
Hydraulické lisy používají pro vyvození síly kapalinu, která je vtlačována pod tlakem nad píst, nebo pod píst. To umožňuje stlačení, nebo zdvih pístu. Princip je založen na rovnoměrném šíření tlaku v kapalině tj. Pascalův zákon. Velikost zdvihu a rychlost beranu lze libovolně nastavit. Proto jsou tyto lisy vhodné pro výrobu součástí, které vyžadují větší výšku zdvihu. Hlavní nevýhoda spočívá především v malé produktivitě, to je dáno především rychlostí tvářecího procesu.

5 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

Regulační člen je v současné době vyráběn pomocí třískového obrábění v komerční firmě. Vyrobení součásti touto metodou je z hlediska finančního tak i časového značně náročné, proto zákazník hledá možnosti jak tuto součást vyrobit levněji a pokud možno se stejnými nebo lepšími materiálovými a mechanickými vlastnostmi. Pro tuto součást byla tedy zvolena jako nejpříznivější metoda objemovým tvářením, a to konkrétně metoda protlačováním za studena.

Z hlediska úspory materiálu je tato metoda výhodnější. Na obrobení je potřeba polotovaru o délce konečného výrobku, kdežto pro protlačení se předpokládá o třetinu menší, jelikož bude mít objem přibližně stejný jako finální průtlaček. Srovnání tří variant z hlediska přebytečného materiálu je uveden na obr. 29

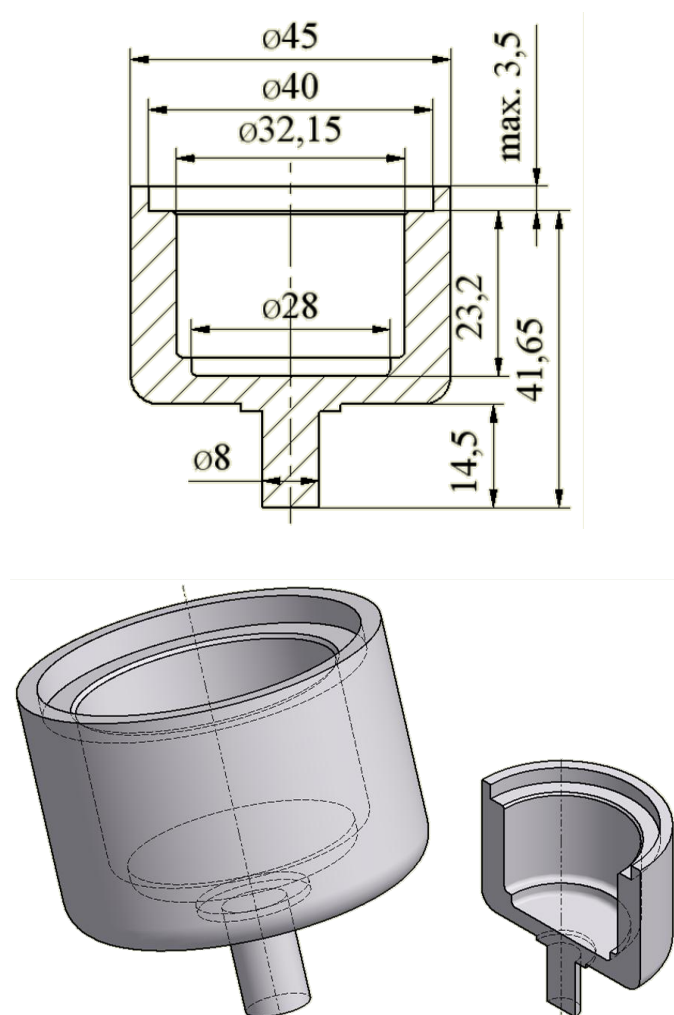
Součást se tedy vyrobí pomocí protlačování za studena, provede se potřebné tepelné zpracování a součást se obrobí do finálního tvaru, jak je požadováno od zákazníka. Předpokládá se výrazná finanční a časová úspora.



Obr. 29 Varianty výroby s přebytečným materiálem

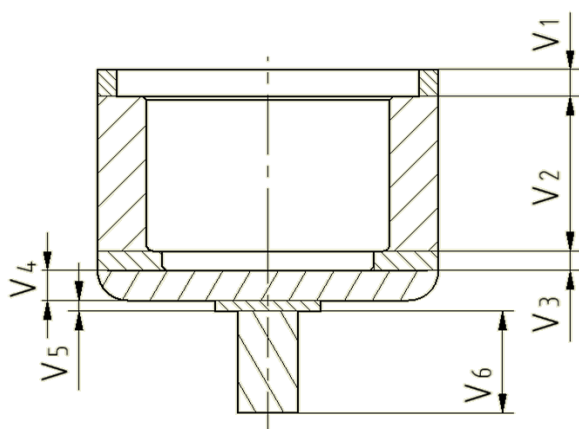
6 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY ZADANÉ SOUČÁSTI

Při návrhu technologie protlačování bude zhodnoceno několik možných variant jak součást vyrábět a z nich bude vybrána optimální varianta. V následujících kapitolách bude tedy uveden výpočet objemu navrženého průtlačku, výpočet přetvoření, deformačních odporů a z nich výsledná síla potřebná k protlačení. S ohledem na možnosti technologie protlačování, byl navržen optimální tvar průtlačku, který bude po protlačení obroben do finální podoby. Na obr. 30 je uveden návrh podoby budoucího průtlačku, podrobné rozměry jsou uvedeny na výkresu s označením DP-2013-002.



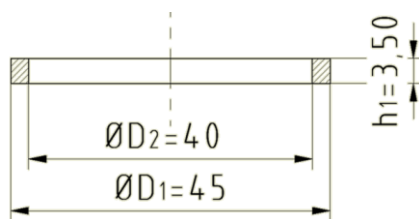
Obr. 30 Budoucí průtlaček s orientačními rozměry, model a model v řezu zmenšený

6.1 Návrh polotovaru a výpočet objemu součásti



Obr. 31 Součást rozdělená na dílčí objemy

Součást je rozdělena na skupinu dílčích těles (Obr. 31), které jsou následně spočítány dle známých vzorců. V těchto výpočtech nejsou zahrnuty zaoblení, proto je výsledný součet objemů ověřen pomocí počítačového softwaru Autodesk Inventor Professional 2010 (Obr. 38).



Obr. 32 Objem V₁

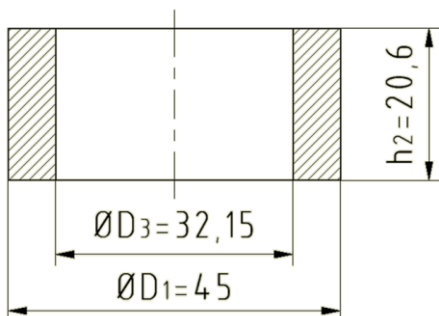
1. Výpočet objemu V₁ (Obr. 32):

Jedná se o část průtlačku, která slouží jako kompenzátor objemu materiálu. Rozměry tohoto kompenzátoru jsou stanoveny jako nejvyšší, kterých lze dosáhnout. U stanovení výšky této části objemu se zohledňuje tolerance přesnosti výroby tyčí v hutích, což je $\pm 0,21$ mm na průměru tyče a tolerance přesnosti řezání $\pm 0,2$ mm na délce.

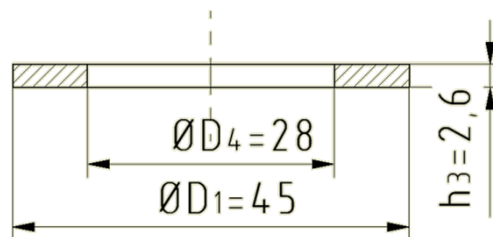
$$V_1 = \frac{\pi \cdot (D_1^2 - D_2^2)}{4} \cdot h_1 = \frac{\pi \cdot (45^2 - 40^2)}{4} \cdot 3,5 = 1168,28 \text{ mm}^3 \quad (6.1)$$

2. Výpočet objemu V₂ (Obr. 33):

$$V_2 = \frac{\pi \cdot (D_1^2 - D_3^2)}{4} \cdot h_2 = \frac{\pi \cdot (45^2 - 32,15^2)}{4} \cdot 20,6 = 16039,7 \text{ mm}^3 \quad (6.2)$$



Obr. 33 Objem V₂



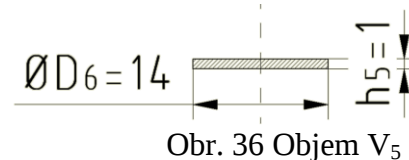
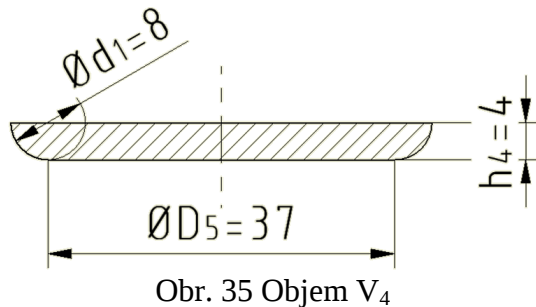
Obr. 34 Objem V₃

3. Výpočet objemu V₃ (Obr. 34):

$$V_3 = \frac{\pi \cdot (D_1^2 - D_4^2)}{4} \cdot h_3 = \frac{\pi \cdot (45^2 - 28^2)}{4} \cdot 2,6 = 2534,17 \text{ mm}^3 \quad (6.3)$$

4. Výpočet objemu V_4 (Obr. 35):

$$V_4 = \left(\frac{\pi \cdot D_5^2}{4} \cdot h_4 \right) + \left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot D_5}{4} \right) = \left(\frac{\pi \cdot 37^2}{4} \cdot 4 \right) + \left(\frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 37}{4} \right) = 5761,54 \text{ mm}^3 \quad (6.4)$$



5. Výpočet objemu V_5 (Obr. 36):

$$V_5 = \frac{\pi \cdot D_6^2}{4} \cdot h_5 = \frac{\pi \cdot 14^2}{4} \cdot 1 = 153,94 \text{ mm}^3 \quad (6.5)$$

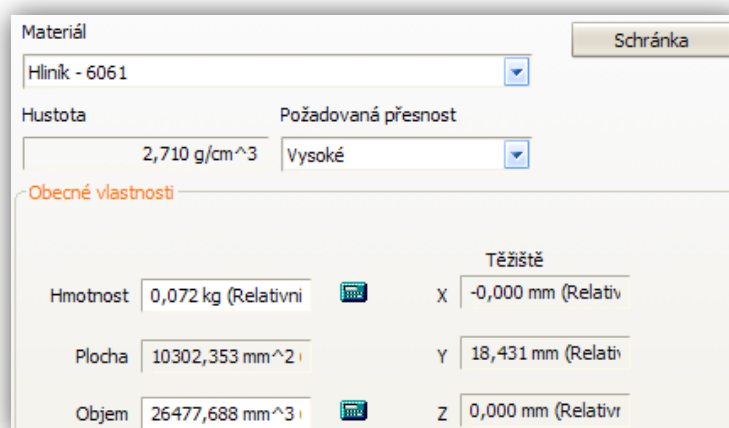


6. Výpočet objemu V_6 (Obr. 37):

$$V_6 = \frac{\pi \cdot D_7^2}{4} \cdot h_6 = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot 13,5 = 678,58 \text{ mm}^3 \quad (6.6)$$

Výpočet celkového objemu součásti:

$$V_c = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 = 1168,28 + 16039,7 + 2534,17 + 5761,54 + 153,94 + 678,58 = 26336,21 \text{ mm}^3 \quad (6.7)$$



Obr. 38 Výpočet objemu z Autodesk Inventor Professional 2010

Výsledná hodnota z programu se tedy liší přibližně o 5% od vypočítané. V dalších výpočtech bude zahrnuta pouze hodnota ověřená programem.

Hodnota hmotnosti:

$$m = \rho \cdot V = 26477,688 \cdot 2,710 \cdot 10^{-6} = 0,07175 \text{ kg} = 71,8 \text{ g} \quad (6.8)$$

Pro optimální vkládání polotovaru do nástroje a dobré vystředění byl zvolen polotovar o průměru 43,5 mm, tolerance tohoto průměru je tedy, jak již bylo výše uvedeno, dána tolerancí z hutí $\pm 0,2$ mm. Výška polotovaru je dána konečným maximálním objemem, který je možno dosáhnout při zaplnění celé dutiny formy. Tato zákonitost je dána zákonem o zachování objemu. Je dána vzorcem:

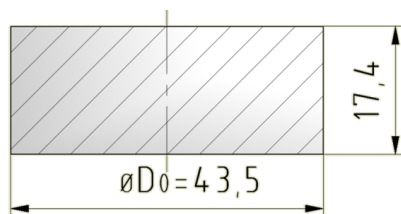
$$V_{\text{průtlačku}} = V_{\text{polotovaru}}$$

$$V_{\text{průtlačku}} = \frac{\pi \cdot (\varnothing D_{\text{polotovaru}})^2}{4} \cdot h_{\text{polotovaru}} \quad (6.9)$$

$$h_{\text{polotovaru}} = \frac{4 \cdot V_{\text{průtlačku}}}{\pi \cdot \varnothing D_{\text{polotovaru}}^2} = \frac{4 \cdot 26477,69}{\pi \cdot 43,7^2}$$

$$h_{\text{polotovaru}} = 17,65 \text{ mm}$$

Při maximálních tolerancích polotovaru vyjde tedy výška o velikosti 17,65 mm. Jako optimální byl stanoven dle tolerancí rozměr $\varnothing 43,5 \times 17,44$ mm viz. obr. 39 a jako minimální možný dle tolerancí $\varnothing 43,3 \times 17,23$ mm.



