



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SENDVIČOVÉ ZÁVITOVÉ VLOŽKY OBJEMOVÝM TVÁŘENÍM

BULK FORMING TECHNOLOGY OF SANDWICH COIL INSERT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Šíma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Vojtěch Šíma
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
Akademický rok:	2018/19

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 sendvičové závitové vložky objemovým tvářením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jde o návrh technologie velkosériové (hromadné) výroby sendvičové vložky se závitem používané pro spojení sendvičových panelů podlahy letadla s trupovými přepážkami. Předmětné vložky z lehké slitiny AlMnSi mají tvar tenkostěnného kalíšku s velkou přírubou o malé tloušťce asi 0,6 mm. Při návrhu technologie bude nutno zvážit kombinované protlačování s napěchováním příruby.

Cíle diplomové práce:

- 1.Vypracovat literární studii se zaměřením na objemové (kombinované) tváření za studena
- 2.Zhodnotit současný stav výroby součásti obdobného tvaru
- 3.Navrhnout vlastní technologii výroby se zaměřením na varianty a jejich hodnocení
- 4.Vypracovat výkresovou dokumentaci postupového nástroje
- 5.Zpracovat technické a ekonomické hodnocení
- 6.Formulovat závěry a doporučení

Seznam doporučené literatury:

LANGE, Kurt, et al. Handbook of metal forming. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.

ELFMARK, Jiří, et al. Tváření kovů. Ing.Pavel Vávra. 1. vyd. Praha : SNTL, 1992. 524 s. Technický průvodce; sv. 62. ISBN 80-03-00651-1.

MIELNIK, Edward M. Metalworking science and Engineering. Michael B. Bever. 1st edition. New York : McGraw-Hill, Inc., 1991. 976 s. ISBN 0-07-041904-3.

FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Milan Forejt; Design obálky: Ildikó Putzová. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

ŠÍMA Vojtěch: Výroba sendvičové vložky objemovým tvářením.

Projekt vypracovaný v rámci magisterského studia oboru M-STG je zaměřen na návrh technologie výroby sendvičové vložky, používané pro spojení sendvičových panelů podlahy letadla s trupovými přepážkami. Výrobek je zhotoven z lehké hliníkové slitiny AlMn1. Na základě požadavků výroby a velikosti výrobní série 120 000 kusů za rok byla jako nejvhodnější technologie vybrána výroba kombinovaným protlačováním za studena s pěchováním příruby. Součást je vyrobena ze špalíkového polotovaru ve třech operacích na postupovém tvářecím automatu TPM 8-A o jmenovité síle 1000 kN od firmy Šmeral Brno a.s. V rámci projektu byly navrženy nástroje pro výrobu součásti, a také byly provedeny technické výpočty pro jednotlivé operace a technicko-ekonomické zhodnocení výroby. Cena součásti je odhadována nejméně na 7,33,- Kč.

Klíčová slova: hliníková slitina AlMn1, kombinované protlačování za studena, pěchování, sendvičová vložka, postupový tvářecí automat TPM 8-A

ABSTRACT

ŠÍMA Vojtěch: Bulk forming of sandwich coil insert.

The project elaborated in a frame of Master's degree branch M-STG focuses on the design of a technology of sandwich coil used for connecting the aircraft floor sandwich panels to the fuselage bulkheads. The product is made of a lightweight aluminium alloy AlMn1. Combined cold extrusion with upsetting of the flange was chosen as the most fitting technology due to the manufacturing requirements and production series size of 120 000 pieces per year. The component is manufactured from a block blank in three operations by a progressive forming machine TPM 8-A with a nominal force of 1000 kN from Šmeral Brno a.s. producer. Within the project, tools for the production of the part were designed and also technical calculations for individual operations and technical and economic evaluation of production were made. The price of the component is estimated to be at least CZK 7,33

Keywords: aluminum alloy AlMn1, combined cold extrusion, upsetting, sandwich coil insert, progressive forming machine TPM 8-A

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠÍMA, Vojtěch. *Výroba sendvičové závitové vložky objemovým tvářením*. Brno, 2019.
Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116167>. Diplomová práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
Vedoucí práce Milan Forejt.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 24.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu práce prof. Ing. Milanu Forejtovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Velké poděkování patří i mým rodičům a všem blízkým, kteří mne podporovali při studiu na vysoké škole.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	10
2 LITERÁRNÍ STUDIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA	12
2.1 Fyzická podstata plastické a elastické deformace	12
2.2 Metody objemového tváření za studena	13
2.2.1 Pěchování	13
2.2.2 Protlačování	13
2.3 Technologičnost výroby při objemovém tváření za studena	15
2.3.1 Tvary vhodné k objemovému tváření za studena	15
2.3.2 Materiály vhodné k objemovému tváření	18
2.3.3 Příprava materiálu	20
2.4 Tvářecí nástroje	21
2.4.1 Nástroje pro pěchování	21
2.4.2 Nástroje pro dopředné protlačování	22
2.4.3 Nástroje pro zpětné protlačování	24
2.4.4 Materiály nástrojů	26
2.5 Tvářecí stroje	27
2.6 Technologické výpočty	28
3 POSTUP TECHNOLOGIE VÝROBY	38
3.1 Varianty výroby	38
3.1.1 Výběr nejvhodnější varianty	42
3.2 Výpočet rozměrů součástí v jednotlivých operacích	43
3.3 Technologické výpočty k variantě B	45
3.3.1 1. operace – předtvarování.....	45
3.3.2 2. operace – kombinované protlačování	46
3.3.3 3. operace – pěchování příruby a kalibrace	57
3.4 Volba tvářecího stroje	59
3.5 Návrh sestavy nástrojů	60
3.6 Výpočet rychlostí deformace k variantě B	62
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	65
5 ZÁVĚRY	68

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6]

Tvářením kovů rozumíme technologický proces zpracování železných i neželezných kovů, během kterého se mění tvar i mechanické vlastnosti součásti bez toho, aniž by v něm docházelo k porušení spojitosti. Během procesu roste v materiálu napětí, evokované specifickými nástroji, jenž působí na polotovary vnějšími silami. Napětí v materiálu roste, a až po okamžik dosažení meze kluzu v něm vyvolává vratné elastické deformace. Po překročení meze kluzu se tvoří deformace plastické, které jsou nevratné a ty mají za následek změnu tvaru. Technologie tváření zaznamenala ve 20. století velký posun vzhledem k rozvoji maziv, výrobních strojů, nástrojů. Nyní nalézá uplatnění v sériové a hromadné výrobě ve snaze nahradit technologii obrábění za účelem úspory materiálu, zvýšení produktivity a zlepšení mechanických vlastností a jakosti výrobků.

Hlavní rozdělení tvářecích procesů je:

Podle převažujícího stavu napjatosti:

- **Plošné tváření:** např. tažení, stříhání, ohýbání. Polotovarem je plech a během procesu je podroben dvouosé napjatosti.
- **Objemové tváření:** např. protlačování, pěchování, nebo kování. Polotovar jednoduchého tvaru je trojose namáhán a tvarově výrazně přetvořen.

Podle teploty:

- **Tváření za studena:** probíhá za teplot výrazně nižších, než je teplota rekrystalizace. Struktura materiálu se deformuje.
- **Tváření za poloohřevu:** se provádí při teplotách tzv. zotavení, kdy dochází k tepelně aktivovanému pohybu dislokací. Dochází k deformačnímu zpevnění.
- **Tváření za tepla:** probíhá nad teplotami rekrystalizace. Výsledkem je zjemnění zrna.

Cílem diplomové práce je zaměřením se na oblast technologie objemového tváření za studena – převážně protlačování a pěchování. K popisu problematiky byla zadána součást, na které se budou aplikovat nabyté znalosti z technologického a konstrukčního hlediska – tj. návrh variant výroby a výběr té nejvhodnější možnosti výroby, výpočet parametrů potřebných k výrobě a konstrukce nástrojů takovým způsobem, aby bylo dosaženo požadovaných rozměrů a jakosti součástí. Hlavním výstupem je prokázat znalosti studenta získaných během studia na fakultě a ověřit jeho schopnost práce s odbornou literaturou a schopnost aplikace získaných znalostí při řešení technologických problémů.

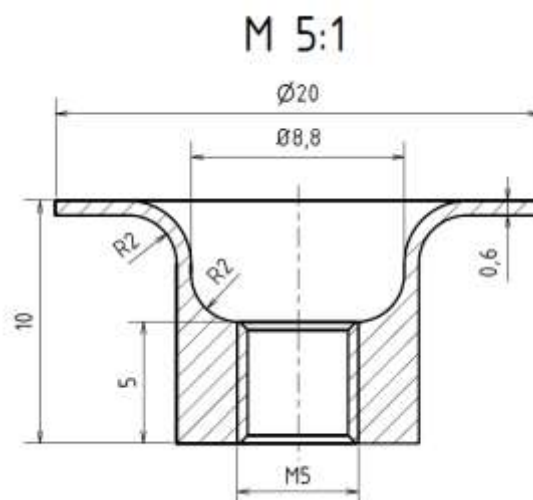


Obr. 1: Příklady součástí vyrobených objemovým tvářením [2]

1 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU [1], [7], [8], [9]

Práce pojednává o výrobě tzv. sendvičové vložky se závitem. Tato součást spojuje sendvičové panely, tvořící podlahu s trupovými přepážkami. Samotné sendvičové panely nelze připevnit k trupovým přepážkám, protože jejich korálovitá struktura jádra znemožňuje vytvoření závitu v panelu – je tedy nutné spojovat panely touto speciální spojkou.

Samotná součást je tenkostěnný kalíšek s tloušťkou stěny asi 0,6 mm a s velkou přírubou o průměru 20 mm. Ve dně kalíšku se nachází otvor se závitem M5.



Obr. 2: Výkres zadané součásti

Materiál: hliníková slitina AlMn1 ČSN 42 44 32

Výrobek je vytvořen z lehké hliníkové slitiny AlMnSi se sérií 120 000 kusů ročně. Jde o tvářenou litinu pro všeobecné účely, používanou ve stavu měkkém, nebo tvářeném za studena. Tento materiál je pevnější než samotný čistý hliník, ale i přesto si zachovává vysokou tažnost a korozní odolnost. Používá se na výrobu málo namáhaných součástí, zhotovených technologií tažení nebo ohýbání, a také na středně namáhané konstrukce letadel, vozidel a součástí pro jemnou mechaniku a optiku.

Tab. 1: Chemické složení AlMn1 [8]

Materiál		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Zr + Ti	ostatní		Al
									jedn.	celk.	
AlMn1	min				0,9						zb.
	max	0,5	0,7	0,1	1,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,15	

Tab. 1: Materiálové vlastnosti slitiny AlMn1 [8]

		Průměr [mm]		Tloušťka [mm]		Rm [MPa]		Rp0,2 [MPa]		A5 [%]	A10 [%]	A50 [%]	Tvrdost [HB]	
Stav	Směr	min	max	min	max	min	max	min	max	min	min	min	min	max
.15.,.11	L					90	140	50	90	18	16		20i	35i
.25.,.21	L		40		40	140	190	90	145	8	6		35i	45i
.35.,.31	L		25		25	190		150		3	2		40i	55i

Možnosti výroby:

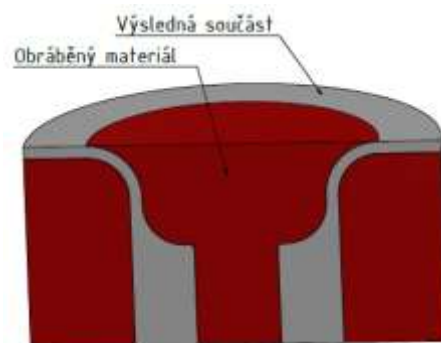
S ohledem na efektivnost a kvalitu výroby v rámci velké výrobní série je potřeba zvážit několik technologií možných k výrobě a vybrat z nich tu nejvhodnější.

- **Odlévání:** Jedná se o způsob hromadné výroby součásti, kterou by jinými způsoby nebylo možné vyrobit. Roztavený kov se vlije do formy, která má dutinu tvarově přibližně odpovídající výslednému produktu. Po vychladnutí kovu se odstraní vtokový kanálek a provedou se konečné úpravy.

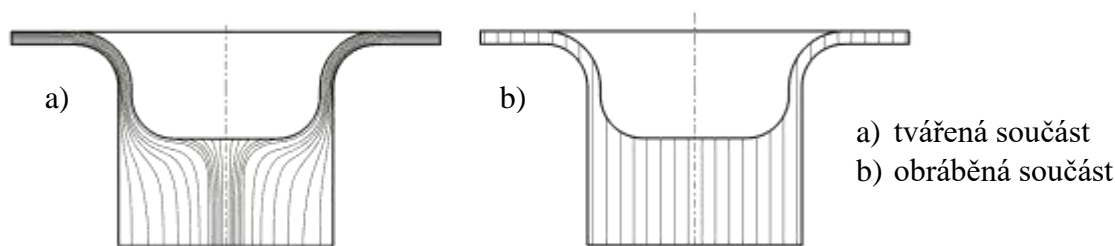
Vzhledem ke tloušťce stěny, příruby a celkovému tvaru řešené součásti nepřichází konkrétní metoda v úvahu, protože by materiál při odlévání pravděpodobně nezatekl do všech dutin a některé plochy by vyžadovaly přídavky, které by vzhledem k velikosti součásti způsobily velkou spotřebu materiálu. Výroba je navíc velice energeticky a v tomto případě i časově náročná. Odlitý materiál má hrubozrnnou strukturu a spoustu nežádoucích odměšenin, staženin a bublin, vzniklých při chladnoucím procesu, způsobujících anizotropii.

- **Obrábění:** Metoda třískového obrábění je založena na silovém působení nástroje na polotovaru, ze kterého odebírá materiál ve formě tzv. třísek. Podle druhu nástroje a způsobu úběru třísky se metoda obrábění dále rozlišuje například na frézování, soustružení, vrtání nebo broušení. Pomocí této technologie lze vyhotovit velmi přesné a hladké povrchy, ovšem za cenu velké spotřeby materiálu (obr. 3). Výsledný výrobek ale nedosahuje tak vysoké pevnosti jako když je tvářen. Vlákná jsou na ploše vzorku rovnoběžná a v místě přechodů přerušena (obr. 4b). Oproti tomu tvářená vlákna přizpůsobují svůj směr tvaru součásti, což je příznivější pro její pevnost a houževnatost.

V případě závitové vložky by byla možnost výroby upnutím tyčového polotovaru o průměru 22 mm do soustruhu, obrobením průměru $\text{Ø}10$ mm, následně upnutím za tuto plochu a obrobením průměru $\text{Ø}8,8$ mm, vyvrtáním závitu a dokončením příruby. Bylo by ovšem nutné celý proces experimentálně ověřit, protože vzhledem k velikosti příruby (průměr $\text{Ø}20$ mm) hrozí čelní házení příruby a její deformace.



Obr. 3: Množství odpadu při technologii obrábění



Obr. 4: Vlákná ve tvářeném a v obráběném materiálu

- **Tváření:** Tváření je beztržkový způsob výroby, který je vzhledem k vysoké ceně nástrojů vhodný převážně jen pro velké série. Úsporou výrobního času a spotřebovaného materiálu však tuto nevýhodu nahrazuje. Makroskopická struktura je oproti obrábění příznivá, protože vlákna kopírují tvar součásti a nejsou přerušena (obr. 4a), díky čemuž má materiál lepší mechanické vlastnosti.

S přihlédnutím k velké sérii výroby a tvaru součásti je postup výroby tvářením nejvhodnější, a proto mu bude věnována největší pozornost. Jako vhodná možnost výroby pomocí tváření se jeví dopředné protlačování s pýchováním příruby.

2 LITERÁRNÍ STUDIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA [6], [10]

S postupem vývoje výroby proniká čím dál více technologie objemového tváření za studena do průmyslového odvětví a nahrazuje tehdejší výrobní postupy a technologie inovativnějšími a efektivnějšími způsoby. Zároveň umožňuje zhotovení součástí, které původními způsoby byly složité vyrobitelné, nebo nedosahovaly dostatečných kvalit.

Aby byl technolog schopen využívat výhod této poměrně mladé technologie, musí porozumět jejím základním principům v materiálové, konstrukční a technologické oblasti.

2.1 Fyzická podstata plastické a elastické deformace [4], [10], [11], [12]

Jedná se o jev nezbytný pro fungování metody objemového tváření. Materiál, který je podroben zatížení vnějších sil, se nejprve deformuje pružně neboli elasticky. K elastické deformaci dochází za předpokladu malých sil a deformací. Je popsána Hookovým zákonem (rovnice 2.1) a projevuje se vratností tělesa do původního stavu po eliminaci vnějších zatížení.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon [-] \quad (2.1)$$

kde: ε [-] – poměrné délkové prodloužení

E [MPa] – modul pružnosti v tahu

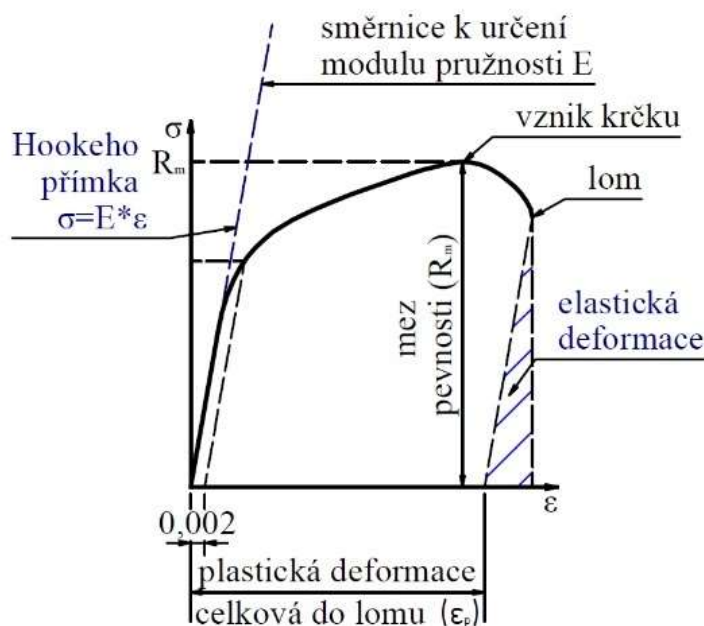
σ [MPa] – mechanické napětí

$$E = \frac{\Delta l}{l} [-] \quad (2.2)$$

kde: Δl [mm] – prodloužení vzorku

l [mm] – délka vzorku

Při vyšším zatížení dochází k překonání kritického kluzového napětí, které způsobí pohyb atomů v krystalické mřížce. Dojde tak k uvolnění atomů z rovnovážné polohy a jejich přemístění do jiných míst s rovnovážnou polohou. Tento proces se projevuje nevratnými změnami tvaru a rozměrů tělesa neboli plastickou deformací. Celý proces je graficky dobře prezentovatelný na tahovém diagramu na obrázku 5.



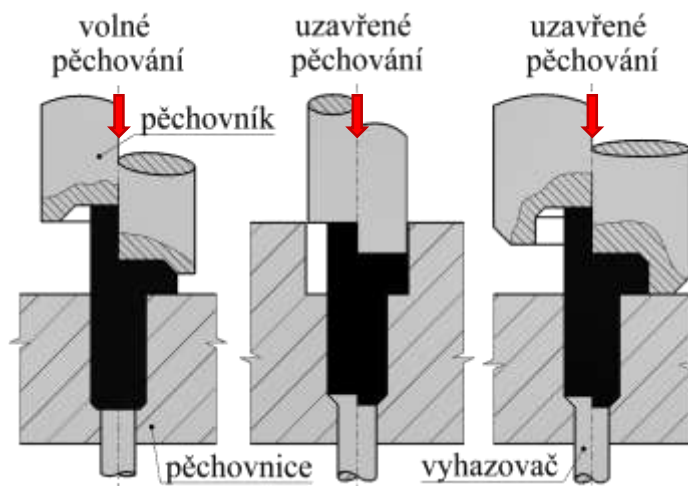
Obr. 5: Tahový diagram se smluvní mezí kluzu [11]

2.2 Metody objemového tváření za studena [17], [18]

Od ostatních tvářecích technologií se objemové tváření za studena vymezuje nižší teplotou procesu, než je teplota rekrystalizace a také prostorovou napjatostí, působící v materiálu velké plastické deformace bez porušení jeho soudržnosti. Touto metodou lze vyrábět výrobky s velkou sériovostí a přesností IT10 až IT8 se zlepšenými mechanickými vlastnostmi. S ohledem na tok materiálu se proces rozděluje do několika metod výroby. Mezi hlavní dvě patří pěchování a protlačování.

2.2.1 Pěchování [6], [15], [17], [18]

Jedná se od jeden ze základních tvářecích výrobních principů, který spočívá ve zmenšování výšky součásti za současného rozšiřování jejího radiálního průřezu. Polotovar se vloží mezi dvě vodorovné plochy nástroje a je stlačován v osovém směru do požadované výšky. Podle tvaru nástrojů se rozlišuje pěchování volné a uzavřené (obr. 5). Pěchováním lze zhotovit polotovary v mezioperacích, kombinovaných s ostatními technologiemi, ale také hotové výrobky v dokončovacích a kalibračních operacích.

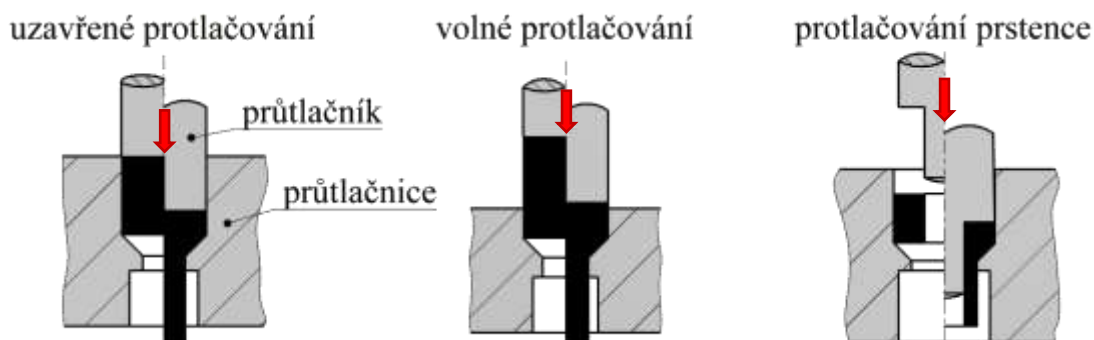


Obr. 6: Způsoby pěchování [15]

2.2.2 Protlačování [6], [15], [17], [18], [19], [20], [21], [22]

Tato více než 100 let stará metoda výroby se v poslední době ujímá v praxi čím dál více při výrobě velkosériových normalizovaných součástí. Jejím principem je deformace materiálu působením tvářecích sil pomocí speciálních nástrojů – průtlačníků. Konečný tvar součásti neboli protlačku, je dán konstrukcí nástroje (průtlačníku) a formy (průtlačnice), které určují tok materiálu. Podle způsobu toku materiálu se rozlišuje několik metod protlačování.

- **Dopředné protlačování:** Ve starších publikacích se uvádí také jako přímé protlačování. Do procesu vstupuje materiál ve formě špalíků či kalot se dnem nebo bez dna, nastříhaných z plných, nebo dutých tyčí. Polotovar je protlačován skrze průtlačnici, kde je redukován jeho průřez a vytéká ve směru chodu průtlačníku na druhé straně z výstupní části průtlačnice. Podle toho, zdali je nebo není průtlačník vedený v průtlačnici, se rozlišuje protlačování volné a uzavřené, jak je vidět na obrázku 7. Průtlačky musí být z dutiny odstraněny vyhazovačem, nebo vytlačeny dalším protlačkem.

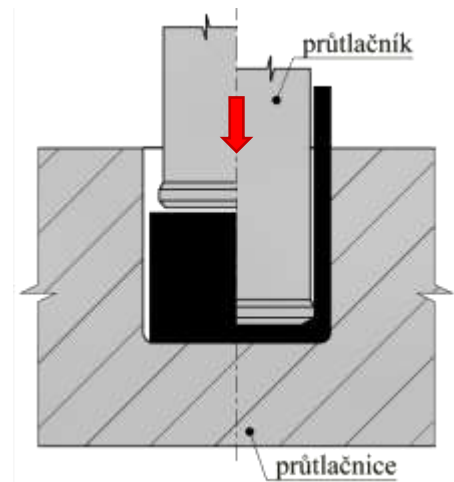


Obr. 7: Hlavní způsoby dopředného protlačování [15]

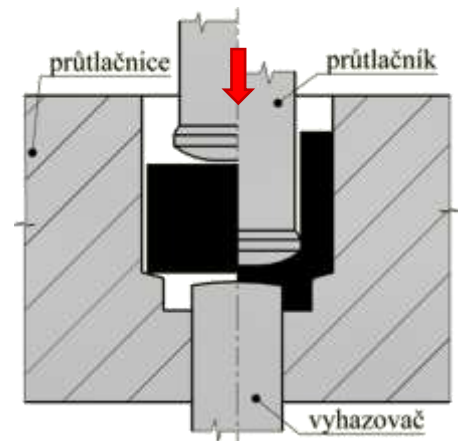
• **Zpětné protlačování:** Ve starších publikacích se uvádí také jako usměrněné protlačování. Tvářený materiál je ve formě plných špalíků, nebo prstenců deformován v uzavřené průtlačnici průtlačníkem do požadovaného tvaru. Průměr průtlačníku je menší, než je průměr dutiny průtlačnice (obr. 8). Mezerou mezi těmito nástroji teče materiál proti směru pohybu průtlačníku. Během procesu podléhá materiál několika fázím přetvoření. Nejprve se zaplní mezeru mezi polotovarem a stěnou průtlačnice. Následně se materiál v oblasti pod tlačníkem zpevní a vytvoří se tzv. ohnisko deformace, které sahá až do výšky šestiny průměru tlačníku. V poslední fázi je materiál již zplastizovaný a protéká mezerou mezi nástroji, kde už se dále nepřetváří, ale už se chová jako spojité kontinuum. Vše probíhá v souladu se zákonem zachování objemu, což znamená že se snižováním výšky polotovaru roste stěna výrobku o odpovídající vytlačený objem. Technologie nalézá své uplatnění ve strojírenském a elektrotechnickém průmyslu při hromadné výrobě a je oproti dopřednému protlačování náročnější kvůli velkým deformačním odporům, omezujícím délku průtlačníku a kvůli nerovnoměrnému stavu přetvoření. Nerovnoměrné přetvoření je způsobeno tím, že směry hlavních deformací nejsou totožné se směry hlavních souřadnicových os.

• **Sdružené protlačování:** Jedná se o kombinaci dopředného a zpětného protlačování. Dopředné protlačování je způsobeno průtlačníkem a zpětné protlačování pomocným trnem. Část materiálu teče před čelem nástroje a další část mezerou mezi průtlačníkem a průtlačnicí – materiál teče oběma směry současně. Z hlediska vyrobiteľnosti je důležitý předpoklad, aby stupeň deformace v horní části dílce, ve které dochází ke zpětnému protlačování, byl větší než v jeho spodní části, kde probíhá deformace podle zásad dopředného protlačování. Při nedodržení této podmínky materiál nevyplní dno součásti. Schéma sdruženého protlačování je znázorněno na obrázku 9.

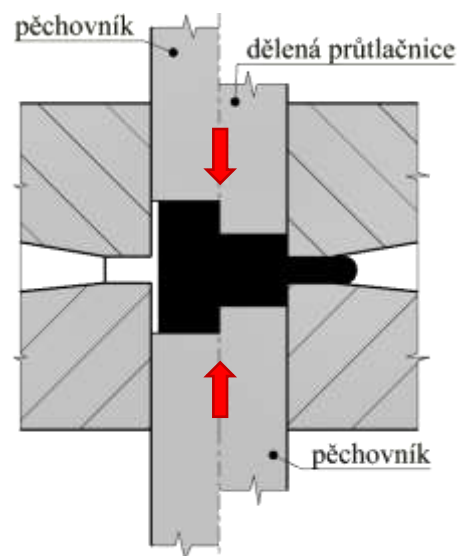
• **Radiální protlačování:** Někdy se také uvádí pod pojmem stranové protlačování. Od předchozích metod se odlišuje tokem materiálu (obr. 10). Polotovaz je vložen do dělené průtlačnice a z obou stran je uzavřen tlačíky, které umožňují tok kovu pouze radiálním směru, tedy ve směru kolmém na zatěžovací sílu. S oblibou se využívá při změně průřezu pouze v určité části výrobku, nebo při tváření výstupků různých tvarů.



Obr. 8: Dopředné protlačování [15]



Obr. 9: Sdružené protlačování [15]



Obr. 10: Radiální protlačování [15]

2.3 Technologičnost výroby při objemovém tváření za studena [6], [21]

Při návrhu technologického postupu a konstrukci nástrojů se inženýr potýká s mnoha problémy (například s výběrem vhodné technologie, volbou polotovaru, návrhem geometrie nástrojů, pevnostními výpočty atd.). Při řešení těchto problémů se zpravidla čerpá z letitých zkušeností návrhářů a konstruktérů ve firmě a dále z výsledků experimentálních měření, zavedených například v technických normách. Každá volba jednotlivých parametrů může pozitivně i negativně ovlivnit průběh výroby a vlastnosti materiálu, a proto je důležité žádný zásadní problém neopomenout.

2.3.1 Tvary vhodné k objemovému tváření za studena [6], [21], [23], [24], [25], [26]

Geometrie konečné součásti je jedním z faktorů, napovídajícím, jakou metodu zvolit. Tvar konečné součásti by měl respektovat určitá ustanovení, plynoucí z experimentálních zkoušek, a která umožňují jeho vyrobiteľnost. Svá pravidla má i výběr polotovaru.

- **Tvar a rozměry výchozího polotovaru:** Zásadním parametrem při návrhu polotovaru je objem materiálu, potřebný k vyhotovení konečného výlisku. V souladu se zákonem zachování objemu platí rovnost objemu materiálu v každé operaci – lze tedy jednoduše určit potřebné množství materiálu podle rozměrů v konečné operaci. Výpočet lze provést ručně rozdělením součásti na dílčí objemy jednodušších tvarů, nebo pomocí výpočetního 3D modelářského softwaru. Tvar polotovaru by měl být co nejvíce podobný konečným rozměrům, aby nedošlo k příliš velkým přetvořením. Pro objemové tváření za studena je několik základních a vhodných druhů tvaru:

a) špalík kruhového průřezu (obr. 11):

Využití nalézá při pěchování i dopředném a zpětném protlačování. Výlisek má někdy dno, které je případně nutné prostříhnout. Průměr špalíku je odvozen od největšího vnějšího průměru výrobku (za tento rozměr se ustředí do tvářecí dutiny) a jeho výška se dopočte z potřebného objemu. Vytváří se z plných tyčí ustříhnutím stříhacími noži, nebo dělením pásovou pilou. Při přetváření představuje velké deformační odpory, což má za následek snížení životnosti nástrojů.

b) prstenec (obr. 12):

Jeho tvar je z hlediska úspory materiálu vhodný pro zhotovení rotačních součástí s průchozím otvorem pomocí pěchování, nebo zpětného či dopředného protlačování. Vnější průměr prstence je totožný s vnějším průměrem výlisku kvůli vystředění a vnitřní průměr polotovaru nesmí být menší než otvor výrobku. Získává se z tlustostěnných trubek pomocí upichování, svařením drátů do kroužku, nebo objemovým tvářením z drátů či tyčí. Oproti špalíku je výhodnější z hlediska menších přetvárných odporů, nelze z něj ovšem vytvořit součástku s plným průřezem.

c) špalík mnohoúhelníkového průřezu:

Není příliš vhodný, protože zanechává po protlačení výstupky v místech kde byly hrany.



Obr. 11: Polotovar špalíku [6]



Obr. 12: Polotovar prstence [6]

- **Tvar a rozměry součásti:** Rozměry výsledného výrobku jsou omezeny pouze měrným tlakem, tvářecí silou a rozměry tvářecího stroje. Součásti jsou vyrobitelné do průměru 160 mm a do délky 1500 mm. Je zároveň potřeba dodržet několik zásad (obr. 13):

- při zpětném protlačování by tloušťka stěny měla být v rozmezí 0,5 až 15mm
- u zpětného protlačování by hloubka dutiny měla být dvakrát větší než průměr dutiny
- velikost průměru dutiny zhotovené zpětným protlačováním se navrhuje minimálně 10mm
- při pěchování je potřeba dodržet tzv. pěchovací poměr podle vzorce 2.3, který by neměl přesahovat hodnotu 2,5. Při jeho nedodržení by mohlo dojít ke zohnutí vzorku.