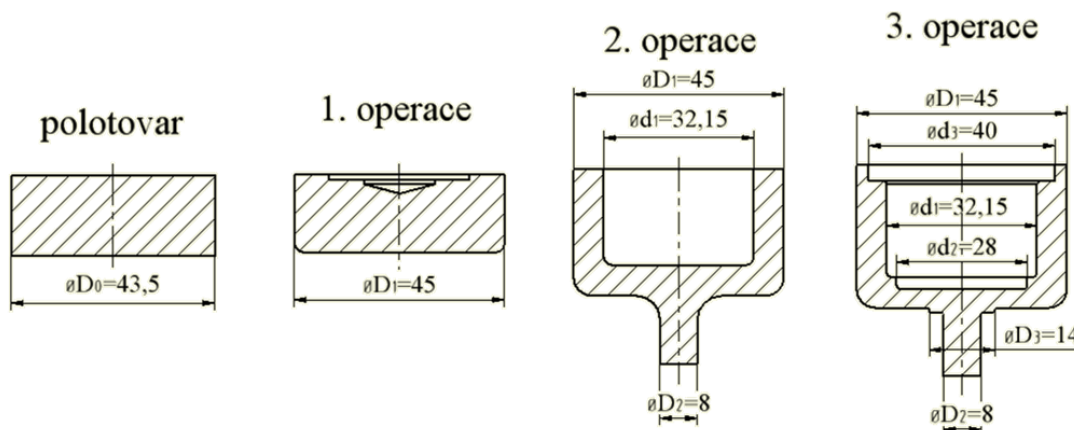
Obr. 39 Rozměry polotovaru

6.2 Technologické varianty návrhu protlačování

I. Varianta (Obr. 40), (Obr. 41)

Uříznutí polotovaru z tyče o $\varnothing D_0$,

1. operace zarovnání čel a pěchování polotovaru na $\varnothing D_1$,
2. operace kombinované protlačení, dílek dopředným protlačením na $\varnothing D_2$, a hlava protlačena zpětným protlačením na $\varnothing d_1$,
3. operace protlačení na $\varnothing d_2$ a vytvoření výstupku na vnější straně dopředným protlačením o $\varnothing D_3$ a zatečení přebytku materiálu do kompenzátoru o $\varnothing d_3$.



Obr. 40 Schema I. varianty technologického postupu

1. Operace

Pěchování

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{45^2}{43,5^2} = 0,067[-] \quad (6.10)$$

2. Operace

Dopředné protlačování

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{8^2}{45^2} = -3,454[-] \quad (6.11)$$

Zpětné protlačování

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_1^2 - d_1^2}{D_1^2} = \ln \frac{45^2 - 32,15^2}{45^2} = -0,714[-] \quad (6.12)$$

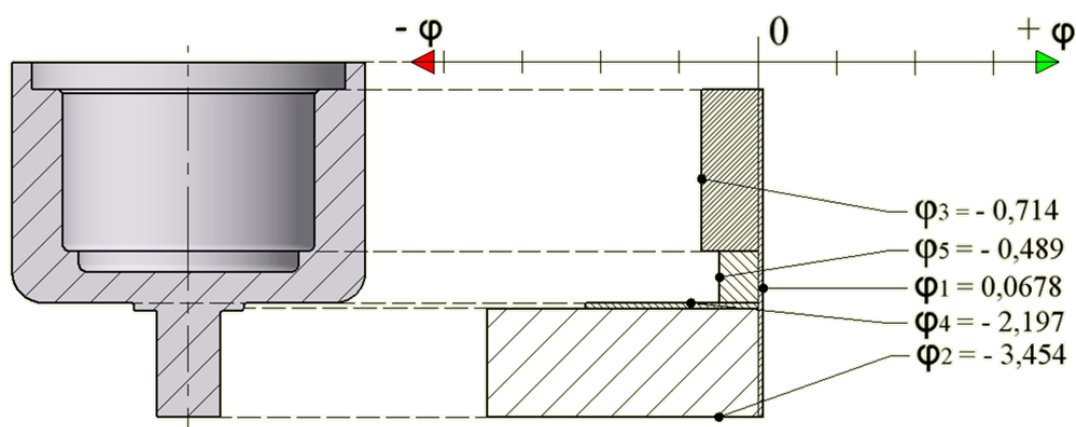
3. Operace

Dopředné protlačování

$$\varphi_4 = \ln \frac{D_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{15^2}{45^2} = -2,197[-] \quad (6.13)$$

Zpětné protlačování

$$\varphi_5 = \ln \frac{D_1^2 - d_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{45^2 - 28^2}{45^2} = -0,489[-] \quad (6.14)$$

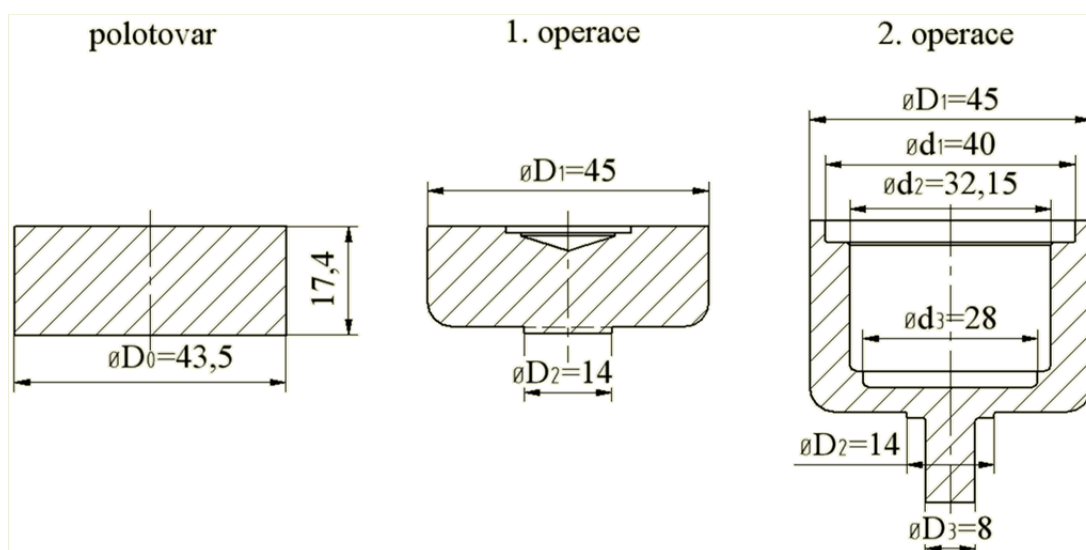


Obr. 41 Diagram logaritmické přetvoření I. varianty

II. Varianta (Obr. 42), (Obr. 43)

Uříznutí polotovaru z tyče o $\varnothing D_0$,

1. operace zarovnání čel a spěchování polotovaru na $\varnothing D_1$ a vytvoření výstupku o $\varnothing D_2$,
2. operace kombinované protlačení, dřík dopředným protlačením na $\varnothing D_3$, a hlava protlačena zpětným protlačením na $\varnothing d_3$, $\varnothing d_2$, a vytvoření kompenzátoru o $\varnothing d_1$.



Obr. 42 Schéma II. Varianty technologického postupu

1. Operace

Pěchování

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{45^2}{43,5^2} = 0,067[-] \quad (6.15)$$

Dopředné protlačování

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{14^2}{45^2} = -2,335[-] \quad (6.16)$$

2. Operace

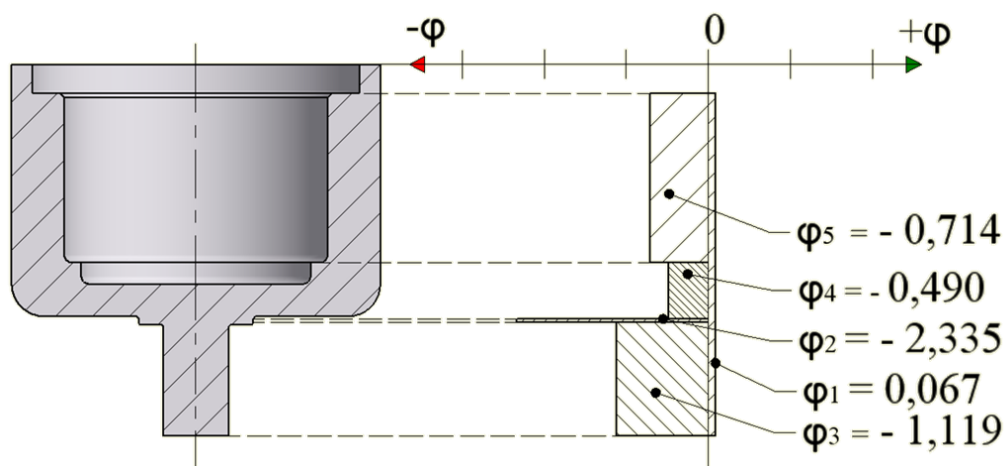
Dopředné protlačování

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \frac{8^2}{14^2} = -1,119[-] \quad (6.17)$$

Zpětné protlačování

$$\varphi_4 = \ln \frac{D_1^2 - d_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{45^2 - 28^2}{45^2} = -0,490[-] \quad (6.18)$$

$$\varphi_5 = \ln \frac{D_1^2 - d_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{45^2 - 32,15^2}{45^2} = -0,714[-] \quad (6.19)$$

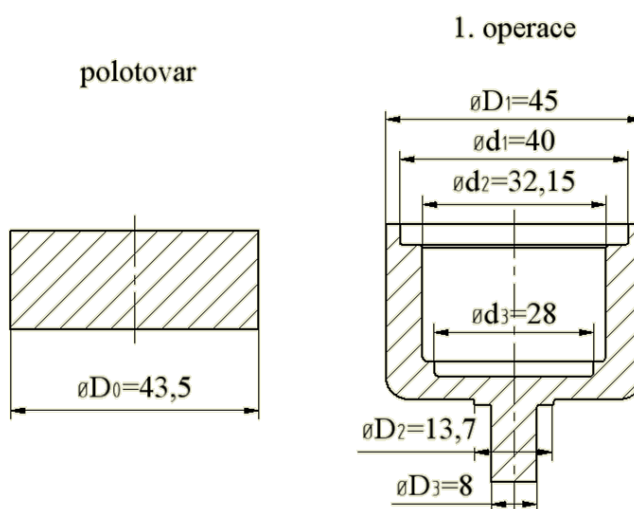


Obr. 43 Diagram logaritmického přetvoření II. varianty

III. Varianta (Obr. 44), (Obr. 45)

Uříznutí polotovaru z tyče o $\varnothing D_0$,

1. operace Kombinované protlačení, dřík dopředným protlačněním na $\varnothing D_3$, $\varnothing D_2$ a hlava protlačena zpětným protlačněním na $\varnothing D_1$, $\varnothing d_3$, $\varnothing d_2$, a vytvoření kompenzátoru o $\varnothing d_1$.



Obr. 44 Schéma III. varianty technologického postupu

1. Operace

Zpětné protlačování

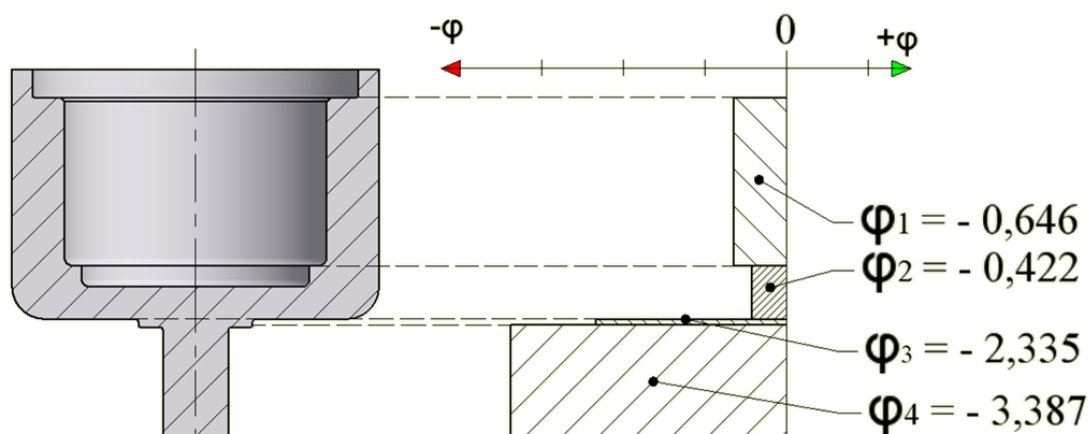
$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0^2 - d_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{43,5^2 - 32,15^2}{45^2} = -0,646[-] \quad (6.20)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_0^2 - d_3^2}{D_1^2} = \ln \frac{43,5^2 - 28^2}{45^2} = -0,422[-] \quad (6.21)$$

Dopředné protlačování

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_2^2}{D_0^2} = \ln \frac{14^2}{43,5^2} = -2,267[-] \quad (6.22)$$

$$\varphi_4 = \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \frac{8^2}{14^2} = -3,387[-] \quad (6.23)$$



Obr. 45 Diagram logaritmických přetvoření III. varianty

6.3 Experimentální stanovení přetvárného odporu materiálu

Pro zjištění hodnot přetvárného odporu materiálu AW 6082, byla provedena zkouška přechování válcového vzorku na laboratorním zkušebním zařízení s označením ZD 40 (Obr. 47). Hodnoty a vlastnosti zkušebního stroje jsou uvedeny v příloze č. 1. Zkouška byla provedena na třech vzorcích, které byly soustruženy z kulatiny na rozměry uvedené v tab. 3. Výstupem zkoušky byla závislost hodnot síly a spěchované výšky. Z těchto výsledků byly vypočítány hodnoty přirozeného přetvárného odporu a skutečného přetvárného odporu. Následně byly sestaveny grafy těchto závislostí a jejich regrese, které jsou uvedeny níže v grafech č. 1, 2 a 3. Obrázek spěchovaných vzorků je na obr. 46.

Tab. 3 Hodnoty vzorků

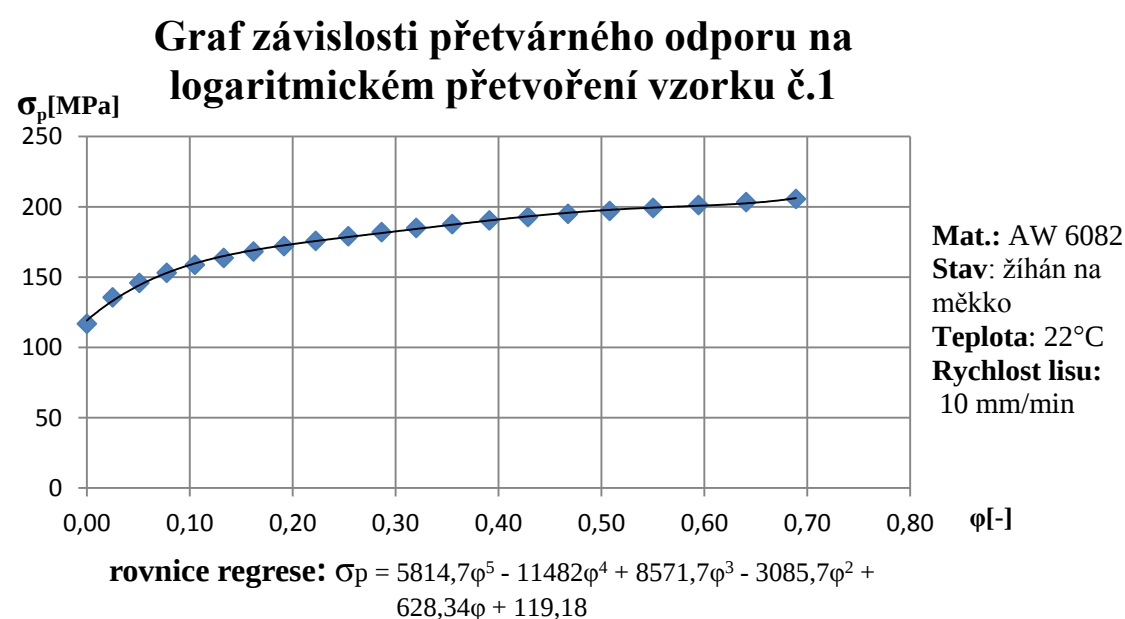
Číslo vzorku	Výška vzorku H_0 [mm]	Průměr vzorku D_0 [mm]	Konečná délka vzorku H [mm]	Konečný průměr D [mm]
1.	32,03	25,10	15,64	36,89
2.	31,9	25,03	15,45	36,88
3.	32	25,04	15,61	36,54



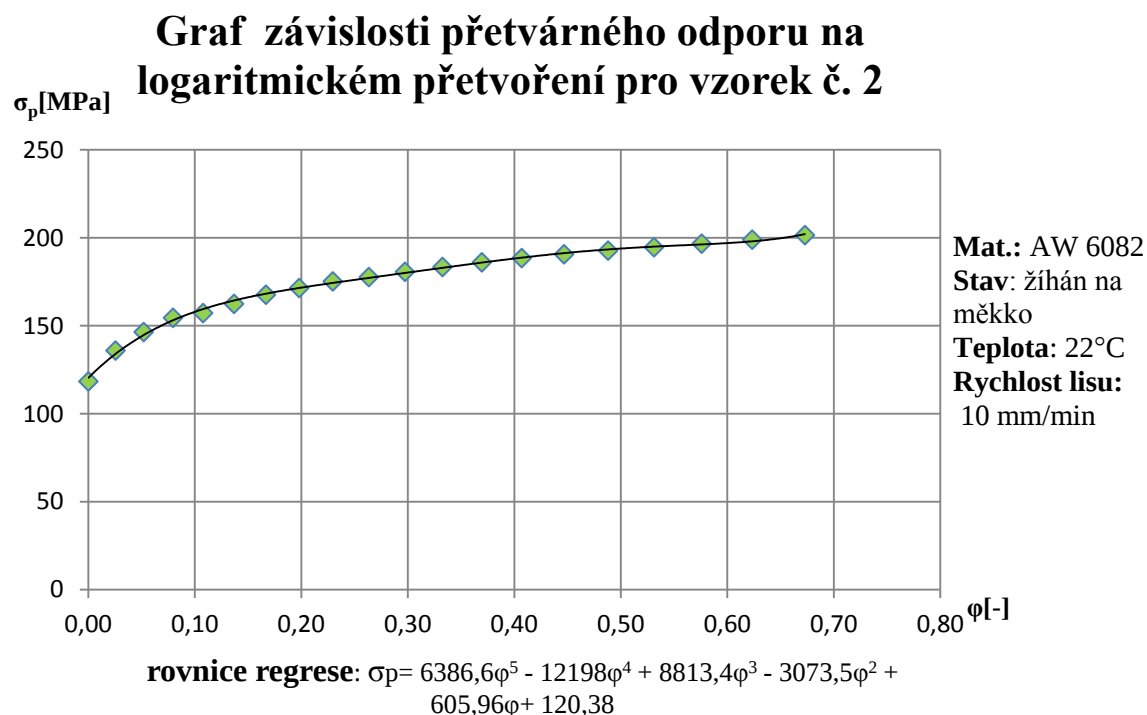
Obr. 46 Vzorky po přechovací zkoušce



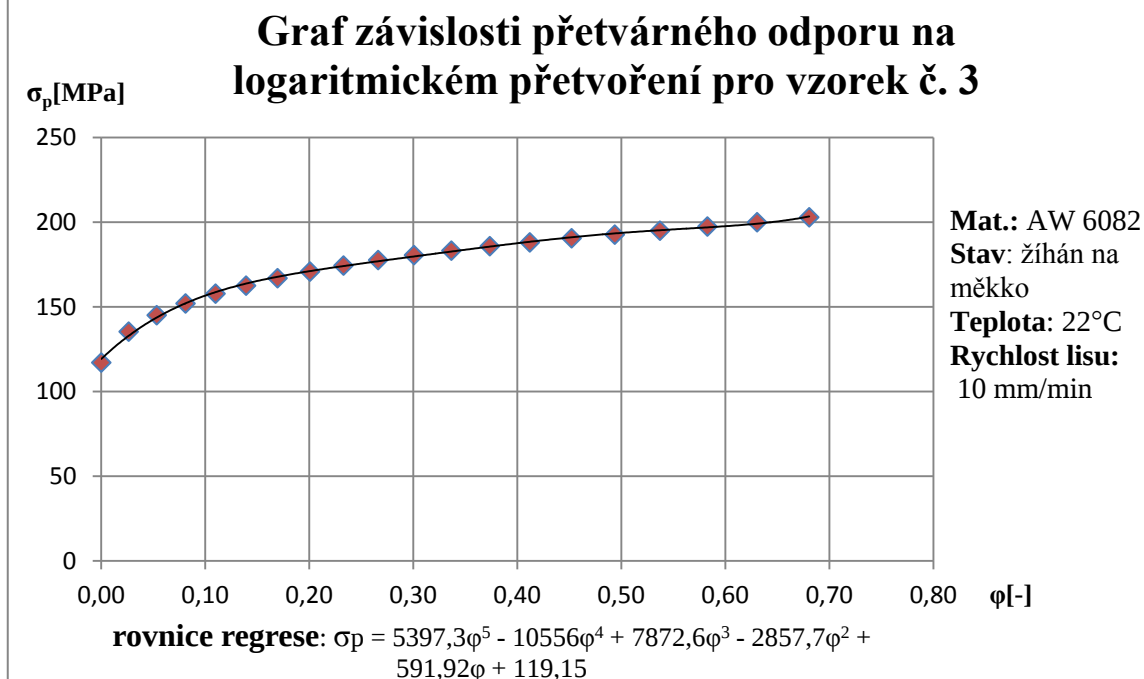
Obr. 47 Vzorek umístěný v lisovacím přípravku



Graf. 1. Křivka zpevnění pro vzorek č. 1



Graf 2. Křivka zpevnění pro vzorek č. 2

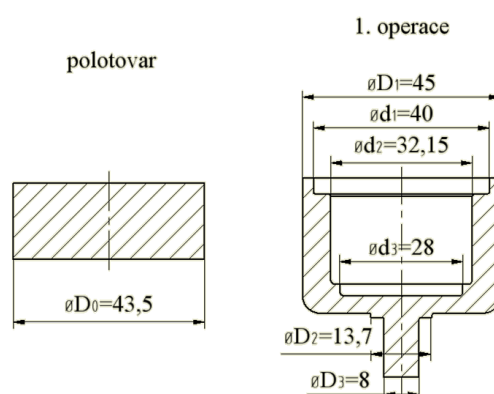


Graf 3. Křivka přetvoření pro vzorek č. 3

6.3.1 Zhodnocení a výběr nejlepší varianty

Pro navržený průtláček byly navrženy tři varianty technologického postupu protlačování a pro zadaný materiál byla provedena pēchovací zkouška. Po provedení pēchovací zkoušky byly u tēch vzorků materiálu AW 6082 zjištēny průběhy křivky zpevnění. Z průběhů křivek zpevnění je patrné, že po mírném nárůstu deformačního odporu za mezí kluzu je intenzita zpevňování sledovaného materiálu velice malá. Maximální síla zkušebního stroje sice neumožnila stanovení deformačních odporů při vysokém stupni pētvoření, ale vzhledem k průběhu křivek zpevnění bylo rozhodnuto, realizovat výrobně nejekonomičtější variantu č. III.

6.4 Výpočet deformačních odporů a sil



Obr. 48 Zvolená varianta III.

Hodnoty deformačních napětí a sil budou propočítány tedy pro variantu III. Jelikož se hodnoty logaritmických pētvoření pro zpētné protlačení nacházejí v experimentálně provedených grafech, bude pro hodnoty pētvárných odporů počítáno s hodnotou regrese z tēchto grafů. Vzhledem k minimálním odchylkám mezi naměřenými hodnotami pētvárných odporů a logaritmických pētvoření, bude počítáno s regresí grafu č. 1. Protože hodnoty pētvoření pro dopředné protlačování výrazně pēvyšují experimentálně získané výsledky, bude tedy pro dopředné protlačování zvolen jiný postup výpočtu, a to pomocí rovnice (2.15). Jelikož je materiál slitina hliníku, a má tedy mřížku FCC, musí být použita rovnice dle **Zerilliho a Armstronga**. Hodnoty konstant této rovnice jsou uvedeny v tab. 4.