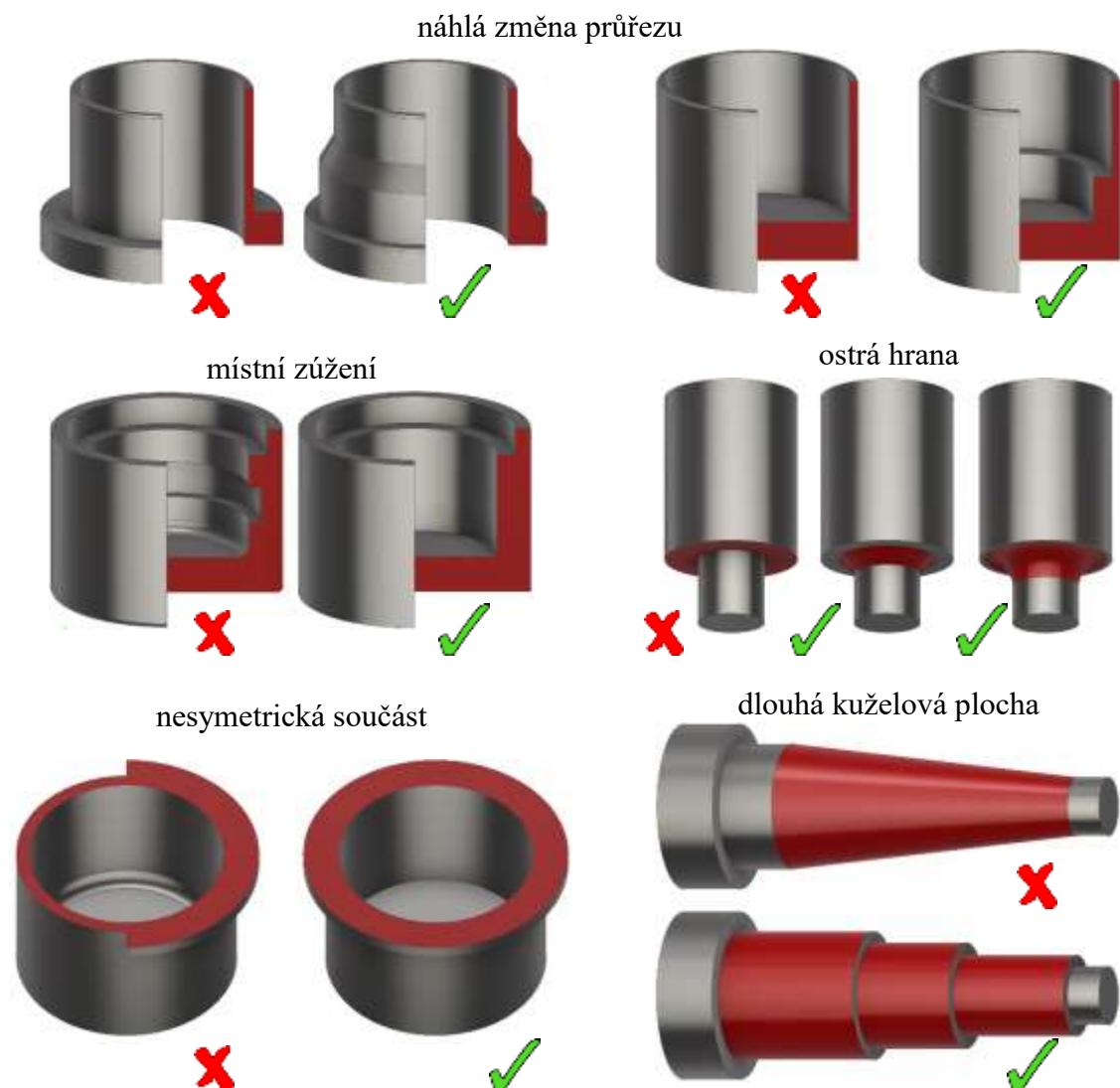
$$D_R = \frac{h_0}{d_0} < 2,5 \quad (2.3)$$

kde: D_R [-] – pěchovací poměr

h_0 [mm] – výška polotovaru

D_0 [mm] – průměr polotovaru

- vnější i vnitřní plochy by měly být rovnoběžné se směrem pracovní dráhy nástroje
- náhlé přechody z velkých průřezů do menších se eliminují pozvolnými přechody, místo ostrých hran a rohů se použije zaoblení a úkosy
- dlouhé, kuželové plochy se nahrazují válcovými
- místní zúžení průřezu je zakázáno
- součást by měla být symetrická



Obr. 131: Příklad vhodných a nevhodných tvarů součástí [25]

Vyrobené díly lze rozdělit podle tvaru do několik skupin:

- a) součásti typu kalíšek (obr. 14): vyrobitelné dopředným a zpětným protlačováním



Obr. 14: Součásti typu kalíšek [6]

- b) součásti typu čep (obr. 15): vyrábí se většinou pýchováním. Méně často stranovým a dopředným protlačováním



Obr. 15: Součásti typu čep [6]

- c) rotační symetrické součásti s otvorem (obr. 16): lze vyhotovit dopředným protlačováním prstenců



Obr. 16: Rotační symetrické součásti s otvorem [6]

- d) nesymetrické součásti (obr. 17): kvůli náročnosti se příliš nepoužívají



Obr. 17: Nesymetrické součásti [6]

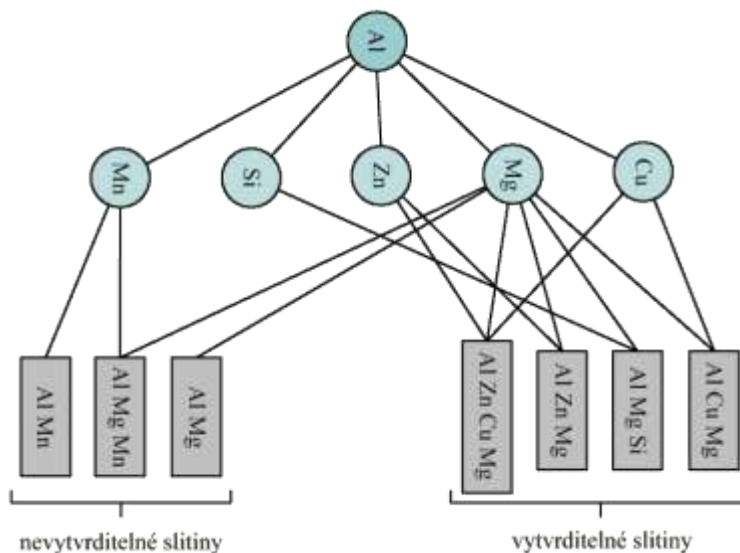
2.3.2 Materiály vhodné k objemovému tváření [10], [16], [21], [23], [24], [27], [28], [29]

Volba materiálu je jedním ze zásadních bodů při návrhu výroby součásti a velice ovlivňuje průběh tváření. Aby byl materiál použitelný, je potřeba aby vyhovoval několika podmínkám:

- mechanické vlastnosti:** materiál musí být schopný plastické deformace při nízké mezi kluzu, malém sklonu ke zpevnění a dobré tvařitelnosti. Obecně nejpoužívanější jsou polotovary, které mají co nejplošší křivku zpevnění, vysokou tažnost (nad 10%) a kontrakci “Z” (nad 55%). Pokud kontrakce “Z” klesne pod 50%, hrozí že dojde ke vzniku trhlin a je potřeba znovu obnovit plasticitu. Nevhodné materiály jsou ty, které k přetvoření vyžadují zvláště vysoký tlak (až 2500 MPa) a po první operaci nepřekonají deformaci větší než 25%.
- vnitřní struktura:** pro tváření je vhodná jemnozrnná homogenní struktura bez většího množství vad a vměstků, bublin, trhlin a porézností. Nejvhodnější je struktura feritická, nebo feriticko-perlitická s globulárním (kuličkovým) perlitem, které lze dosáhnout vhodným tepelným zpracováním, např. normalizačním žiháním, nebo žiháním na měkko.
- chemické složení:** materiály vhodné k tváření lze rozdělit na kovové a nekovové. Do kovových patří převážně nízkouhlíkové (max 15%C), nízkolegované a středně legované oceli. Další kovy, které jsou vhodné k protlačování jsou neželezné slitiny hliníku, nebo mědi.
 - **Oceli:** jsou nejpoužívanější materiál ke tváření, vhodný k velkosériové výrobě. Zpravidla jsou tvářené na více operací, protože mají vyšší pevnost než jiné, neželezné kovy. Jednou z hlavních podmínek je obsah uhlíku nižší než 0,2% objemu, protože má negativní vliv na velikost deformačního odporu a snižuje životnost nástrojů. Kromě obsahu uhlíku zhoršuje tvařitelnost i přítomnost prvků jako je síra, fosfor, dusík a kyslík. Naopak příznivými prvky pro tvárnost jsou Ni, V, Al.
 - **Hliník a jeho slitiny:** jde o nejpoužívanější materiály k protlačování složitějších součástí (příklad na obrázku 18). Ve většině případů jdou díky výborné tvárnosti vyrobit na jednu operaci, během které se jejich přetvárný odpor navýší až o 120%. Jsou poměrně málo legované – obsah legujících prvků většinou dosahuje maximálně 10%. Přesto lze však přesným chemickým složením podstatně změnit jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. Podle množství legujících prvků se hliníkové slitiny ke tváření dělí na vytvrditelné a nevytvrditelné (obr. 19).



Obr. 18: Protlačovaná součást z hliníkové slitiny [27]



Obr. 19: Rozdělení tvářených hliníkových slitin [29]

Vliv některých legujících prvků je zobrazen v tabulce 3.

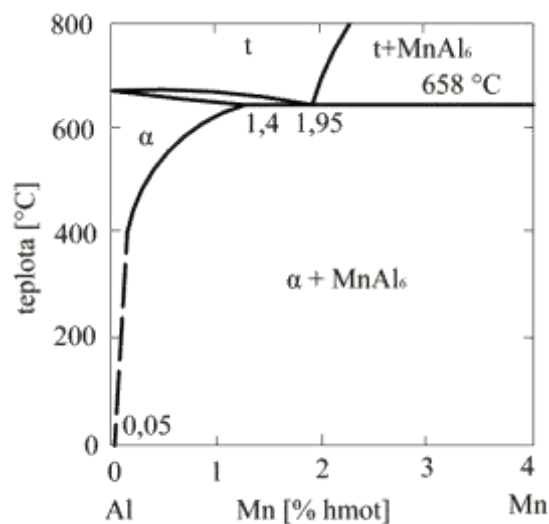
Tab. 3: Vliv legujících prvků a příměsí na vlastnosti hliníku [28]

Cu	Zvyšuje tvrdost a pevnost (vytvrzováním), ale snižuje tvárnost, plasticitu a korozní odolnost. V technických slitinách je nejčastěji legurou spolu s hořčíkem.
Si	Hlavní legující prvek u slévárenských slitin Al-Si (siluminů), zvyšuje pevnost a v kombinaci s hořčíkem umožňuje vytvrzování.
Mg	Redukuje teplotu tavení na 451°C, zvyšuje pevnost a odolnost proti korozi, spolu s mědí způsobuje, že je materiál schopen precipitačního vytvrzení.
Zn	Výrazně zvyšuje pevnost a mírně snižuje korozivzdornost.
Mn	Přidává se za účelem zvýšení pevnostních vlastností, zvýšení rekrystalizační teploty, zjemnění zrna. V případě jeho vyloučení ve formě disperzních precipitátů se projevuje blokováním růstu zrn. Zvyšuje citlivost ke kalení a potlačuje vyloučení Fe v destičkovém tvaru a vytvoření intermetalické fáze (Fe, Mn)Al ₆ .
Ni	Zvyšuje pevnost za vysokých teplot
Co	U některých slitin hliníku zvyšuje pevnostní i plastické vlastnosti.
Cr	Snižuje náchylnost k růstu zrn u slitin Al-Mg, ztěžuje proces rekrystalizace u slitin Al-Mg-Si a Al-Mg-Zn, u vytvrzitelných slitin zvyšuje kalitelnost
Fe	Je běžnou nečistotou ve slitinách Al
Ti	Snižuje velikost zrn
Zr	U některých slitin je legován v množství 0,1-0,3%. U lité slitiny Al-Mg-Zn slouží ke zjemnění struktury. Používá se u slitin, vykazujících superplasticitu s cílem zachování jemné struktury.

Podle pevnosti se pak dále rozlišují na:

- Nízkopevnostní slitiny s dobrou korozní odolností: Patří zde např. slitiny Al-Mg, nebo Al-Mn. Mají vysokou korozní odolnost, protože neobsahují měď. Vykazují výbornou lomovou houževnatost, svařitelnost, tvárnost a odolnost proti vibračnímu zatížení. Nedají se ovšem tepelným zpracováním vytvrdit. Na obrázku 20 je znázorněný binární diagram slitiny Al-Mn.
- Vysokopevnostní slitiny a slitiny s nízkou korozní odolností: Mezi tyto materiály patří např. slitiny Al-Cu-Mg, nebo duraly AlCu4Mg, AlCu4Mg1, nebo AlCu4Mg1Mn. Obsahují měď, která je ve slitinách hliníku dobře rozpustná a kvůli zpevňujícím účinkům je jedním z nejdůležitějších prvků těchto slitin. Po vytvrzení dosahují pevnosti až 530 MPa. Nepříznivou vlastností je, že snižuje odolnost proti korozi – musí se proto ošetřovat tenkou ochrannou vrstvou hliníku. Běžné provozní teploty duralu se pohybují okolo 150 °C. S přidáním hořčíku, nebo niklu se provozní teplota může zvýšit až na 200 až 300°C.

• **Měď a její slitiny**: Při tváření se využívají hlavně ve formě mědi a mosazi. Mají dobrou elektrickou vodivost a vysokou tepelnou a korozní odolnost.



Obr. 20: Binární diagram slitiny Al-Mn [16]

2.3.3 Příprava materiálu [4], [17], [23], [30], [31]

Než dojde k samotnému tvářecímu procesu, podléhá materiál ještě několika přípravným operacím, které zlepší jeho mechanické vlastnosti, zvýší tvařitelnost a upraví povrch polotovaru tak, aby byl lépe zpracovatelný.

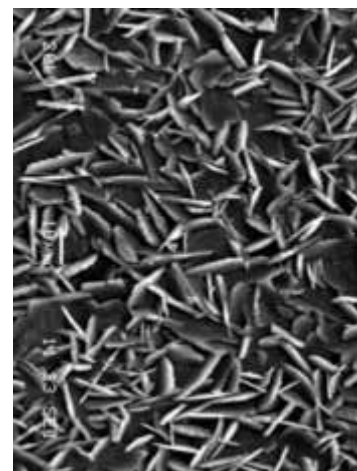
- **Dělení polotovaru:** hutní polotovar normalizovaných tvarů je dělený na kotoučových pilách, dělicích nůžkách, nebo speciálních strojích s loupací hlavou a noži. Při odstřížení špalíku pomocí nůžek dojde k nežádoucímu malému deformačnímu zpevnění jeho povrchu. Střížná hrana je nerovná a rozměr špalíku je nepřesný. Zvýšení přesnosti se dá dosáhnout dělením na kotoučové pile. Povrch špalíku sice není zpevněný, ale za cenu velkého množství odpadu a nízké produktivity.

- **Očištění povrchu:** povrch polotovaru je mnohdy znečištěný a obsahuje velké množství vad, které se musí odstranit buďto mechanicky (otryskáváním v bubnech pomocí broků nebo křemičitého písku, omíláním, loupáním nebo kartáčováním), či chemicky (mořením).

- **Povrchová úprava:** třecí procesy mezi nástrojem a polotovarem zvyšují množství nutné energie, vynaložené k přetvoření materiálu až o 11%, a jako pasivní činitelé brzdí plastickou deformaci a způsobují opotřebení nástrojů. Ve snaze co nejvíce snížit účinky tření se materiály příslušně ošetřují mazivy, které vytváří tenkou vrstvu filmu mezi polotovarem a nástrojem a zabraňují tak jejich přímému styku. Před protlačováním se součásti často ošetřují tzv. fosfátováním. Jedná se o pórovitou amorfní vrstvu na bázi vodního roztoku kyseliny fosforečné s obsahem fosforečanů manganu, zinku a železa. Tato vrstva má díky své poréznosti až 13 krát vyšší nasákavost maziva než holý povrch.

Postup přípravy fosfátové vrstvy:

1. odmaštění, nebo moření v alkalických lázních (např. Alkon S)
2. oplach ve studené vodě
3. oplach v horké vodě o teplotě okolo 70-80°C
4. aktivační oplach (např. Synfát 1007 při teplotě 15-25°C na 15 min)
5. fosfátování ponořením do fosfatizační lázně při teplotě 90°C na 4-12 minut (obr. 21)
6. oplach ve studené vodě
7. neutralizační (pasivační) oplach (např. dichroman draselný) při teplotě 50-90°C, který zabrání dalšímu průběhu reakce
8. sušení při teplotě 100-150°C
9. mazání



Obr. 212: Snímek struktury fosfátových povlaků [31]

- **Mazání:** je nanášení tenké, teplotně a tlaku odolné vrstvy, snižující třecí účinky mezi polotovarem a nástrojem a zároveň nástroj ochlazuje. Maziva se rozdělují na:

- a) **Oleje:** minerální, nebo syntetické. Mnohdy obsahují přísady ve formě kovových mýdel a aditiv na bázi P, Cl, nebo MoS₂, které zlepšují jejich vlastnosti.
- b) **Maziva na bázi mýdel:** nejčastější je stearát sodný, odolný proti vysokým tlakům.
- c) **Pevná maziva:** např. syrník molybdeničitý MoS₂ (používaný do teplot 400°C), nebo grafit v dispersi s vodou a olejem (odolný do teplot 800°C), nebo plastické hmoty jako polyethylen a teflon.
- d) **Vodní emulze:** své využití mají při malých deformacích, malých nárocích na mazání a velkých nárocích na chlazení během rychlých tvářecích procesů

Neželezné kovy ke snížení tření zpravidla využívají mezeru mezi průtlačníkem a průtlačnicí, zvanou „košilka“. Do této mezery materiál zateče a chová se jako mazivo.

2.4 Tvářecí nástroje [6], [21], [24], [32]

V praxi se ve tváření používají pro hromadnou výrobu jednoúčelové nástroje, určené speciálně pro jeden druh součásti. Jejich výroba je kvůli vysokým nárokům na přesnost a pevnost velice drahá. Proto je v rámci hospodárnosti brán velký ohled na jejich životnost. Aby se zvýšila jejich životnost, je potřeba při jejich návrhu a používání dodržovat určité konstrukční, technologické a výrobní zásady. Životnost nástroje lze ovlivnit například jeho konstrukcí, správnou volbou materiálu, volbou zpracovávaného materiálu, užitím mazadel a kontrolou tepelného namáhání nástroje. Z konstrukčního hlediska existuje několik zásad, jejichž dodržení zvyšuje životnost nástroje.

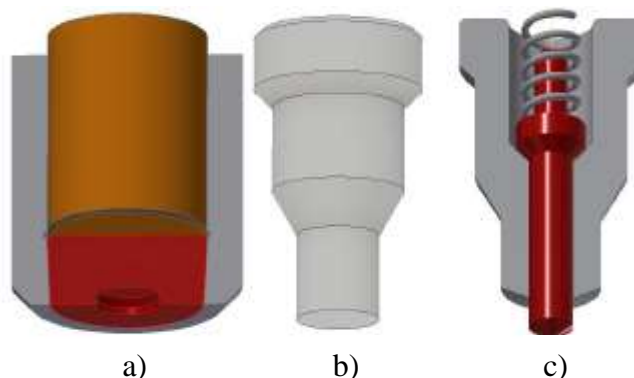
- Vysoká tuhost nástroje a rozměrová stálost, která ovlivňuje přesnost výrobků
- Soustřednost aktivních částí nástroje. Průtlačníky je třeba vést vodičnými pouzdry
- Jednoduché složení a výměna funkčních částí nástroje
- Spolehlivé vyhazování protlačku z průtlačnice a jeho stírání z průtlačníku
- Odvzdušnění částí nástroje, ve kterých hrozí ulpívání vzduchu
- Dostatečné mazání, chlazení a ošetření funkčních částí nástrojů
- Dodržení maximálního stupně deformace

2.4.1 Nástroje pro pýchování [6], [15], [21], [24], [25], [26], [32], [33]

Konstrukční návrh nástrojů je určen podle technologického postupu výroby, ale liší se také podle použití příslušného stroje (lis, pýchovací automat, jednooperační nebo víceoperační stroj). Nástroj se skládá z pýchovníku a pýchovnice a slouží k předpýchování součástí před dalšími operacemi, k zarovnání čel, nebo ke konečnému spýchování na požadovaný tvar.

Tvary částí pýchovníku a jeho konstrukční řešení jsou různá. Podle toho, jestli pýchovník zajede až do dutiny pýchovnice, nebo se zastaví už nad ní, se rozděluje proces pýchování na volné a uzavřené podle obrázku 6.

Funkční části pýchovníku mohou mít také různé tvary. Nástroj s plochým čelem (obr. 22b) se používá pro zarovnání čel. Nástroj s kuželovitým zakončením (obr. 22c) je vhodný k vystředění polotovaru. Pro středící kužely má pýchovník v sobě speciální zahĺoubení, do kterého se kužel umístí. Na čele může být vytvořena také funkční dutina (obr. 22a), která má tvar hlavy hotové součásti.

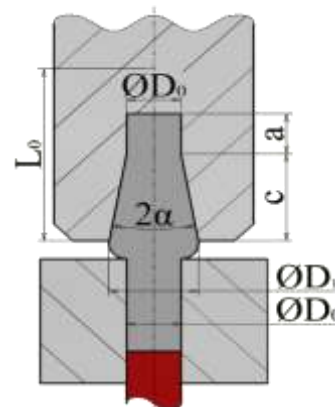


Obr. 22: Tvary funkčních částí pýchovníku [15]

Pro pýchování hlav existují určité směrnice, určující doporučenou geometrii dutiny pýchovníku. Jejich příklady jsou uvedeny v tabulce 4, vztahující se k obrázku 23. L_0 je vzpěrná výška a D_0 je průměr polotovaru.

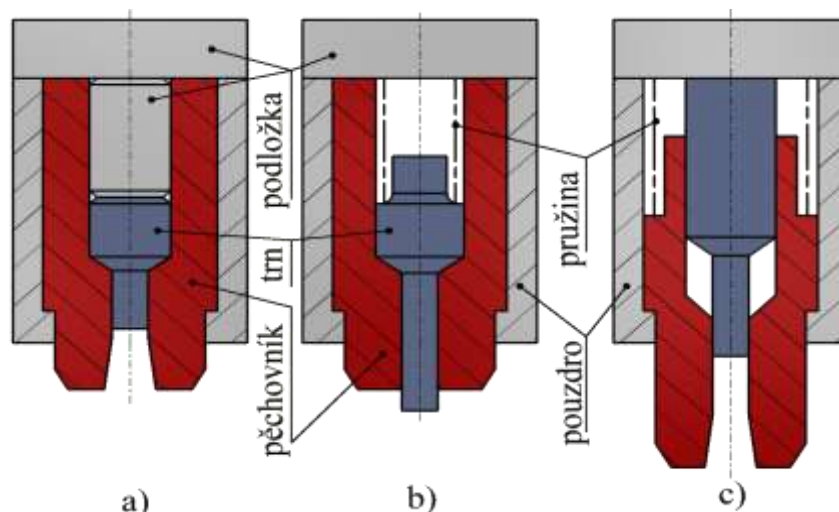
Tab. 4: Doporučená geometrie dutiny pýchovníku [26]

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



Obr. 23: Geometrie dutiny pýchovníku [25]

Pěchovníky se vyrábějí z více částí a mají několik konstrukčních provedení. Základní pevný (vločkovaný) pěchovník (obr. 24a) má podložku z nástrojové oceli nebo ze slinutých karbidů, zapouzdřenou s přesahem do objímky. Pro lepší zavedení polotovaru do pěchovnice se vyrábí odpružené nástroje. Existují možnosti s odpružením trnu (obr. 24b) pro výrobu krátkých součástí, nebo s odpružením pěchovníku (obr. 24c) pro výrobu součástí s dlouhým dřikem. Při pěchování dlouhých součástí se polotovar zasune do funkční dutiny, čímž dojde ke snížení volné pěchovací délky na $L_0/D_0 < 2,3$ a při dalším tváření je tlačěn trnem do předpěchovací dutiny.



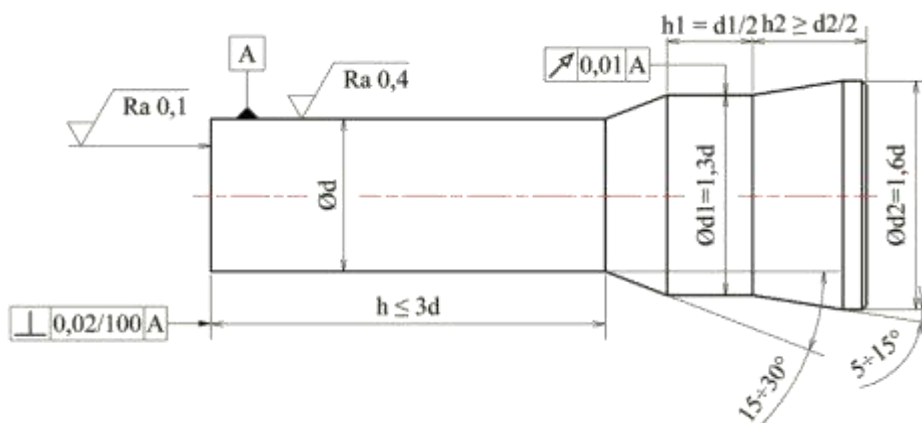
Obr. 24: Konstrukce pěchovacích nástrojů [15]

2.4.2 Nástroje pro dopředné protlačování [6], [15], [21], [22], [24], [25], [26], [32], [33]

Nejnámáhanější části jsou průtlačníky a průtlačnice, případně ještě vyhazovače. Na tyto části jsou kladeny velké požadavky, a proto se navrhují s co nejmenšími rozměry a s co nejvíce plynulými přechody.

- **Průtlačník pro protlačování plných součástí:**

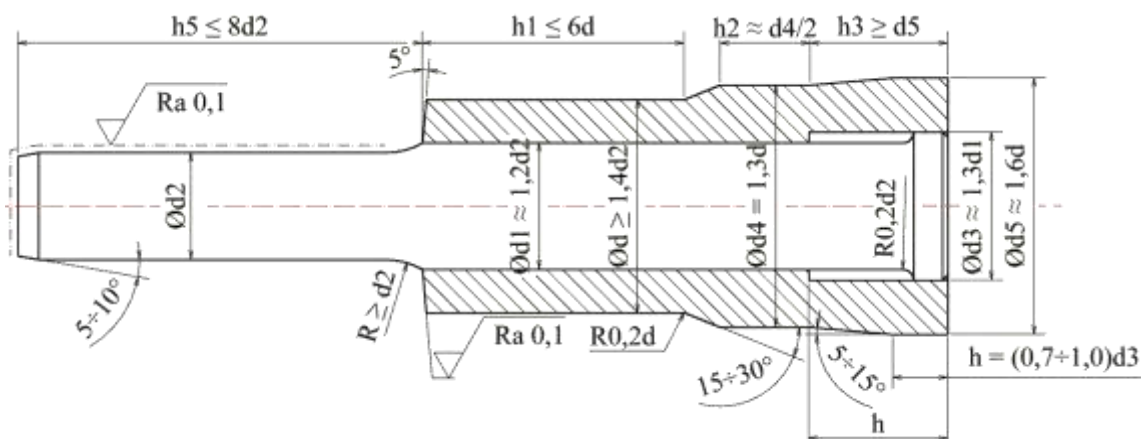
Je vyráběn jako celistvý a tvoří jej dvě části – dřík a upínací část. Upínací část má válcový nebo kuželový tvar. V místě přechodu ze dříku na upínací část dochází k největším ohybovým napětím, které se snižují konstrukcí co nejkratších dříků a pozvolnými přechody mezi dříkem a upínací částí. Aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti vyráběných součástí, je důležité vyrábět průtlačníky s ohledem na vysoké tolerance kolmosti, rovnoběžnosti, házivosti a kvalitou povrchu funkčních ploch. Základní tvar průtlačníku je dán normou ČSN 22 7005 a je znázorněn na obrázku 25.



Obr. 25: Tvar průtlačníku pro tváření plných součástí [26]

- **Průtlačník pro protlačování dutých součástí:**

Více se při výrobě používá dělený průtlačník s tzv. pouzdrem s uložením H7/h6, jehož doporučené rozměry jsou znázorněny na obrázku 26. Kdyby byl z jednoho kusu, tak by hrozilo jeho porušení ve funkční části v místě přechodu ze dříku na pouzdro. Nástroj má kuželovou upínací část z důvodu jednoduché vyměnitelnosti a zmenšení tlaku na nástroj. Z pevnostních důvodů nesmí být největší průřez pouzdra menší než průřez pracovní části. Čelo dříku je zkoseno a zakončeno plochou, aby nedošlo k odštípnutí jeho hrany.



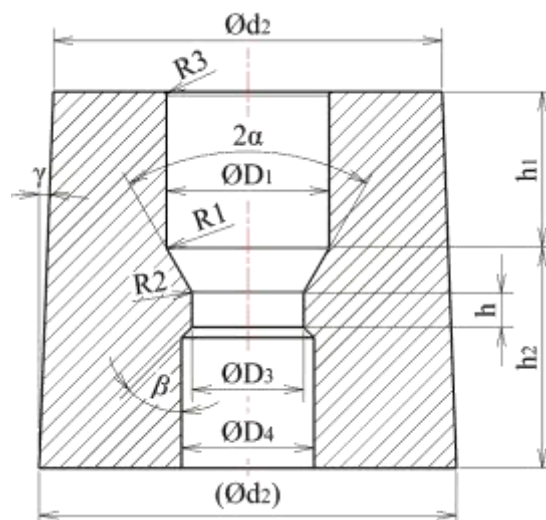
Obr. 26: Tvar průtlačníku pro tváření dutých součástí [26]

- **Průtlačnice pro dopředné protlačování:**

Dělí se na vstupní část (kontejner), redukční kuželovou část, kalibrační očko a výstupní část. Polotovar se vkládá do kontejneru, kde je protlačován skrze redukční očko do konečného průměru. Pro jednodušší zavedení polotovaru do průtlačnice se zavádí na hraně vstupní části náběhový kužel, nebo rádius. Výška kontejneru je konstruována tak, aby byl horní okraj průtlačnice o 10 mm výš než horní okraj polotovaru. Dutina kontejneru přechází přes kuželovou část do kalibračního očka pod úhlem 30 až 90°. Průměr kalibračního očka je dán průměrem konečné součásti a jeho výška je závislá na teplotě tvářecího procesu. Průměr výstupní části je pak pozvolným způsobem odlehčen větším průměrem, aby se usnadnilo vysouvání protlačené součásti a snížilo se riziko jejího ulpění v dutině průtlačnice. Osvědčený tvar s doporučenými rozměry dle tabulky 5 je znázorněn na obrázku 27.

Tab. 5: Optimální rozměry průtlačnice [26]

Teplota tváření	20°C	200~400°C
D ₄	D ₃ +(0,1~0,2)	D ₃ +(0,2~0,4)
h	0,5 · √D ₃	2~3
2α	30~90°	60~120°
R ₁	(D ₁ -D ₃)/2	
R ₂	(0,05~0,1)·D ₃	1~2
R ₃	asi 0,15·D ₁	
h ₂	min 0,7·D ₁	
γ	1~2°	
β	5~10°	

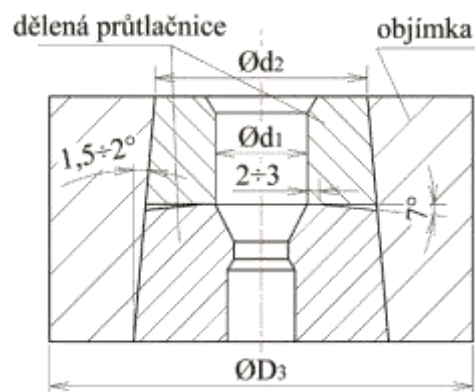


Obr. 27: Doporučený tvar průtlačnice pro dopředné protlačování [26]

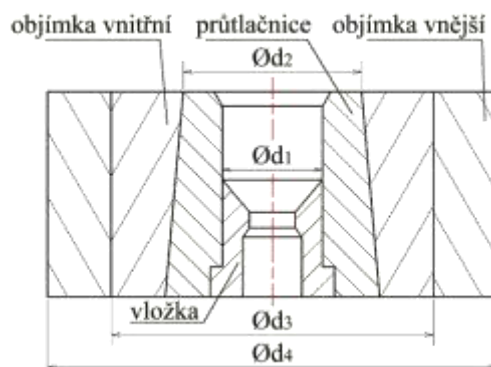
Nejdůležitější částí průtlačnice je redukční část, jejíž geometrie ovlivňuje tok materiálu a velikost deformačního odporu v materiálu během tváření. V místě přechodu do kalibračního očka je při tváření nejvíce radiálně namáhána a v tomto místě nejvíce hrozí porušení tvárené součásti. Pro snížení vrubového účinku lze průtlačnici v místě přechodu příčně rozdělit, jak je znázorněno na obrázku 28. V takovém případě je ale potřeba zajistit těsný styk obou částí nástroje, aby nedocházelo k zatečení materiálu do dělicí roviny.

Existují ovšem také průtlačnice se zalisovanou vložkou (obr. 29), která lze v případě opotřebení jednoduše vyměnit. Průtlačnice bývají obvykle zapouzdřeny v objímce, která zvyšuje jejich únosnost a umožňuje snadnou vyměnitelnost. Obecně platí, že průtlačnice použitelné do radiálních tlaku 1000 MPa nepotřebují být zapouzdřeny. Nástroje s jednou objímkou se používají do radiálního tlaku 1600 MPa. Při vyšších tlacích je vhodné použít i dvě objímky. Průměry jednotlivých segmentů nástroje jsou vůči sobě velikostně v poměrech dle vztahu 2.4.

$$\frac{d_2}{d_1} \doteq \frac{d_3}{d_2} \doteq \frac{d_4}{d_3} \approx 1,8 \div 2,2 \quad (2.4)$$



Obr. 28: Dělená průtlačnice pro dopředné protlačování [15]



Obr. 29: Dělená průtlačnice s vložkou pro dopředné protlačování [22]

2.4.3 Nástroje pro zpětné protlačování [6], [15], [21], [24], [25], [26], [32], [33]

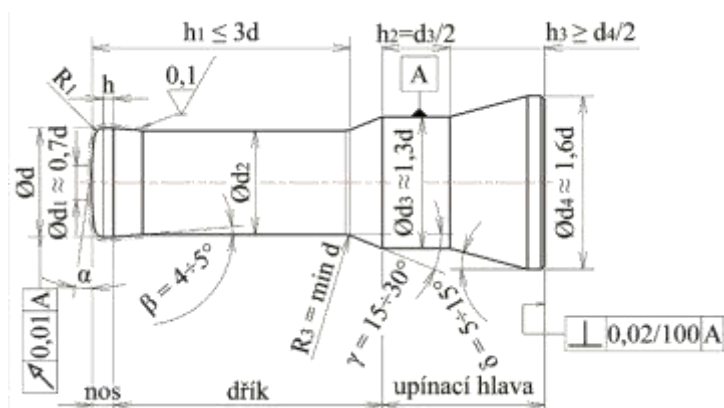
Jsou rozděleny na průtlačník a průtlačnici.

- **Průtlačník pro zpětné protlačování:**

Oproti nástroji pro dopředné protlačování je konstrukčně odlišný. Je celistvý a tvořený ze tří částí – hlava, dřík a čelo (nos). Základní tvar průtlačníku podle normy ČSN 72 005 je znázorněn na obrázku 30 a jeho geometrie v tabulce 6.