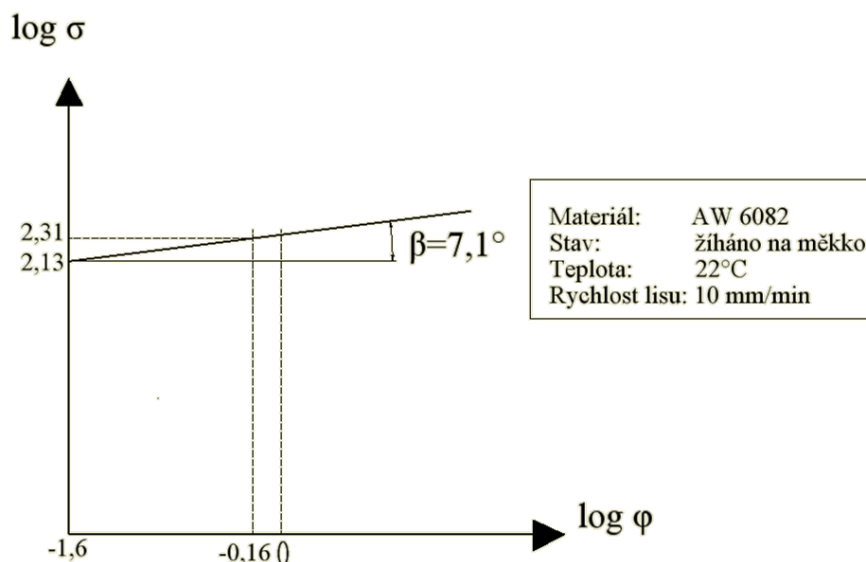
Tab. 4 Hodnoty konstant pro rovnici dle Zerilli a Armstronga [14]

	AW 6082
C2 [MPa]	355,14
C3 [1/K]	0,00341
C4 [1/K]	0,000057

➤ **Stanovení exponentu zpevnění n :** (viz graf 4)

Exponent zpevnění byl stanoven z hodnot logaritmických přetvoření a přetvárných odporů z grafu č. 1. Tyto hodnoty byly zlogaritmovány a proloženy přímkou.

Stanovení exponentu zpevnění n pro materiál AW 6082



Graf. 4 Určení exponentu zpevnění z křivky zpevnění

$$n = \operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} 7,1 = 0,12 \quad (6.24)$$

kde βúhel mezi proloženou přímkou a rovinou $[\circ]$

➤ **Určení rychlosti nástroje**

Technologický postup bude navržen a propočítán pro lis, pro který bude navrhován konstruován nástroj, což je lis Šmeral LLR 400. Při výpočtu rychlosti nástroje v_0 proto uvažujeme s hodnotami tohoto stroje.

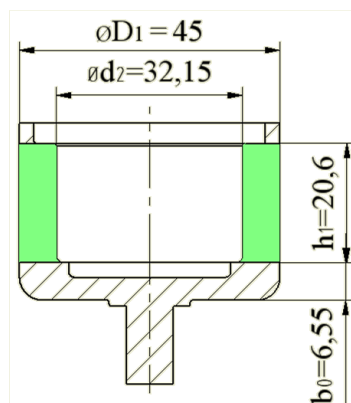
$$v_0 = \frac{s}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot n_l \cdot h}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 53 \cdot 90}{60 \cdot 10^3} = 0,159 \, m \cdot s^{-1} \quad (6.25)$$

kde hzdvih beranu $[mm]$
 n_lpočet zdvihů $[1/min]$

❖ Zpětné protlačování

I. Hlava $\varnothing d_2$ (Obr. 49)

$$\varphi_1 = |-0,646|$$



Obr. 49 Schéma k výpočtům pro hlavu d_2

Maximální rychlost přetvoření v osové směru

$$\dot{\varphi}_z = -\frac{v_0}{R \cdot \tan \alpha + b_0} = -\frac{0,159}{0 \cdot \tan 45 + 0,00655} = -24,28 \text{ s}^{-1} \quad (6.26)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním směru

$$\dot{\varphi}_r = \frac{v_0}{2 \cdot (R \cdot \tan \alpha + b_0)} = -\frac{0,159}{2 \cdot (0 \cdot \tan 45 + 0,00655)} = 12,137 \text{ s}^{-1} \quad (6.27)$$

Přirozený přetvárný odpor

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 5814,7 \cdot \varphi_1^5 - 11482 \cdot \varphi_1^4 + 8571,7 \cdot \varphi_1^3 - 3085,7 \cdot \varphi_1^2 + 628,34 \cdot \\ &\quad \varphi_1 + 119,18 = 5814,7 \cdot 0,646^5 - 11482 \cdot 0,646^4 + 8571,7 \cdot \\ &\quad 0,646^3 - 3085,7 \cdot 0,646^2 + 628,34 \cdot 0,646 + 119,18 = \\ &\quad \mathbf{202,735 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (6.28)$$

Střední hodnota přetvoření

$$\varphi_s = \frac{\varphi_0 + \varphi_1}{2} = \frac{0 + 0,646}{2} = 0,323[-] \quad (6.29)$$

Střední hodnota přetvárného odporu

$$\begin{aligned} \sigma_{ps} &= 5814,7 \cdot \varphi_s^5 - 11482 \cdot \varphi_s^4 + 8571,7 \cdot \varphi_s^3 - 3085,7 \cdot \varphi_s^2 + 628,34 \cdot \\ &\quad \varphi_s + 119,18 = 5814,7 \cdot 0,323^5 - 11482 \cdot 0,323^4 + 8571,7 \cdot 0,323^3 - \\ &\quad 3085,7 \cdot 0,323^2 + 628,34 \cdot 0,323 + 119,18 = \mathbf{184,524 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (6.30)$$

Deformační napětí

$$\begin{aligned} \sigma_d &= 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{D_1^2}{d_2^2} \left(\log \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_2^2} + \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_2^2} \cdot \log \frac{D_1^2}{d_2^2} + \log \frac{d_2^2}{D_1^2 - d_2^2} \right) = 1,152 \cdot \\ &\quad 202,735 \cdot \frac{45^2}{32,15^2} \left(\log \frac{45^2}{45^2 - 32,15^2} + \frac{45^2}{45^2 - 32,15^2} \cdot \log \frac{45^2}{32,15^2} + \log \frac{32,15^2}{45^2 - 32,15^2} \right) = \\ &\quad \mathbf{457,557 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (6.31)$$

Potřebná síla

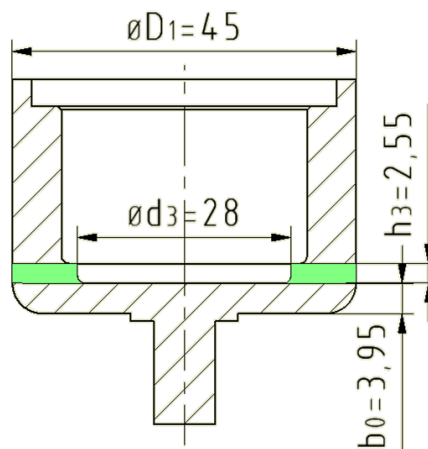
$$F_1 = \sigma_d \cdot S = 457,557 \cdot \frac{\pi \cdot 32,15^2}{4} = 371447,16 \text{ N} = \mathbf{371,45 \text{ kN}} \quad (6.32)$$

Potřebná práce

$$A_1 = \sigma_{ps} \cdot \varphi_1 \cdot V = 184,524 \cdot 0,646 \cdot 26,336 = \mathbf{3156,20 \text{ J}} \quad (6.33)$$

II. Hlava $\odot d_3$ (Obr. 50)

$$\varphi_2 = |-0,422|$$



Obr. 50 Schéma k výpočtům pro hlavu d_3

Maximální rychlost přetvoření v osové směru

$$\dot{\varphi}_z = -\frac{v_0}{R \cdot \tan \alpha + b_0} = -\frac{0,159}{0 \cdot \tan 45 + 0,00395} = -40,25 \text{ s}^{-1} \quad (6.34)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním směru

$$\dot{\varphi}_r = \frac{v_0}{2 \cdot (R \cdot \tan \alpha + b_0)} = \frac{0,159}{2 \cdot (0 \cdot \tan 45 + 0,00395)} = 20,13 \text{ s}^{-1} \quad (6.35)$$

Přirozený přetvárný odpor

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 5814,7 \cdot \varphi_2^5 - 11482 \cdot \varphi_2^4 + 8571,7 \cdot \varphi_2^3 - 3085,7 \cdot \varphi_2^2 + 628,34 \cdot \varphi_2 + 119,18 = \\ &= 5814,7 \cdot 0,422^5 - 11482 \cdot 0,422^4 + 8571,7 \cdot 0,422^3 - 3085,7 \cdot 0,422^2 + 628,34 \cdot 0,422 + 119,18 = \mathbf{192,667 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (6.36)$$

Střední hodnota přetvoření

$$\varphi_s = \frac{\varphi_0 + \varphi_2}{2} = \frac{0 + 0,422}{2} = 0,211[-] \quad (6.37)$$

Střední hodnota přetvárného odporu

$$\begin{aligned} \sigma_{ps} &= 5814,7 \cdot \varphi_s^5 - 11482 \cdot \varphi_s^4 + 8571,7 \cdot \varphi_s^3 - 3085,7 \cdot \varphi_s^2 + 628,34 \cdot \varphi_s + 119,18 = \\ &= 5814,7 \cdot 0,211^5 - 11482 \cdot 0,211^4 + 8571,7 \cdot 0,211^3 - 3085,7 \cdot 0,211^2 + 628,34 \cdot 0,211 + 119,18 = \mathbf{174,576 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (6.38)$$

Deformační napětí

$$\begin{aligned} \sigma_d &= 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{D_1^2}{d_3^2} \left(\log \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_3^2} + \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_3^2} \cdot \log \frac{D_1^2}{d_3^2} + \log \frac{d_3^2}{D_1^2 - d_3^2} \right) = 1,152 \cdot \\ &192,667 \cdot \frac{45^2}{28^2} \left(\log \frac{45^2}{45^2 - 28^2} + \frac{45^2}{45^2 - 28^2} \cdot \log \frac{45^2}{28^2} + \log \frac{28^2}{45^2 - 28^2} \right) = \\ &\mathbf{393,098 \text{ MPa}} \end{aligned} \quad (6.39)$$

Potřebná síla

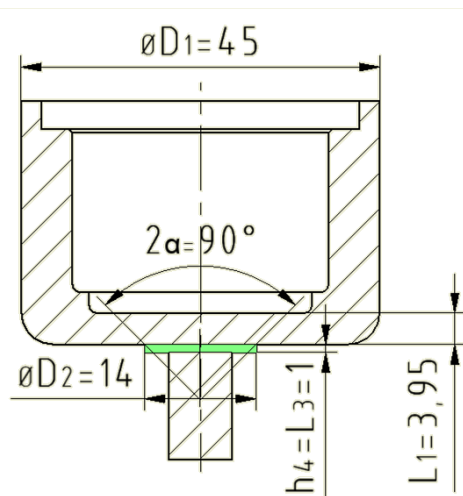
$$F_2 = \sigma_d \cdot S = 393,098 \cdot \frac{\pi \cdot 28^2}{4} = 242050,94 \text{ N} = \mathbf{242,1 \text{ kN}} \quad (6.40)$$

Potřebná práce

$$A_2 = \sigma_{ps} \cdot \varphi_2 \cdot V = 174,576 \cdot 0,422 \cdot 26,336 = \mathbf{1940,20 \text{ J}} \quad (6.41)$$

III. Dřík $\varnothing D_2$ (Obr. 51)

$$\varphi_3 = |-2,267|$$



Obr. 51 Schéma k výpočtu pro dřík D_1

Maximální rychlost přetvoření v osovém směru:

$$\dot{\varphi}_z = 2 \cdot v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \cdot \tan \alpha = 2 \cdot 0,159 \cdot \frac{0,0225^2}{0,007^3} \cdot \tan 45 = \mathbf{469,35 \text{ s}^{-1}} \quad (6.42)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\dot{\varphi}_r = \dot{\varphi}_t = \frac{d\varphi_r}{dt} = -\frac{v_r}{R} = -v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \cdot \tan \alpha = -0,159 \cdot \frac{0,0225^2}{0,007^3} \cdot \tan 45 = \mathbf{-2,347 \text{ s}^{-1}} \quad (6.43)$$

Přirozený přetvárný odpor dle Zerilli a Armstronga

$$\sigma_p = \sigma_0 + C_2 \cdot \varphi_3^n \cdot [\exp \cdot (-C_3 \cdot T + C_4 \cdot T \cdot \ln \dot{\varphi})] = 120 + 355,14 \cdot 2,267^{0,12} \cdot [\exp \cdot (-0,00341 \cdot 295,15 + 0,000057 \cdot 295,15 \cdot \ln 495,35) = \mathbf{278,93 \text{ MPa}} \quad (6.44)$$

Střední hodnota přetvoření

$$\varphi_s = \frac{\varphi_0 + \varphi_3}{2} = \frac{0 + 2,267}{2} = \mathbf{1,134} \quad (6.45)$$

Střední hodnota přetvárného odporu

$$\sigma_{ps} = \sigma_0 + C_2 \cdot \varphi_3^n \cdot [\exp \cdot (-C_3 \cdot T + C_4 \cdot T \cdot \ln \dot{\varphi})] = 120 + 355,14 \cdot 1,134^{0,12} \cdot [\exp \cdot (-0,00341 \cdot 295,15 + 0,000057 \cdot 295,15 \cdot \ln 495,35) = \mathbf{266,28 \text{ MPa}} \quad (6.46)$$

Výpočet deformačního odporu pro dopředné plné protlačování dle Feldmanna:

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\hat{\alpha}} \right) \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f_2 \frac{D_2 \cdot L_3}{D_1^2} \sigma_{ps} + 4f_1 \frac{L_1}{D_1} \sigma_p = 266,28 \cdot \left[\left(1 + \frac{0,1}{0,785} \right) \ln \left(\frac{45}{14} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,785 \right] + 4 \cdot 0,1 \cdot \frac{14 \cdot 1}{45^2} 266,28 + 4 \cdot 0,1 \cdot \frac{3,95}{45} \cdot 278,93 = \mathbf{840,764 \text{ MPa}} \quad (6.47)$$

Potřebná síla

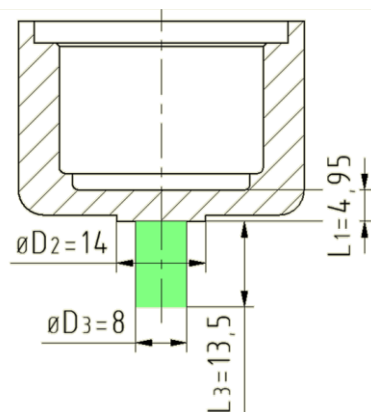
$$F_3 = \sigma_d \cdot S = 840,764 \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 131843,559 \text{ N} = \mathbf{129,43 \text{ kN}} \quad (6.48)$$

Potřebná práce

$$A_3 = \sigma_{ps} \cdot \varphi_3 \cdot V = 266,28 \cdot 2,267 \cdot 26,336 = \mathbf{15 \text{ 898 J}} \quad (6.49)$$

IV. Dřík ϕD_3 (Obr. 53)

$$\phi_4 = |-3,387|$$



Obr. 52 Schéma pro výpočet dřík D_3

Maximální rychlost přetvoření v osové směru:

$$\dot{\phi}_z = 2 \cdot v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \cdot \tan \alpha = 2 \cdot 0,159 \cdot \frac{0,007^2}{0,004^3} \cdot \tan 45 = \mathbf{243,47 \text{ s}^{-1}} \quad (6.50)$$

Maximální rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru:

$$\dot{\phi}_r = \dot{\phi}_t = \frac{d\phi_r}{dt} = -\frac{v_r}{R} = -v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \cdot \tan \alpha = -0,159 \cdot \frac{0,007^2}{0,004^3} \cdot \tan 45 = \mathbf{-0,487 \text{ s}^{-1}} \quad (6.51)$$

Přirozený přetvárný odpor

$$\sigma_p = \sigma_0 + C_2 \cdot \phi_4^n \cdot [\exp \cdot (-C_3 \cdot T + C_4 \cdot T \cdot \ln \phi)] = 120 + 355,14 \cdot 3,387^{0,12} \cdot [\exp \cdot (-0,00341 \cdot 295,15 + 0,000057 \cdot 295,15 \cdot \ln 243,47)] = \mathbf{284,826 \text{ MPa}} \quad (6.52)$$

Střední hodnota přetvoření

$$\phi_s = \frac{\phi_0 + \phi_4}{2} = \frac{0 + 3,387}{2} = \mathbf{1,694} \quad (6.53)$$

Střední hodnota přetvárného odporu

$$\sigma_{ps} = \sigma_0 + C_2 \cdot \phi_s^n \cdot [\exp \cdot (-C_3 \cdot T + C_4 \cdot T \cdot \ln \phi)] = 120 + 355,14 \cdot 1,694^{0,12} \cdot [\exp \cdot (-0,00341 \cdot 295,15 + 0,000057 \cdot 295,15 \cdot \ln 243,47)] = \mathbf{271,672 \text{ MPa}} \quad (6.54)$$

Výpočet deformačního odporu pro dopředné plné protlačování dle Feldmanna:

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^2 + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] + 4f_2 \frac{D_3 \cdot L_3}{D_1^2} \sigma_{ps} + 4f_1 \frac{L_1}{D_1} \sigma_p = 271,672 \cdot \left[\left(1 + \frac{0,1}{0,785} \right) \ln \left(\frac{45}{8} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,785 \right] + 4 \cdot 0,1 \cdot \frac{8 \cdot 13,5}{45^2} \cdot 271,672 + 4 \cdot 0,1 \cdot \frac{4,95}{45} \cdot 284,826 = \mathbf{1218,31 \text{ MPa}} \quad (6.55)$$

Potřebná síla

$$F_4 = \sigma_d \cdot S = 1281,31 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 61\,239,02 \text{ N} = \mathbf{61,24 \text{ kN}} \quad (6.56)$$

Potřebná práce

$$A_4 = \sigma_{ps} \cdot \phi_4 \cdot V = 271,672 \cdot 3,387 \cdot 26,336 = \mathbf{24\,233,15 \text{ J}} \quad (6.57)$$

Celková síla

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 371,45 + 242,1 + 129,43 + 61,24 = \mathbf{804,22 \text{ kN}} \quad (6.58)$$

Celková práce

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 3156,2 + 1940,2 + 15898 + 24233,15 = \mathbf{45\,227,7 \text{ J}} \quad (6.59)$$

6.5 Volba tvářecího stroje [9]



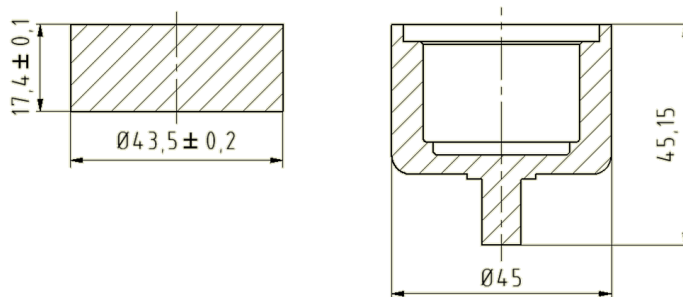
Obr. 53 Kolenový razící lis LLR 400 [9]

Pro protlačování za studena se obvykle volí mezi lisy mechanickými a hydraulickými. Jelikož je návrh zpracován pro komerční firmu, která má k dispozici určité typy strojů, byl zpracován návrh na stroj který je určen k protlačování za studena, a to konkrétně od firmy Šmeral Brno a.s. s typovým označením LLR 400 (Obr. 53) se jmenovitou silou 4000 kN.

Tab. 5 Parametry lisu [9]

Pracovní rozsah		
Tvářecí síla	[kN]	4000
Sevření	[mm]	450
Průchod	[mm]	500
Stůl		
Upínací plocha stolu	[mm]	500x596
Beran		
Upínací plocha beranu	[mm]	370x400
Přestavení beranu	[mm]	15
Zdvih	[mm]	90
Počet zdvihů	[1/min]	55
Stroj		
Celkový instalovaný výkon	[kW]	17

6.6 Postupový list a schematický postup protlačování



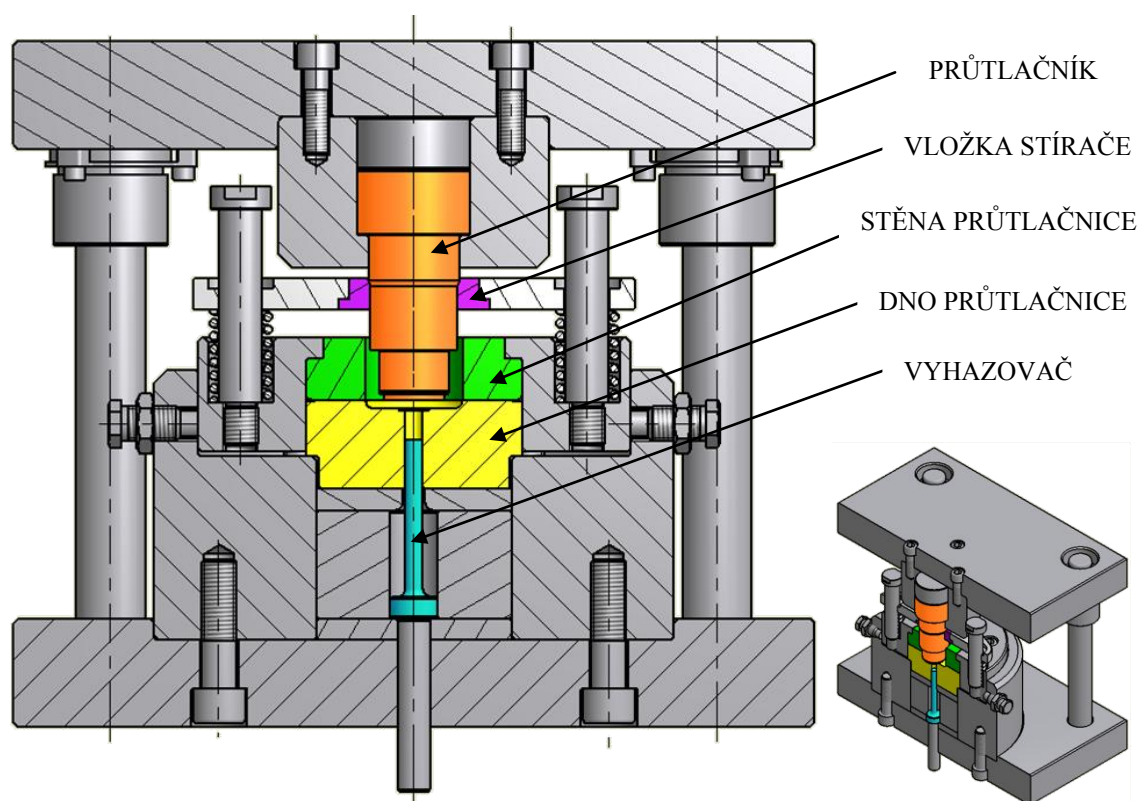
Obr. 54 Schematický postup protlačení

POSTUPOVÝ LIST

Název výrobku: Regulační člen - průtlaček		Číslo výkresu součástí: DP – 2013 - 01	Číslo výkresu průtlačku: DP – 2013 - 02
Č. op.:	Název operace:		
1.	Dodávka tyčového materiálu z hutí		
	Tyč: Ø43,5 x 3000 mm	Stav: F	
2.	Dělení materiálu - řezání		
	Jakost: AlMg1Si1Mn	Rozměr: Ø43,5 x 17,4 mm	Materiál: EN AW6082
	Stroj: Kotoučová pila WAM 70		Hmotnost přířezu: 0,07 kg
3.	Kontrola přířezu		
	Kontrola rozměru a hmotnosti s četností 1%		
4.	Tepelné zpracování		
	Druh: žihání na měkko ohřev 200°C, ochlazení do vody	Stroj: elektrická pec Realistic	Zpracovat do 24h po tepelném zpracování
5.	Mazání v omílacím zařízení		
	Stroj: Rösler R250/5 LR	Mazadlo: Stearan zinečnatý	Dávka: 1500 ks
6.	Protlačování v lince		
	Stroj: LLR 400		Protlačovací síla: 804 kN
	Popis operace: - dopravení polotovaru pásovým dopravníkem do zásobníku - ustavení do správné polohy - založení polotovaru do nástroje pomocí zakladače - protlačení na lise LLR 400		
7.	Tepelné zpracování		
	Druh: T6 – rozpouštěcí žihání a umělé stárnutí	Stroj: elektrická pec Realistic	
	Popis operace: <u>Rozpouštěcí žihání</u> - Ohřev na 500°C, výdrž 6:30 h - Ochlazení do vody <u>Umělé stárnutí:</u> Ohřev na 160°C, výdrž 6:30 h		
8.	Tryskání		
	Stroj: Tryskací zařízení LMBC 1,1 - L		
9.	Kontrola produkce a balení		

6.7 Návrh sestavy nástroje

Sestava nástroje je navržena na jednu tvářecí operaci a je upnuta pomocí upínek k beranu a stolu lisu s označením LLR 400. Pro dobrou manipulaci je nástroj opatřen závěsnými šrouby a pro uskladnění jsou ve spodní části základové desky vyvrtány otvory pro vložení kolíků. Nástroj je opatřen vyhazovačem a stíračem pro odstranění průtlačku z dutiny nástroje. Sestava nástroje musí být dobře vystředěna, aby nedošlo k přesazení obou částí nástroje. K tomuto nám slouží středící šrouby v části průtlačnice. Průtlačnice je dělená ze dvou kusů, které jsou vystředěny pomocí objímky. Jelikož vznikají ve dně průtlačnice větší tlaky, je možné z důvodu optimalizace výrobního procesu, bandážovat průtlačnici pomocí objímky. Tímto lze dosáhnout delší trvanlivosti nástroje. Jelikož je nástroj ve zkušebním stavu, není prozatím žádným způsobem optimalizován. Na obr. 55 je zobrazeno schéma sestavy protlačovadla v řezu, podrobný výkres je uveden v přílohách DP-2013-003.