Tab. 6: Doporučená geometrie zpětného průtlačníku [26]

Teplota tváření	20°C
Ød	d-(0,1~0,2)
h	0,5 · √D
α	5~8°
R ₁	(0,05~0,1) · d
R ₃	d-(2·R ₁ +0,2)≈0,7·d

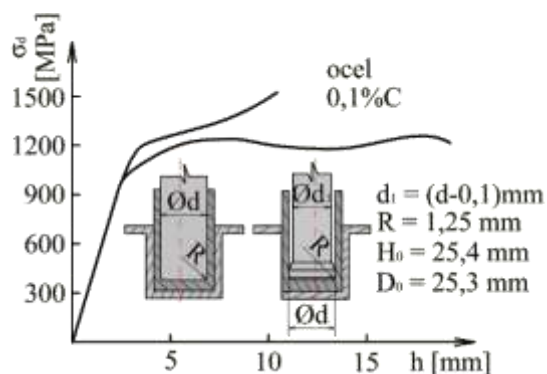


Obr. 30: Průtlačník pro zpětné protlačování [26]

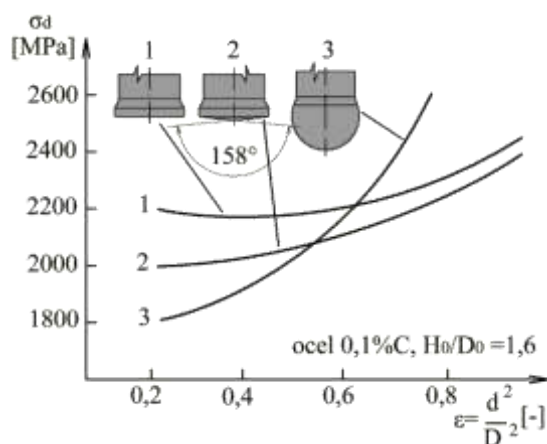
Čelo je opatřeno fazetkou o výšce h , která snižuje tření mezi povrchem průtlačníku a stěnou průtlačnice. Za ní je na čele nástroj odlehčen kuželovým přechodem do menšího průměru, který rovněž snižuje tření mezi nástroji. Vliv odlehčení dřívku na snížení deformačního odporu je vidět na Obr. . Tato aktivní část je namáhána na ohyb a je potřeba ji volit co nejmenší. Funkční část h_1 se proto doporučuje volit v poměru ku průměru čela průtlačníku maximálně 3:1. Na funkční část nástroje jsou kladeny vysoké nároky na drsnost (okolo $Ra\ 0,1$), protože s nižší drsností povrchu se zvyšuje životnost nástroje. Důležitý je také tvar čela průtlačníku, který zásadně ovlivňuje deformační odpor (obr. 31). Nejvíce se používá kuželovitý tvar, který nejlépe roztírá mazivo po povrchu součásti.

- **Průtlačnice pro zpětné protlačování:**

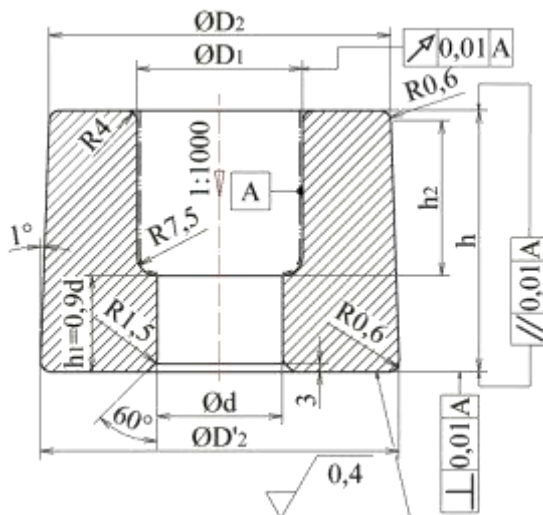
Stejně jako u dopředného protlačování má průtlačnice zaoblenou nebo zkosenou hranu náběhu do vstupní části. Vstupní část je nyní ale zakončena zaoblením, které snižuje působení kontrakce radiálního napětí a celá dutina je vyrobena s mírnou kuželovitostí 1:1000, čímž se zabraňuje velkým osovým tahům při vyhazování výrobku. Tvar dutiny průtlačnice by měl být přibližně stejný jako tvar průtlačníku a povrchy její funkční části jsou broušeny a lapovány. Průtlačnice jsou buďto celistvé, nebo dělené. Dělené se používají pro výrobu barevných kovů. Na obrázku 33 je znázorněna doporučená geometrie pro návrh průtlačnice.



Obr. 31: Vliv odlehčení dřívku na deformační odpor [25]



Obr. 32: Vliv tvaru čela nástroje na deformační odpor [25]



Obr. 33: Průtlačnice pro zpětné protlačování [26]

2.4.4 Materiály nástrojů [6], [13], [15], [17], [24], [32], [34]

Materiály nástrojů jsou vysoce namáhány na tah, tlak, i ohyb a při jejich cyklickém dynamickém namáhání hrozí riziko porušení únavovým lomem. Správnou volbou materiálu a stanovením vhodného výrobního postupu má veliký vliv na jejich životnost. Druh nástrojového materiálu se volí podle metody tváření, druhu, velikosti a složitosti tvářeného materiálu, velikosti výrobní série a druhu nástroje. Materiál musí vyhovovat nárokům na odolnost proti tlakovému a rázovému zatížení, houževnatost, tvrdost, odolnost proti opotřebení, nízkou teplotní roztažnost a dobrou obrobiteľnost.

Materiály musí být prokované a dezoxidované, s nízkým obsahem fosforu a síry. Jejich základní strukturu tvoří martenzit s legujícími prvky (Si, Cr, W, V, Mn), které vytvářejí spolu s uhlíkem jemné karbidy, které jsou díky vhodnému tepelnému zpracování dobře rozmístěny.

Materiál projde normalizačním žháním, aby došlo ke zjemnění struktury a vyrovnání nehomogenity. Pro zlepšení obrobiteľnosti se některé materiály ještě žhají na měkko, aby došlo ke změně lamelárního perlitu na globulární a zlepšila se obrobiteľnost. Následně se materiál obrobí a vyžihá na snížení vnitřního pnutí. Teprve poté se materiál rychle zakalí na martenzitickou strukturu. Teplota kalení závisí na chemickém složení oceli. Po kalení je nástroj velmi tvrdý, s velkým vnitřním pnutím a musí se popustit, aby se zvýšila jeho houževnatost a snížilo pnutí. Dlouhodobým popouštěním dojde ke změně nestabilního tetragonálního martenzitu na stabilní, kubický. Přehled materiálů vhodných pro protlačování je uveden v tabulce 7.

Tab. 7: Materiály vhodné pro protlačovací nástroje [34]

Součást protlačovadla		Materiál	
Průtlačník		19 314, 19 315, 19 436, 19 550, 19 569, 19 572, 19 820, 19 830	
Průtlačnice		19 436, 19 550, 19 569, 19 572, 19 655, 19 735, 19 820, 19 830	
Objímka	Jednoduchá	19 550, 19 740 tepelné zpracování na tvrdost 45~48 HRC	
	Dvojitá	Vnitřní	19 550 tepelné zpracování na tvrdost 52~55 HRC 19 655 tepelné zpracování na tvrdost 55 HRC
		Vnější	15 261 tepelné zpracování na tvrdost 45~48 HRC; volí se 19 246 tepelné zpracování na tvrdost 40~45 HRC
Vyhazovač		19 314, 19 569, 19 820, 19 830	
Kolík vyhazovače		19 314, 19 426, 19 550	
Opěrná deska, vodící vložka		19 314, 19 356, 19 550, u většího tlakového namáhání 19 436	
Těleso protlačovadla		11 600, 11 700, 12 060, 13 180, 14 260 Tepelné zpracování na tvrdost 40~45 HRC	

Pro méně namáhané nástroje jsou dostačující nástrojové oceli, zušlechťené na horní mez pevnosti. Jsou levné a velice houževnaté, ale málo tvrdé a málo pevné a rychle se opotřebují. Vysoce namáhané nástroje vyžadují materiál ze slinutého karbidu wolframu a kobaltu, který má nižší pevnost v tahu a ohybu, ale větší pevnost v tlaku, tvrdost povrchu a odolnost proti opotřebení. Tabulka 8 uvádí základní přehled používaných karbidů.

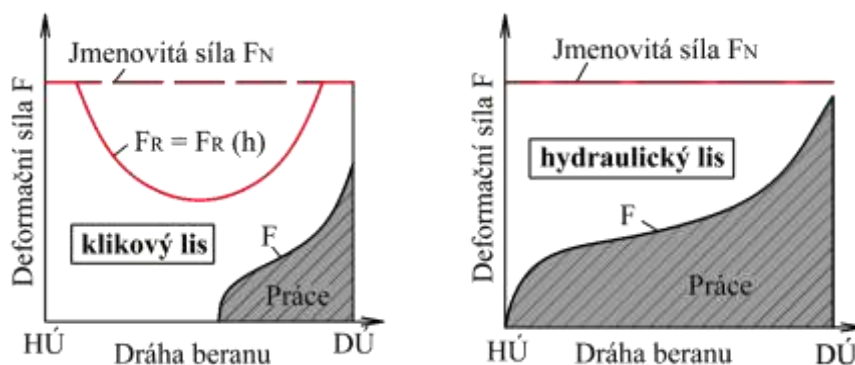
Tab. 8: Přehled slinutých karbidů používaných při tváření [6]

Označení	W [%]	Co [%]	Tvrdost [HRB]	Pevnost v ohybu [MPa]
G1	94	6	88	1200
G1.1	92	8	87.5	1300
G2	89	11	86.5	1400
G3	85	15	85	1600
G4	80	20	84	1800
G5	75	25	82.5	1950
G6	70	30	80	2150

2.5 Tvářecí stroje [6], [13], [21], [25], [32]

K vyhotovení součásti pomocí nástrojů je potřeba příslušné síly, kterou vyvolávají tvářecí stroje. Vhodný stroj pro výrobu součásti se volí převážně s ohledem na velikost série, rozměry součásti a velikost vypočítané potřebné tvářecí síly a přetvárné práce. Jmenovitá síla stroje by měla být větší asi o 30 až 50% než potřebná tvářecí síla z důvodu nepřetěžování stroje. Zatížení stroje se zjišťuje pomocí přetvárné práce. Při výběru správného stroje je nápomocný tzv. pracovní diagram stroje, znázorněný na obrázku 34. Existuje několik výrobních zařízení, která lze rozdělit do několika skupin.

- **Mechanické lisy:** vhodné nejvíce pro kusovou a malosériovou výrobu velkých součástí a výrobu výlisků, vyžadujících mezioperační žíhání. Jsou upřednostňovány kvůli jednodušší údržbě a vyšší produktivitě oproti hydraulickým lisům. Vyrábí ale pouze maximálně na dvě operace.
 - a) **Klikový lis:** pohyb elektromotoru je pomocí ozubených kol, ojnice a klikové hřídele převáděn na beran. Jsou vybaveny pneumatickou spojkou a brzdou.
Výhody: velký zdvih
Nevýhody: velká rázová špička, tzn. velká rychlost beranu při kontaktu nástroje s výrobkem – snižuje se např. hydraulickou poduškou v beranu, nebo ve stole
 - b) **Kolenový lis:** pohyb elektromotoru je převáděn přes spojku na setrvačnick. Setrvačnick roztáčí klikový hřídel, napojený na kolenové ústrojí, které rozpohybuje beran. Jsou vhodné pouze pro výrobu nižších součástí.
Výhody: stálejší rychlosti pohybu oproti klikovým lisům, redukuje dynamická zatížení
Nevýhody: malý zdvih (výroba pouze nižších součástí), menší přetvárná práce
 - c) **Výstředníkový lis:** k rozpohybování beranu používá výstředník poháněný přes spojku. Nejsou příliš vhodné pro objemové tvářen, protože mají malou tuhost. Používají se spíše pro přípravné operace.
- **Hydraulické lisy:** jsou vhodné pro kusovou výrobu rozměrných, a hlavně dlouhých součástí, pro jejichž zhotovení je potřeba velkých tvářecích sil. Pohyb beranu se zajišťen pístem, který je poháněný tlakem kapaliny z akumulátoru nebo z čerpadla. Poháněcí kapalinou je nejčastěji voda nebo hydraulický olej.
Výhody: velký zdvih, velká a konstantní jmenovitá síla stroje (až 10^3 MN), konstantní tlak
Nevýhody: nižší pracovní rychlost ($\max 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), nižší účinnost, složitá konstrukce, cena, nemají klikové ústrojí – je potřeba nastavit seřiditelný doraz pro omezení zdvihu
- **Speciální tvářecí automaty:** jsou vhodné pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Patří zde např. pýchovací automaty, protlačovací automaty a postupové lisy. Tyto stroje zhotovují součást postupně v několika operacích na základě zpevnění materiálu v předchozí operaci a jsou vybaveny automatickým podáváním. Jejich výhodou je zrychlení a zautomatizování výroby a možnost využití rovnoměrného zpevnění materiálu v několika operacích.



Obr. 34: Pracovní diagram beranu mechanického a hydraulického lisu [25]

2.6 Technologické výpočty [5], [13], [14], [15], [25], [35], [37], [38]

Pro správné dimenzování nástrojů a výběr strojů je potřeba provést technologické výpočty, mezi které patří například velikosti deformací, přetvárných a deformačních odporů, přetvárných prací a sil. K získání těchto veličin je vhodná inženýrská metoda, zvaná také analytická metoda rovinných řezů, která k dosažení výsledků využívá přibližných diferenciálních rovnic. K zjednodušení výpočtů však zavádí několik předpokladů:

- tvářený materiál je izotropní, spojité kontinuum
- směry hlavních napětí ve všech bodech tělesa jsou totožné se směry souřadných os
- prostorové stavy napjatosti a přetvoření jsou převedeny na rovinné a osově symetrické úlohy
- infinitezimálně tenké rovinné řezy zachovávají svůj tvar i po přetvoření
- vliv tření je omezen pouze na stykové funkční plochy mezi nástrojem a materiálem
- rychlost deformace a stupeň deformace se na základě smluvních podmínek stanovují pouze pro vyjmutý element tělesa

Veškeré veličiny použité v této kapitole jsou popsány v seznamu symbolů a zkratk.

- Logaritmická deformace φ :** slouží jako ukazatel velikosti přetvoření materiálu a využívá se při určování vyrobitelnosti součástí. Celkový součet všech logaritmických deformací v daném úseku součásti nesmí překročit interval deformace, určený pro každý materiál z pěchovací zkoušky.

$$\varphi_c = \sum_{i=1}^k \varphi_i \quad [-] \quad (2.5)$$

Logaritmická deformace se určuje s ohledem na použitou technologii výroby (viz Obr.).

a) pěchování: (obr. 35a)

$$\varphi_{\text{pěch}} = \ln \frac{S_{\text{kon}}}{S_{\text{poč}}} = \ln \frac{D_{\text{kon}}^2}{D_{\text{poč}}^2} \quad [-] \quad (2.6)$$

b) dopředné protlačování: (obr. 35b)

$$\varphi_{\text{Dprotl}} = \ln \frac{S_{\text{kon}}}{S_{\text{poč}}} = \ln \frac{D_{\text{kon}}^2}{D_{\text{poč}}^2} \quad [-] \quad (2.7)$$

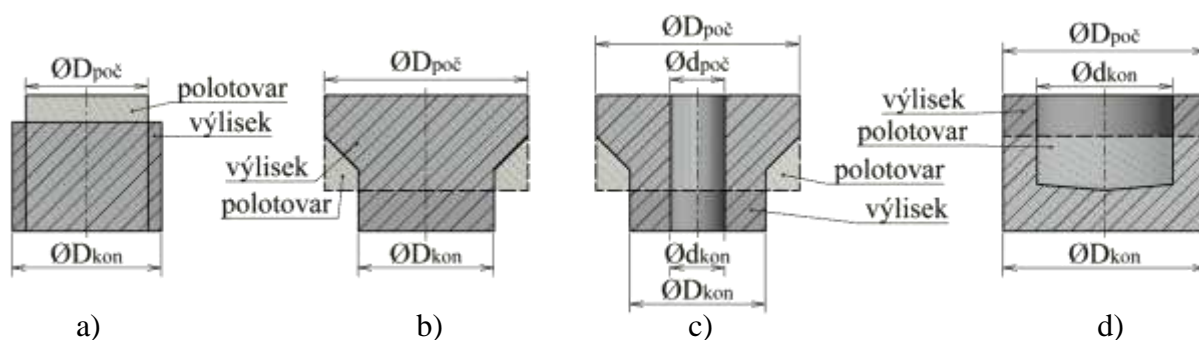
c) dopředné protlačování dutých součástí: (obr. 35c)

$$\varphi_{\text{Dprotl}} = \ln \frac{S_{\text{kon}}}{S_{\text{poč}}} = \ln \frac{D_{\text{kon}}^2 - d_{\text{kon}}^2}{D_{\text{poč}}^2 - d_{\text{poč}}^2} \quad [-] \quad (2.8)$$

d) zpětné protlačování: (obr. 35d)

$$\varphi_{\text{Zprotl}} = \ln \frac{S_{\text{kon}}}{S_{\text{poč}}} = \ln \frac{D_{\text{kon}}^2 - d_{\text{kon}}^2}{D_{\text{poč}}^2} \quad [-] \quad (2.9)$$

Všechny uvedené vztahy se následně upravují dle potřeb s ohledem ke tvaru řešené součásti.



Obr. 35: Geometrické modely – určení logaritmických deformací

- **Přirozený (základní) přetvárný odpor σ_p :** je vnitřní odpor materiálu, který působí proti vlivům vnějších sil, zatěžujících výrobek za podmínek jednoosé napjatosti v okamžiku vzniku plastické deformace. Je vyjádřený napětím a je ovlivněn chemickým složením, rychlostí deformace, tvářecí teplotou a stupněm deformace. Jeho průběh lze získat z experimentálně získaných křivek, z již určených materiálových rovnic, nebo z pracovních diagramů pro daný materiál. Pro zadaný materiál byla poskytnuta rovnice přetvárného odporu, kterou lze získat ze vzorců z materiálových listů, dostupných v příloze 1, ve které jsou dostupné také vstupní parametry pro výpočet rovnice.

Dosažením do vstupních parametrů byla získána obecná rovnice pro výpočet přetvárného odporu.

$$\sigma_p = \sum_{i=1}^k b_i \cdot T^{r_i} \cdot \varphi_i^{s_i} = 4,64 \cdot \varphi^5 + 16,76 \cdot \varphi^4 + 0,05 \cdot \varphi^3 - 157,91 \cdot \varphi^2 + 205,73 \cdot \varphi + 140,31 \text{ [MPa]} \quad (2.10)$$

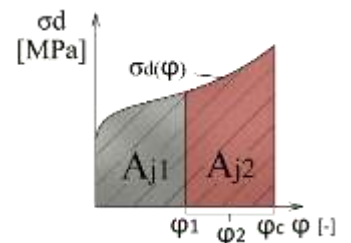
kde: σ_p [MPa] – přirozený (základní) přetvárný odpor
 T [°C] – teplota materiálu
 φ_i [-] – logaritmická deformace jednotky
 k [-] – je optimální počet členů pro konkrétní materiál a teplotní zónu
 b_i, r_i, s_i [-] – exponenty, vybrané statistickým rozbohem tak, aby každý člen v aproximaci byl významný s pravděpodobností 95%

Rovnice přirozeného přetvárného odporu z přílohy 1 je sestavena pro konkrétní hodnoty teploty a rychlosti deformace.

- **Měrná přetvárná práce A_j :** je vztažena na jednotku objemu a představuje plochu pod křivkou deformačního odporu, jak je vidět na obrázku 36. V materiálových listech v příloze 1 je dostupný vzorec se všemi parametry, stanovujícími rovnici pro zadaný materiál.

$$A_j = \sum_{i=1}^k b_i \cdot T^{r_i} \cdot \varphi_i^{s_i} = 0,0063 \cdot \varphi^4 - 0,0056 \cdot \varphi^3 + 0,0006 \cdot \varphi^2 + 0,19 \cdot \varphi \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (2.11)$$

kde: A_j [J.mm⁻³] – měrná přetvárná práce



Obr. 36: Model zpevnění materiálu [5]

- **Napětí při pýchování dle Siebela:**

Odvození veškerých vzorců s popisem veličin lze nalézt v příloze 2 a v seznamu symbolů a zkratk. Veličiny ze vztahů jsou vztaženy ke geometrickému modelu na obrázku 37.

a) Radiální napětí $\sigma_{r(S)}$ dle Siebela: (obr.37)

$$\sigma_{r(S)} = -\sigma_p \cdot \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \left(\frac{D}{2} - r \right) \text{ [MPa]} \quad (2.12)$$

kde: $\sigma_{r(S)}$ [MPa] – radiální napětí dle Siebela
 f [-] – součinitel tření
 r [mm] – okamžitý poloměr
 h [mm] – okamžitá výška
 D [mm] – okamžitý průměr
 σ_p [MPa] – přirozený přetvárný odpor

b) Osově napětí $\sigma_{z(S)}$ dle Siebela: (obr.37)

$$\sigma_{z(S)} = -\sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \left(\frac{D}{2} - r \right) \right] \text{ [MPa]} \quad (2.13)$$

kde: $\sigma_{z(S)}$ [MPa] – osově napětí dle Siebela

c) Smykové napětí $\tau_{f(S)}$ dle Siebela: (obr. 37)

$$\tau_{f(S)} = f \cdot \sigma_{z(S)} = -f \cdot \sigma_p \text{ [MPa]} \quad (2.14)$$

kde: $\tau_{f(S)}$ [MPa] – smykové napětí dle Siebela

d) Deformační odpor $\sigma_{d(S)}$ dle Siebela pro plný špalík: (obr. 37)

$$\sigma_{d(S)} = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h} \right) \text{ [MPa]} \quad (2.15)$$

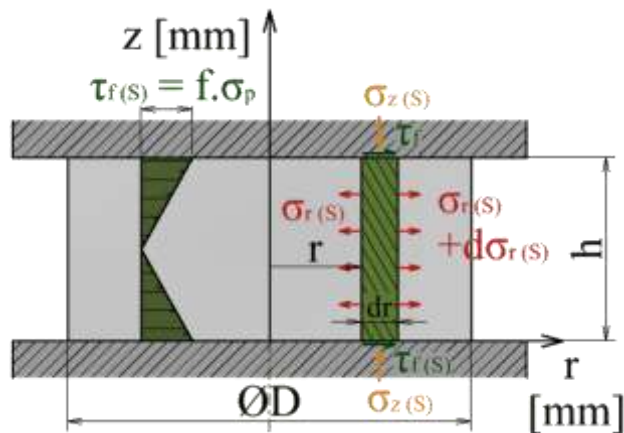
kde: $\sigma_{d(S)}$ [MPa] – deformační odpor dle Siebela

e) Deformační odpor $\sigma_{d(S)}$ dle Siebela pro prstenec: (obr. 37)

$$\sigma_{d(S)} = \sigma_p \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot (D - d)}{h} \right] \text{ [MPa]} \quad (2.161)$$

kde: d [mm] – průměr otvoru

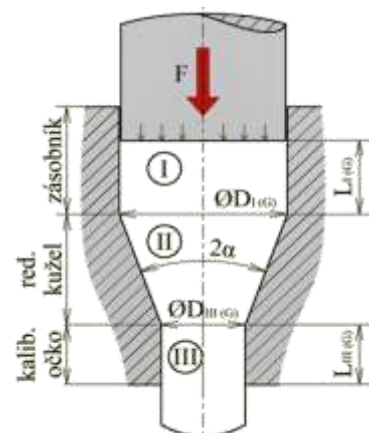
Působení napětí v součásti je znázorněno na obrázku 37.



Obr. 37: Geometrický model pýchování dle Siebela [5], [25]

• **Napětí při dopředném protlačování dle Gubkina:**

Odvození veškerých vzorců s popisem veličin lze nalézt v příloze 3 a v seznamu symbolů a zkratk. Průtláčnice je rozdělena na tři části podle obrázku 38 – na zásobník (vstupní kontejner), redukční kužel a kalibrační očko. V každé části je průběh jednotlivých napětí odlišný, a proto je nutné je určovat a počítat všechny zvlášť. S ohledem na číselné označení jednotlivých částí dle obr. 38 jsou indexována také napětí, působící v konkrétních oblastech průtláčnice.



Obr. 38: Model dopředného protlačování

* Řešení pro kalibrační očko (část III): (obr. 39)

a) Osově napětí v kalibračním očku $\sigma_{zIII(G)}$ dle Gubkina:

$$\sigma_{zIII(G)} = \sigma_{\rho IImin(G)} = \sigma_{pIII(G)} \cdot \frac{4 \cdot f_3}{D_{III(G)}} \cdot z \quad [\text{MPa}] \quad (2.17)$$

kde: $\sigma_{zIII(G)}$ [MPa] – osově napětí v kalibračním očku dle Gubkina
 $\sigma_{\rho IImin(G)}$ [MPa] – osově napětí na nejmenším průměru redukčního kužele dle Gubkina

$D_{III(G)}$ [mm] – průměr kalibračního očka

z [mm] – okamžitá výška

f_3 [-] – koeficient tření

b) Radiální napětí v kalibračním očku $\sigma_{rIII(G)}$ dle Gubkina: (obr. 39)

$$\sigma_{rIII(G)} = \sigma_{pIII(G)} \quad [\text{MPa}] \quad (2.18)$$

kde: $\sigma_{rIII(G)}$ [MPa] – radiální napětí v kalibračním očku dle Gubkina

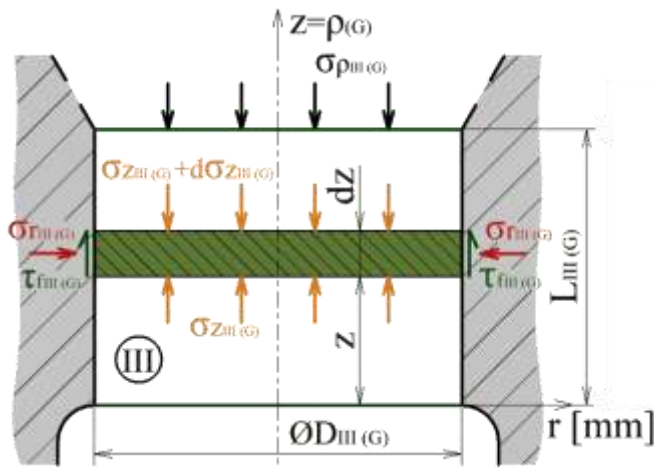
$\sigma_{pIII(G)}$ [MPa] – přirozený přetvárný odpor v kalibračním očku

c) smykové napětí v kalibračním očku $\tau_{fIII(G)}$ dle Gubkina: (obr. 39)

$$\tau_{fIII(G)} = f_3 \cdot \sigma_{rIII(G)} = -f_3 \cdot \sigma_{pIII(G)} \quad [\text{MPa}] \quad (2.19)$$

kde: $\tau_{fIII(G)}$ [MPa] – smykové napětí v kalibračním očku dle Gubkina

Působení napětí v kalibračním očku je znázorněno na obrázku 39.



Obr. 39: Geometrický model kalibračního očka [5], [13]

* Řešení redukční kužel (část II): (obr. 40)

a) Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu $\sigma_{pS(G)}$

$$\sigma_{pS(G)} = (A_{jIII(G)} - A_{jI(G)}) \cdot \frac{1000}{\varphi_{III(G)} - \varphi_{I(G)}} \quad [\text{MPa}] \quad (2.20)$$

kde: $\sigma_{pS(G)}$ [MPa] – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu pro výpočet dle Gubkina

$A_{jI(G)}$ [J.mm⁻³] – měrná přetvárná práce ve vstupním kontejneru

$A_{jIII(G)}$ [J.mm⁻³] – měrná přetvárná práce v kalibračním očku

$\varphi_{I(G)}$ [-] – logaritmické přetvoření ve vstupním kontejneru

$\varphi_{III(G)}$ [-] – logaritmické přetvoření v kalibračním očku

b) Osově napětí v redukčním kuželu $\sigma_{\rho II(G)}$ dle Gubkina: (obr. 40)

$$\sigma_{\rho II(G)} = \sigma_{\rho II(G)} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_{III(G)} \cdot \sigma_{\rho III(G)}}{D_{III(G)} \cdot \sigma_{\rho II(G)}} + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D}{D_{III(G)}} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg} \alpha}} - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f_2} - 1 \right] \text{ [MPa]} \quad (2.21)$$

kde: $\sigma_{\rho II(G)}$ [MPa] – osově napětí v redukčním kuželu dle Gubkina
 $\sigma_{\rho II(G)}$ [MPa] – přirozený přetvárný odpor v redukčním kuželu
 $L_{III(G)}$ [mm] – výška funkční části kalibračního očka (obr. 38)
 D [mm] – okamžitý průměr
 f_2, f_3 [-] – koeficient tření
 α [°] – redukční úhel průtlačnice

c) Napětí na stěně redukčního kužele $\sigma_{\varphi II(G)}$ dle Gubkina: (obr. 40)

$$\sigma_{\varphi II(G)} = \sigma_{\rho II(G)} + \sigma_{\rho II(G)} \text{ [MPa]} \quad (2.22)$$

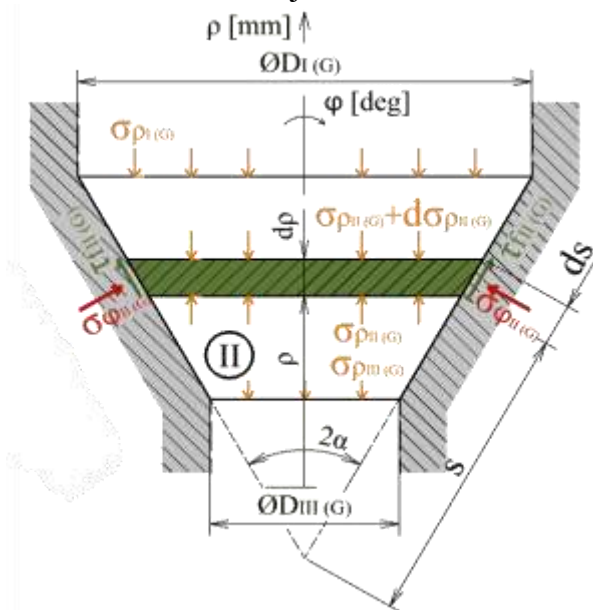
kde: $\sigma_{\varphi II(G)}$ [MPa] – napětí na stěně redukčního kužele dle Gubkina

d) Smykové napětí v redukčním kuželu $\tau_{fII(G)}$ dle Gubkina: (obr. 40)

$$\tau_{fII(G)} = f_2 \cdot \sigma_{\varphi II(G)} \text{ [MPa]} \quad (2.23)$$

kde: $\tau_{fII(G)}$ [MPa] – smykové napětí v redukčním kuželu dle Gubkina

Působení napětí v redukčním kuželu je znázorněno na obrázku 40.



Obr. 40: Geometrický model redukčního kužele [5], [13]

* Řešení pro vstupní kontejner (část I): (obr. 41)

a) Osově napětí ve vstupním kontejneru $\sigma_{zI(G)}$ dle Gubkina:

$$\sigma_{zI(G)} = \sigma_{\rho II \max(G)} \cdot e^{\frac{4 \cdot f_1}{D_I(G)} \cdot \frac{z}{1-\mu}} \text{ [MPa]} \quad (2.24)$$

kde: $\sigma_{zI(G)}$ [MPa] – osově napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina
 $\sigma_{\rho II \max(G)}$ [MPa] – osově napětí na největším průměru redukčního kužele dle Gubkina
 $D_{I(G)}$ [mm] – průměr vstupního kontejneru
 z [mm] – okamžitá výška
 f_1 [-] – koeficient tření
 μ [-] – Poissonova konstanta (pro hliníkové slitiny $\mu=0,33$)

b) Radiální napětí ve vstupním kontejneru $\sigma_{rI(G)}$ dle Gubkina: (obr.41)

$$\sigma_{rI(G)} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \sigma_{zI(G)} \text{ [MPa]} \quad (2.25)$$

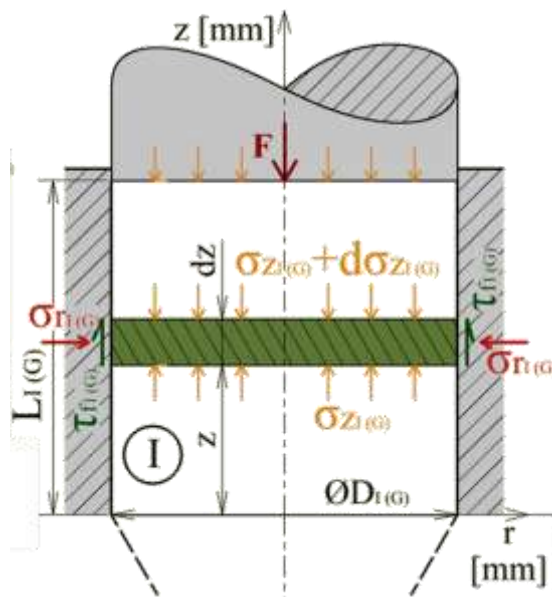
kde: $\sigma_{rI(G)}$ [MPa] – radiální napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina

c) Smykové napětí ve vstupním kontejneru $\tau_{zI(G)}$ dle Gubkina: (obr. 41)

$$\tau_{zI(G)} = f_1 \cdot \sigma_{rI(G)} \text{ [MPa]} \quad (2.26)$$

kde: $\tau_{zI(G)}$ [MPa] – smykové napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina

Působení napětí v redukčním kuželu je znázorněno na obrázku 41.



Obr. 41: Geometrický model vstupního válce (kontejneru) [5], [13]

* Řešení pro celou průtlačnici:

a) Deformační odpor $\sigma_{d(G)}$ při dopředném protlačování dle Gubkina:

$$\sigma_{d(G)} \equiv \sigma_{zI\max(G)} = \sigma_{pS(G)} \cdot e^{\frac{\mu}{1-\mu} \cdot 4 \cdot f_1 \cdot \frac{L_I(G)}{D_I(G)}} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_{III(G)}}{D_{III(G)}} \cdot \frac{\sigma_{pIII(G)}}{\sigma_{pS(G)}} + \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D_I(G)}{D_{III(G)}} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\text{tg}\alpha}} - \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} - 1 \right] \text{ [MPa]} \quad (2.27)$$

kde: $\sigma_{d(G)}$ [MPa] – deformační odpor při dopředném protlačování dle Gubkina
 $\sigma_{zI\max(G)}$ [MPa] – maximální osové napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina

b) Deformační odpor $\sigma_{d(F)}$ při dopředném protlačování dle Feldmanna:

$$\sigma_{d(F)} = \sigma_{pS(G)} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\hat{\alpha}} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_I(G)}{D_{III(G)}} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \hat{\alpha} \right] + 4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_{III(G)}}{D_{III(G)}} \cdot \sigma_{pIII(G)} + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{L_I(G)}{D_I(G)} \cdot \sigma_{pI} \text{ [MPa]} \quad (2.28)$$

kde: $\sigma_{d(F)}$ [MPa] – deformační odpor při dopředném protlačování dle Feldmanna
 $\hat{\alpha}$ [grad] – oblouková míra redukčního úhlu průtlačnice; $\hat{\alpha} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180}$
 $L_{III(G)}$ [mm] – výška funkční části vstupního kontejneru (obr. 38)

- **Napětí při zpětném protlačování:** Výpočty napětí působících v průtlačnici a deformačních odporů uvádí například Dipper, nebo Siebel. Během procesu zpětného protlačování dochází k nehomogenní deformaci. Ve většině výpočtových postupů pro řešení takového přetvoření autoři předpokládají, že kov vytéká prstencem mezi průtlačníkem a průtlačnicí do oblasti 3, kde se dále již nepřetváří. Při výběru výpočetního postupu je potřeba splnit podmínky určené autory, jejichž splnění nám dovoluje daný výpočetní postup pro řešenou situaci použít. V případě výpočtů dle Dippera je proces rozdělen do tří oblastí podle obrázku 42. S ohledem na číselné označení jednotlivých částí dle obrázku 42 jsou indexována napětí, působící v konkrétních oblastech průtlačnice. Odvození veškerých vzorců dle Dippera s popisem veličin lze nalézt v příloze 4 a v seznamu symbolů a zkratk. Veličiny ze vztahů jsou vztaženy ke geometrickému modelu na obrázku 37.

* Podmínky pro užití výpočetních vztahů.

a) Podmínka použití vztahů dle Siebela:

$$s > 0,1 \cdot d_i \quad (2.29)$$

kde: s [mm] – tloušťka stěny
 d_i [mm] – průměr průtlačníku

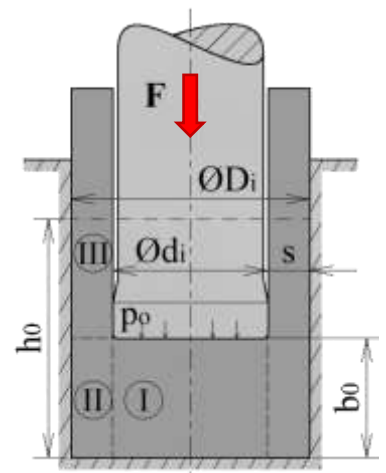
b) Podmínky a předpoklady použití vztahů dle Dippera:

$$\frac{d_i^2}{D_i^2} \ll 0,5 \sim 0,6 \quad (2.30)$$

kde: D_i [mm] – průměr protlačované součásti

$$\frac{h_0}{b} \leq 2 \text{ až } 2,2 \quad (2.31)$$

kde: h_0 [mm] – výška polotovaru
 b [mm] – okamžitá výška dna

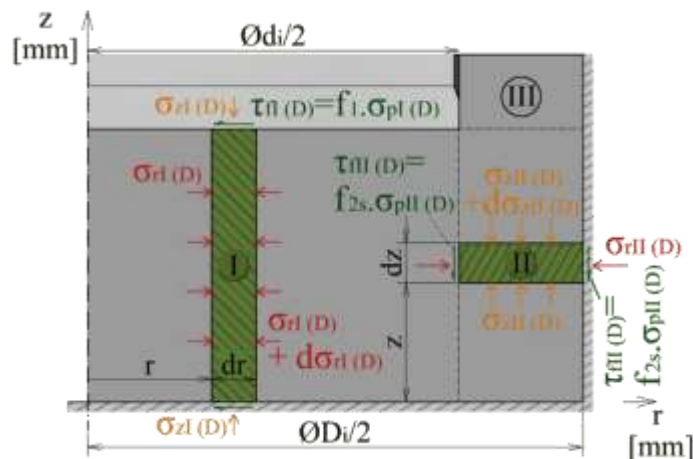


Obr. 42: Model zpětného protlačování [5]

$$\varphi_1 = \varphi_3 - \varphi_1 = \ln \frac{h_0}{b} \quad (2.32)$$

kde: $\varphi_{I(D)}$ [-] – logaritmické přetvoření v oblasti I dle Dippera
 $\varphi_{II(D)}$ [-] – logaritmické přetvoření v oblasti II dle Dippera
 $\varphi_{III(D)}$ [-] – logaritmické přetvoření v oblasti III dle Dippera

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d_i}{8s}\right) \quad (2.33)$$



Obr. 43: Geometrický model zpětného protlačování dle Dippera [5], [25]

* Řešení pro oblast II dle Dippera: (obr. 43)

a) Osové napětí $\sigma_{zII(D)}$ v oblasti II dle Dippera:

$$\sigma_{zII(D)} = \frac{4 \cdot f_{2s} \cdot \sigma_{pII(D)}}{(D_i - d_i)} \cdot (b - z) \quad (2.34)$$

kde: $\sigma_{zII(D)}$ [-] – osové napětí v oblasti II dle Dippera

$\sigma_{pII(D)}$ [MPa] – přirozený přetvárný odpor v oblasti II při zpětném protlačování dle Dippera

D_i [mm] – průměr protlačku

d_i [mm] – průměr průtlačníku

b [mm] – okamžitá výška dna

$f_{2s(D)}$ [-] – střední koeficient tření, kde $f_{2s} = 0,5 \cdot (f_1 + 0,5)$

b) Radiální napětí $\sigma_{rII(D)}$ v oblasti II dle Dippera: (obr. 43)

$$\sigma_{rII(D)} = \left[\frac{4 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot (b - z) + 1 \right] \cdot \sigma_{pII(D)} = \sigma_{zII(D)} + \sigma_{pII(D)} \quad (2.35)$$

kde: $\sigma_{rII(D)}$ [MPa] – radiální napětí v oblasti II dle Dippera

c) Střední radiální napětí $\sigma_{rII s(D)}$ v oblasti II dle Dippera: (obr. 43)

$$\sigma_{rII s(D)} = \left[\frac{4 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot (b - z) + 1 \right] \cdot \sigma_{pII s(D)} \quad (2.36)$$

kde: $\sigma_{rII s(D)}$ [MPa] – střední radiální napětí v oblasti II dle Dippera

$\sigma_{pII s(D)}$ [MPa] – střední přirozený přetvárný odpor v oblasti II dle Dippera, pro které platí vztah:

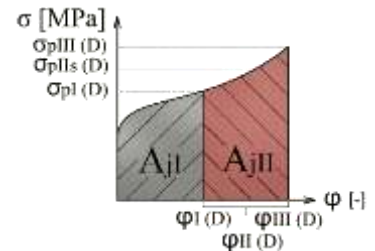
$$\sigma_{pII s(D)} = \frac{A_{jIII(D)} - A_{jI(D)}}{\varphi_{II(D)}}$$

V rovnicích 5 a 6 je využíván model materiálu, vyjádřený křivkou zpevnění podle obrázku 44 za předpokladu:

$$z = 0 \rightarrow \sigma_{pII(D)} = \sigma_{pI(D)}$$

$$z = b \rightarrow \sigma_{pII(D)} = \sigma_{pIII(D)} = \sigma_{rII(D)}$$

kde: $\sigma_{pIII(D)}$ [MPa] – přirozený přetvárný odpor v oblasti III dle Dippera



Obr. 44: Model zpevnění materiálu [5]

d) Smykové napětí $\tau_{fII(D)}$ v oblasti II dle Dippera: (obr. 43)

$$\tau_{fII(D)} = f_{2s} \cdot \sigma_{pII(D)} \quad (2.37)$$

kde: $\tau_{fII(D)}$ [MPa] – smykové napětí v oblasti II dle Dippera

* Řešení pro oblast I dle Dippera: (obr. 43)

a) Osové napětí $\sigma_{zI(D)}$ v oblasti I dle Dippera:

$$\sigma_{zI(D)} = \sigma_{rII s(D)} + \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) + 1 \right] \quad (2.38)$$

kde: $\sigma_{zI(D)}$ [-] – osové napětí v oblasti I dle Dippera

$\sigma_{pI(D)}$ [MPa] – přirozený přetvárný odpor v oblasti I dle Dippera

b) Radiální napětí $\sigma_{rI(D)}$ v oblasti I dle Dippera: (obr. 43)

$$\sigma_{rI(D)} = \sigma_{rII_s(D)} + \sigma_{pI(D)} \cdot \frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) = \sigma_{zI(D)} - \sigma_{pI(D)} \quad (2.39)$$

kde: $\sigma_{rI(D)}$ [MPa] – radiální napětí v oblasti I dle Dippera

c) Smykové napětí $\tau_{fI(D)}$ v oblasti I dle Dippera: (obr. 43)

$$\tau_{fI(D)} = f_1 \cdot \sigma_{pI(D)} \quad (2.40)$$

kde: $\tau_{fI(D)}$ [MPa] – smykové napětí v oblasti I dle Dippera

* Řešení pro celou průtláčnici:

a) Deformační odpor při zpětném protlačování prstence $\sigma_{d(D)}$ dle Dippera:

$$\sigma_{d(D)} = \sigma_{pI(D)} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot f_1 \cdot \frac{d_i - d_{ii}}{b} \right) + \sigma_{rII_s(D)} \quad (2.41)$$

kde: $\sigma_{d(D)}$ [MPa] – deformační odpor při zpětném protlačování dle Dippera

d_{ii} [mm] – průměr vnitřního otvoru prstence

b) Deformační odpor při zpětném protlačování $\sigma_{d(S)}$ dle Siebela:

$$\sigma_{d(Szp)} = 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{D_i^2}{d_i^2} \cdot \left(\log \frac{D_i^2}{D_i^2 - d_i^2} + \frac{D_i^2}{D_i^2 - d_i^2} \cdot \log \frac{D_i^2}{d_i^2} + \log \frac{d_i^2}{D_i^2 - d_i^2} \right) \quad (2.42)$$

kde: $\sigma_{d(Szp)}$ [MPa] – deformační odpor při zpětném protlačování dle Siebela

- **Tvářecí síla F:** jedná se o sílu, kterou musí vynaložit nástroj pro to, aby zhotovil součást do požadovaných rozměrů. Z fyzikálního hlediska se určuje jako napětí, definované deformačním odporem, vztažené na plochu průřezu pod nástrojem. Podle nejvyšší tvářecí síly během celého procesu se vybírá stroj. Jmenovitá síla stroje musí být vždy vyšší, než je tvářecí síla potřebná ke zhotovení výrobku.

$$F = \sigma_d \cdot S \text{ [N]} \quad (2.43)$$

kde: F [N] – tvářecí síla

S [mm²] – plocha průřezu činné části pod nástrojem

σ_d [MPa] – deformační odpor

- **Rychlost deformace ϕ :** má velký vliv na zpevnění materiálu v důsledku nárůstu přetvárného odporu. Čím je její hodnota vyšší, tím více dochází v materiálu během procesu přetvoření ke zpevnění. Rychlost deformace je ovlivněna rychlostí nástroje a jeho geometrií. Odvození veškerých výpočtů pro rychlosti deformace a rychlost nástroje lze nalézt v příloze 7.

* Určení rychlosti nástroje:

Stanoví se z parametrů zvoleného stroje a je stěžejní pro výpočty rychlostí deformace

$$v_0 = \frac{l_n}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot H}{t \cdot 10^3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.44)$$

kde: v_0 [m.s⁻¹] – rychlost chodu nástroje (jedná se o parametr stroje)

l_n [mm] – dráha nástroje

n_1 [min⁻¹] – počet zdvihů

H [mm] – zdvih beranu (jedná se o parametr stroje)

t [s] – čas

* Určení rychlosti deformace:

a) Rychlost deformace při pěchování: (obr. 45a)

$$\dot{\varphi}_r(\text{pěch}) = \dot{\varphi}_t(\text{pěch}) = \frac{v_0 \cdot 1000}{2 \cdot h} [\text{s}^{-1}] \quad (2.45)$$

kde: $\dot{\varphi}_r(\text{pěch}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v radiálním směru u pěchování
 $\dot{\varphi}_t(\text{pěch}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v tečném směru u pěchování
 $v_0 [\text{ms}^{-1}]$ – rychlost chodu nástroje

$$\dot{\varphi}_z(\text{pěch}) = -\frac{v_0 \cdot 1000}{h} [\text{s}^{-1}] \quad (2.46)$$

kde: $\dot{\varphi}_z(\text{pěch}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v osovém směru u pěchování

b) Rychlost deformace při dopředném protlačování: (obr. 45b)

$$\dot{\varphi}_r(\text{DP}) = \dot{\varphi}_t(\text{DP}) = -v_0 \cdot \frac{r_1^2(\text{DP}) \cdot 10^3}{r^3} \cdot \text{tg}(\alpha) [\text{s}^{-1}] \quad (2.47)$$

kde: $\dot{\varphi}_r(\text{DP}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v radiálním směru u dopředného protlačování
 $\dot{\varphi}_t(\text{DP}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v tečném směru u dopředného protlačování
 $r_1^2(\text{DP}) [\text{mm}]$ – poloměr vstupního kontejneru

$$\dot{\varphi}_z(\text{DP}) = -2 \cdot \dot{\varphi}_r(\text{DP}) [\text{s}^{-1}] \quad (2.48)$$

kde: $\dot{\varphi}_z(\text{DP}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v osovém směru u dopředného protlačování

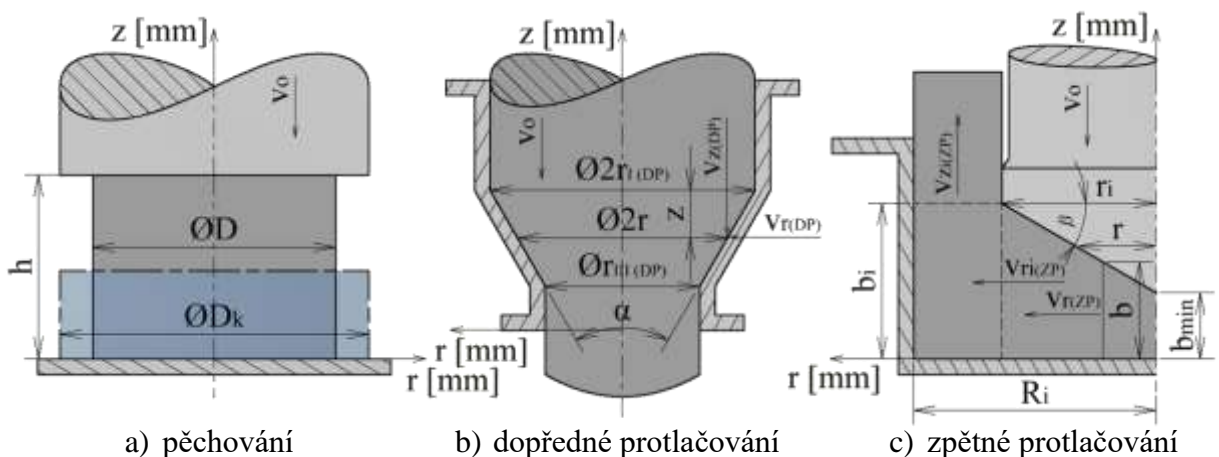
c) Rychlost deformace při zpětném protlačování: (obr. 45c)

$$\dot{\varphi}_r(\text{ZP}) = \dot{\varphi}_t(\text{ZP}) = \frac{v_0 \cdot 10^3}{2 \cdot (r \cdot \text{tg}(\beta) + b_{\text{min}})} [\text{s}^{-1}] \quad (2.49)$$

kde: $v_r(\text{ZP}) [\text{ms}^{-1}]$ – rychlost toku v radiálním směru u zpětného protlačování
 $\dot{\varphi}_r(\text{ZP}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v radiálním směru u zpětného protlačování
 $\dot{\varphi}_t(\text{ZP}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v tečném směru u zpětného protlačování

$$\dot{\varphi}_z(\text{ZP}) = -2 \cdot \dot{\varphi}_r(\text{ZP}) [\text{s}^{-1}] \quad (2.50)$$

kde: $\dot{\varphi}_z(\text{ZP}) [\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v osovém směru u zpětného protlačování

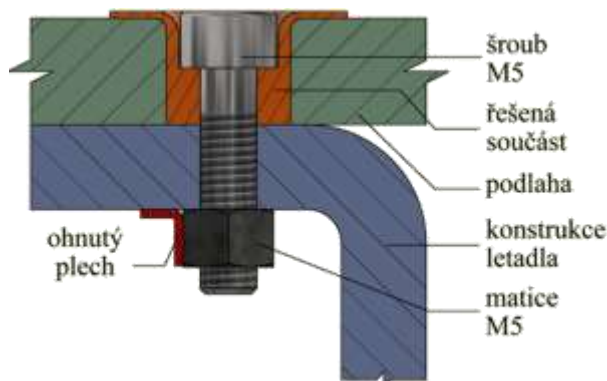


Obr. 45: Geometrické modely pro určení rychlosti deformace [38]

3 POSTUP TECHNOLOGIE VÝROBY

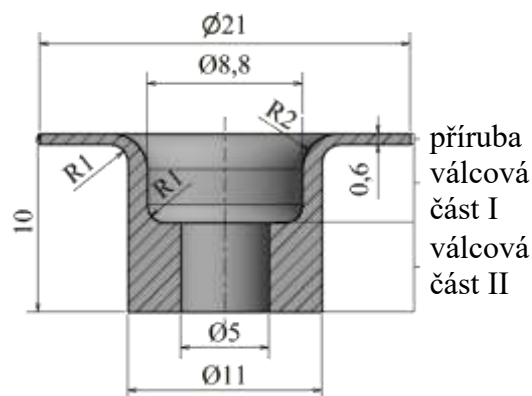
Při návrhu výrobního postupu součásti je potřeba zvážit několik možných variant výroby a vybrat tu nejvhodnější z hlediska velikosti deformace, přetvárné práce, počtu operací a celkově vyrobiteľnosti. Pro vybranou variantu výroby je následně nutné určit hmotnost, objem a rozměry polotovaru, vstupujícího do procesu. Pro daný polotovar se pak stanoví velikost deformačního odporu a velikost tvářecí síly, která je potřebná k určení tvářecího stroje.

Součást slouží jako spojovací díl pro sendvičové podlahy s trupem letadla. Struktura sendvičových panelů neumožňuje navrtání závitů a jejich upevnění ke konstrukci se řeší právě pomocí navržených spojek, které slouží jako vložky pro šroub a umožňují upevnění podlahových panelů pomocí příruby. Do podlahových panelů bude navrtán otvor pro umístění výrobku, který bude pomocí metrického šroubu s válcovou hlavou připevněn k žebrované konstrukci stroje. Ze spodní strany žebra je umístěna matice, která je zafixovaná přišroubovaným, nebo přilepeným ohnutým plechem, aby se při montáži zamezilo jejímu otáčení kolem osy (obr. 46).



Obr. 46: Způsob upevnění podlah

Kvůli velkým deformacím, vzniklým při výrobě, bylo potřeba navrhnout rozměry výrobku tak, aby vyhovovaly požadavkům na funkčnost a vyrobiteľnost. Navržené rozměry pro zadanou součást jsou znázorněny na obrázku 47. Pro přehlednost byla součást rozdělena na přírubu, válcovou část I a válcovou část II. Po vytvoření součásti zůstává na dně válcové části II. blána, která se buďto vyvrtá, nebo prostříhne, aby vznikl otvor pro šroub M5. Ten zůstane bez závitů, aby se zjednodušila montáž panelů k trupu letadla.



Obr. 47: Součást se zadanými rozměry

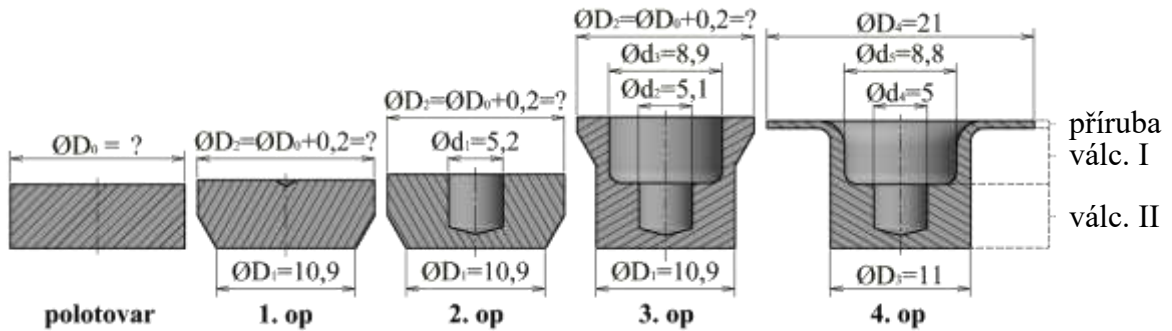
3.1 Varianty výroby

Výrobní varianty se od sebe odlišují zvolením rozdílného tvaru polotovaru a využitím jiné tvářecí technologie. Posuzují se s ohledem na velikost deformace, která by měla být v celém průřezu součásti co nejvíce rovnoměrná a s ohledem na počet operací, který by měl být co nejmenší. V případech, kdy geometrie výrobku neumožňuje rovnoměrnost deformace v celém průřezu, je snaha dosáhnout alespoň co nejnižších stupňů deformace.

. Optimální varianta je ta, která se vyznačuje nejmenší deformací součásti s nejmenším počtem operací a splňuje požadované materiálové, konstrukční a technologické podmínky. Při výpočtu přetvoření byl v konkrétním případě brán zřetel na rovnost přetvoření příruby a přetvoření válcové části I.

Při výpočtu deformace v jednotlivých operacích není ustřížení polotovaru a prostřížení konečného otvoru Ø5 počítáno jako samostatná operace.

• **Varianta A (obr. 48):**



Obr. 48: Výrobní postup – varianta A

Polotovarem je špalík o průřezu $\text{Ø}D_0$, který je v průběhu čtyřech operací přetvořen v konečnou součást. Operace následují po sobě takto:

- I. operace: předtvarování ústřížku
- II. operace: zpětné protlačování otvoru $\text{Ø}d_1$
- III. operace: kombinované protlačování otvoru $\text{Ø}d_3$ a průměru $\text{Ø}D_1$
- IV. operace: napěchování příruby

Protlačování válcové části II.:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{válc.II}} &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_1^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{D_1^2 - d_2^2}{(D_0+0,2)^2 - d_1^2} \right| + \left| \ln \frac{D_3^2 - d_4^2}{D_1^2 - d_2^2} \right| = \quad (3.1) \\ &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 5,2^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{10,9^2 - 5,1^2}{(D_0+0,2)^2 - 5,2^2} \right| + \left| \ln \frac{11^2 - 5^2}{10,9^2 - 5,1^2} \right| = \varphi(D_0) \end{aligned}$$

Protlačování válcové části I.:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{válc.I}} &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_1^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_3^2}{(D_0+0,2)^2 - d_1^2} \right| + \left| \ln \frac{D_3^2 - d_5^2}{(D_0+0,2)^2 - d_3^2} \right| = \quad (3.2) \\ &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 5,2^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 8,9^2}{(D_0+0,2)^2 - 5,2^2} \right| + \left| \ln \frac{11^2 - 8,8^2}{(D_0+0,2)^2 - 8,9^2} \right| = \varphi(D_0) \end{aligned}$$

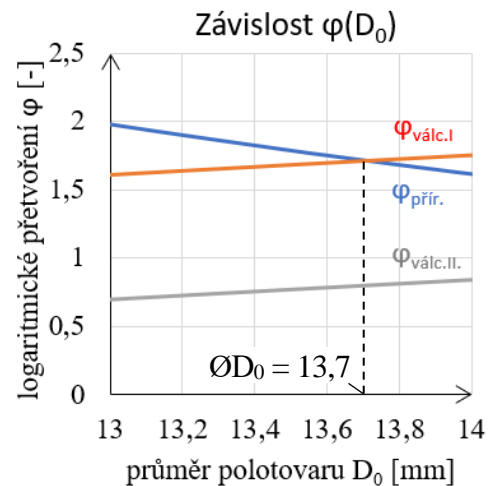
Protlačování příruby:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{přir.}} &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_1^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_3^2}{(D_0+0,2)^2 - d_1^2} \right| + \left| \ln \frac{D_4^2 - d_5^2}{(D_0+0,2)^2 - d_3^2} \right| = \quad (3.3) \\ &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 5,2^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 8,9^2}{(D_0+0,2)^2 - 5,2^2} \right| + \left| \ln \frac{21^2 - 8,8^2}{(D_0+0,2)^2 - 8,9^2} \right| = \varphi(D_0) \end{aligned}$$

Výsledné hodnoty deformací jsou znázorněny na grafu (obr. 49), nebo v tabulce 9. Podle těchto výsledků je nejvhodnější průměr polotovaru $\text{Ø}D_0 = 13,7$ mm.

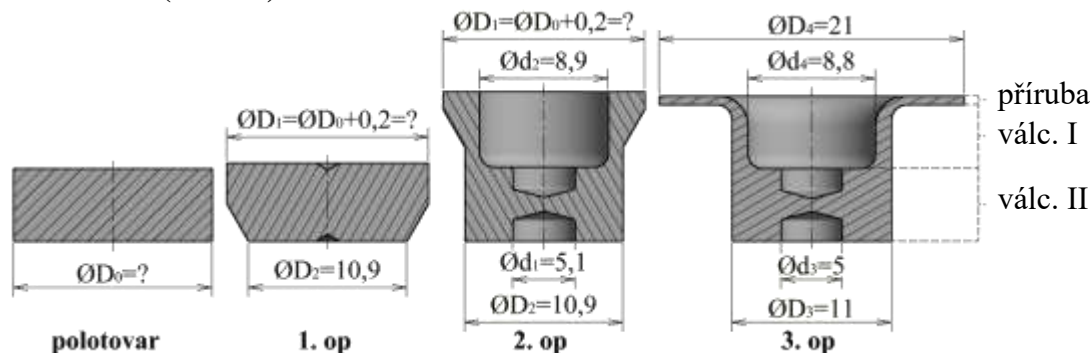
Tab. 9: Hodnoty celkové logaritmické deformace – metoda A

D_0 [mm]	$\varphi_{\text{přir.}}$ [-]	$\varphi_{\text{válc.I}}$ [-]	$\varphi_{\text{válc.II}}$ [-]
13,5	1,787	1,681	0,768
13,6	1,751	1,695	0,782
13,7	1,716	1,709	0,796
13,8	1,682	1,723	0,810
13,9	1,649	1,737	0,824



Obr. 49: Nejvhodnější průměr polotovaru – metoda A

• **Varianta B (obr. 50):**



Obr. 50: Výrobní postup – varianta B

Polotovarem je špalík o průřezu $\text{Ø}D_0$, který je v průběhu tří operací přetvořen v konečnou součást. Operace následují po sobě takto:

I. operace: předtvarování ústřížku

II. operace: kombinované protlačování otvorů $\text{Ø}d_1$ a $\text{Ø}d_2$ a průměru $\text{Ø}D_2$

III. operace: napěchování příruby

Protlačování válcové části II.:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{válc.II}} &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_2^2-d_1^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{D_3^2-d_3^2}{D_2^2-d_1^2} \right| = \\ &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{10,9^2-5,1^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{11^2-5^2}{10,9^2-5,1^2} \right| = \varphi(D_0) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Protlačování válcové části I.:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{válc.I}} &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_2^2-d_2^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{D_3^2-d_4^2}{D_2^2-d_2^2} \right| = \\ &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{10,9^2-8,9^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{11^2-8,8^2}{10,9^2-8,9^2} \right| = \varphi(D_0) \end{aligned} \quad (3.5)$$

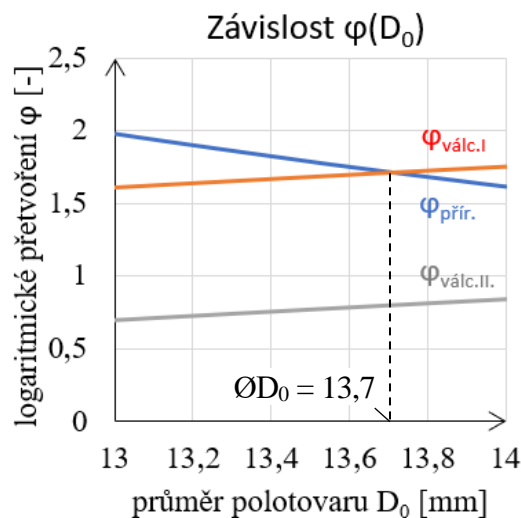
Protlačování příruby:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{přír.}} &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2-d_2^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{D_4^2-d_4^2}{(D_0+0,2)^2-d_2^2} \right| = \\ &= \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2-8,9^2}{(D_0+0,2)^2} \right| + \left| \ln \frac{21^2-8,8^2}{(D_0+0,2)^2-8,9^2} \right| = \varphi(D_0) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Výsledné hodnoty deformací jsou znázorněny na grafu (obr. 51), nebo v tabulce 10. Podle těchto výsledků je nejvhodnější průměr polotovaru $\text{Ø}D_0 = 13,7$ mm.

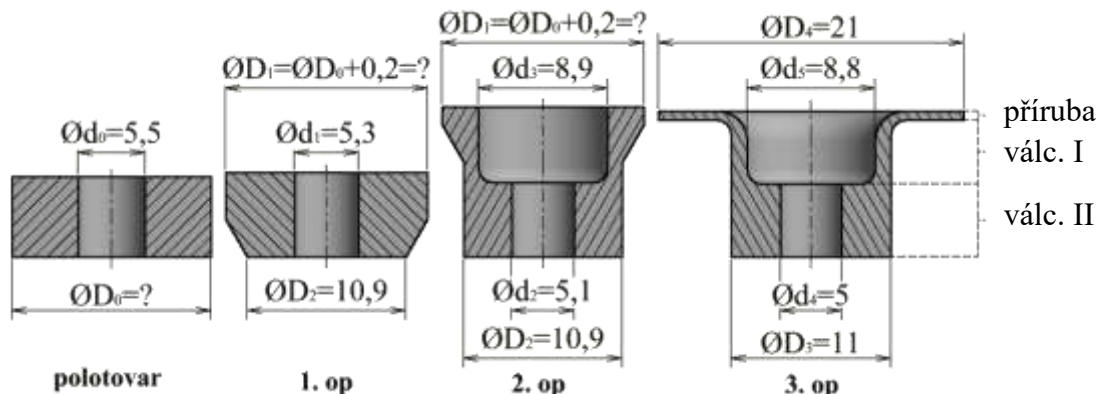
Tab. 10: Hodnoty celkové logaritmické deformace – metoda B

D_0 [mm]	$\varphi_{\text{přír.}}$ [-]	$\varphi_{\text{válc.I}}$ [-]	$\varphi_{\text{válc.II}}$ [-]
13,5	1,787	1,681	0,768
13,6	1,751	1,695	0,782
13,7	1,716	1,709	0,796
13,8	1,682	1,723	0,810
13,9	1,649	1,737	0,824



Obr. 51: Nejvhodnější průměr polotovaru – metoda B

• **Varianta C (obr. 52):**



Obr. 52: Výrobní postup – varianta C

Polotovarem je prstenec o vnějším průměru $\text{Ø}D_0$ a vnitřním průměru $\text{Ø}d_0$, který je v průběhu tří operací přetvořen v konečnou součást. Operace následují po sobě takto:

I. operace: předtvarování ústřížku

II. operace: kombinované protlačování otvoru $\text{Ø}d_3$ a průměru D_2

III. operace: napěchování příruby

Protlačování válcové části II.:

$$\varphi_{\text{válc.II}} = \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_1^2}{D_0^2 - d_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_2^2 - d_2^2}{(D_0+0,2)^2 - d_1^2} \right| + \left| \ln \frac{D_3^2 - d_3^2}{D_2^2 - d_2^2} \right| = \quad (3.7)$$

$$\varphi_{\text{válc.II}} = \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 5,3^2}{D_0^2 - 5,5^2} \right| + \left| \ln \frac{10,9^2 - 5,1^2}{(D_0+0,2)^2 - 5,3^2} \right| + \left| \ln \frac{11^2 - 8,9^2}{10,9^2 - 5,1^2} \right| = \varphi(D_0)$$

Protlačování válcové části I.:

$$\varphi_{\text{válc.I}} = \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_1^2}{D_0^2 - d_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_2^2 - d_3^2}{(D_0+0,2)^2 - d_1^2} \right| + \left| \ln \frac{D_4^2 - d_5^2}{D_2^2 - d_3^2} \right| = \quad (3.8)$$

$$\varphi_{\text{válc.I}} = \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 5,3^2}{D_0^2 - 5,5^2} \right| + \left| \ln \frac{10,9^2 - 8,9^2}{(D_0+0,2)^2 - 5,3^2} \right| + \left| \ln \frac{11^2 - 8,8^2}{10,9^2 - 8,9^2} \right| = \varphi(D_0)$$

Protlačování příruby:

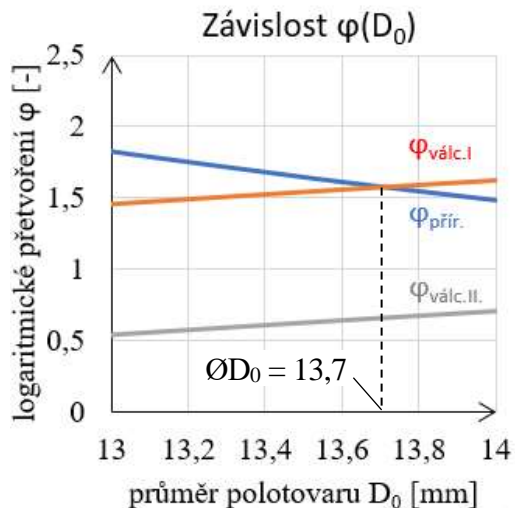
$$\varphi_{\text{přir.}} = \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_1^2}{D_0^2 - d_0^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - d_3^2}{(D_0+0,2)^2 - d_1^2} \right| + \left| \ln \frac{D_4^2 - d_5^2}{(D_0+0,2)^2 - d_3^2} \right| = \quad (3.9)$$

$$\varphi_{\text{přir.}} = \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 5,3^2}{D_0^2 - 5,5^2} \right| + \left| \ln \frac{(D_0+0,2)^2 - 8,9^2}{(D_0+0,2)^2 - 5,3^2} \right| + \left| \ln \frac{21^2 - 8,8^2}{(D_0+0,2)^2 - 8,9^2} \right| = \varphi(D_0)$$

Výsledné hodnoty deformací jsou vidět na grafu (obr. 53), nebo v tabulce 11. Podle těchto výsledků je nejvhodnější průměr polotovaru $\text{Ø}D_0 = 13,7$ mm.