Obr. 55 Sestava protlačovadla

Nástroj byl vyroben a odzkoušen. Výsledkem byl průtlaček, na kterém byly po tepelném zpracování provedeny materiálové zkoušky uvedené v kap. 6.8. Fotografie vzorového průtlačku je uvedena na obr. 56.

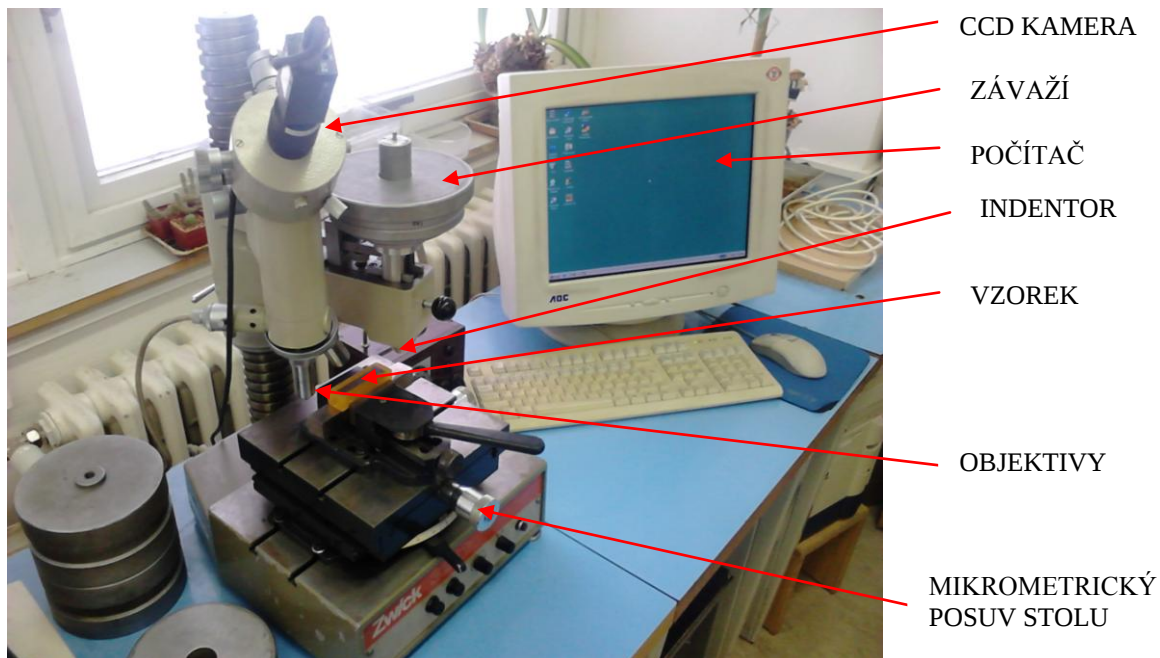


Obr. 56 Zhotovený průtlaček

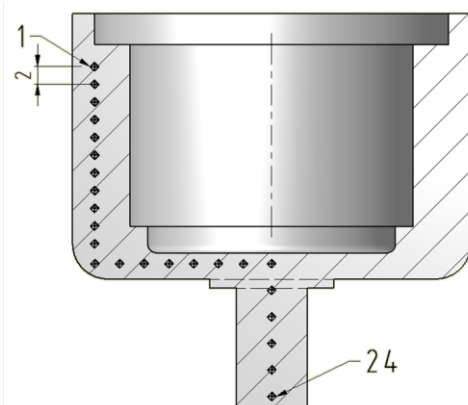
6.8 Materiálové zkoušky

A. Měření tvrdosti dle Vickerse

Postup měření je popsán normou ČSN EN ISO 6507-1



Obr. 57 Tvrdoměr Zwick 3215



Obr. 58 Schéma vpichů na měřeném vzorku

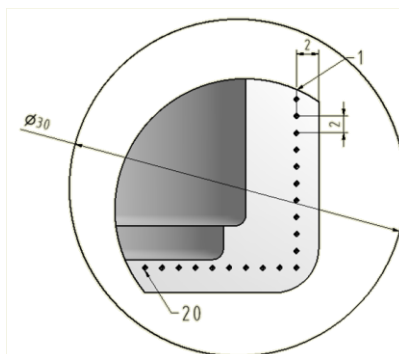
Tab. 6 Parametry přístroje

Přístroj	Tvrdoměr ZWICK 3212
Snímání vzorku	CCD kamera
Software	Zwick/Roell testXpert
Min. zatížení tvrdoměru	0,2 kg
Max. zatížení tvrdoměru	30 kg
Zvětšení	10:1, 20:1, 40:1

Tab. 7 Naměřené hodnoty tvrdosti HV2 (závaží 2kg)

Číslo měření (viz obr. 58)	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Tvrdost HV	122	120	120	118	119	118	120	123	120	120	120	118
	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.
	117	119	119	120	122	118	118	122	105	113	102	107

Měření tvrdosti na metalografickém výbrusu



Obr. 59 Schéma vzorku na měření tvrdosti po metalografickém výbrusu

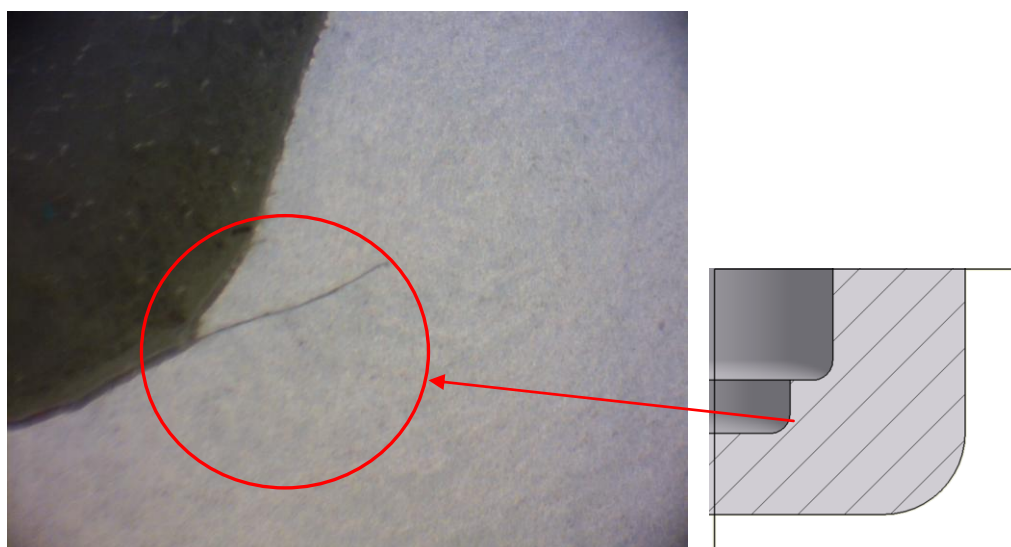
Tab. 7 Naměřené hodnoty tvrdosti na vzorku po metalurgickém výbrusu HV5 (závaží 5 kg)

Číslo měření (viz. Obr. 60)	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Tvrdost HV	110	110	108	109	109	106	107	107	106	108
	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.
	110	112	108	110	111	109	109	107	105	106

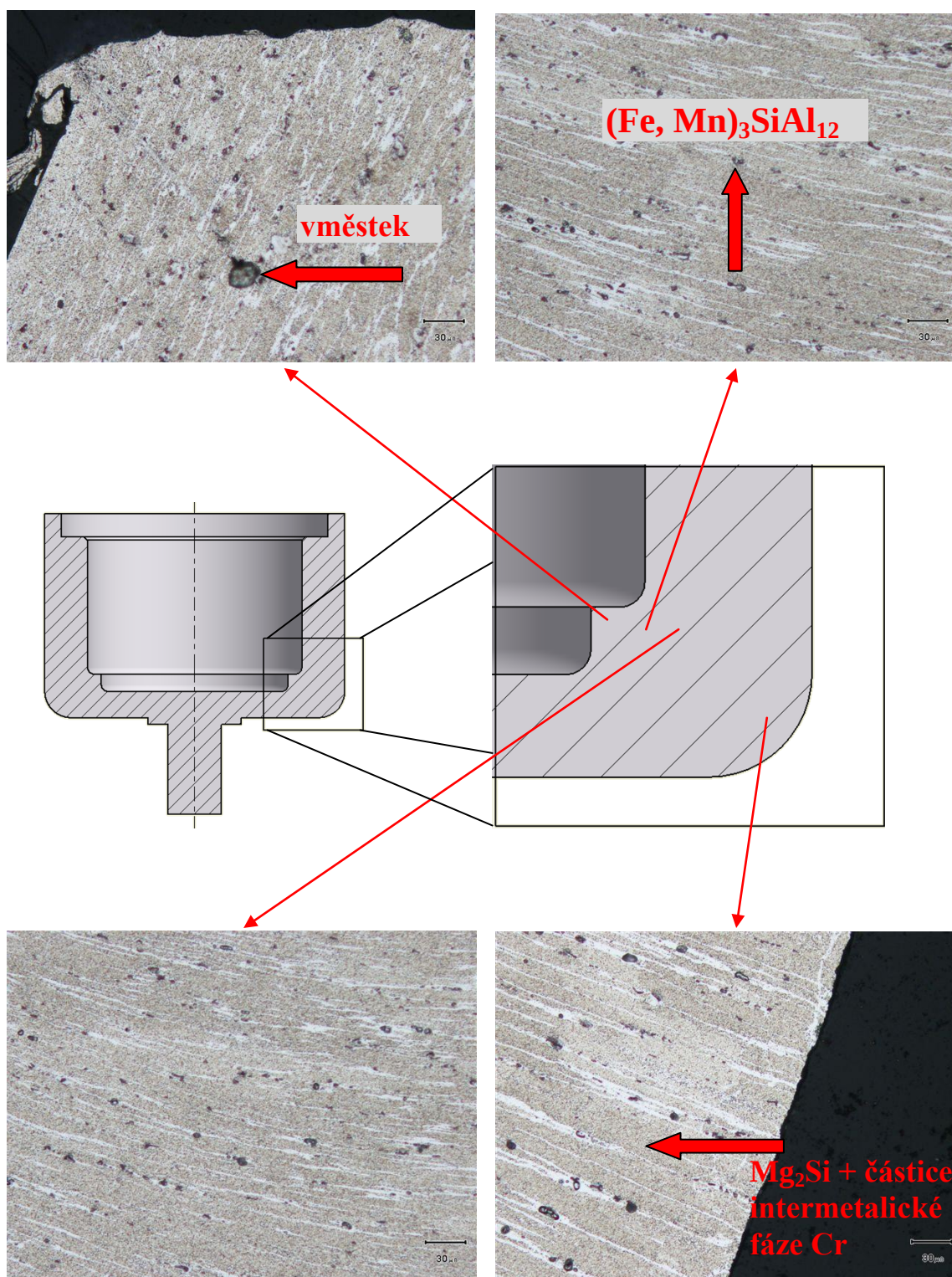
B. Metalografická zkouška

Postup přípravy metalografického vzorku:

- 1) Zalisování do pryskyřice
- 2) Vybrusění na poloautomatu od firmy Struers – Pedemin
- 3) Broušení na brusných papírech o zrnitosti: 280, 600, 4000
- 4) Leštění diamantovou pastou 3 μm , následně 1 μm
- 5) Leptání leptadlem značky FUSS – kyselina chlorovodíková, dusičná, fluorovodíková a destilovaná voda
- 6) Focení na mikroskopu



Obr. 60 Makrostruktura vzorku 100x zvětšeného



Obr. 61 Mikrostruktura vzorku průtlačku se zvětšením 200x

Závěry z materiálových zkoušek

Naměřená tvrdost se pohybuje v intervalu od 102 do 123 HV. Malé odchylky mohou být způsobeny nedostatečně dlouhou fází vytvrzování při tepelném zpracování. Průtlačky jsou při tepelném zpracování náhodně rozloženy v koši, jak je patrné z obr. 62. Pro dokonalější způsob tepelného zpracování by bylo možné navrhnout přípravek, který by zabezpečil uložení průtlačku v jedné poloze. Tímto by se dalo předejít případnému nahromadění vzduchu v dutině při ochlazování.



Obr. 62 Umístění průtlačku v koši

Na vnitřní straně průtlačku se objevila přeložka o délce cca 1 mm, viz. obr. 60. Vzhledem k tomu, že na vnitřním povrchu není přidavek na opracování, je nutné navrhnout řešení k odstranění této přeložky. Přeložka může být při namáhání iniciátorem vzniku napětí a následné tvorby trhliny.