Tab. 11: Hodnoty celkové logaritmické deformace – metoda C

D_0 [mm]	$\varphi_{\text{přir.}}$ [-]	$\varphi_{\text{válc.I}}$ [-]	$\varphi_{\text{válc.II}}$ [-]
13,5	1,644	1,538	0,625
13,6	1,611	1,554	0,641
13,7	1,578	1,571	0,658
13,8	1,546	1,587	0,674
13,9	1,514	1,603	0,690



Obr. 53: Nejvhodnější průměr polotovaru – metoda C

3.1.1 Výběr nejvhodnější varianty

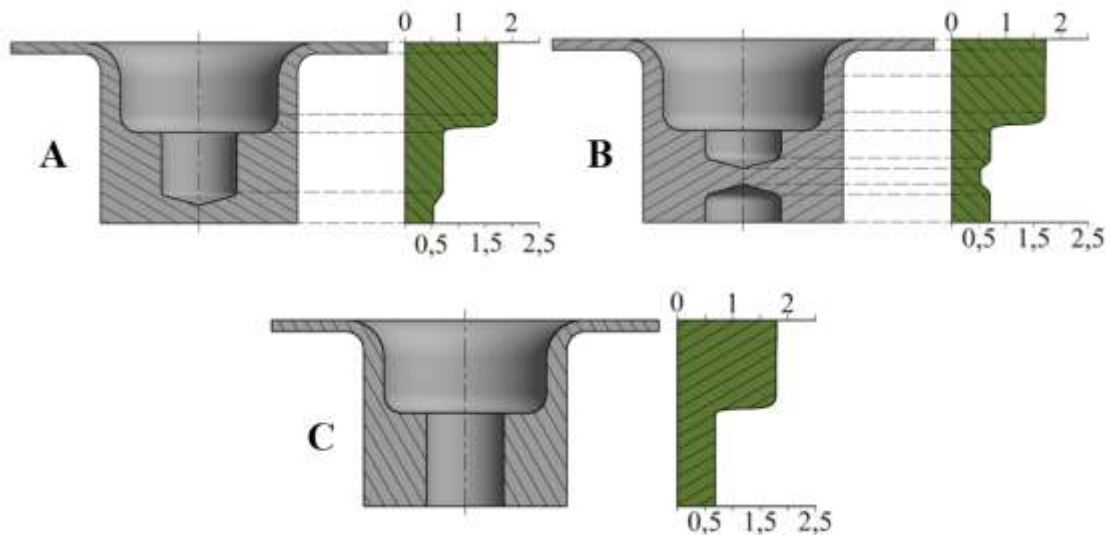
Všemi metodami lze vyrobit součást podle požadovaných rozměrů, tolerancí i kvality povrchu. V oblasti příruby a válcové části I. dochází k velkému přetvoření materiálu ve všech variantách (obr. 54) a hrozí zde jeho vyčerpání plasticity. Byla proto provedena optimalizace volby průměru polotovaru, aby nebyla přesažena kritická hodnota deformace v žádné oblasti výrobku.

- **Varianta C:** je velice výhodná z hlediska konečných úprav, protože se při ní nemusí prostřihovat blána pro vytvoření otvoru pro šroub. Otvor je již vytvořen v polotovaru prstence. S ohledem na celkové logaritmické přetvoření se zdá být nejvhodnější metodou, protože ve všech třech částech vykazuje nejnižší hodnoty deformace. Toto přetvoření ovšem není oproti ostatním variantám o tolik menší, aby se vyplatilo používání prstencového polotovaru, jehož výroba je mnohem náročnější než výroba špalíkového polotovaru. Tato metoda nebude kvůli vyšším finančním nákladům na výrobu polotovaru využita.
- **Varianta A:** vykazuje stejné hodnoty celkového přetvoření v porovnání s variantou B, ovšem k vyhotovení součásti vyžaduje oproti ostatním metodám o jednu operaci navíc, což je ekonomicky velice nevýhodné. Možnost A se proto vylučuje.
- **Varianta B:** je co se týče přetvoření stejně náročná jako varianta A – při výpočtech hodnot celkového přetvoření bylo dosaženo stejných výsledků. Oproti variantě A ale tato možnost výroby potřebuje ke zhotovení součásti o jednu operaci méně, což značně zjednodušuje výrobní postup, návrh a konstrukci nástrojů a finanční náročnost celého procesu.

Ke zhotovení součásti byl vybrán způsob B, který je z hlediska počtu operací a jednoduchosti polotovaru nejvýhodnější i přes o trochu vyšší hodnoty deformace než ve variantě C. V rámci tohoto postupu budou dále provedeny potřebné výpočty.

Pro vybranou variantu byla také provedena kontrola vyrobiteľnosti. Podle experimentálních pěstovacích zkoušek (viz příloha 1) byl pro logaritmické přetvoření určen interval bezpečnosti, po jehož překročení dojde k vyčerpání plasticity. Hodnota kritického přetvoření pro materiál AlMn1 je $\varphi_{krit}(T=21\text{ °C})=2,06$ a $\varphi_{krit}(T=100\text{ °C})=1,86$. V obou případech spadá výrobní proces dle varianty B do požadovaného intervalu $\varphi = <0;1,86>$, nebo $\varphi = <0;2,06>$. Součást je proto považována za zhotovitelnou. Hodnoty celkových logaritmických deformací pro všechny metody jsou znázorněny na obrázku 54.

Podle předchozích výpočtů se jevil nejvhodnější průměr polotovaru $\varnothing D_0 = 13,7$ mm. Pro tento poloměr budou provedeny výpočty.



Obr. 54: Průběhy celkových logaritmických deformací

3.2 Výpočet rozměrů součásti v jednotlivých operacích

Určení všech rozměrů součásti v každé operaci je podstatné pro konstrukci nástrojů a nastavení dráhy beranu stroje. Při výpočtu rozměrů se vychází ze zákona zachování objemu. Platí tedy rovnost objemu polotovaru v každé operaci s konečným výrobkem, jehož rozměry jsou známy a lze z nich stanovit objem výrobku.

Výpočet objemu součásti byl proveden v parametrickém 3D modelovacím programu Autodesk Inventor Professional 2017. K usnadnění výpočtů rozměrů v některých operacích byla součást rozdělena na dílčí objemy (obr. 55).

Dílčí objemy byly vypočítány programem:

$$V_1 = 196,83 \text{ mm}^3$$

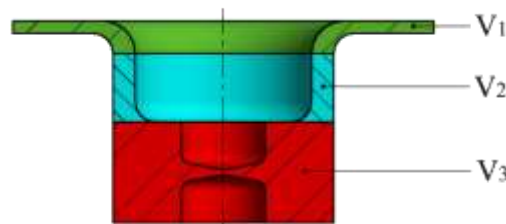
$$V_2 = 121,95 \text{ mm}^3$$

$$V_3 = 391,92 \text{ mm}^3$$

Celkový objem je pak součtem všech dílčích:

$$V_{\text{celk}} = V_1 + V_2 + V_3 = 196,83 + 121,95 + 391,92 = 710,7 \text{ mm}^3 \quad (3.10)$$

Kde: V_{celk} [mm³] – celkový objem součásti



Obr. 55: Dílčí objemy konečné součásti

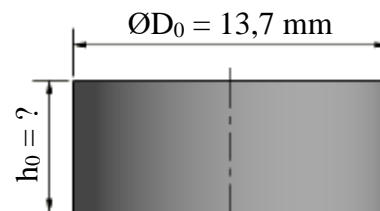
- **Rozměry polotovaru – špalík** (obr. 45)

Výška ústrižku se určí z celkového objemu a z předpokladu válcového tvaru špalíku rovnicí 3.11.

$$V_{\text{celk}} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 \rightarrow h_0 = \frac{4 \cdot V_{\text{celk}}}{\pi \cdot D_0^2} \quad (3.11)$$

$$h_0 = \frac{4 \cdot V_{\text{celk}}}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 710,7}{\pi \cdot 13,7^2} = 4,82 \text{ mm} \cong 4,9 \text{ mm}$$

Aby se pokryly nepřesnosti stříhu při dělení, stanoví se výška polotovaru h_0 na 4,9 mm.



Obr. 56: Rozměry polotovaru

- **Rozměry polotovaru – I. operace** (obr. 57)

Objem sražené části V_4 a středícího důlku V_6 byl určen pomocí výpočetního programu.

$$V_4 = 314,86 \text{ mm}^3$$

$$V_6 = 0,39 \text{ mm}^3$$

Nyní je potřeba určit výšku h_1 pomocí válce V_5 bez středícího důlku V_6 .

$$V_5 = V_{\text{celk}} - V_4 + V_6$$

$$\frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot \left(h_1 - \frac{D_1 - D_2}{\text{tg}(30^\circ)} \right) = V_{\text{celk}} - V_4 + V_6 \quad (3.12)$$

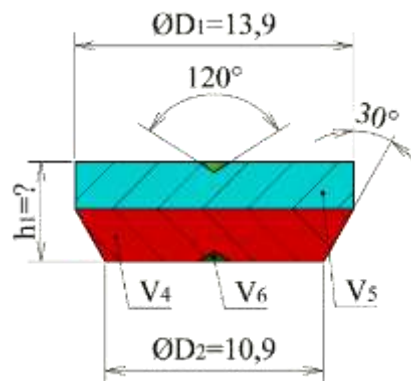
Kde: h_1 [mm] – výška polotovaru v I. operaci

D_1 [mm] – průměr spěchované části výrobku v I. operaci

D_2 [mm] – průměr sražené části výrobku v I. operaci

V_4 [mm³] – objem sražené části v I. operaci

V_6 [mm³] – objem středícího důlku v I. operaci



Obr. 57: Rozměry polotovaru - I. operace

Nyní se vyjádří z rovnice 3.12 výška h_1

$$h_1 = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot \text{tg}(30^\circ)} + \frac{4}{\pi \cdot D_1^2} \cdot (V_{\text{celk}} - V_4 + V_6) \quad (3.13)$$

$$h_1 = \frac{13,9 - 10,9}{2 \cdot \text{tg}(30^\circ)} + \frac{4}{\pi \cdot 13,9^2} \cdot (710,6 - 314,86 + 0,39) \cong 5,21 \cong 5,2 \text{ mm}$$

• **Rozměry polotovaru – II. operace**

Při určování rozměrů válcové části II. (objem V_{11}) se vychází z rozměrů konečné součásti s přídatkem na kalibraci. Je předpokládáno, že do této části již při kalibraci materiál příliš nezateká. Pro kontrolu bylo provedeno porovnání objemů V_{11} a V_3 pomocí výpočetního programu.

$$V_3 = 391,92 \text{ mm}^3; V_{10} = 388,24 \text{ mm}^3.$$

Obdobným způsobem byly určeny rozměry v části označené jako V_9 , ovšem s předpokladem, že do této části při poslední operaci materiál ještě zatekl z částí V_8 a V_7 . Ze zbytku objemu, který do oblasti V_9 nezatekl, se v poslední operaci vytvoří příruba napěchováním.

$$V_7 = V_{\text{celk}} - V_{10} - V_9 - V_8 =$$

$$V_7 = 710,6 - 388,24 - 49,24 - 153,65 = 119,47 \text{ mm}^3 \quad (3.14)$$

Výsledek z rovnice 3.14 byl využit k výpočtu výšky h_3

$$h_4 = \frac{V_7 \cdot 4}{\pi \cdot (D_1^2 - d_2^2)} = \frac{119,47 \cdot 4}{\pi \cdot (13,9^2 - 8,9^2)} \doteq 1,33 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Výšku h_2 lze určit pomocí goniometrických funkcí z trojúhelníku na obrázku 58

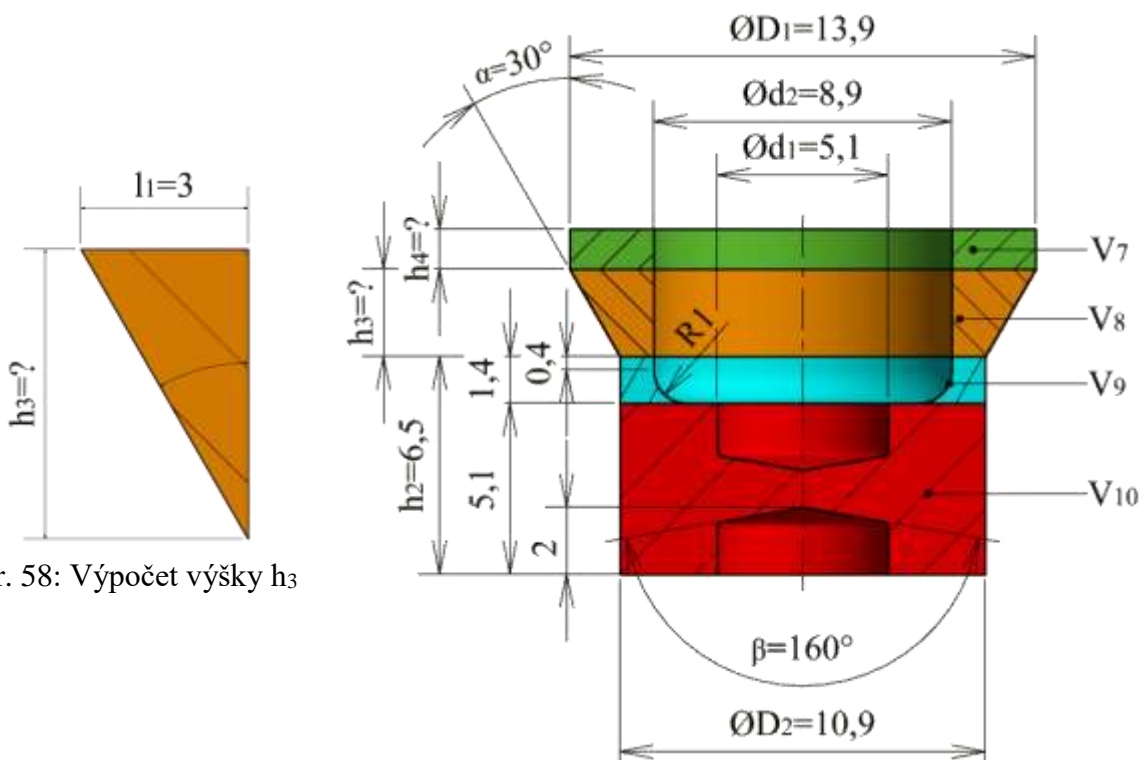
$$h_3 = \frac{l_1}{\sin(\alpha)} = \frac{3}{\sin(30^\circ)} = 6 \text{ mm} \quad (3.16)$$

Všechny vypočtené objemy jsou zapsány v tabulce 12.

Vypočtené a určené rozměry součásti ve II. operaci jsou znázorněny na obrázku 59.

Tab. 12: Hodnoty objemů

V	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
[mm ³]	196,83	121,95	391,92	314,86	396,13	0,39
V	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀	V _{celk}	
[mm ³]	119,47	153,65	49,24	388,24	736	



Obr. 58: Výpočet výšky h_3

Obr. 59: Rozměry polotovaru – II. operace

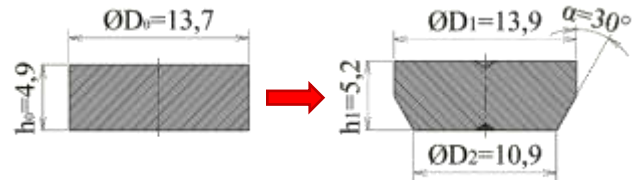
3.3 Technologické výpočty k variantě B

K určení, zda je součást vyrobitelná, nebo který stroj je vhodný pro její zhotovení, je potřeba znát určité fyzikální parametry v každé operaci. Pro zadanou součást byly provedeny výpočty deformací, napětí, přetvárného a deformačního odporu, tvářecí síly a tvářecí práce.

3.3.1 1. operace – předtvarování [5], [25]

Logaritmická deformace:

$$\varphi_A = \left| \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} \right| = \left| \ln \frac{13,9^2}{13,7^2} \right| = \underline{\underline{0,029}} \quad (3.17)$$



Obr. 60: Spěchovaná součást v 1. operaci

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice 2.10

$$\begin{aligned} \sigma_{p,A} &= 4,64 \cdot \varphi_A^5 + 16,76 \cdot \varphi_A^4 + 0,05 \cdot \varphi_A^3 - 157,91 \cdot \varphi_A^2 + 205,73 \cdot \varphi_A + 140,31 = \\ &= 4,64 \cdot 0,029^5 + 16,76 \cdot 0,029^4 + 0,05 \cdot 0,029^3 - 157,91 \cdot 0,029^2 + \\ &\quad + 205,73 \cdot 0,029 + 140,31 = \underline{\underline{146,14 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Měrná přetvárná práce: viz vztah 2.11

$$\begin{aligned} A_{jA} &= 0,0063 \cdot \varphi_A^4 - 0,0056 \cdot \varphi_A^3 + 0,0006 \cdot \varphi_A^2 + 0,19 \cdot \varphi_A = 0,0063 \cdot 0,029^4 - \\ &\quad - 0,0063 \cdot 0,029^4 - 0,0056 \cdot 0,029^3 + 0,0006 \cdot 0,029^2 + 0,19 \cdot 0,029 = \underline{\underline{0,006 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Osově napětí $\sigma_{z,A}$ dle Siebela pro plný špalík:

Dosazením za $h=h_1$; $D=D_1$; $r=0$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,A}$ do vztahu 2.13:

$$\sigma_{z\max,A} = -\sigma_{p,A} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f \cdot D_1}{h_1} \right) = -146,14 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 13,9}{5,2} \right) = \underline{\underline{-204,74 \text{ MPa}}} \quad (3.20)$$

Dosazením za $h=h_1$; $D=D_1$; $r=D_1/2$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,A}$ do vztahu 2.13:

$$\sigma_{z\min,A} = -\sigma_{p,A} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h_1} \cdot \left(\frac{D_1}{2} - \frac{D_1}{2} \right) \right] = -\sigma_{p,A} = \underline{\underline{-146,14 \text{ MPa}}} \quad (3.21)$$

$$\sigma_{z\text{stř},A} = \sigma_{z\min,A} + \frac{\sigma_{z\max,A} - \sigma_{z\min,A}}{3} = -146,14 + \frac{-204,74 + 146,14}{3} = \underline{\underline{-165,67 \text{ MPa}}} \quad (3.22)$$

Radiální napětí $\sigma_{r,A}$ dle Siebela pro plný špalík:

Dosazením za $h=h_1$; $D=D_1$; $r=0$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,A}$ do vztahu 2.12:

$$\sigma_{r\max,A} = -\sigma_{p,A} \cdot \frac{2 \cdot f \cdot D_1}{h_1} = 146,14 \cdot \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 13,9}{5,2} = \underline{\underline{-58,6 \text{ MPa}}} \quad (3.23)$$

Dosazením za $h=h_1$; $D=D_1$; $r=D_1/2$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,A}$ do vztahu 2.12:

$$\sigma_{r\min,A} = -\sigma_{p,A} \cdot \frac{2 \cdot f}{h_1} \cdot \left(\frac{D_1}{2} - \frac{D_1}{2} \right) = \underline{\underline{0 \text{ MPa}}} \quad (3.24)$$

Smykové napětí $\tau_{f,A}$ dle Siebela:

Dosazením za $f=0,15$; $\sigma_z(S)=\sigma_{z\min,A}=-\sigma_{p,A}$ do vztahu 2.14:

$$\tau_{f\min,A} = f \cdot \sigma_{z\min,A} = -f \cdot \sigma_{p,A} = -0,15 \cdot 146,14 = \underline{\underline{-21,92 \text{ MPa}}} \quad (3.25)$$

Dosazením za $f=0,15$; $\sigma_z(S)=\sigma_{z\max,A}$ do vztahu 2.14:

$$\tau_{f\max,A} = f \cdot \sigma_{z\max,A} = 0,15 \cdot (-204,74) = \underline{\underline{-30,71 \text{ MPa}}} \quad (3.26)$$

Deformační odpor $\sigma_{d,A}$ dle Siebela:

Dosažením za $h=h_1$; $D=D_1$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,A}$ do vztahu 2.15:

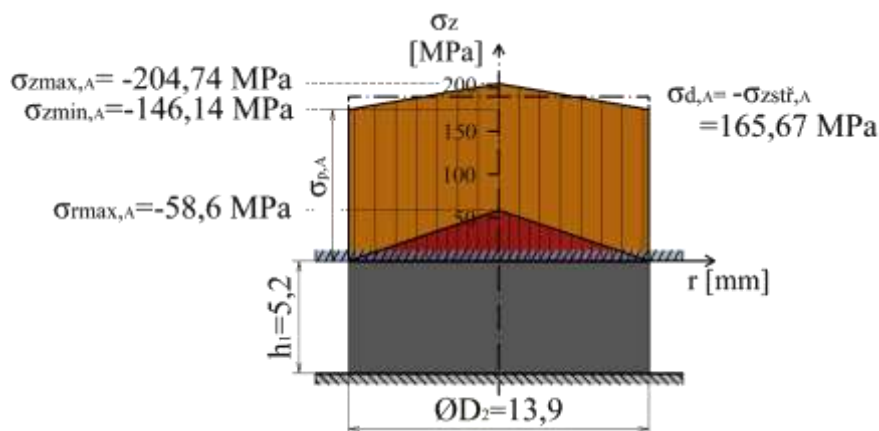
$$\sigma_{d,A} = -\sigma_{zstř} = \sigma_{p,A} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_1}{h_1}\right) = 146,14 \cdot \left(1 + \frac{0,15 \cdot 13,9}{3 \cdot 5,2}\right) = \underline{\underline{165,67 \text{ MPa}}} \quad (3.27)$$

Tvářecí síla:

Dosažením za $\sigma_d=\sigma_{d,A}$; $S=S_A$; $D=D_1$, do vztahu 2.43:

$$F_A = \sigma_{d,A} \cdot S_A = \sigma_{d,A} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 175,44 \cdot \frac{\pi \cdot 13,9^2}{4} = \underline{\underline{26,622 \text{ kN}}} \quad (3.28)$$

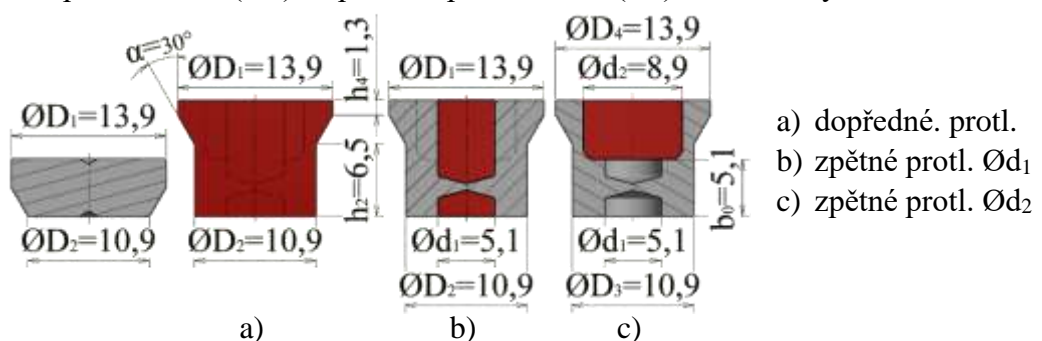
Průběh radiálního a osového napětí je znázorněn na obrázku 61.



Obr. 61: Průběh radiálního a osového napětí v 1. operaci

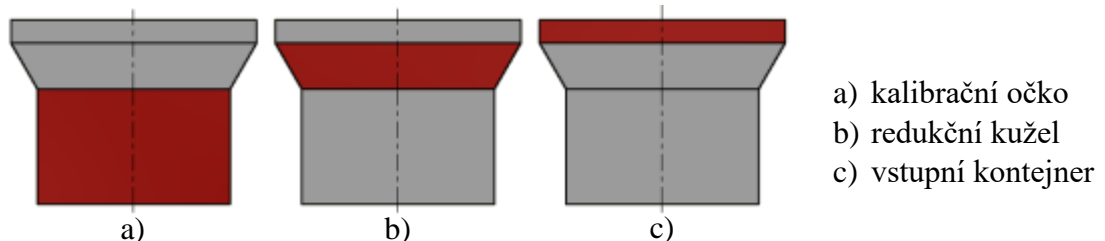
3.3.2 2. operace – kombinované protlačování [5], [13], [25]

Tento proces je nutné rozdělit do několika jednodušších podoperací tak, aby jejich složením pomocí superpozice vznikl výsledek pro celou součást. Operace se skládá z technologií dopředného protlačování (DP) a zpětného protlačování (ZP), znázorněných na obrázku 62.



Obr. 62: Dílčí podoperace kombinovaného protlačování ve II. operaci

- **Dopředné protlačování:** je nutné rozdělit na 3 části, vztažené k částem průtláčnice: (obr. 63)



Obr. 63: Dopředné protlačování-části protlačku

• **Dopředné protlačování – kalibrační očko:** (obr. 64)

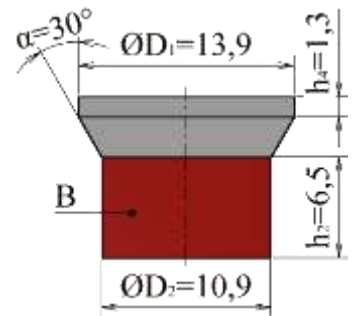
Geometrický model a odvození vztahů pro dopředné protlačování pro redukční očko lze nalézt v příloze 3.

Logaritmická deformace:

$$\varphi_B = |\varphi_A| + \left| \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} \right| = 0,029 + \left| \ln \frac{10,9^2}{13,9^2} \right| = \underline{\underline{0,515}} \quad (3.29)$$

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice 2.10

$$\begin{aligned} \sigma_{p,B} = & 4,64 \cdot \varphi_B^5 + 16,76 \cdot \varphi_B^4 + 0,05 \cdot \varphi_B^3 - 157,91 \cdot \varphi_B^2 \\ & + 205,73 \cdot \varphi_B + 140,31 = 4,64 \cdot 0,515^5 + 16,76 \cdot \\ & \cdot 0,515^4 + 0,05 \cdot 0,515^3 - 157,91 \cdot 0,515^2 + \\ & + 205,73 \cdot 0,515 + 140,3 = \underline{\underline{205,75 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.30)$$



Obr. 64: Dopředné protlačování části B

Měrná přetvárná práce: viz vztah 2.11

$$\begin{aligned} A_{j,B} = & 0,0063 \cdot \varphi_B^4 - 0,0056 \cdot \varphi_B^3 + 0,0006 \cdot \varphi_B^2 + 0,19 \cdot \varphi_B = 0,0063 \cdot 0,515^4 - \\ & - 0,0056 \cdot 0,515^3 + 0,0006 \cdot 0,515^2 + 0,19 \cdot 0,515 = \underline{\underline{0,098 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Osově napětí v kalibračním očku $\sigma_{z,III,B}$ dle Gubkina:

Dosažením za $z=h_2$; $D_{III(G)}=D_2$; $f_3=0,15$; $\sigma_{p,III(G)}=\sigma_{p,B}$ do vztahu 2.17:

$$\sigma_{z,max,B} = \sigma_{p,B} \cdot \frac{4 \cdot f_3}{D_2} \cdot h_2 = 205,75 \cdot \frac{4 \cdot 0,15}{10,9} \cdot 6,5 = \underline{\underline{73,62 \text{ MPa}}} \quad (3.32)$$

Dosažením za $z=0$; $D_{III(G)}=D_2$; $f_3=0,15$; $\sigma_{p,III(G)}=\sigma_{p,B}$ do vztahu 2.17:

$$\sigma_{z,min,B} = \underline{\underline{0 \text{ MPa}}}$$

Radiální napětí v kalibračním očku $\sigma_{r,B}$ dle Gubkina:

Dosažením za $\sigma_{p,III(G)}=\sigma_{p,B}$ do vztahu 2.18:

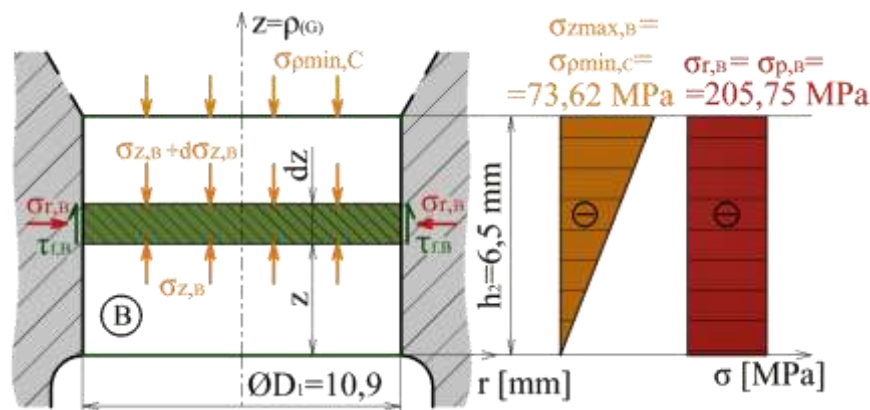
$$\sigma_{r,B} = \sigma_{p,B} = \underline{\underline{205,75 \text{ MPa}}} \quad (3.33)$$

Třecí napětí v kalibračním očku $\tau_{f,B}$:

Dosažením za $f_3=0,15$; $\sigma_{r,III(G)}=\sigma_{r,B}$ do vztahu 2.19:

$$\tau_{fB} = f_3 \cdot \sigma_{r,B} = 0,15 \cdot 205,75 = \underline{\underline{30,86 \text{ MPa}}} \quad (3.34)$$

Průběh radiálního a osověho napětí je znázorněn na obrázku 65.



Obr. 65: Geometrický model kalibračního očka

• **Dopředné protlačování – redukční kužel:** (obr. 66)

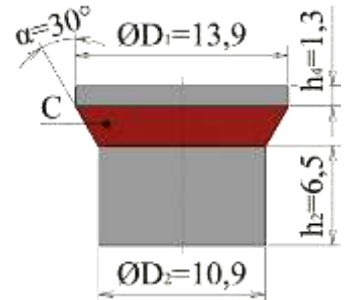
Geometrický model a odvození vztahů pro dopředné protlačování pro redukční očko lze nalézt v příloze 3.

Hodnoty napětí, deformací a přetvárných odporů v krajních bodech redukčního kužele jsou známy již z předchozích výpočtů a z výpočtů kalibračního očka.

Logaritmická deformace:

$$\varphi_{Cmin} = |\varphi_A| = \underline{\underline{0,029}} \quad (3.35)$$

$$\varphi_{Cmax} = |\varphi_B| = \underline{\underline{0,515}} \quad (3.36)$$



Obr. 3: Dopředné protlačování části C

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice 2.10

$$\sigma_{pmin,C} = \sigma_{p,A} = \underline{\underline{146,14 \text{ MPa}}} \quad (3.37)$$

$$\sigma_{pmax,C} = \sigma_{p,B} = \underline{\underline{205,75 \text{ MPa}}} \quad (3.38)$$

Měrná přetvárná práce: viz vztah 2.11

$$A_{jmin,C} = A_{j,A} = \underline{\underline{0,006 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \quad (3.39)$$

$$A_{jmax,C} = A_{j,B} = \underline{\underline{0,098 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \quad (3.40)$$

Střední přetvárný odpor: viz rovnice 2.20

$$\sigma_{ps,C} = (A_{j,B} - A_{j,A}) \cdot \frac{1000}{\varphi_B - \varphi_A} = (0,098 - 0,006) \cdot \frac{1000}{0,515 - 0,029} = \underline{\underline{189,66 \text{ MPa}}} \quad (3.41)$$

Osové napětí v redukčním kuželu $\sigma_{p,C}$ dle Gubkina:

Dosazením za $L_{III(G)}=h_2$; $D_{III(G)}=D_2$; $D=D_2$; $f_2=0,15$; $f_3=0,15$; $\sigma_{pIII(G)}=\sigma_{pmax,C}$; $\sigma_{pII(G)}=\sigma_{pmax,C}$; $\sigma_{pImin(G)}=\sigma_{zmax,B}$; $\alpha=30^\circ$ do vztahu 2.21:

$$\begin{aligned} \sigma_{pmin,C} = \sigma_{zmax,B} &= \sigma_{pmax,C} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{h_2}{D_2} \cdot \frac{\sigma_{pmax,C}}{\sigma_{pmax,C}} + \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D_2}{D_2} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\text{tg}\alpha}} - \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} - 1 \right] \\ &= 205,75 \cdot \left[\left(4 \cdot 0,15 \cdot \frac{6,5}{10,9} \cdot \frac{205,75}{205,75} + \frac{\text{tg}(30^\circ)}{0,15} + 1 \right) \cdot \left(\frac{10,9}{10,9} \right)^{\frac{2 \cdot 0,15}{\text{tg}(30^\circ)}} - \frac{\text{tg}(30^\circ)}{0,15} - 1 \right] \\ &= \underline{\underline{73,62 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Dosazením za $L_{III(G)}=h_2$; $D_{III(G)}=D_2$; $D=D_1$; $f_2=0,15$; $f_3=0,15$; $\sigma_{pIII(G)}=\sigma_{pmax,C}$; $\sigma_{pII(G)}=\sigma_{pS,C}$; $\sigma_{pIImax(G)}=\sigma_{zmin,D}$; $\alpha=30^\circ$ do vztahu 2.21:

$$\begin{aligned} \sigma_{pmax,C} = \sigma_{zmin,D} &= \sigma_{pS,C} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{h_2}{D_2} \cdot \frac{\sigma_{pmax,C}}{\sigma_{pS,C}} + \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\text{tg}\alpha}} - \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} - 1 \right] = \\ &= 189,66 \cdot \left[\left(4 \cdot 0,15 \cdot \frac{6,5}{10,9} \cdot \frac{205,75}{189,66} + \frac{\text{tg}(30^\circ)}{0,15} + 1 \right) \cdot \left(\frac{13,9}{10,9} \right)^{\frac{2 \cdot 0,15}{\text{tg}(30^\circ)}} - \frac{\text{tg}(30^\circ)}{0,15} - 1 \right] \\ &= \underline{\underline{207,37 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Napětí na kuželové stěně redukčního kužele $\sigma_{\varphi,c}$ dle Gubkina:

Dosažením za $\sigma_{pII(G)} = \sigma_{pS,C}$; $\sigma_{\rho II(G)} = \sigma_{\rho max,C}$ do vztahu 2.22:

$$\sigma_{\varphi max,C} = \sigma_{\rho max,C} + \sigma_{pS,C} = 207,37 + 189,66 = \underline{\underline{397,04 \text{ MPa}}} \quad (3.44)$$

Dosažením za $\sigma_{pII(G)} = \sigma_{pS,C}$; $\sigma_{\rho II(G)} = \sigma_{\rho min,C}$ do vztahu 2.22:

$$\sigma_{\varphi min,C} = \sigma_{\rho min,C} + \sigma_{pS,C} = 73,62 + 189,66 = \underline{\underline{263,28 \text{ MPa}}} \quad (3.45)$$

Třecí napětí v redukčním kuželu $\tau_{f,C}$:

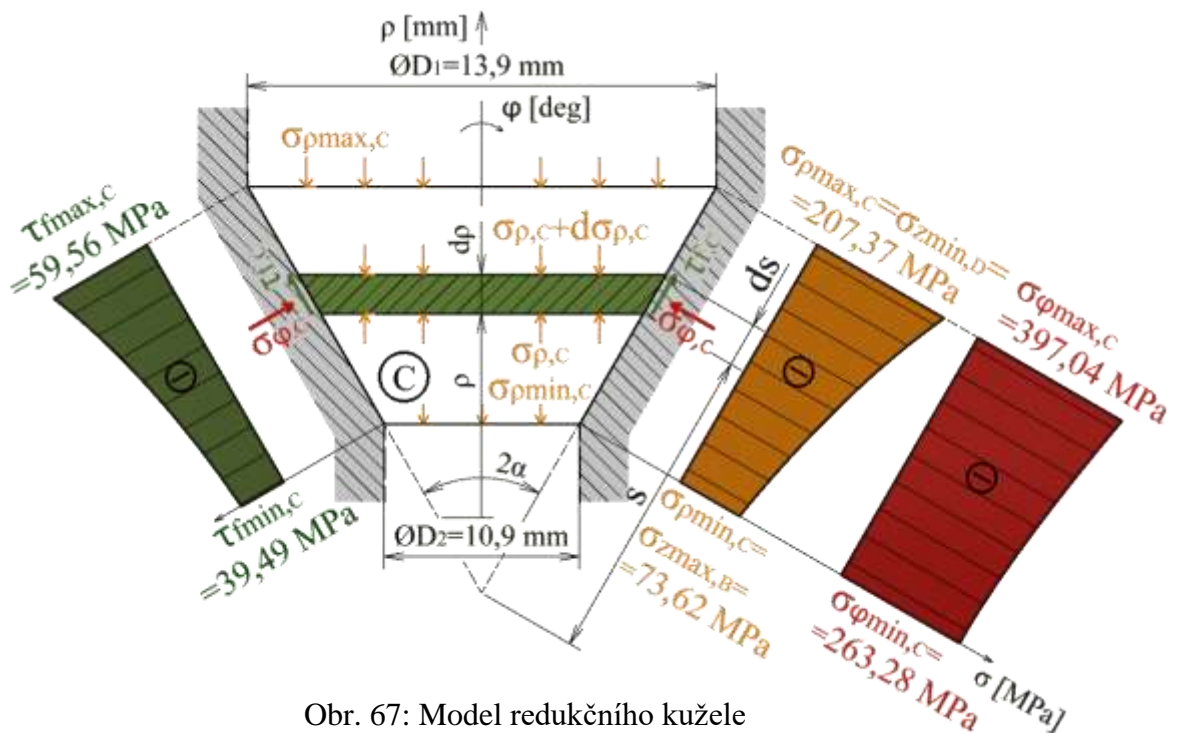
Dosažením za $f_2 = 0,15$; $\sigma_{\varphi II(G)} = \sigma_{\varphi min,C}$ do vztahu 2.23:

$$\tau_{f min,C} = f_2 \cdot \sigma_{\varphi min,C} = 0,15 \cdot 263,28 = \underline{\underline{39,49 \text{ MPa}}} \quad (3.46)$$

Dosažením za $f_2 = 0,15$; $\sigma_{\varphi II(G)} = \sigma_{\varphi max,C}$ do vztahu 2.23:

$$\tau_{f max,C} = f_2 \cdot \sigma_{\varphi max,C} = 0,15 \cdot 397,04 = \underline{\underline{59,56 \text{ MPa}}} \quad (3.47)$$

Průběh radiálního a osového napětí je znázorněn na obrázku 67.



Obr. 67: Model redukčního kužele

- **Dopředné protlačování – vstupní kontejner:** (obr. 68)

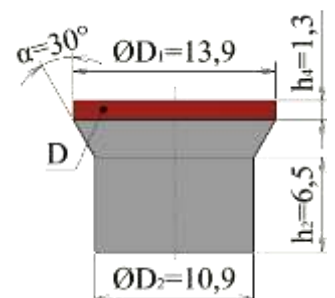
Geometrický model a odvození vztahů pro dopředné protlačování pro vstupní kontejner lze nalézt v příloze 3.

Logaritmická deformace:

$$\varphi_D = |\varphi_A| = \underline{\underline{0,029}} \quad (3.48)$$

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice 2.10

$$\sigma_{p,D} = \sigma_{p,A} = \underline{\underline{146,14 \text{ MPa}}} \quad (3.49)$$



Obr. 68: Dopředné protlačování části D

Měrná přetvárná práce: viz vztah 2.11

$$A_{j,D} = A_{j,A} = \underline{\underline{0,006 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \quad (3.50)$$

Osově napětí ve vstupním kontejneru $\sigma_{z,D}$ dle Gubkina:

Dosažením za $f_1=0,15$; $D_{I(G)}=D_I$; $\sigma_{\rho I \max(G)}=\sigma_{\rho \max,C}$; $z=0$; $\mu=0,33$ do vztahu 2.24:

$$\sigma_{z \min,D} = \sigma_{\rho \max,C} \cdot e^0 = \sigma_{\rho \max,C} = \underline{\underline{207,37 \text{ MPa}}} \quad (3.51)$$

Dosažením za $f_1=0,15$; $D_{I(G)}=D_I$; $\sigma_{\rho I \max(G)}=\sigma_{\rho \max,C}$; $z=h_4$; $\mu=0,33$ do vztahu 2.24:

$$\sigma_{z \max,D} = \sigma_{\rho \max,C} \cdot e^{h_4 \cdot \frac{4 \cdot f_1}{D_1} \cdot \frac{\mu}{1-\mu}} = 207,37 \cdot e^{1,3 \cdot \frac{4 \cdot 0,15}{13,9} \cdot \frac{0,33}{1-0,33}} = \underline{\underline{213,18 \text{ MPa}}} \quad (3.52)$$

Radiální napětí ve vstupním kontejneru $\sigma_{r,D}$ dle Gubkina:

Dosažením za $f_1=0,15$; $\sigma_{z I(G)}=\sigma_{z \min,D}$; $\mu=0,33$ do vztahu 2.25:

$$\sigma_{r \min,D} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \sigma_{z \min,D} = \frac{0,33}{1-0,33} \cdot 207,37 = \underline{\underline{102,14 \text{ MPa}}} \quad (3.53)$$

Dosažením za $f_1=0,15$; $\sigma_{z I(G)}=\sigma_{z \min,D}$; $\mu=0,33$ do vztahu 2.25:

$$\sigma_{r \max,D} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \sigma_{z \max,D} = \frac{0,33}{1-0,33} \cdot 213,18 = \underline{\underline{105 \text{ MPa}}} \quad (3.54)$$

Třecí napětí ve vstupním kontejneru $\tau_{r,D}$ dle Gubkina:

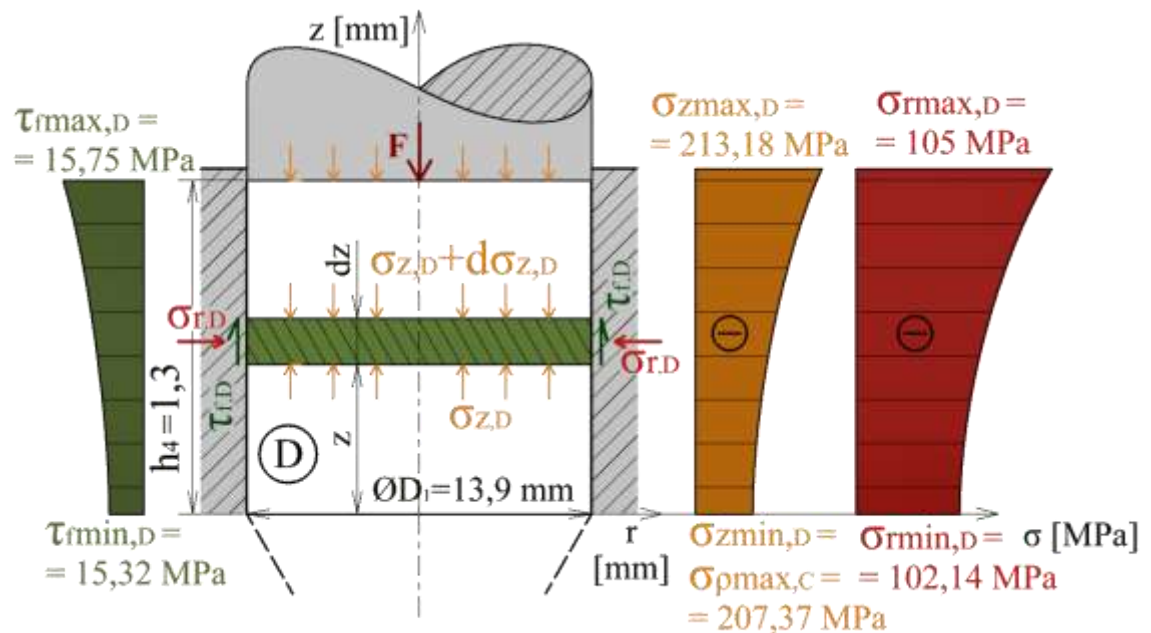
Dosažením za $f_1=0,15$; $\sigma_{r I(G)}=\sigma_{r \min,D}$ do vztahu 2.26:

$$\tau_{f \min,D} = f_1 \cdot \sigma_{r \min,D} = 0,15 \cdot 102,14 = \underline{\underline{15,32 \text{ MPa}}} \quad (3.55)$$

Dosažením za $f_1=0,15$; $\sigma_{r I(G)}=\sigma_{r \max,D}$ do vztahu 2.26:

$$\tau_{f \max,D} = f_1 \cdot \sigma_{r \max,D} = 0,15 \cdot 105 = \underline{\underline{15,75 \text{ MPa}}} \quad (3.56)$$

Průběh radiálního a osověho napětí je znázorněn na obrázku 69.



Obr. 69: Geometrický model vstupního kontejneru

• **Dopředné protlačování – řešení pro celou průtláčnici:**

Deformační odpor $\sigma_{d(G)}$ dle Gubkina:

Dosazením za $\sigma_{zmax(G)} = \sigma_{zmax,D}$; $\sigma_{pS(G)} = \sigma_{pS,C}$; $f_1 = f_2 = f_3 = 0,15$; $L_{III(G)} = h_2$; $L_I(G) = h_4$; $\sigma_{pIII(G)} = \sigma_{p,B}$; $D_{III(G)} = D_2$; $D_I(G) = D_1$; $\alpha = 30^\circ$; $\mu = 0,33$ do vztahu 2.27:

$$\sigma_{d(G)} \equiv \sigma_{zmax,D} = \sigma_{pS,C} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{h_2}{D_2} \cdot \frac{\sigma_{p,B}}{\sigma_{pS,C}} + \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\text{tg}\alpha}} - \frac{\text{tg}\alpha}{f_2} - 1 \right] \cdot e^{\frac{\mu}{1-\mu} \cdot 4 \cdot f_1 \cdot \frac{h_4}{D_1}} = 189,66 \cdot \left[\left(4 \cdot 0,15 \cdot \frac{6,5}{10,9} \cdot \frac{205,75}{189,66} + \frac{\text{tg}30^\circ}{0,15} + 1 \right) \cdot \left(\frac{13,9}{10,9} \right)^{\frac{2 \cdot 0,15}{\text{tg}30^\circ}} - \frac{\text{tg}30^\circ}{0,15} - 1 \right] \cdot e^{\frac{0,33}{1-0,33} \cdot 4 \cdot 0,15 \cdot \frac{1,3}{13,9}} = \underline{\underline{213,18 \text{ MPa}}} \quad (3.57)$$

Deformační odpor $\sigma_{d(F)}$ dle Feldmanna:

Dosazením za $\sigma_{pS(G)} = \sigma_{pS,C}$; $f_1 = f_2 = f_3 = 0,15$; $D_I(G) = D_1$; $D_{III(G)} = D_2$; $L_{III(G)} = h_2$; $L_I(G) = h_4$; $\sigma_{pI(G)} = \sigma_{p,D}$; $\sigma_{pIII(G)} = \sigma_{p,B}$; $\hat{\alpha} = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} = \frac{\pi \cdot 30^\circ}{180} = 0,52$ do vztahu 2.28):

$$\sigma_{d(F)} = \sigma_{pS,C} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\hat{\alpha}} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \hat{\alpha} \right] + 4 \cdot f_3 \cdot \frac{h_2}{D_2} \cdot \sigma_{p,B} + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{h_4}{D_1} \cdot \sigma_{p,D} = 189,66 \cdot \left[\left(1 + \frac{0,15}{0,52} \right) \cdot \ln \left(\frac{13,9}{10,9} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,52 \right] + 4 \cdot 0,15 \cdot \frac{6,5}{10,9} \cdot 205,75 + 4 \cdot 0,15 \cdot \frac{1,3}{13,9} \cdot 146,14 = \underline{\underline{266,67 \text{ MPa}}} \quad (3.58)$$

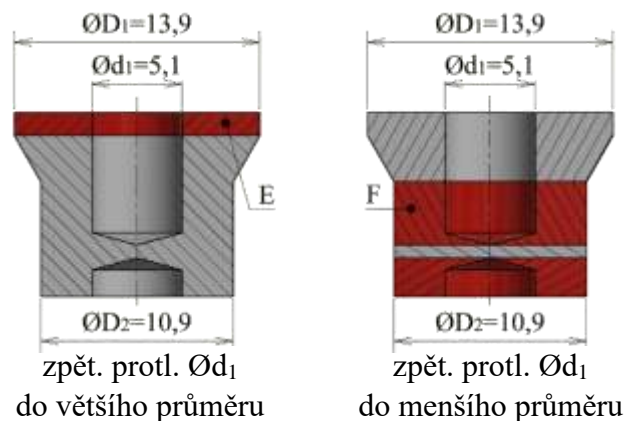
Deformační odpor z výpočtu dle Feldmanna vyšel vyšší. Z toho důvodu použijeme výsledek z tohoto výpočtu k určení výsledné tvářecí síly.

Tvářecí síla:

$$F_{D(G)} = \sigma_{d,D(F)} \cdot S_D = \sigma_{d,D(F)} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 266,67 \cdot \frac{\pi \cdot 13,9^2}{4} = \underline{\underline{40,47 \text{ kN}}} \quad (3.59)$$

• **Zpětné protlačování $\text{Ø}d_1$:**

Proces zpětného protlačování průměru $\text{Ø}d_1$ je potřeba rozdělit na dvě části (obr. 70) a to na protlačování průměru $\text{Ø}d_1$ do většího průměru (část E) a do menšího průměru (část F). Pro každou část vyjdou různé výsledky pro výpočet deformace, přetvárného odporu, deformačního odporu a tvářecí síly. Pro volbu způsobu výpočtů bude třeba zvážit, zdali použít k výpočtům vztahy dle Siebela, nebo dle Dippera.



Obr. 70: Rozdělení protlačování otvoru $\text{Ø}d_1$

• **Zpětné protlačování $\varnothing d_1$ do většího průměru $\varnothing D_1$:**

V rámci této podoperace se protlačí pouze jeden otvor (obr. 71). Výběr vhodného způsobu výpočtu byl určen z podmínek pro využití vztahů, určených jejími autory.

Podmínka využití vztahu dle Dippera:

Dosazením do podmínky ze vztahu 2.30 za $D_i=D_1$; $d_i=d_1$:

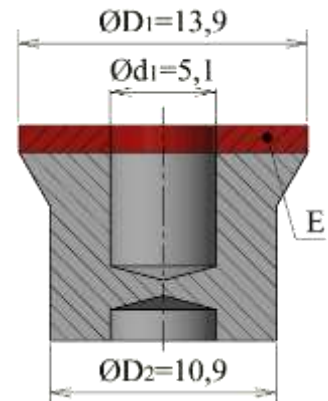
$$\frac{d_1^2}{D_1^2} = \frac{5,1^2}{13,9^2} = 0,13 \rightarrow 0,5 \sim 0,6 \rightarrow \text{nevyhovuje} \quad (3.60)$$

Podmínka využití vztahu dle Siebela:

Dosazením do podmínky ze vztahu 2.29 za $s=(D_1-d_1)/2$; $d_i=d_1$:

$$\frac{D_1 - d_1}{2} > 0,1 \cdot d_1 \rightarrow \frac{13,9 - 5,1}{2} > 0,1 \cdot 5,1 \quad (3.61)$$

$$4,4 > 0,51 \rightarrow \text{podmínka vyhovuje}$$



Obr. 71: Zpětné protlačování otvoru $\varnothing d_1$ do většího průměru $\varnothing D_1$

Vzor výpočtů pro operaci zpětného protlačování dle Siebela:

Logaritmická deformace:

$$\varphi_E = |\varphi_D| + \left| \ln \frac{D_1^2 - d_1^2}{D_1^2} \right| = 0,029 + \left| \ln \frac{13,9^2 - 5,1^2}{13,9^2} \right| = \underline{\underline{0,174}} \quad (3.62)$$

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice 2.10

$$\begin{aligned} \sigma_{p,E} &= 4,64 \cdot \varphi_E^5 + 16,76 \cdot \varphi_E^4 + 0,05 \cdot \varphi_E^3 - 157,91 \cdot \varphi_E^2 + 205,73 \cdot \varphi_E + 140,31 = \\ &= 4,64 \cdot 0,174^5 + 16,76 \cdot 0,174^4 + 0,05 \cdot 0,174^3 - 157,91 \cdot 0,174^2 + \\ &\quad + 205,73 \cdot 0,174 + 140,31 = \underline{\underline{171,28 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.63)$$

Měrná přetvárná práce: viz vztah 2.11

$$\begin{aligned} A_{j,E} &= 0,0063 \cdot \varphi_E^4 - 0,0056 \cdot \varphi_E^3 + 0,0006 \cdot \varphi_E^2 + 0,19 \cdot \varphi_E = \\ &= 0,0063 \cdot 0,174^4 - 0,0056 \cdot 0,174^3 + 0,0006 \cdot 0,174^2 + 0,19 \cdot 0,174 \\ &= \underline{\underline{0,033 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Deformační odpor $\sigma_{d,E}$ dle Siebela:

Dosazením za $\sigma_p=\sigma_{p,E}$; $D_i=D_1$; $d_i=d_1$ do vztahu 2.42:

$$\begin{aligned} \sigma_{d,E} &= 1,152 \cdot \sigma_{p,E} \cdot \frac{D_1^2}{d_1^2} \cdot \left(\log \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_1^2} + \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \cdot \log \frac{D_1^2}{d_1^2} + \log \frac{d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \right) = \\ &= 1,152 \cdot 171,28 \cdot \frac{13,9^2}{5,1^2} \cdot \left(\log \frac{13,9^2}{13,9^2 - 5,1^2} + \frac{13,9^2}{13,9^2 - 5,1^2} \cdot \log \frac{13,9^2}{5,1^2} + \right. \\ &\quad \left. + \log \frac{5,1^2}{13,9^2 - 5,1^2} \right) = \underline{\underline{382,64 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.65)$$

Tvářecí síla:

$$F_E = \sigma_{d,E} \cdot S_E = \sigma_{d,E} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 382,64 \cdot \frac{\pi \cdot 5,1^2}{4} = \underline{\underline{7,82 \text{ kN}}} \quad (3.66)$$

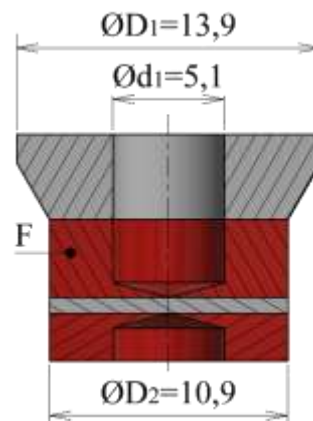
• **Zpětné protlačování $\text{Ø}d_1$ do menšího průměru $\text{Ø}D_2$:** (obr. 72)

V rámci této podoperace (obr. 72) se protlačují dva stejné otvory $\text{Ø}d_1$ do válcové části II o průměru $\text{Ø}D_2$, konkrétně shora pomocí průtlačníku a zespoda pomocí vyhadzovače, který plní funkci průtlačníku. Výběr vhodného způsobu výpočtu byl určen z podmínek pro využití vztahů, určených jejich autory.

Postup výpočtů je obdobný jako výpočet v předchozí podoperaci zpětného protlačování $\text{Ø}d_1$ do většího průměru $\text{Ø}D_1$ dle Siebela – proto jsou dále uvedeny pouze jeho výsledky a celý postup lze nalézt v příloze 5.

Tab. 13: Výsledky výpočtů zpětného protlačování části F

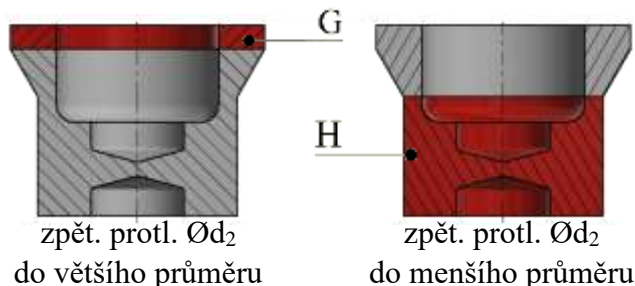
Podmínka pro využití vztahů splněna:	dle Dippera	Ne
	dle Siebela	Ano
Veličina	Hodnota	
Logaritmická deformace φ_F [-]	0,762	
Přirozený přetvárný odpor $\sigma_{p,F}$ [MPa]	212,25	
Měrná přetvárná práce $A_{j,F}$ [J · mm ⁻³]	0,145	
Deformační odpor $\sigma_{d,F}$ [MPa]	446,22	
Tvářecí síla F_F [kN]	9,11	



Obr. 72: Zpětné protlačování otvoru $\text{Ø}d_1$ do menšího průměru $\text{Ø}D_2$

• **Zpětné protlačování $\text{Ø}d_2$:**

Proces zpětného protlačování průměru $\text{Ø}d_2$ je rovněž potřeba rozdělit na dvě části (obr. 73) a to na protlačování průměru $\text{Ø}d_2$ do většího průměru (část G) a do menšího průměru (část H). Pro každou část vyjdou odlišné výsledky pro výpočet deformace, přetvárného odporu, deformačního odporu a síly.



Obr. 73: Rozdělení protlačování otvoru $\text{Ø}d_2$

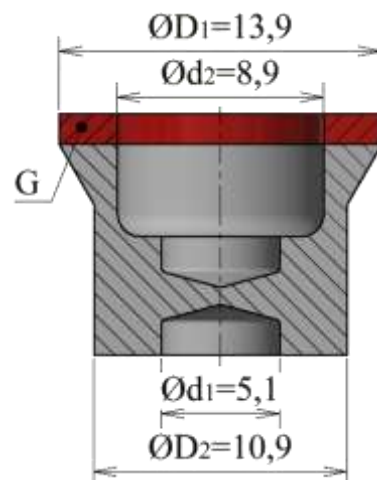
• **Zpětné protlačování $\text{Ø}d_2$ do většího průměru:** (obr. 74)

Výběr vhodného způsobu výpočtu byl určen z podmínek pro využití vztahů, určených jejich autory.

Postup výpočtů je opět obdobný jako výpočet v předchozí podoperaci – proto jsou dále uvedeny pouze jeho výsledky a celý postup lze nalézt v příloze 5.

Tab. 14: Výsledky výpočtů zpětného protlačování části G

Podmínka pro využití vztahů splněna:	dle Dippera	Ne
	dle Siebela	Ano
Veličina	Hodnota	
Logaritmická deformace φ_G [-]	0,557	
Přirozený přetvárný odpor $\sigma_{p,G}$ [MPa]	207,76	
Měrná přetvárná práce $A_{j,G}$ [J · mm ⁻³]	0,106	
Deformační odpor $\sigma_{d,G}$ [MPa]	424,61	
Tvářecí síla F_G [kN]	26,42	



Obr. 74: Zpětné protlačování otvoru $\text{Ø}d_2$ do většího průměru $\text{Ø}D_1$

• **Zpětné protlačování $\text{Ø}d_2$ do menšího průměru $\text{Ø}D_2$:**

V rámci této podoperace (obr. 75) se protlačuje otvor $\text{Ø}d_2$ do válcové části II o průměru $\text{Ø}D_2$, ve které byl v předchozí podoperaci vyhotoven menší otvor $\text{Ø}d_1$. Toto zjednodušení bylo provedeno kvůli náročnosti výpočtů protlačování průměru $\text{Ø}d_1$ dle Dippera. V praxi jsou oba otvory vytvořeny jedním nástrojem v téže operaci.

Podmínka využití vztahu dle Dippera:

Dosažením do podmínky ze vztahu 2.30 za $D_i=D_2$; $d_i=d_2$:

$$\frac{d_2^2}{D_2^2} = \frac{8,9^2}{10,9^2} = 0,67 > 0,5 \sim 0,6 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (3.67)$$

Pro určení výpočetních vztahů dle Dippera podle přílohy 4 bylo provedeno rozdělení na tři části (obr. 75). Napětí v konkrétních oblastech jsou indexována podle označení jednotlivých částí na obrázku.

Logaritmická deformace pro části I, II a III dle Dippera:

Dosažením za $b=b_0$; $h_0=h_5+b_0$ do vztahu 2.32:

Pozn: pro výchozí výšku bylo počítáno s výškou součásti po dopředném protlačování

$$\varphi_{I,H} = |\varphi_F| + \ln \frac{h_5 + b_0}{b_0} = 0,762 + \ln \frac{5,3 + 5,1}{5,1} = 0,762 + \ln \frac{10,4}{5,1} = \underline{\underline{1,475}} \quad (3.68)$$

Dosažením za $b=b_0$; $h_0=h_0$; $d_i=d_2$; $s=s$ do vztahu 2.33:

$$\varphi_{III,H} = |\varphi_F| + \ln \frac{h_5 + b_0}{b_0} \cdot \left(1 + \ln \frac{d_2}{8 \cdot s}\right) = 0,762 + \ln \frac{10,4}{5,1} \cdot \left(1 + \ln \frac{8,9}{8}\right) = \underline{\underline{1,551}} \quad (3.69)$$

$$\varphi_{II,H} = \varphi_{III,H} - \varphi_{I,H} = 1,551 - 1,475 = \underline{\underline{0,076}} \quad (3.70)$$

Měrná přetvárná práce: viz vztah 2.11

$$A_{jI,H} = 0,0063 \cdot \varphi_{I,H}^4 - 0,0056 \cdot \varphi_{I,H}^3 + 0,0006 \cdot \varphi_{I,H}^2 + 0,19 \cdot \varphi_{I,H} = 0,0063 \cdot 1,475^4 - 0,0056 \cdot 1,475^3 + 0,0006 \cdot 1,475^2 + 0,19 \cdot 1,475 = \underline{\underline{0,293}} \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (3.71)$$

$$A_{jIII,H} = 0,0063 \cdot \varphi_{III,H}^4 - 0,0056 \cdot \varphi_{III,H}^3 + 0,0006 \cdot \varphi_{III,H}^2 + 0,19 \cdot \varphi_{III,H} = 0,0063 \cdot 1,551^4 - 0,0056 \cdot 1,551^3 + 0,0006 \cdot 1,551^2 + 0,19 \cdot 1,551 = \underline{\underline{0,312}} \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (3.72)$$

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice 2.10

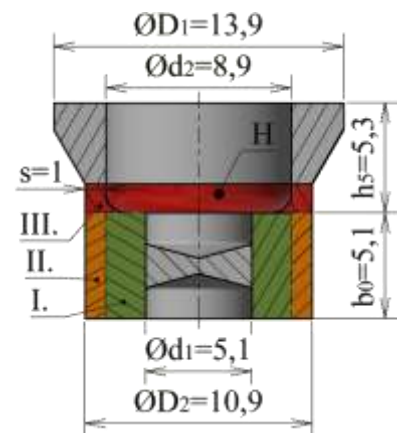
$$\sigma_{pI,H} = 4,64 \cdot \varphi_{I,H}^5 + 16,76 \cdot \varphi_{I,H}^4 + 0,05 \cdot \varphi_{I,H}^3 - 157,91 \cdot \varphi_{I,H}^2 + 205,73 \cdot \varphi_{I,H} + 140,31 = 4,64 \cdot 1,475^5 + 16,76 \cdot 1,475^4 + 0,05 \cdot 1,475^3 - 157,91 \cdot 1,475^2 + 205,73 \cdot 1,475 + 140,31 = \underline{\underline{212,09}} \text{ MPa} \quad (3.73)$$

$$\sigma_{pIII,H} = 4,64 \cdot \varphi_{III,H}^5 + 16,76 \cdot \varphi_{III,H}^4 + 0,05 \cdot \varphi_{III,H}^3 - 157,91 \cdot \varphi_{III,H}^2 + 205,73 \cdot \varphi_{III,H} + 140,31 = 4,64 \cdot 1,551^5 + 16,76 \cdot 1,551^4 + 0,05 \cdot 1,551^3 - 157,91 \cdot 1,551^2 + 205,73 \cdot 1,551 + 140,31 = \underline{\underline{218,34}} \text{ MPa} \quad (3.74)$$

Střední přetvárný odpor $\sigma_{pII,H}$ v oblasti II dle Dippera:

$$\sigma_{pII,H} = \frac{A_{jIII,H} - A_{jI,H}}{\varphi_{II,H}} \cdot 10^3 = \frac{0,312 - 0,293}{0,076} \cdot 10^3 \cong \underline{\underline{215,21}} \text{ MPa} \quad (3.75)$$

pozn: výsledek pro $\sigma_{pII,H}$ vychází pouze po dosažení nezaokrouhlených hodnot!