Eliminovat vznik přeložky je možné:

- a) úpravou nástroje
- b) navrhnutím přídavek
- c) více-operačním protlačováním

Úprava nástroje může spočívat ve změně velikosti rádiusu na průtlačníku. Jako další by byla možnost zvětšit přídávky na vnitřním povrchu a tuto přeložku odstranit obráběním. To by vedlo ke zvýšení obráběcích časů a tedy i zvýšení ceny výrobku. Poslední možnost by byla zavést více - operační protlačování a například využít I. Variantu protlačování (Obr. 40). Tím by se teoreticky dalo předejít tvorbě přeložky, avšak výsledek není zaručený a zvýšení nákladů by bylo příliš velké. Náklady by se zvýšili kvůli nutnosti použití jiného stroje, jelikož pracovní prostor lisu LLR 400 by nevyhovoval požadavkům a také by se nejspíše muselo zavést mezioperační žíhání.

7 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Při technickém i ekonomickém zhodnocení budou srovnány dvě technologie. Jako první bude počítána výroba pomocí obrábění a následně tváření. Největší počáteční finanční investicí je pořízení strojů. V tomto případě se při zhodnocení uvažuje, že stroje jsou k dispozici. Další finanční položkou k výrobě je pořízení nástrojů a materiálů. K obsluze strojů, ať už tvářecích či obráběcích, bude zapotřebí jednoho dělníka na směnu.

K výrobě obrábění bude tedy zapotřebí obráběcí centrum a nástrojů konvenčních, jako například pro vrtání, tak i nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami. Tato technologie je výhodná především z důvodu vyrobení součásti do finální podoby. Co se týče nákladů na materiál a časovou náročnost je tato technologie dosti neproduktivní. Proto je snahou tyto náklady a časovou náročnost snížit.

K výrobě objemovým tvářením protlačováním je nutné využít tvářecí lis, který bude podpořen podávacími, dopravními a rovnacími systémy. Předběžně se dá říci, že tato technologie bude z časového i materiálového hlediska výrazně produktivnější než obrábění.

Pro obě tyto technologie budou dále zhodnoceny všechny parametry pro celkovou finanční náročnost kompletní výrobní série.

Tab. 8 Základní vstupní parametry

Délka tyče	L_t [mm]	3000
Šířka prořezu	l_d [mm]	1
Přídavek	p [mm]	1,5
Měrná hmotnost hliníku	ρ [kg/dm ³]	2,8
Cena materiálu	c_m [Kč/kg]	80
Cena odpadu	c_o [Kč/kg]	25
Cena třískového odpadu	c_t [Kč/kg]	8

7.1 Výpočet nákladů pro technologii obrábění

Pro výpočet parametrů nákladů bylo zvoleno obráběcí centrum značky: KOVOSVIT MAS SP 180

❖ Norma spotřeby materiálu na 1ks:

$$N_m = Q_s + q_d + q_o + q_k = 0,07 + 0,0050667 + 0,174 + 0,0001537 = 0,2492 \text{ kg/ks} \quad (7.1)$$

kde Q_shmotnost hotové součásti [kg/ks],
 q_dztráta materiálu při dělení tyče [kg/ks],
 q_oztráta materiálu při obrábění [kg/ks],
 q_kztráta materiálu z nevyužitého konce tyče [kg/ks].

❖ Hmotnost hotové součásti:

$$Q_s = V_s \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 26\,477,69 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,244 \text{ kg/ks} \quad (7.2)$$

Kde V_smax. objem materiálu hotové součásti (viz obr. 38) [mm³],
 ρměrná hmotnost [kg/dm³].

❖ Hmotnost polotovaru

$$Q_p = V_p \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 80\,796,74 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,244 \text{ kg/ks} \quad (7.3)$$

$$V_p = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot l_p = \frac{\pi \cdot (45+3)^2}{4} \cdot (45,15 + 3) = 87130,19 \text{ mm}^3 \quad (7.4)$$

kde V_pobjem materiálu polotovaru [mm³],
 d_pprůměr polotovaru (přířezu) [mm],
 l_pdélka polotovaru (přířezu) [mm].

❖ **Ztráty materiálu vzniklé při dělení**

$$q_d = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot l_d \cdot \rho \cdot 10^{-6} = \frac{\pi \cdot (45+3)^2}{4} \cdot 1 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,0050667 \text{ kg/ks} \quad (7.5)$$

❖ **Ztráty materiálu vzniklé při obrábění**

$$q_o = Q_p - Q_s = 0,244 - 0,07 = 0,174 \text{ kg/ks} \quad (7.6)$$

❖ **Počet přířezu z tyče:**

$$n_p = \frac{L_t}{l_p + l_d} = \frac{3000}{(45,15+3)+1} = 61,04 \cong 61 \text{ ks} \quad (7.7)$$

❖ **Délka nevyužitého konce tyče**

$$l_k = L_t - n_p \cdot (l_p + l_d) = 3000 - 61 \cdot [(45,15 + 3) + 1] = 1,85 \text{ mm} \quad (7.8)$$

❖ **Ztráta materiálu z nevyužitého konce tyče:**

$$q_k = \frac{\pi \cdot d_p^2 \cdot l_k}{4 \cdot n_p} \cdot \rho \cdot 10^{-6} = \frac{\pi \cdot (45+3)^2 \cdot 1,85}{4 \cdot 61} \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,0001537 \text{ kg/ks} \quad (7.9)$$

❖ **Celková ztráta třískového materiálu**

$$z_{m1} = (q_d + q_o) = 0,005067 + 0,174 = 0,179 \text{ kg/ks} \quad (7.10)$$

❖ **Celková ztráta kusového materiálu**

$$z_{m2} = q_k = 0,0001537 \text{ kg/ks} \quad (7.11)$$

❖ **Náklady na přímý materiál**

$$Np_m = N_m \cdot c_m - z_{m1} \cdot c_t - z_{m2} \cdot c_o = 0,2492 \cdot 80 - 0,179 \cdot 8 - 0,0001536 \cdot 25 = \mathbf{18,34 \text{ Kč/ks}} \quad (7.12)$$

❖ **Náklady na přímé mzdy**

$$Nm_{AC} = t_{AC} \cdot \frac{Mo_{AC}}{60} = 1,5 \cdot \frac{150}{60} = \mathbf{3,75 \text{ Kč/ks}} \quad (7.13)$$

kde t_{AC}jednotkový placený čas výrobního dělníka [min],
 Mo_{AC}mzdový tarif výrobního dělníka [Kč/ks],

❖ **Náklady na provoz stroje**

$$Nps_{AC} = \frac{t_{AC}}{60} \cdot Nh_s = \frac{1,5}{60} \cdot 45 = \mathbf{1,575 \text{ Kč/ks}} \quad (7.14)$$

kde Nh_snáklady na hodinu provozu stroje [Kč/h],

$$Nh_s = P \cdot c_e = 18 \cdot 3,5 = \mathbf{63 \text{ Kč/h}} \quad (7.15)$$

kde Ppříkon stroje [kW],
 c_etarifní cena elektřiny [kWh].

❖ **Celkové náklady na 1ks**

$$N_{co} = Np_m + Nm_{AC} + Nps_{AC} = 18,34 + 3,75 + 1,575 = \mathbf{23,67 \text{ Kč/ks}} \quad (7.16)$$

❖ **Náklady na celou sérii**

$$N_S = N_{celk} \cdot s = 23,67 \cdot 300\,000 = 7\,101\,000 \text{ Kč} \quad (7.17)$$

7.2 Výpočet nákladů pro technologii tváření - protlačování

Pro výpočet parametrů nákladů byl zvolen tvářecí lis značky: Šmeral a.s. LLR 400

❖ **Norma spotřeby materiálu na 1ks:**

$$N_m = Q_s + q_d + q_o + q_k = 0,072 + 0,004161 + 0 + 0,000662 = 0,07682 \text{ kg/ks} \quad (7.18)$$

❖ **Hmotnost hotové součásti:**

$$Q_s = V_s \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 26\,477,69 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,072 \text{ kg/ks} \quad (7.19)$$

❖ **Hmotnost polotovaru**

$$Q_p = V_s \cdot \rho \cdot 10^{-6} = 26\,477,69 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,072 \text{ kg/ks} \quad (7.20)$$

❖ **Ztráty materiálu vzniklé při dělení**

$$q_d = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot l_d \cdot \rho \cdot 10^{-6} = \frac{\pi \cdot (43,5)^2}{4} \cdot 1 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,004161 \text{ kg/ks} \quad (7.21)$$

❖ **Ztráty materiálu vzniklé při tváření**

$$q_o = Q_p - Q_s = 0,072 - 0,072 = 0 \text{ kg/ks} \quad (7.22)$$

❖ **Počet přířezu z tyče**

$$n_p = \frac{L_t}{l_p + l_d} = \frac{3000}{(17,6+3)+1} = 138,9 \cong 138 \text{ ks} \quad (7.23)$$

❖ **Délka nevyužitého konce tyče**

$$l_k = L_t - n_p \cdot (l_p + l_d) = 3000 - 138 \cdot [(17,6 + 3) + 1] = 19,2 \text{ mm} \quad (7.23)$$

❖ **Ztráta materiálu z nevyužitého konce tyče**

$$q_k = \frac{\pi \cdot d_p^2 \cdot l_k}{4 \cdot n_p} \cdot \rho \cdot 10^{-6} = \frac{\pi \cdot (43,5+3)^2 \cdot 19,2}{4 \cdot 138} \cdot 2,8 \cdot 10^{-6} = 0,000662 \text{ kg/ks} \quad (7.24)$$

❖ **Celková ztráta třískového materiálu**

$$z_{m1} = (q_d + q_o) = 0,004161 + 0 = 0,004161 \text{ kg/ks} \quad (7.25)$$

❖ **Celková ztráta kusového materiálu**

$$z_{m2} = q_k = 0,000662 \text{ kg/ks} \quad (7.26)$$

❖ **Náklady na přímý materiál**

$$Np_m = N_m \cdot c_m - z_{m1} \cdot c_t - z_{m2} \cdot c_o = 0,07682 \cdot 80 - 0,004161 \cdot 8 - 0,000662 \cdot 25 = 6,10 \text{ Kč/ks} \quad (7.27)$$

❖ **Náklady na přímé mzdy**

$$Nm_{AC} = t_{AC} \cdot \frac{Mt_{AC}}{60} = 0,08 \cdot \frac{150}{60} = 0,20 \text{ Kč/ks} \quad (7.28)$$

kde t_{AC}jednotkový placený čas výrobního dělníka [min]
 Mt_{AC}mzdový tarif výrobního dělníka [Kč/ks]

❖ **Náklady na provoz stroje**

$$Np_{sAC} = \frac{t_{AC}}{60} \cdot Nh_s = \frac{0,08}{60} \cdot 42 = \mathbf{0,06 \text{ Kč/ks}} \quad (7.29)$$

kde Nt_{hs}náklady na hodinu provozu stroje [Kč/h]

$$Nh_s = P \cdot c_e = 12 \cdot 3,5 = 42 \text{ Kč/h} \quad (7.30)$$

❖ **Celkové náklady na 1ks**

$$N_{ct} = Np_m + Nm_{AC} + Np_{sAC} = 6,10 + 0,20 + 0,06 = \mathbf{6,36 \text{ Kč/ks}} \quad (7.31)$$

❖ **Náklady na celou sérii**

$$N_s = N_{celk} \cdot s = 6,36 \cdot 300\,000 = \mathbf{1\,908\,000 \text{ Kč}} \quad (7.32)$$

Tab. 8 Porovnání nákladů obrábění a tváření

Náklady	Obrábění	Tváření	Rozdíl tváření x obrábění
Náklady na přímý materiál[Kč/ks]	18,34	6,10	+ 12,24
Náklady na přímé mzdy [Kč/ks]	3,75	0,20	+ 3,55
Náklady na provoz stroje [Kč/ks]	1,58	0,06	+ 1,52
Náklady na 1 kus [Kč]	23,67	6,36	+ 17,31
Celkové náklady [Kč]	7 101 000	1 908 000	+ 5 193 000

Pro získání hodnoty, kdy bude poměr tržeb a nákladů roven nule (tzv. rovnovážný bod), budou použita data pouze základní, tedy bez hodnot odpisů, režijí, nákladů na provoz managementu atd.