Obr. 75: Zpětné protlačování otvoru $\text{Ø}d_2$ do menšího průměru $\text{Ø}D_2$

Osově napětí $\sigma_{zII,H}$ v oblasti II dle Dippera:

Dosažením za $f_{2s}=0,5 \cdot (f_1+0,5)$; $D_i=D_2$; $d_i=d_2$; $\sigma_{pII(D)}=\sigma_{pIII,H}$; $z=b_0$; $b=b_0$ do rovnice 2.34:

$$\sigma_{zIImin,H} = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot (f_1 + 0,5) \cdot \sigma_{pIII,H}}{(D_2 - d_2)} \cdot (b_0 - b_0) = \underline{\underline{0 \text{ MPa}}} \quad (3.76)$$

Dosažením za $f_{2s}=0,5 \cdot (f_1+0,5)$; $D_i=D_2$; $d_i=d_2$; $\sigma_{pII(D)}=\sigma_{pI,H}$; $z=0$; $b=b_0$ do rovnice 2.34:

$$\begin{aligned} \sigma_{zIImax,H} &= \frac{4 \cdot 0,5 \cdot (f_1 + 0,5) \cdot \sigma_{pI,H}}{(D_2 - d_2)} \cdot b_0 = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot (0,15 + 0,5) \cdot 218,34}{(10,9 - 8,9)} \cdot 5,1 = (3.77) \\ &= \underline{\underline{723,78 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

Radiální napětí $\sigma_{rII,H}$ v oblasti II dle Dippera:

Dosažením za $f_{2s}=0,5 \cdot (f_1+0,5)$; $D_i=D_2$; $d_i=d_2$; $\sigma_{pII(D)}=\sigma_{pIII,H}$; $z=b_0$; $b=b_0$ do rovnice 2.35:

$$\sigma_{rIImin,H} = \left[\frac{4 \cdot 0,5 \cdot (f_1 + 0,5)}{(D_2 - d_2)} \cdot (b_0 - b_0) + 1 \right] \cdot \sigma_{pIII,H} = \sigma_{pIII,H} = \underline{\underline{218,34 \text{ MPa}}} \quad (3.78)$$

Dosažením za $f_{2s}=0,5 \cdot (f_1+0,5)$; $D_i=D_2$; $d_i=d_2$; $\sigma_{pII(D)}=\sigma_{pI,H}$; $z=0$; $b=b_0$ do rovnice 2.35:

$$\begin{aligned} \sigma_{rIImax,H} &= \left[\frac{4 \cdot 0,5 \cdot (f_1 + 0,5)}{(D_2 - d_2)} \cdot (b_0 - 0) + 1 \right] \cdot \sigma_{pI,H} = (3.79) \\ &= \left[\frac{4 \cdot 0,5 \cdot (0,15 + 0,5)}{(10,9 - 8,9)} \cdot 5,1 + 1 \right] \cdot 212,09 = \underline{\underline{915,16 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

Střední radiální napětí $\sigma_{rII,s,H}$ v oblasti II dle Dippera:

Dosažením za $f_{2s}=0,5 \cdot (f_1+0,5)$; $D_i=D_2$; $d_i=d_2$; $\sigma_{pII(D)}=\sigma_{pII,s,H}$; $z=b_0/2$; $b=b_0$ do rovnice 2.36:

$$\begin{aligned} \sigma_{rII,s,H} &= \left[\frac{4 \cdot 0,5 \cdot (f_1 + 0,5)}{(D_2 - d_2)} \cdot \left(b_0 - \frac{b_0}{2} \right) + 1 \right] \cdot \sigma_{pII,s,H} = (3.80) \\ &= \left[\frac{4 \cdot 0,5 \cdot (0,15 + 0,5)}{(10,9 - 8,9)} \cdot \left(5,1 - \frac{5,1}{2} \right) + 1 \right] \cdot 215,21 = \underline{\underline{571,92 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

Střední smykové napětí $\tau_{fII,s,H}$ v oblasti II dle Dippera:

Dosažením za $f_{2s}=0,5 \cdot (f_1+0,5)$; $\sigma_{pII(D)}=\sigma_{pII,s,H}$; do rovnice 2.37:

$$\tau_{fII,s,H} = 0,5 \cdot (f_1 + 0,5) \cdot \sigma_{pII,s,H} = 0,5 \cdot (0,15 + 0,5) \cdot 215,21 = \underline{\underline{169,94 \text{ MPa}}} \quad (3.81)$$

Osově napětí $\sigma_{zI,H}$ v oblasti I dle Dippera:

Dosažením za $\sigma_{rII(s,D)}=\sigma_{rII,s,H}$; $\sigma_{pI(D)}=\sigma_{pI,H}$; $f_1=0,15$; $b=b_0$, $d_i=d_2$; $r=d_2/2$ do rovnice 2.38:

$$\begin{aligned} \sigma_{zImin,H} &= \sigma_{rII,s,H} + \sigma_{pI,H} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b_0} \cdot \left(\frac{d_2}{2} - \frac{d_2}{2} \right) + 1 \right] = (3.82) \\ &= 571,92 + 212,09 \cdot \left[\frac{2 \cdot 0,15}{5,1} \cdot \left(\frac{8,9}{2} - \frac{8,9}{2} \right) + 1 \right] = \underline{\underline{784,01 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

Dosažením za $\sigma_{rII(s,D)}=\sigma_{rII,s,H}$; $\sigma_{pI(D)}=\sigma_{pI,H}$; $f_1=0,15$; $b=b_0$, $d_i=d_2$; $r=d_1/2$ do rovnice 2.38:

$$\begin{aligned} \sigma_{zImax,H} &= \sigma_{rII,s,H} + \sigma_{pI,H} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b_0} \cdot \left(\frac{d_2}{2} - \frac{d_1}{2} \right) + 1 \right] = (3.83) \\ &= 571,92 + 212,09 \cdot \left[\frac{2 \cdot 0,15}{5,1} \cdot \left(\frac{8,9}{2} - \frac{5,1}{2} \right) + 1 \right] = \underline{\underline{807,72 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

Střední osové napětí $\sigma_{zls,H}$ v oblasti I dle Dippera:

Dosažením za $\sigma_{rlls(D)} = \sigma_{rlls,H}$; $\sigma_{pl(D)} = \sigma_{pl,H}$; $f_1 = 0,15$; $d = d_2$; $r = d_1/2 + (d_2 - d_1)/4$; $b = b_0$ do rovnice 2.38:

$$\begin{aligned} \sigma_{zls,H} = \sigma_{rlls,H} + \sigma_{pl,H} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b_0} \cdot \left(\frac{d_2}{2} - \frac{d_1}{2} - \frac{(d_2 - d_1)}{4} \right) + 1 \right] = 571,92 + \\ + 212,09 \cdot \left[\frac{2 \cdot 0,15}{5,1} \cdot \left(\frac{8,9}{2} - \frac{5,1}{2} - \frac{8,9 - 5,1}{4} \right) + 1 \right] = \underline{\underline{795,9 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.84)$$

Radiální napětí $\sigma_{rls,H}$ v oblasti I dle Dippera:

Dosažením za $\sigma_{zI(D)} = \sigma_{zImin,H}$; $\sigma_{pl(D)} = \sigma_{pl,H}$ do rovnice 2.39:

$$\sigma_{rlmin,H} = \sigma_{zImin,H} - \sigma_{pl,H} = 784,01 - 212,09 = \underline{\underline{571,92 \text{ MPa}}} \quad (3.85)$$

Dosažením za $\sigma_{zI(D)} = \sigma_{zImax,H}$; $\sigma_{pl(D)} = \sigma_{pl,H}$ do rovnice 2.39:

$$\sigma_{r1max,I} = \sigma_{zImax,H} - \sigma_{pl,H} = 807,72 - 212,09 = \underline{\underline{595,63 \text{ MPa}}} \quad (3.86)$$

Smykové napětí $\tau_{fl,H}$ v oblasti I dle Dippera:

Dosažením za $f_1 = 0,15$; $\sigma_{pl(D)} = \sigma_{pl,H}$; do rovnice 2.40:

$$\tau_{fl,H} = f_1 \cdot \sigma_{pl,H} = 0,15 \cdot 212,09 = \underline{\underline{31,81 \text{ MPa}}} \quad (3.87)$$

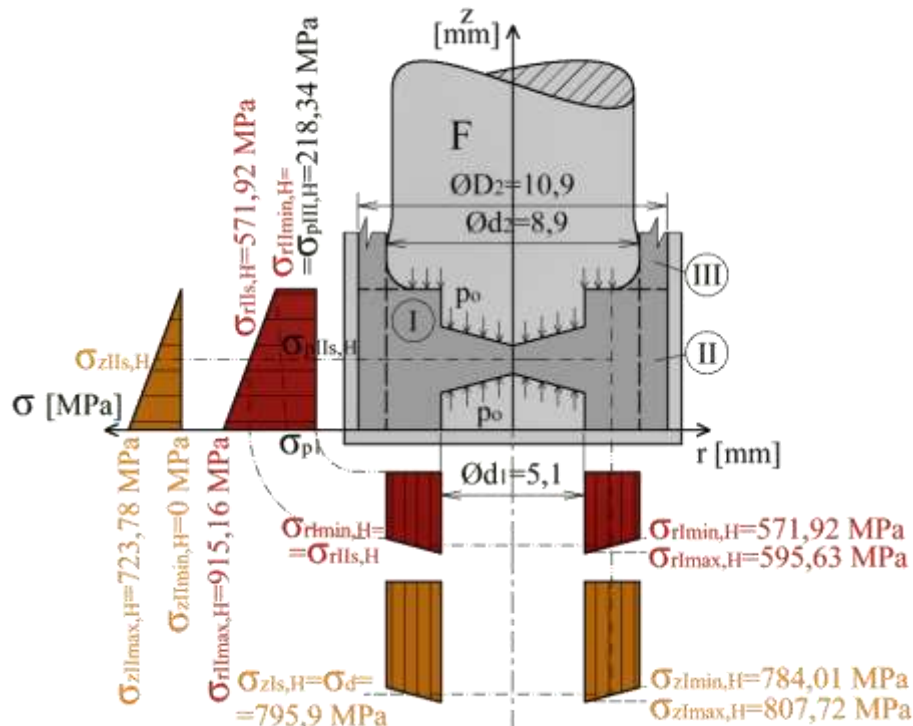
Deformační odpor dle Dippera:

Dosažením za $f_1 = 0,15$; $d_i = d_2$; $d_{ii} = d_1$; $b = b_0$, $\sigma_{pl(D)} = \sigma_{pl,H}$; $\sigma_{rlls(D)} = \sigma_{rlls,H}$ do rovnice 2.41:

$$\begin{aligned} \sigma_{d,H} \equiv \sigma_{zls,H} = \sigma_{pl(D)} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot f_1 \cdot \frac{d_2 - d_1}{b_0} \right) + \sigma_{rlls,H} = \\ = 212,09 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,15 \cdot \frac{8,9 - 5,1}{3} \right) + 571,92 = \underline{\underline{791,91 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.88)$$

Tvářecí síla:

$$F_H = \sigma_{d,H} \cdot S_H = \sigma_{d,H} \cdot \frac{\pi \cdot (d_2^2 - d_1^2)}{4} = 791,91 \cdot \frac{\pi \cdot (8,9^2 - 5,1^2)}{4} = \underline{\underline{33,09 \text{ kN}}} \quad (3.89)$$



Obr. 76: Průběh napětí u zpětného protlačování průřezu mezikružší dle Dippera

3.3.3 3. operace – pýchování příruby a kalibrace [5], [25]

Logaritmická deformace:

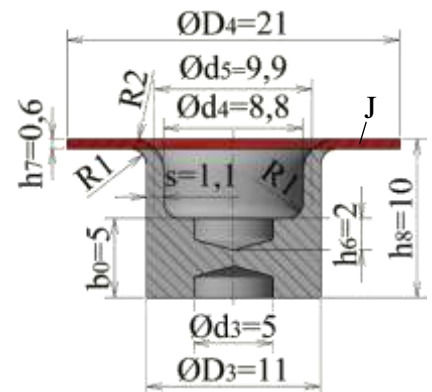
Hodnoty celkových deformací pro třetí operaci byly provedeny již v kapitole 3.1.1. Její výsledky jsou pro zvolený rozměr polotovaru uvedeny pro přehlednost v následující tabulce 15.

Tab. 15: Hodnoty deformace ve 3. operaci

D_0 [mm]	$\varphi_{\text{přir.}} = \varphi_J$ [-]	$\varphi_{\text{válc.I}} = \varphi_K$ [-]	$\varphi_{\text{válc.II.}} = \varphi_L$ [-]
13,7	1,716	1,709	0,796

* Pýchování příruby $\text{Ø}D_4$: (obr. 77)

Vztahy pro výpočty napětí, působících v přírubové části výrobku jsou odvozeny v příloze 2. Výpočty pro minimální hodnoty napětí jsou vztaženy k ose stěny ve válcové části I. Jedná se o rozměr $\text{Ø}d_5=9,9$ mm.



Obr. 77: Třetí operace – výsledná součást

Logaritmická deformace:

$$\varphi_J = |\varphi_G| + \left| \ln \frac{D_4^2 - d_5^2}{D_2^2 - d_2^2} \right| = 0,557 + \left| \ln \frac{21^2 - 9,9^2}{13,9^2 - 8,8^2} \right| = 1,658 \quad (3.90)$$

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice 2.10

$$\begin{aligned} \sigma_{p,J} &= 4,64 \cdot \varphi_J^5 + 16,76 \cdot \varphi_J^4 + 0,05 \cdot \varphi_J^3 - 157,91 \cdot \varphi_J^2 + 205,73 \cdot \varphi_J + 140,31 = \\ &= 4,64 \cdot 1,658^5 + 16,76 \cdot 1,658^4 + 0,05 \cdot 1,658^3 - 157,91 \cdot 1,658^2 + \\ &\quad + 205,73 \cdot 1,658 + 140,31 = \underline{\underline{232,35 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.91)$$

Měrná přetvárná práce: viz vztah 2.11

$$\begin{aligned} A_{j,J} &= 0,0063 \cdot \varphi_J^4 - 0,0056 \cdot \varphi_J^3 + 0,0006 \cdot \varphi_J^2 + 0,19 \cdot \varphi_J = 0,0063 \cdot 1,658^4 - \\ &\quad - 0,0056 \cdot 1,658^3 + 0,0006 \cdot 1,658^2 + 0,19 \cdot 1,658 = \underline{\underline{0,339 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \end{aligned} \quad (3.92)$$

Osové napětí $\sigma_{z,J}$ dle Siebela:

Dosažením za $h=h_7$; $D=D_4$; $r = D_4/2$; $f=0,15$; $\sigma_p = \sigma_{p,J}$ do vztahu 2.13:

$$\sigma_{z\text{min},J} = -\sigma_{p,J} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h_7} \cdot \left(\frac{D_4}{2} - \frac{D_4}{2} \right) \right] = -\sigma_{p,J} = \underline{\underline{-232,35 \text{ MPa}}} \quad (3.93)$$

Dosažením za $h=h_7$; $D=D_4$; $r=d_5/2$; $f=0,15$; $\sigma_p = \sigma_{p,J}$ do vztahu 2.13:

$$\begin{aligned} \sigma_{z\text{max},J} &= -\sigma_{p,J} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h_9} \cdot \left(\frac{D_4}{2} - \frac{d_5}{2} \right) \right] = \\ &= -232,35 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot 0,15}{0,6} \cdot \left(\frac{21}{2} - \frac{9,9}{2} \right) \right] = \underline{\underline{-877,11 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.94)$$

Střední osové napětí $\sigma_{zs,J}$ dle Siebela:

$$\begin{aligned} \sigma_{zs,J} &= \sigma_{z\text{min},J} + \frac{\sigma_{z\text{max},J} - \sigma_{z\text{min},J}}{3} = -232,35 + \frac{-877,11 + 232,35}{3} = \\ &= \underline{\underline{-447,27 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.95)$$

Radiální napětí $\sigma_{r,J}$ dle Siebela:

Dosazením za $h=h_7$; $D=D_4$; $r= D_4/2$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,J}$ do vztahu 2.12:

$$\sigma_{rmin,J} = -\sigma_{p,J} \cdot \frac{2 \cdot f}{h_7} \cdot \left(\frac{D_4}{2} - \frac{D_4}{2} \right) = \underline{\underline{0 \text{ MPa}}} \quad (3.96)$$

Dosazením za $h=h_7$; $D=D_4$; $r=d_5/2$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,J}$ do vztahu 2.12:

$$\begin{aligned} \sigma_{rmax,J} &= -\sigma_{p,J} \cdot \frac{2 \cdot f}{h_7} \cdot \left(\frac{D_4}{2} - \frac{d_5}{2} \right) = \\ &= -232,35 \cdot \frac{2 \cdot 0,15}{0,6} \cdot \left(\frac{21}{2} - \frac{9,9}{2} \right) = \underline{\underline{-644,77 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.97)$$

Smykové napětí $\tau_{f,J}$ dle Siebela:

Dosazením za $f=0,15$; $\sigma_{z(S)}=\sigma_{zmin,J}=-\sigma_{p,J}$ do vztahu 2.14:

$$\tau_{fmin,J} = f \cdot \sigma_{z,J} = -f \cdot \sigma_{p,J} = 0,15 \cdot (-232,35) = \underline{\underline{-34,85 \text{ MPa}}} \quad (3.98)$$

Dosazením za $f=0,15$; $\sigma_{z(S)}=\sigma_{zmax,J}$ do vztahu 2.14:

$$\tau_{fmax,J} = f \cdot \sigma_{zmax,J} = 0,15 \cdot (-877,11) = \underline{\underline{-131,57 \text{ MPa}}} \quad (3.99)$$

Deformační odpor $\sigma_{d,J}$ dle Siebela:

Geometrický model přechování a odvození vztahu pro deformační odpor lze nalézt v příloze 1.

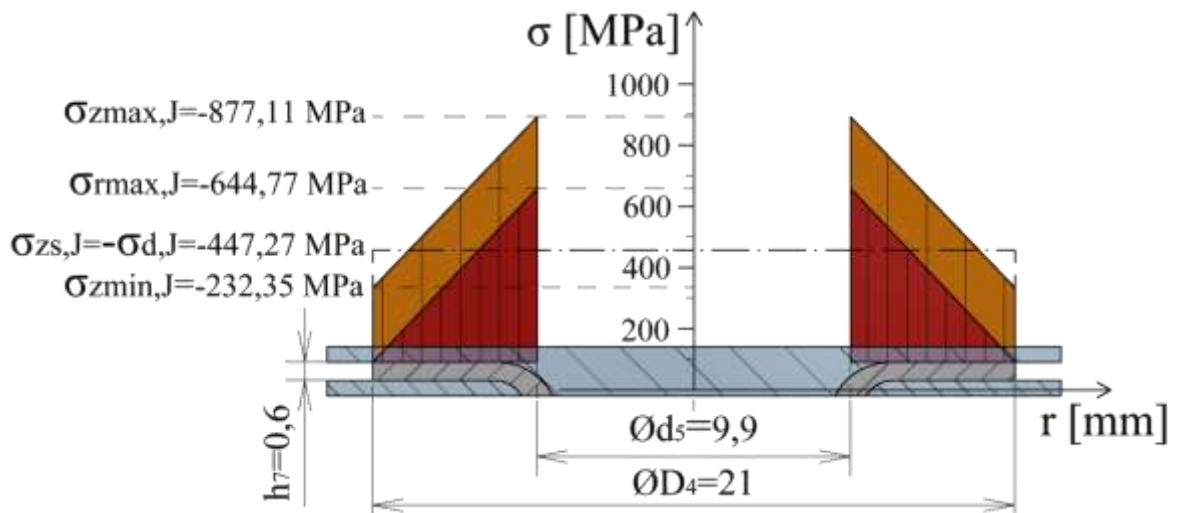
Dosazením za $h=h_7$; $D=D_4$; $d=d_5$; $f=0,15$; $\sigma_p=\sigma_{p,J}$ do vztahu 2.16:

$$\begin{aligned} \sigma_{d,J(S)} \equiv -\sigma_{zs,J} &= \sigma_{p,J} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot (D_4 - d_5)}{h_7} \right] \\ &= 232,35 \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,15 \cdot (21 - 9,9)}{0,6} \right] = \underline{\underline{447,27 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (3.100)$$

Tvářecí síla:

$$F_J = \sigma_{d,J} \cdot S_J = \sigma_{d,J} \cdot \frac{\pi \cdot (D_4^2 - d_5^2)}{4} = 447,27 \cdot \frac{\pi \cdot (21^2 - 9,9^2)}{4} = \underline{\underline{120,49 \text{ kN}}} \quad (3.101)$$

Průběh radiálního a osového napětí v závislosti na okamžitém poloměru je znázorněn na obrázku 78.



Obr. 78: Průběh radiálního a osového napětí při přechování ve 3. operaci

3.4 Volba tvářecího stroje [36]

Pro výrobu součásti je třeba zvolit tvářecí stroj. Při jeho výběru jsou hlavními řídicími parametry největší tvářecí síla, potřebná pro vyhotovení výrobku, počet pracovních pozic (počet operací), velikost zdvihu a rozměry. Ve většině případů si ovšem firma k výrobě vybírá stroj, kterým již disponuje.

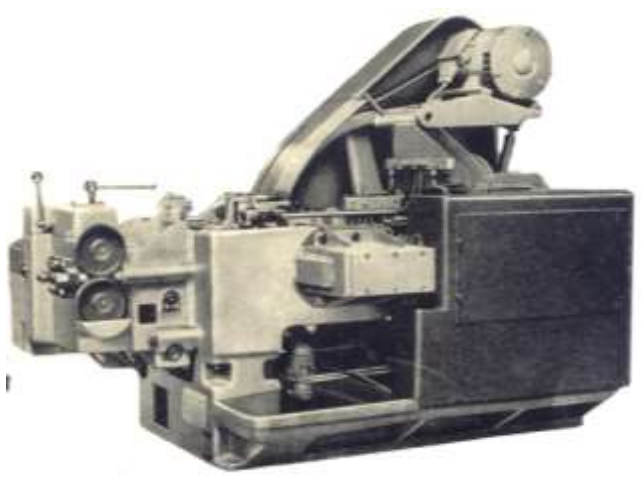
Pro zhotovení výrobku byl zvolen víceoperační postupový automat TPM 8-A (obr. 79) pro výrobu matic od firmy Šmeral Brno se jmenovitou silou 1000 kN. Jedná se o čtyřoperační automat s přídatnou operací pro uštížení polotovaru. Z ekonomického hlediska není volba tohoto stroje příliš vhodná, protože jmenovitá síla stroje je několikanásobně větší, než je tvářecí síla potřebná k výrobě vložky, která činí 120,45 kN. Ta je navíc navržena pouze na tři operace – jedna operace bude tedy nevyužita. Ovšem s ohledem na dostupné dokumentace byl zvolený stroj nejvhodnější variantou.

Postupový automat je vybaven stříhacím ústrojím s uzavřeným nožem, dorazem a podávacími kleštinami. Lisovnice jsou uloženy v nástrojovém bloku ve stojanu a jsou opatřeny vyrážeci. Lisovníky jsou upnuty ve stavitelných držácích na beranu a jsou bez vyrážeců.

Technické údaje tvářecího automatu jsou uvedeny v tabulce 16.

Tab. 16: Technické parametry postupového automatu TPM 8-A [36]

ZÁKLADNÍ PARAMETRY		VÝKON ELEKTROMOTORU	
Jmenovitá síla [kN]	1000	Hlavního [kW]	13
Délka ústřížku [mm]	5 až 17	Chladicího čerpadla	0,125
Průměr ústřížku [mm]	7,5 až 14	Mazacího čerpadla	0,42
Počet zdvihů beranu [min^{-1}]	100	ROZMĚRY AUTOMATU	
Zdvih beranu [mm]	110	Základ. rozměry [mm]	3500D x 1965Š x 2300V
Zdvih vyrážeců [mm]	20	Hmotnost [kg]	11 140



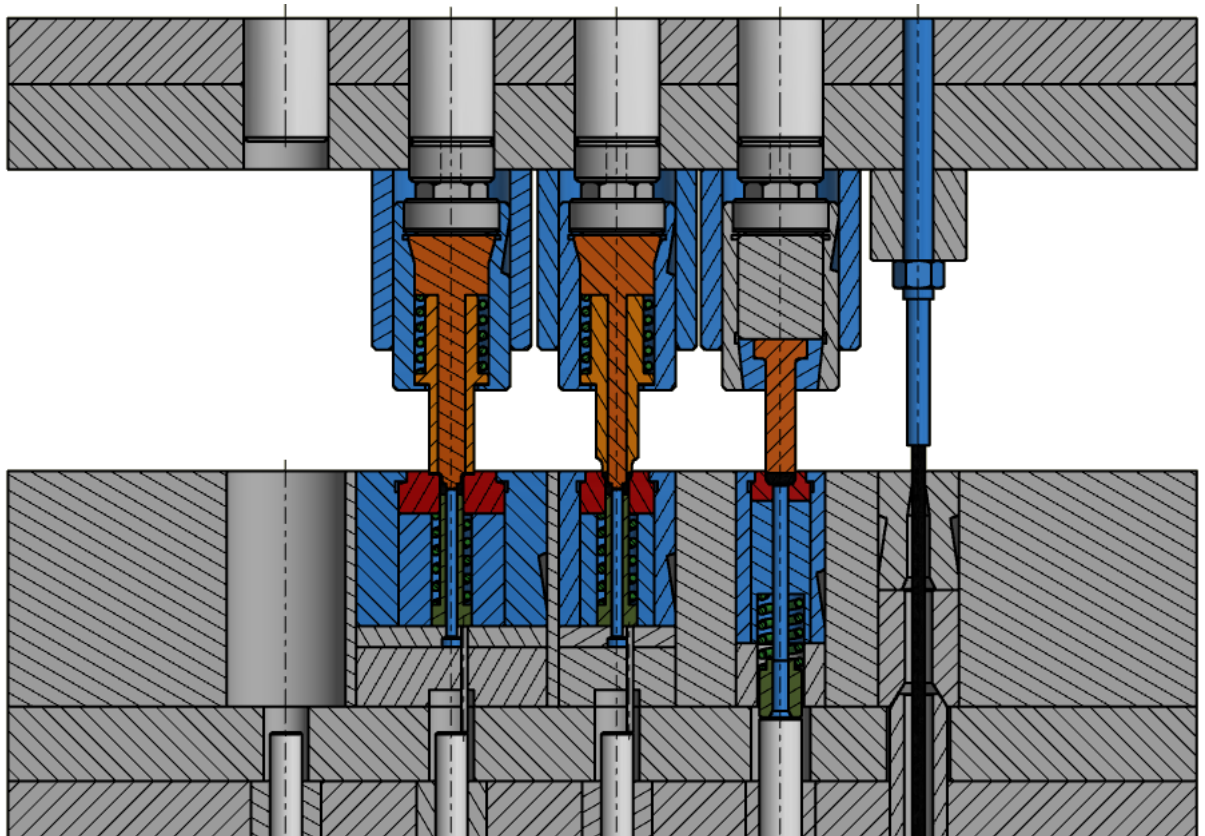
Obr. 79: Postupový automat TPM 8-A [36]

3.5 Návrh sestavy nástrojů

Postupový nástroj byl zkonstruován podle starého zástavbového výkresu pro výrobu čepu se zahloubením hlavy. Výkres lze nalézt v příloze 6. Navržený nástroj je rozdělen na pevnou spodní část a pohyblivou vrchní část. Ve vrchní části jsou přidělané lisovníky a ve spodní pevné části jsou vloženy lisovnice s vyhazovačema. Vzorový výkres neobsahuje zobrazení mechanických spojů (šrouby, klíny), a proto se nevyskytují ani v navržené sestavě. Detailní výkres sestavy: viz výkresová dokumentace A2-DP-2019-002

Sestava je znázorněna na obrázku 80 a je složena z několika dílů, rozdělených podle barev následujícím způsobem:

- Šedá – základní prvky nástroje: jedná se například o základové desky, opěrné desky, upínací a vyrážecí trny. Tyto díly byly ponechány z původního výkresu a jejich rozměry byly stanoveny ručním odměřením ze zástavbového výkresu.
- Modrá – rozměrově upravené prvky: prvky, jejichž základní tvar byl ponechán z původního výkresu, ale mají pozměněné rozměry s ohledem na funkčnost nástroje. Jde například o montážní pláště, upínací kroužky, vyhazovače a stříhací doraz.
- Zelená – tvarově i rozměrově výrazně upravené díly: musely být výrazně upraveny, aby byla splněna funkčnost nástroje. Jsou to např. pružiny a pouzdra vyhazovačů. V původní sestavě tato pouzdra neměla vyhazovací funkci.
- Červená – lisovnice: nachází se pouze ve spodní části nástroje. Jsou to kusy navržené speciálně pro konkrétní řešenou součást. Mají zpravidla velké nároky na rozměrové tolerance a tepelné zpracování.
- Oranžová – lisovníky: složené pěchovníky a průtláčníky, navržené speciálně pro rozměry řešené součásti. Mají zpravidla velké nároky na rozměrové tolerance a tepelné zpracování.
- Černá – tvary součásti v jednotlivých operacích.



Obr. 80: Sestava postupového nástroje

- **Konstrukce lisovnic:**

Konstrukce nástrojů se řídí podle tvarových doporučení pro lisovnice pro dopředné protlačování (obr. 27) a pro zpětné protlačování (obr. 33) dle normy ČSN 22 7005. Materiálem pro lisovnice byla zvolena z tabulky 7 nástrojová ocel 19 436, zušlechtná na horní mez kluzu stanovenou pro konkrétní materiál. Lisovnice nepotřebují zalisovat do objímky, protože maximální radiální tlaky na stěnu průtlačnice $\sigma_{rmax} = \sigma_{rIImax,H} = 915,82$ MPa nepřesahují hodnotu 1000 MPa, nad kterou by bylo potřeba zapouzdřit lisovnici do jedné objímky. Průtlačnice jsou pouze vsunuty do montážních plášťů za studena, bez tepelných úprav a zajištěny zespona podložkou. K tomuto rozhodnutí bylo přikloněno také na základě informace o výrobním postupu součásti podobného tvaru.

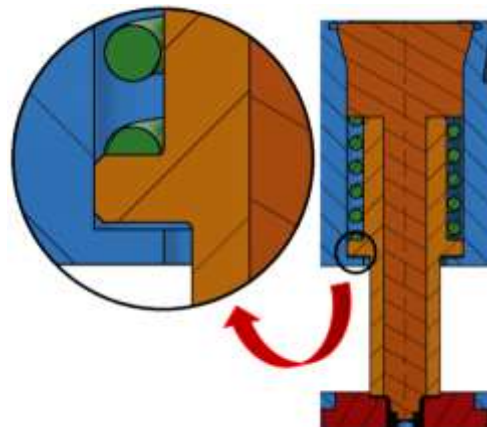
V rámci výkresové dokumentace byly zpracovány výkresy pro lisovnice ve všech třech operacích, viz výkresová dokumentace DP_17201/03, DP_17201/05 a DP_17201/08. Na obrázku 81 je pro představu znázorněn tvar průtlačnice ve druhé operaci.



Obr. 81: Tvar lisovnice ve II. operaci

- **Konstrukce lisovníků:**

Konstrukce nástrojů se řídí podle tvarových doporučení pro lisovníky pro dopředné protlačování (obr. 26) a pro zpětné protlačování (obr. 30) dle normy ČSN 22 7005. Materiálem pro lisovníky byla zvolena z tabulky 7 nástrojová ocel 19 436, zušlechtná na horní mez kluzu stanovenou pro konkrétní materiál. Při zpětném protlačování má součást tendenci ulpívat na nástroji a je potřeba zajistit její spolehlivé oddělení pomocí stěračů, nebo složených nástrojů. Proto jsou lisovníky ve druhé a třetí operaci složeny a odpružené (obr. 82). Takováto konstrukce napomáhá sejmutí výrobku z nástroje na konci operace. Funkce složeného nástroje pracuje na principu pevného a pohyblivého nástroje. Ve spodní poloze nástroje je vnější průtlačník v kontaktu s vnitřním. V okamžiku zdvihu beranu se ale začne vnitřní průtlačník zvedat a pružina začne tlačít na vnější část nástroje ve snaze udržet ho stále v dolní poloze, zatímco vnitřní část se bude zvedat s beranem. Tímto je zajištěno setření součásti. V rámci výkresové dokumentace byly zpracovány výkresy pro lisovníky ve všech třech operacích, viz výkresy DP_17201/04, DP_17201/06, DP_17201/07, DP_17201/09 a DP_17201/10.



Obr. 82: Detail složeného lisovníku

3.6 Výpočet rychlostí deformace k variantě B [37], [38]

Rychlost deformace bude určena v jednotlivých částech částech

- **Určení rychlosti nástroje:**

Dosažením za $t=60$ s a z parametrů stroje za $n_1=100 \text{ min}^{-1}$ a $H=110 \text{ mm}$ do rovnice 2.44:

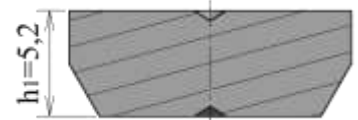
$$v_0 = \frac{l_n}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot H}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 110}{60 \cdot 10^3} = 0,367 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.102)$$

- **Rychlost deformace v I. operaci:**

Rychlost deformace v radiálním a tečném směru $\dot{\varphi}_{r,A}$ a $\dot{\varphi}_{t,A}$:

Dosažením za $h=h_1$ do rovnice 2.45: (obr. 83)

$$\dot{\varphi}_{r,A} = \dot{\varphi}_{t,A} = \frac{v_0 \cdot 10^3}{2 \cdot h_1} = \frac{0,367 \cdot 10^3}{2 \cdot 5,2} = \underline{\underline{35,26 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.103)$$



Obr. 83: Parametry pro výpočet rychlosti deformace v 1. operaci

Rychlost deformace v osovém směru $\dot{\varphi}_{z,A}$ u přechování:

Dosažením za $\dot{\varphi}_r$ (přech) = $\dot{\varphi}_{r,A}$ do rovnice 2.46:

$$\dot{\varphi}_{z,A} = -2 \cdot \dot{\varphi}_{r,A} = -2 \cdot 35,25 = \underline{\underline{-70,52 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.104)$$

- **Rychlost deformace ve II. operaci: (obr. 84)**

- * Dopředné protlačování na průměr $\text{Ø}D_2$:

V této operaci byla součást rozdělena na podoperace dopředného protlačování a zpětného protlačování otvoru $\text{Ø}d_1$ a otvoru $\text{Ø}d_2$. Je potřeba si uvědomit, že pro dopředné protlačování je rychlost deformace proměnná v části C a rovněž platí, že:

$$\dot{\varphi}_D = \dot{\varphi}_{\min,C}$$

$$\dot{\varphi}_B = \dot{\varphi}_{\max,C}$$

Rychlost deformace v radiálním a tečném směru

$\dot{\varphi}_{r,C}$ a $\dot{\varphi}_{t,C}$ u dopředného protlačování:

Dosažením za $r_I(DP) = D_1/2$; $r = D_1/2$; $\alpha = 30^\circ$ do rovnice 2.47: (obr. 84)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{r\min,C} = \dot{\varphi}_{r,D} = \dot{\varphi}_{t\min,C} = \dot{\varphi}_{t,D} &= -v_0 \cdot \frac{2 \cdot D_1^2 \cdot 10^3}{D_1^3} \cdot \text{tg}(30^\circ) = \\ &= -0,367 \cdot \frac{2 \cdot 13,9^2 \cdot 10^3}{13,9^3} \cdot \text{tg}(30^\circ) = \underline{\underline{-30,46 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned} \quad (3.105)$$

Dosažením za $r_I(DP) = D_1/2$; $r = D_2/2$; $\alpha = 30^\circ$ do rovnice 2.47: (obr. 84)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{r\max,C} = \dot{\varphi}_{r,B} = \dot{\varphi}_{t\max,C} = \dot{\varphi}_{t,B} &= -v_0 \cdot \frac{2 \cdot D_1^2 \cdot 10^3}{D_2^3} \cdot \text{tg}(30^\circ) = \\ &= -0,367 \cdot \frac{2 \cdot 13,9^2 \cdot 10^3}{10,9^3} \cdot \text{tg}(30^\circ) = \underline{\underline{-63,17 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned} \quad (3.106)$$

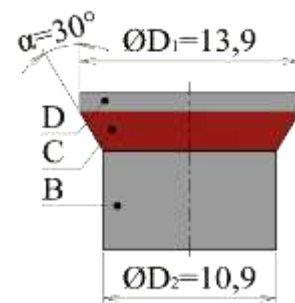
Rychlost deformace v osovém směru $\dot{\varphi}_{z,C}$ u dopředného protlačování

Dosažením za $\dot{\varphi}_r(DP) = \dot{\varphi}_{r\min,C}$ do rovnice 2.48:

$$\dot{\varphi}_{z\min,C} = \dot{\varphi}_{z,D} = -2 \cdot \dot{\varphi}_{r\min,C} = -2 \cdot (-30,46) = \underline{\underline{60,92 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.107)$$

Dosažením za $\dot{\varphi}_r(DP) = \dot{\varphi}_{r\max,C}$ do rovnice 2.48:

$$\dot{\varphi}_{z\max,C} = \dot{\varphi}_{z,B} = -2 \cdot \dot{\varphi}_{r\max,C} = -2 \cdot (-63,17) = \underline{\underline{126,33 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.108)$$



Obr. 84: Parametry pro výpočet rychlosti deformace – dopředné protlačování ve 2 operaci

* Zpětné protlačování průměru $\text{Ø}d_1$:

Vzhledem ke stejnému protlačovanému průměru v části E a části F (obr. 70) vyplývá, že rychlost deformace je v těchto částech totožná. Platí tedy, že:

$$\dot{\varphi}_E = \dot{\varphi}_F$$

Rychlost deformace v radiálním a tečném směru $\dot{\varphi}_{r,E}$ a $\dot{\varphi}_{t,E}$ u zpětného protlačování $\text{Ø}d_1$:

Dosažením za $b_{\min}=0,5$; $r=d_1/2$; $\beta=15^\circ$ do rovnice 2.49: (obr. 85)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{r\min,E} &= \dot{\varphi}_{r\min,F} = \dot{\varphi}_{t\min,E} = \dot{\varphi}_{t\min,F} \\ &= \frac{v_0 \cdot 10^3}{d_1 \cdot \text{tg}(\beta) + 2 \cdot b_{\min}} = \quad (3.109) \\ &= \frac{0,367 \cdot 10^3}{5,1 \cdot \text{tg}(15^\circ) + 2 \cdot 0,5} = \underline{\underline{154,94 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned}$$