Fixní náklady na nástroje: $FN = 20\,000 \text{ Kč}$

Zisk 20% z jedné součásti za rok:

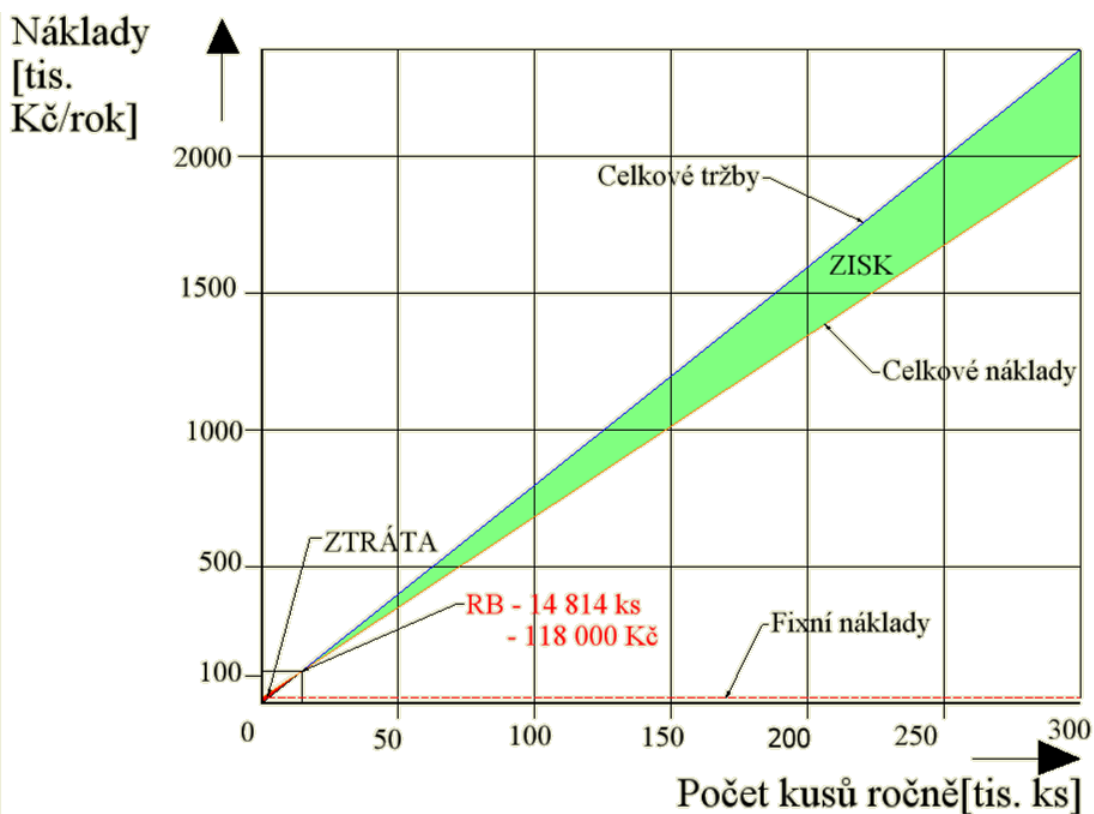
$$Z_{20} = \frac{(N_s + FN) \cdot 20}{100} = \frac{(1\,908\,000 + 20\,000) \cdot 20}{100} = \mathbf{385\,600 \text{ Kč}} \quad (7.33)$$

Zisk 20% z jedné součásti

$$c_{20} = \frac{N_s + FN + Z_{20}}{n} = \frac{1\,908\,000 + 20\,000 + 385\,600}{300\,000} = \mathbf{7,71 \text{ Kč}} \quad (7.34)$$

Rovnovážný bod:

$$RB = \frac{FN}{c_{20} - N_{ct}} = \frac{20\,000}{7,71 - 6,36} = \mathbf{14\,814 \text{ ks}} \quad (7.35)$$



Graf. 5 Plánované zisky a ztráty při zadané výrobě

Závěry z technicko-ekonomického hodnocení

Jelikož nejsou známa veškerá data, je výsledek rovnovážného bodu nízký. Výroba tedy začne být produktivní již při hodnotě 14 814 ks. Pokud by se však započítaly do fixních nákladů veškeré hodnoty, jako například mzdy vedoucích pracovníků, pojištění, nájemné, náklady by vzrostly, a tím by se zvýšila i hodnota rovnovážného bodu.

8 ZÁVĚRY

Tato diplomová práce se zabývá návrhem technologie výroby regulačního členu sloužícího jako součást v automobilu. Zmíněná součást bude vyráběna ze slitiny hliníku AW 6082 a sériovostí 300 000 ks/rok. Výroba součásti probíhala obráběním, a bylo požadováno ekonomicky výhodnější řešení výroby. Porovnáním výhod a nevýhod technologií, byla zvolena technologie objemového tváření, a to konkrétně protlačováním za studena. Problematika tohoto tématu byla blíže specifikována v kapitole druhé a třetí.

V návaznosti na literární rešerši, byla navržena podoba budoucího průtlačku s přídavky na obrábění a zhodnoceny možné varianty postupu výroby této součásti. Na základě finální podoby průtlačku byl určen polotovár. Po zhodnocení všech tří variant výroby se došlo k závěru, že nejvýhodnější bude realizovat výrobu pomocí varianty č. III.

Pro získání křivek zpevnění a následných deformačních napětí, byla provedena v laboratoři VUT zkouška petchování na třech vzorcích. Hodnoty byly zpracovány do grafů a z nich pro dané logaritmické přetvoření určeny deformační odpory, síly a práce. Po získání všech dílčích hodnot, byla stanovena výsledná celková hodnota síly, na jejímž základě byl zvolen výrobní stroj. Tímto strojem byl lis od firmy Šmeral a.s. s výrobním označením LLR 400, který je určen přímo pro technologii protlačování. Pro tento typ lisu byl navržen nástroj, který byl následně vyroben a odzkoušen.

Pro součást byl navržen postup výroby, podle kterého byly vyrobeny zkušební kusy. Na zkušebních kusech se provedly materiálové zkoušky, které pomohly zjistit určité odchylky a neshody, jako je např. přeložka. Závěry a nápravná opatření z těchto zkoušek jsou popsány v závěrech na konci kapitoly 6.8. Problematika materiálových zkoušek bude cílem dalšího zkoumání.

Na základě sériovosti bylo zpracováno technicko-ekonomické zhodnocení. Toto zhodnocení zahrnuje porovnání nákladů výroby mezi obráběním a tvářením součástí. V porovnání obou technologií vychází jednoznačně lépe výroba technologií tvářením. Zisk z jednoho kusu hotové součásti vychází na 1,35 Kč. Závěry z technicko-ekonomického hodnocení jsou popsány na konci kapitoly 7.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. *Objemové tváření oceli*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967, 329 s.
2. Coldmatic AKP 4-6 S. *HATEBUR* [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.hatebur.com/hatebur-en/products/coldmatic/akp-4-6s.php>
3. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tvaření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. ISBN 9788021434257.
4. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 8021423749.
5. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994, 229 s.
6. Hliníkové profily a tyče. *ALFUN* [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/sortiment/hlinik/tyce-a-profil>
7. HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-718-3262-6.
8. HÝSEK, Rudolf. *Tvářecí stroje*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1980, 551 s.
9. Kolenové lisy. *Svaz strojírenské technologie* [online]. 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.sst.cz/katalog/product/id/83>
10. KOTOUČ, Jiří, Luděk MÁDLE, Jan ŠANOVEC a Jan ČERMÁK. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1993, 349 s. ISBN 8001010031.
11. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření II*. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2008, 106 s. ISBN 978-80-7231-580-2.
12. MICHNA, Štefan et al. *Encyklopedie hliníku* [CD]. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 1 elektronický optický disk (CD-ROM). [cit. 2013-05-15]. ISBN 8089041884.
13. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 186 s. ISBN 8021404019.
14. ÖZEL, Tuğrul a Yiğit KARPAT. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms. [online]. 2007 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://ie.rutgers.edu/resource/research_paper/paper_07-019.pdf
15. Povlakovací centrum. *VUHZ* [online]. 2009 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.vuhz.cz/media/povlaky-CVD-a-PACVD/VUHZ_povlakovacentrum_new.pdf
16. *Precipitace* [pdf]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Precipitace09_10.pdf
17. Products - aluminium/brass fasteners. *SHREE KHODIYAR BRASS INDUSTRIES* [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://shreekhodiyarbrass.com/aluminium-brass-fasteners.html>

18. *ASM-Metals Handbook: Forming and Forging*. Vol.14. USA: ASM international, 2004, 978 s. ISBN 0871700204.
19. *Softwarový lexikon kovů se zahraničními ekvivalenty* [CD]. Praha: Dashöfer, 2001 [cit. 2013-05-15].
20. Technologie objemového tváření – protlačování. *Technická universita Liberec* [online]. 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/05.htm

SEZNAM PŘÍLOH

- | | | |
|------------------------|----------------------------|-------------|
| 1. Trhací stroj ZD 40 | | |
| 2. Výkres součásti: | REGULAČNÍ ČLEN | DP-2013-001 |
| 3. Výkres průtlačku: | REGULAČNÍ ČLEN (PRŮTLAČEK) | DP-2013-002 |
| 4. Výkres sestavy: | PROTLAČOVADLO | DP-2013-003 |
| 5. Výkres průtlačníku: | PRŮTLAČNÍK | DP-2013-004 |
| 6. Výkres průtlačnice: | PRŮTLAČNICE STĚNA | DP-2013-005 |
| 7. Výkres průtlačnice: | PRŮTLAČNICE DNO | DP-2013-006 |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Mez kluzu stanovená z kvazistatických testů	[MPa]
A _j	Měrná přetvárná práce	[J.mm ⁻³]
B	Modul zpevnění	[MPa]
C	Koeficient citlivosti na rychlost deformace	[-]
C ₂ , C ₃ , C ₄	Materiálové koeficienty	[-]
D ₀	Počáteční průměr	[mm]
D ₁	konečný průměr	[mm]
D ₂	Počáteční průměr v zásobníku	[mm]
D ₃	Konečný průměr v očku	[mm]
F	Síla	[N]
H	Konečná výška	[mm]
H ₀	Původní výška	[mm]
L ₁	Délka průtlačku v zásobníku	[mm]
L ₃	Délka průtlačku v očku	[mm]
L _t	Délka tyče	[mm]
Mo _{AC}	Mzdový tarif výrobního dělníka	[Kč/ks]
Mt _{AC}	Mzdový tarif výrobního dělníka	[Kč/ks]
N _{CO}	Celkové náklady u obrábění	[Kč/ks]
N _{Ct}	Celkové náklady u tváření	[Kč/ks]
Nh _s	Náklady na hodinu provozu stroje	[Kč/h]
N _m	Norma spotřeby materiálu	[kg/ks]
Nm _{AC}	Náklady na přímé mzdy	[Kč/ks]
Np _m	Náklady na přímý materiál	[Kč/ks]
Np _{SAC}	Náklady na provoz stroje	[Kč/ks]
N _s	Náklady na celou sérii	[Kč]
P	Příkon stroje	[kW]
Q _p	Hmotnost polotovaru	[kg/ks]
Q _S	Hmotnost hotové součásti	[kg/ks]
R	Konečný poloměr	[mm]
R ₀	Počáteční poloměr	[mm]
S	Konečný průřez	[mm ²]
S ₀	Počáteční průřez	[mm ²]
T ₀	Teplota okolí	[K]
T _m	Teplota materiálu	[K]
V _p	Objem materiálu polotovaru	[mm ³]
V _s	Objem materiálu hotové součásti	[mm ³]
c _e	Tarifní cena elektřiny	[kWh]
c _m	Cena materiálu	[Kč/kg]
c _o	Cena odpadu	[Kč/kg]

d	Vnitřní průměr protlačku	[mm]
d_p	Průměr polotovaru	[mm]
f_1, f_2	Koeficienty tření	[-]
h	Zdvih beranu	[mm]
l_d	Šířka prořezu	[mm]
l_k	Délka nevyužitého konce tyče	[mm]
l_p	délka polotovaru	[mm]
m	Exponent citlivosti na rychlost deformace	[MPa]
n	Exponent zpevnění	[-]
n_l	Počet zdvihů	[1/min]
n_p	Počet přířezů z tyče	[ks]
p	Přídavek	[mm]
q_d	Ztráta materiálu při dělení tyče	[kg/ks]
q_k	Ztráta materiálu z nevyužitého konce tyče	[kg/ks]
q_o	Ztráta materiálu při obrábění	[kg/ks]
t_{AC}	Jednotkový pracovní čas výrobního dělníka	[min]
v_0	Rychlost nástroje	[m/s]
z_{m1}	Ztráta třískového materiálu	[kg/ks]
z_{m2}	Ztráta kusového materiálu	[kg/ks]
φ	Logaritmické přetvoření	[-]
σ_p	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_d	Deformační odpor	[MPa]
ε	Poměrná deformace	[-]
α	Úhel redukčního kužele	[°]
$\dot{\varphi}_z$	Max. rychlost přetvoření v osovém směru	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}_r$	Max. rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru	[s ⁻¹]
σ_{ps}	střední přetvárný odpor	[MPa]
$\hat{\alpha}$	úhel redukčního kužele	[rad]
$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}_0$	Referenční rychlost přetvoření	[s ⁻¹]
σ_0	Mez kluzu	[MPa]
ρ	Měrná hmotnost	[kg/dm ³]

Příloha č.1 **Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/**

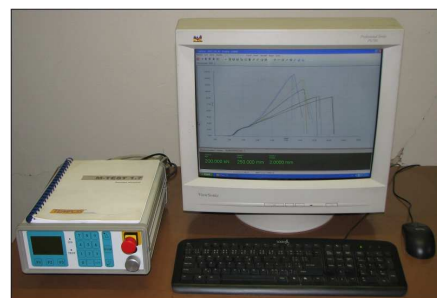
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60