Dosažením za $b_{\min}=0,5$; $r=0$; $\beta=15^\circ$ do rovnice 2.49: (obr. 85)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{r\max,E} &= \dot{\varphi}_{r\max,F} = \dot{\varphi}_{t\max,E} = \dot{\varphi}_{t\max,F} = \frac{v_0 \cdot 10^3}{0 \cdot \text{tg}(\beta) + 2 \cdot b_{\min}} = \quad (3.110) \\ &= \frac{0,367}{0 + 2 \cdot 0,5} = \underline{\underline{366,67 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned}$$

Rychlost deformace v osovém směru $\dot{\varphi}_{z,E}$ u zpětného protlačování $\text{Ø}d_1$:

Dosažením za $\dot{\varphi}_r (ZP) = \dot{\varphi}_{r\min,E}$ do rovnice 2.50:

$$\dot{\varphi}_{z\min,E} = \dot{\varphi}_{z\min,F} = -2 \cdot \dot{\varphi}_{r\min,E} = -2 \cdot 154,94 = \underline{\underline{-309,88 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.111)$$

Dosažením za $\dot{\varphi}_r (ZP) = \dot{\varphi}_{r\max,E}$ do rovnice 2.50:

$$\dot{\varphi}_{z\max,E} = \dot{\varphi}_{z\max,F} = -2 \cdot \dot{\varphi}_{r\max,E} = -2 \cdot 366,67 = \underline{\underline{-733,33 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.112)$$

* Zpětné protlačování průměru $\text{Ø}d_2$:

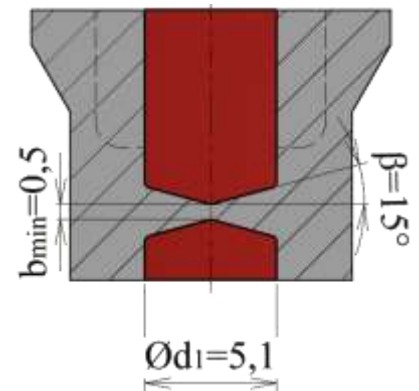
Vzhledem ke stejnému protlačovanému průměru v části G a části H (obr. 73) vyplývá, že rychlost deformace je v těchto částech totožná. Platí tedy, že:

$$\dot{\varphi}_G = \dot{\varphi}_H$$

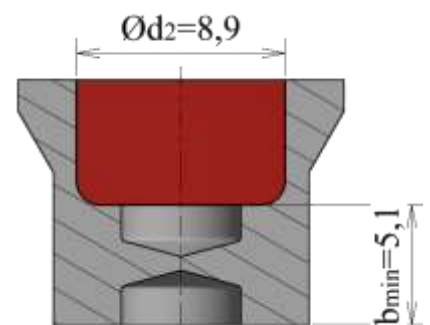
Rychlost deformace v radiálním a tečném směru $\dot{\varphi}_{r,G}$ a $\dot{\varphi}_{t,G}$ u zpětného protlačování $\text{Ø}d_2$:

Dosažením za $b_{\min}=5,1$; $r=d_2/2$; $\beta=0^\circ$ do rovnice 2.49: (obr. 86)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{r\min,G} &= \dot{\varphi}_{r\min,H} = \dot{\varphi}_{t\min,G} = \dot{\varphi}_{t\min,H} \\ &= \frac{v_0 \cdot 10^3}{d_2 \cdot \text{tg}(\beta) + 2 \cdot b_{\min}} = \quad (3.113) \\ &= \frac{0,367 \cdot 10^3}{8,9 \cdot \text{tg}(0^\circ) + 2 \cdot 5,1} = \underline{\underline{35,95 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned}$$



Obr. 85: Parametry pro výpočet rychlosti deformace – zpětné protlačování $\text{Ø}d_1$



Obr. 86: Parametry pro výpočet rychlosti deformace – zpětné protlačování $\text{Ø}d_2$

Dosažením za $b_{\min}=5,1$; $r=0$; $\beta=0^\circ$ do rovnice 2.49: (obr. 86)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{r\max,G} = \dot{\varphi}_{r\max,H} = \dot{\varphi}_{t\max,G} = \dot{\varphi}_{t\max,H} &= \frac{v_0 \cdot 10^3}{0 \cdot \operatorname{tg}(\beta) + 2 \cdot b_{\min}} = \\ &= \frac{0,367}{0 + 2 \cdot 5,1} = \underline{\underline{35,95 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned} \quad (3.114)$$

Rychlost deformace v osovém směru $\dot{\varphi}_{z,G}$ u zpětného protlačování $\text{Ø}d_2$:

Dosažením za $\dot{\varphi}_r(zP) = \dot{\varphi}_{r\min,G}$ do rovnice 2.50:

$$\dot{\varphi}_{z\min,G} = \dot{\varphi}_{z\min,H} = -2 \cdot \dot{\varphi}_{r\min,G} = -2 \cdot 35,95 = \underline{\underline{-71,90 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.115)$$

Dosažením za $\dot{\varphi}_r(zP) = \dot{\varphi}_{r\max,G}$ do rovnice 2.50:

$$\dot{\varphi}_{z\max,G} = \dot{\varphi}_{z\max,H} = -2 \cdot \dot{\varphi}_{r\max,G} = -2 \cdot 35,95 = \underline{\underline{-71,90 \text{ s}^{-1}}} \quad (3.116)$$

• **Rychlost deformace v I. operaci:**

Rychlost deformace v radiálním a tečném směru

$\dot{\varphi}_{r,J}$ a $\dot{\varphi}_{t,J}$:

Dosažením za $h=h_7$ do rovnice 2.45: (obr. 87)

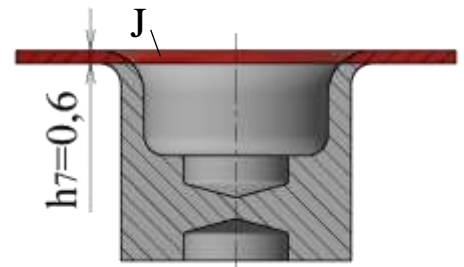
$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{r,J} = \dot{\varphi}_{t,J} &= \frac{v_0 \cdot 10^3}{2 \cdot h_7} = \frac{0,367 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,6} = \\ &= \underline{\underline{305,56 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned} \quad (3.117)$$

Rychlost deformace v osovém směru $\dot{\varphi}_{z,A}$

u přechování:

Dosažením za $\dot{\varphi}_r(\text{pěch}) = \dot{\varphi}_{r,J}$ do rovnice 2.46:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{z,J} &= -2 \cdot \dot{\varphi}_{r,J} = -2 \cdot 305,56 = \\ &= \underline{\underline{-611,11 \text{ s}^{-1}}} \end{aligned} \quad (3.118)$$



Obr. 87: Parametry pro výpočet rychlosti deformace v 1. operaci

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [33]

Technické zhodnocení:

Výroba součásti je možná krom méně pravděpodobných možností technologiemi tváření a třískového obrábění. Výhodou vybrané technologie tváření je hlavně vysoká produktivita, zlepšení mechanických vlastností a velké snížení odpadovosti. Vstupní náklady na výrobu jsou ovšem mnohem vyšší než u obrábění. Ty se ale s rostoucí sériovostí snižují úměrně s počtem kusů, protože například opotřebení tvářecího nástroje je mnohem nižší než obráběcího.

Jako polotovaru byla vybrána tyč o průměru $\text{Ø}D_{\text{pol}}=13,5^{+0,3}$ mm o délce 3000 mm. Vzhledem k určení nejvhodnějšího průměru polotovaru v kapitole 3.1, kde byl jako nejvhodnější průměr určen průměr $\text{Ø}D_0 = 13,7$ mm, bude s tímto rozměrem dále počítáno.

Ekonomické zhodnocení:

Ekonomické zhodnocení se zaměřuje na určení ceny výroby součásti zvoleným způsobem výroby. Ve snaze je určit tzv. rovnovážný bod, který určuje moment, kdy se výroba ze ztrátové stává ziskovou. Náklady jsou rozděleny do několika skupin podle tabulky 17.

Tab. 17: Základní rozdělení nákladů [33]

1. Přímé náklady na materiál	Vlastní náklady výroby	Vlastní náklady výkonů	Úplné vlastní náklady výkonů	Výrobní cena	Prodejní cena
2. Přímé náklady na mzdy					
3. Ostatní přímé náklady					
4. Výrobní režie					
5. Správní režie					
6. Odbytkové náklady					
7. Zisk					
8. Odbytové a obchodní přírážky a srážky					

Při výpočtech nebude bráno v potaz stříhání tyče na požadované polotovary (cena nástroje, zaměstnanci a energie), ale pouze první, druhá a třetí operace. Nebudou uvažovány ani správní a výrobní režie zahrnující například náklady na úklid a údržbu prostorů, osvětlení, náklady na vytápění, nebo řízení a správu podniku, ani náklady na amortizaci.

- **Náklady přímé:**

- Náklady přímé za materiál:

- * Hmotnost jedné tyče:

$$m_t = \rho \cdot V_t = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4 \cdot 10^9} \cdot L_t = 2700 \cdot \frac{\pi \cdot 13,7^2}{4 \cdot 10^9} \cdot 3000 = \underline{\underline{1,194 \text{ kg}}} \quad (4.1)$$

kde: m_t [kg] – hmotnost jedné tyče
 ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – měrná hmotnost hliníku; $\rho = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 V_t [m^3] – objem tyče
 L_t [mm] – délka tyče
 D_0 [mm] – průměr polotovaru

- * Cena jedné tyče:

$$C_t = C_m \cdot m_t = 80 \cdot 1,194 = \underline{\underline{95,52 \text{ Kč/ks}}} \quad (4.2)$$

kde: C_t [Kč/ks] – cena jedné tyče
 C_m [Kč/kg] – cena 1kg materiálu; $C_m = 80 \text{ Kč/kg}$
 m_t [kg] – hmotnost jedné tyče

- * Počet ústrižků z jedné tyče:

$$n_p = \frac{L_t}{h_0} = \frac{3000}{4,9} = 612,24 \rightarrow \underline{\underline{612 \text{ ks}}} \quad (4.3)$$

kde: n_p [ks] – počet kusů ústrižků z jedné tyče
 h_0 [mm] – výška polotovaru; $h_0 = 4,9$ mm

- * Cena materiálu na jeden kus výrobku:

$$C_{ks} = \frac{C_t}{n_p} = \frac{95,52}{612} = \underline{\underline{0,16 \text{ Kč/ks}}} \quad (4.4)$$

kde: C_{ks} [Kč/ks] – cena materiálu na jeden kus výrobku
 n_p [ks] – počet kusů polotovaru z jedné tyče

- * Přímé náklady na materiál:

$$PN_{mat} = C_{ks} \cdot n = 0,16 \cdot 120000 = \underline{\underline{19200 \text{ Kč}}} \quad (4.5)$$

kde: PN_{mat} [Kč/ks] – přímé náklady na materiál
 n [ks/rok] – plánovaný počet vyráběných kusů

Náklady přímé na mzdy:

- * Výrobní čas na jeden kus:

$$t_{ks} = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_{B1}}{60 \cdot n_p} = \frac{1}{100 \cdot 60} + \frac{0,2}{60 \cdot 612} = \underline{\underline{1,72 \cdot 10^{-4} \text{ Nh}}} \quad (4.6)$$

kde: t_{ks} [Nh] – výrobní čas jednoho kusu
 t_{A1} [Nmin] – strojní čas výroby 1 kusu; $t_{A1} = 1/100$ Nmin
 t_{B1} [Nmin] – přípravný čas jednoho kusu tyče; $t_{B1} = 0,2$ Nmin

- * Přímé náklady na mzdy:

$$PN_{mzd} = t_{ks} \cdot M_t \cdot n = 1,72 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 120000 = \underline{\underline{4130,72 \text{ Kč}}} \quad (4.7)$$

kde: PN_{mzd} [Kč] – přímé náklady na mzdy
 M_t [Kč/h] – hodinová mzda zaměstnanců, $M_t = 200$ Kč/h

Náklady přímé na energii:

- * Výrobní čas na jeden kus:

$$PN_{EN} = P \cdot \eta \cdot \frac{t_{A1}}{60} \cdot C_e \cdot n = 13,545 \cdot 0,8 \cdot \frac{1}{100 \cdot 60} \cdot 4,28 \cdot 120000 = \underline{\underline{927,56 \text{ Kč}}} \quad (4.8)$$

kde: PN_{EN} [Kč] – přímé náklady na energii
 P [kWh] – příkon stroje; $P = 13,545$ kWh
 η [-] – využití stroje
 C_e [Kč/kWh] – cena energie, $C_e = 4,28$ Kč/kWh

- * Celkové přímé náklady:

$$\begin{aligned} PN_{celk} &= PN_{mat} + PN_{mzd} + PN_{EN} = 19200 + 4130,72 + 927,56 = \\ &= \underline{\underline{24\,258,28 \text{ Kč}}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

kde: PN_{celk} [Kč] – celkové přímé náklady

Veškeré režijní náklady nebylo možné přesně určit. Z toho důvodu jsou vypočítané přímé náklady navýšeny o odhadované provozní náklady.

$$PN_{celk} = \underline{\underline{40\,000 \text{ Kč}}}$$

- **Fixní náklady:**

Fixní náklady jsou pro každou jednotlivou firmu odlišné podle vybavení a struktury firmy a nejsou tedy přesně určitelné bez konkrétních vnitřních informací z určité firmy. Nejvyšším fixním nákladem je cena stroje. V případě, že strojem již firma disponuje, náklady na stroj jsou určeny pouze jako zlomek ceny stroje, úměrný velikosti série. Tímto se výrazně sníží náklady na celou sérii

Pro následující výpočty jsou fixní náklady vzhledem k nedostupným informacím o ceně stroje a nástrojů, určeny odhadem jednotnou cenou, zahrnující náklady za nástroje a jejich údržbu a zlomek ceny stroje.

$$N_{\text{fix}} = \underline{\underline{400\,000\text{ Kč}}}$$

- **Celkové náklady:**

- * Celkové náklady na sérii:

$$N_{\text{celk}} = PN_{\text{celk}} + N_{\text{fix}} = 40000 + 400000 = \underline{\underline{440\,000\text{ Kč}}} \quad (4.10)$$

kde: N_{celk} [Kč] – celkové náklady
 N_{fix} [Kč] – fixní náklady

- * Celkové náklady na vyrobení jednoho dílu:

$$N_{\text{ks}} = \frac{N_{\text{celk}}}{n} = \frac{440000}{120000} = \underline{\underline{3,67\text{ Kč/ks}}} \quad (4.11)$$

kde: N_{ks} [Kč/ks] – celkové náklady na vyrobení jednoho dílu

- * Cena za kus při zisku 100%:

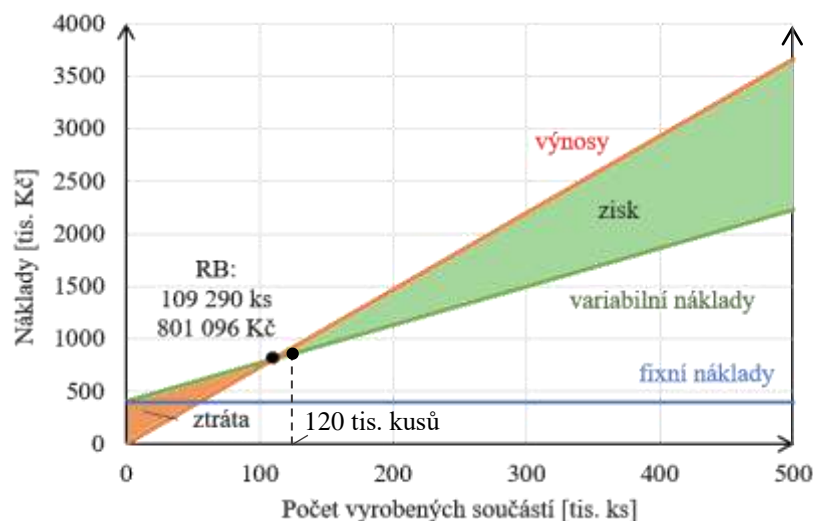
$$C_{100, \text{ks}} = \frac{N_{\text{celk}} + N_{\text{celk}} \cdot 1}{n} = \frac{440000 + 440000}{120000} = \underline{\underline{7,33\text{ Kč/ks}}} \quad (4.12)$$

kde: $C_{100, \text{ks}}$ [Kč] – celkové náklady na vyrobení jednoho dílu

- * Určení rovnovážného bodu:

$$RB = \frac{N_{\text{fix}}}{C_{100, \text{ks}} - N_{\text{ks}}} = \frac{400000}{7,33 - 3,67} = 109\,289,6 \rightarrow \underline{\underline{109\,290\text{ ks}}} \quad (4.13)$$

kde: RB [ks] – rovnovážný bod



Obr. 88: Závislost nákladů na počtu vyrobených kusů

5 ZÁVĚRY

V diplomové práci byl zhotoven návrh výroby závitové sendvičové vložky z hliníkové slitiny AlMn1 s velikostí série 120 000 kusů, která slouží jako spojovací kus podlahových panelů k trupu letadla. Z několika možností pro výrobu byla s ohledem na hospodárnost, produktivnost výroby a konstrukční požadavky součásti vybrána metoda objemového tváření za studena pomocí kombinovaného protlačování a pěchování.

Jeden z hlavních požadavků na součást byla vyrobiteľnosť, ktorá bola potreba zabezpečiť návrhom rozměrů tak, aby při výrobě nebyla přesažena kritická hodnota deformace stanovená pro daný materiál. Největšího stupně deformace bylo dosaženo v místě s nejtenčí stěnou a v místě příruby. Rozměry výrobku byly navrženy tak, aby v těchto dvou místech byly stupně deformace rovny. V rámci tohoto návrhu byly zváženy tři možnosti, ze kterých byla určena jako nejvhodnější s ohledem na počet operací, typ polotovaru a stupeň deformace varianta B. Tato varianta počítá s výrobou součásti z polotovaru tvaru špalíku na 3 operace s předoperací ustřížení polotovaru.

Pro vybranou variantu byly zpracovány výpočty pro pěchování a kombinované protlačování (logaritmická deformace, přirozený přetvárný odpor, měrná přetvárná práce, radiální a osová napětí, deformační odpor, tvářecí síla, radiální a osová rychlost deformace), jejichž odvození lze nalézt v přílohové dokumentaci. Vzhledem k doporučenému rozsahu práce byly tyto výpočty určeny ve třetí operaci pouze pro podoperaci pěchování příruby. Výpočty pro kalibraci výrobku byly opomenuty s předpokladem podobnosti výsledků s předchozí operací v rozsahu 50 MPa kvůli malému rozdílu v rozměrech. Taktéž byl zjednodušen výpočet pro zpětné protlačování ve druhé operaci, kde pro průměr \varnothing_1 byl počítán pouze deformační odpor podle Siebela – radiální a osová napětí pro tento průměr již dále nebyla určena. Z výsledků pro rychlosti deformace plyne závěr, že v každé oblasti součásti dochází k jiným rychlostem deformace. To znamená, že také hodnoty přirozeného přetvárného odporu nelze přímo určit z poskytnutého modelu a lze očekávat, že budou vyšší, což má celkový dopad na stanovené výsledky. Pro přesné určení hodnot napjatostí by bylo potřeba provést experimentální měření při přímém výrobním procesu.

Na základě získaných výsledků a dostupné dokumentace byl pro zhotovení součásti zvolen čtyřoperační tvářecí automat TMP 8-A se jmenovitou silou 1000 kN bezpečně přesahující maximální tvářecí sílu, potřebnou ke zhotovení součásti, která dosahuje 120,49 kN. Pro zvolený stroj byla zkonstruována nástrojová sestava podle poskytnutého starého zástavbového výkresu stroje tak, aby byly z ekonomického důvodu ponechány základní prvky původního nástroje. Hlavní částí sestavy jsou složené lisovníky a lisovnice, pro které byla zhotovena také zvláštní výkresová dokumentace. Vzhledem k největším dosaženým radiálním tlakům (915,16 MPa) nepřesahujícím 1000 MPa není potřeba lisovnice pouzdrít do objímek, a proto jsou pouze volně vsunuty do montážních plášťů.

Pro vytvořený návrh bylo na závěr zhotoveno technicko-ekonomické zhodnocení, v rámci kterého byly stanoveny celkové náklady na výrobní sérii činící 440 000,- Kč a celkové náklady na výrobu jednoho dílu při stanovené sérii, činící 3,67,-Kč/kus. S předpokladem ceny za kus při zisku 100% byl určen rovnovážný bod, podle kterého bylo zjištěno, že výroba bude zisková při sérii nejméně 109 290 kusů.

Vzhledem k předpokládané malé poptávce po součásti se nejeví její výroba příliš výnosná a bylo by potřeba přinejmenším navýšit její prodejní cenu alespoň o 200% výrobní ceny, aby byla její výroba výhodná.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠÍMA, Vojtěch. *Zápustkové kování ozubeného kola*. Brno, 2017. [cit. 2018-15-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147923>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.
- [2] Díly tvářené za studena. *Lagus.cz* [online]. Jihlava: LAGUS s.r.o., 2017 [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <<http://www.lagus.cz/24-dily-tvarene-za-studena.html>>
- [3] BŘEZINA, S. *Výroba krytu* [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-10-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28860>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství, ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný
- [4] Technologie objemového tváření. LENFELD, Petr. *Katedra tváření kovů a plastů – skripta* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie [cit. 2018-10-04]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm>.
- [5] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 1. Vyd. Brno: VUT Brno, 1991, 187 s. ISBN 80-214-0294-6.
- [6] BABOR, Karel, Augustin CVILINEK Jan FIALA a Vladimír HAŠEK. *Objemové tváření ocelí*. 1. vyd. Vladimír Hašek. Eva Tamelová. Praha: STNL, 1967, 332 s. Strojírenská literatura sv. 6006. 04-239-67.
- [7] Hliník AlMn1 – ČSN 424432. *Proal, hliníkové profily* [online]. Ostrava-Svinov: NPS PROAL s.r.o., 2009 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <<http://www.proal.cz/info/424432.htm>>.
- [8] ČSN 42 4432. *Slitina hliníku, tvářená 42 4432 AlMn1*. Schválena: 07.1981. Účinnost: 2005-05-01.
- [9] VEČEŘA, Jiří. *Výroba unášecího čepu objemovým tvářením*. Brno, 2013 [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65746> Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Forejt
- [10] ČADA, Radek. *Technologie I*. 1.vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2008, 360 s. ISBN 978-80-248-1507-7.
- [11] JAN V. *Mechanické vlastnosti I*. [FSI VUT v Brně, Ústav materiálových věd a inženýrství; 2014, Brno, Česká republika], [cit. 2018-11-23], [70 s.]. Dostupné z: <<http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-letni-semestr>>.
- [12] DORAZIL, Eduard a kol. *Nauka o materiálu I - Přednášky*. Vysoké učení technické v Brně: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1986, 248 s. ISBN 05-030-86.
- [13] ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1992, 524 s. Technický průvodce. ISBN 80-030-0651.

-
- [14] STOROŽEV, Michail Vasil'jevič a Jevgenij Aleksandrovič POPOV. *Teória tvárenia kovov*. Bratislava: Alfa, 1978, 486 s. Edícia strojárskkej literatúry (Alfa).
- [15] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [16] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, s. r. o., 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [17] LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 9788074943058.
- [18] ŽÍDEK, Milan, Vladimír DĚDEK, Boris SOMMER. *Tváření oceli*. Praha: SNTL, 1988, 520 s. ISBN 04-408-88.
- [19] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 1. BRNO: CERM, 2001, 238 s. ISBN 80-214-2032-4.
- [20] DVOŘÁK, Milan, MAREČKOVÁ M. *Technologie tváření* [online]. Brno 2006, [cit. 2019-02-09]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm>.
- [21] FELDMANN, Heinz D. *Protlačován oceli: určeno pro technology a konstruktéry*. Praha: STNL, 1962, 196 s.
- [22] ALTAN, Taylan, Gracious NGAILE a Gangshu SHEN. *Cold and hot forging: fundamentals and applications*. 2005. Materials Park, OH: ASM International, c2004. ISBN 08-717-0805-1.
- [23] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [24] BLAŠČÍK, František. *Konstruktia tvárniaceho náradia: náradie pre objemové tvárnenie*. 1.vyd Bratislava : Slovenské vydavateľstve technickej literatury, 1966. 140 s.
- [25] Lange Kurt. *Handbook of metal forming*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, [1995]. ISBN 08-726-3457-4.
- [26] ČSN 22 7005. *Tvářecí nástroje. Protlačování ocelí za studena. Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet*. Schválena: 05.1991. Účinnost: 1992-06-01.
- [27] Supply Precision Cold Extrusion Aluminum Alloy Tensile Parts. *Shxinhou.en: Shanghai Xinhou Spraying & Purification Equipment Co., Limited* [online]. Xujing town, Shanghai, China [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <<https://shxinhou.en.made-in-china.com/product/VSMENWiKGyhj/China-Supply-Precision-Cold-Extrusion-Aluminum-Alloy-Tensile-Parts.html>>.
- [28] TOTTEN, George E; MACKENZIE, D. *Handbook of aluminium : Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing*. Boca Raton : CRC Press, 2003. 724 s. ISBN 08-247-0896-2.

-
- [29] POLMEAR, Iam. *Light Alloys : From traditional alloys to nanocrystals*. Vyd. 4. Australia : Elsevier, 2006. 421 s. ISBN 0750663715.
- [30] FOREJT, Milan, Humár ANTON, Píška MIROSLAV a Libor JANÍNEK. *Experimentální metody* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1_experimentalni_metody_cviceni_2017_forejt_piska_humar_janicek.pdf>.
- [31] OSKUIE A. A., A. AFSHAR a H. HASANNEJAD. Effect of current density on DC electrochemical phosphating of stainless steel 316. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2010, roč. 205, č. 7, s. 2302-2306 [cit. 2019-02-10]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897210008303>>.
- [32] NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992, 186 s. ISBN 8021404019.
- [33] FOREJT, Milan. *Oborový projekt 2* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/h2p_oborovy_projekt_2_forejt.pdf>.
- [34] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 9788073611118.
- [35] MAROŠ, BOHUMIL, Libor JANÍČEK, Marie MAROŠOVÁ a Milan BEBEŠ. *Katalog přetvárných odporů hliníkových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1996.
- [36] HÝSEK, Rudolf. *Tvářecí stroje 1971*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1972, 599 s.
- [37] MIELNIK, Edward M. *Metalworking science and Engineering*. Michael B. Bever. 1st edition. New York: McGraw-Hill, Inc., 1991. 976 s. ISBN 0-07-041904-3.
- [38] FOREJT, Milan. *Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření*. In The 2nd International Conference FORM'95. Volume 1. Brno: TU Brno, PC-DIR Co.Ltd, 1995. s. 77 (s.)ISBN: 80-214-0664-X

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Latinská abeceda

Označení	Legenda	Jednotka
A_j	měrná přetvárná práce	$[J \cdot mm^{-3}]$
$A_{jI(G)}$	Měrná přetvárná práce ve vstupním kontejneru	$[J \cdot mm^{-3}]$
$A_{jIII(G)}$	Měrná přetvárná práce v kalibračním očku	$[J \cdot mm^{-3}]$
b	Okamžitá výška dna	$[mm]$
b_i	Exponent vybraný statistickým rozbořem tak, aby každý člen v aproximaci byl významný se spolehlivostí 95%	$[-]$
C_e	Cena energie	$[Kč/kWh]$
C_{ks}	Cena materiálu na jeden kus výrobku	$[Kč/ks]$
C_m	Cena 1kg materiálu	$[Kč/kg]$
C_t	Cena jedné tyče	$[Kč/ks]$
$C_{100, ks}$	Cena za kus při zisku 100%	$[Kč/ks]$
D	Okamžitý průměr	$[mm]$
D_i	Průměr protlačované součásti	$[mm]$
D_{kon}	Koncový průměr	$[mm]$
$D_{poč}$	Počáteční průměr	$[mm]$
D_{pol}	Průměr polotovaru tyče	$[mm]$
D_R	pěchovací poměr	$[-]$
$D_{I(G)}$	Průměr vstupního kontejneru	$[mm]$
$D_{III(G)}$	Průměr kalibračního oka	$[mm]$
D_0	Průměr polotovaru	$[mm]$
D_1	Průměr spěchované části výrobku v I. operaci	$[mm]$
D_2	Vnější průměr protlačené části výrobku ve II. operaci	$[mm]$
D_3	Vnější průměr válcové části II ve III. operaci	$[mm]$
D_4	Vnější průměr příruby ve III. operaci	$[mm]$
d	Průměr otvoru	$[mm]$
d_i	Průměr průtlačníku	$[mm]$
d_{ii}	Průměr vnitřního otvoru prstence	$[mm]$
d_1	Průměr menšího otvoru ve II. operaci	$[mm]$
d_2	Průměr většího otvoru ve II. operaci	$[mm]$
d_3	Průměr menšího otvoru ve III. operaci	$[mm]$
d_4	Průměr většího otvoru ve III. operaci	$[mm]$
d_5	Průměr vztažený na osu stěny ve válcové části I ve III. operaci	$[mm]$
d_{kon}	Koncový průměr otvoru	$[mm]$
$d_{poč}$	Počáteční průměr otvoru	$[mm]$
E	Youngův modul pružnosti v tahu	$[MPa]$
F	Tvářecí síla	$[kN]$
f	Součinitel tření	$[-]$
f_1	Koeficient tření	$[-]$
f_2	Koeficient tření	$[-]$
f_{2s}	Střední koeficient tření	
f_3	Koeficient tření	$[-]$
H	Zdvih beranu	$[mm]$
h	Okamžitá výška	$[mm]$
h_0	výška polotovaru	$[mm]$
h_1	Spěchovaná výška součásti v I. operaci	$[mm]$
h_2	Výška součásti v kalibračním očku ve II. operaci	$[mm]$
h_3	Výška součásti v redukčním kuželu ve II. operaci	$[mm]$
h_4	Výška součásti ve vstupním kontejneru ve II. operaci	$[mm]$
h_5	Výška většího otvoru ve II. operaci	$[mm]$
h_6	Výška menšího otvoru ve III. operaci	$[mm]$

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
h_7	Výška příruby ve III. operaci	[mm]
h_8	Celková výška součásti	[mm]
k	Optimální počet členů pro konkrétní materiál a teplotní zónu	[-]
L_t	Délka tyče	[mm]
$L_{III(G)}$	Výška funkční části kalibračního očka	[mm]
l	délka vzorku	[mm]
l_n	Dráha nástroje	[mm]
m_t	Hmotnost jedné tyče	[kg]
N_{celk}	Celkové náklady	[Kč]
N_{fix}	Fixní náklady	[Kč]
N_{ks}	Celkové náklady na výrobu jednoho dílu	[Kč/ks]
n	Plánovaný počet vyráběných kusů	[ks/rok]
n_p	Počet kusů ústřížků z jedné tyče	[ks]
n_1	Počet zdvihů	[min ⁻¹]
M_t	Hodinová mzda zaměstnanců	[Kč/h]
P	Příkon stroje	[kWh]
PN_{celk}	Celkové přímé náklady	[Kč]
PN_{en}	Přímé náklady na energii	[Kč]
PN_{mat}	Přímé náklady na materiál	[Kč]
PN_{mzd}	Přímé náklady na mzdy	[Kč]
RB	Rovnovážný bod	[ks]
r	Okamžitý poloměr	[mm]
r_i	Exponent vybraný statistickým rozbohem tak, aby každý člen v aproximaci byl významný se spolehlivostí 95%	[-]
$r_1(DP)$	Poloměr vstupního kontejneru	
S	Plocha průřezu činné části pod nástrojem	[mm ²]
S_{kon}	koncový průřez	[mm ²]
$S_{poč}$	Počáteční průřez	[mm ²]
s	Tloušťka stěny	[mm]
s_i	Exponent vybraný statistickým rozbohem tak, aby každý člen v aproximaci byl významný se spolehlivostí 95%	[-]
T	Teplota materiálu	[°C]
t	Čas	[s]
t_{A1}	Strojní čas výroby jednoho kusu	[Nmin]
t_{B1}	Přípravný čas jednoho kusu tyče	[Nmin]
t_{ks}	Výrobní čas jednoho kusu	[Nh]
V_t	Objem tyče	[mm ³]
V_1	Objem příruby	[mm ³]
V_2	Objem válcové části I	[mm ³]
V_3	Objem válcové části II	[mm ³]
V_4	Objem sražené části v I. operaci	[mm ³]
V_5	Objem nesražené části v I. operaci	[mm ³]
V_6	Objem středícího důlku	[mm ³]
V_7	Objem součásti ve vstupním kontejneru ve II. operaci	[mm ³]
V_8	Objem součásti v redukčním kuželu ve II. operaci	[mm ³]
V_9	Objem součásti v kalibračním očku s průměrem $\varnothing d_2$ ve II. operaci	[mm ³]
V_{10}	Objem součásti v kalibračním očku s průměrem $\varnothing d_1$ ve II. operaci	[mm ³]
v_0	Rychlost chodu nástroje	[m.s ⁻¹]
$v_r(ZP)$	Rychlost toku v radiálním směru u zpětného protlačování	[s ⁻¹]
z	Okamžitá výška	[mm]

Řecká abeceda

Označení	Legenda	Jednotka
α	Redukční úhel průtlačnice	[°]
Δl	Prodloužení vzorku	[mm]
ε	poměrné délkové prodloužení	[-]
μ	Poissonova konstanta	[-]
ρ	Měrná hmotnost	[kg.m ³]
σ	mechanické napětí	[MPa]
σ_d	Deformační odpor	[MPa]
$\sigma_d (D)$	Deformační odpor při zpětném protlačování dle Dippera	[MPa]
$\sigma_d (F)$	Deformační odpor při dopředném protlačování dle Feldmanna	[MPa]
$\sigma_d (G)$	Deformační odpor při dopředném protlačování dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_d (S)$	Deformační odpor dle Siebela	[MPa]
$\sigma_d (Szp)$	Deformační odpor při zpětném protlačování dle Siebela	[MPa]
σ_p	Přirozený (základní) přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_{pS} (G)$	Střední hodnota přetvárného odporu pro výpočet dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{pI} (D)$	Přirozený přetvárný odpor v oblasti I dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{pII} (D)$	Přirozený přetvárný odpor v oblasti II dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{pII} (G)$	Přirozený přetvárný odpor v redukčním kuželu	[MPa]
$\sigma_{pIIs} (D)$	Střední přirozený přetvárný odpor v oblasti II dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{pIII} (D)$	Přirozený přetvárný odpor v oblasti III dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{pIII} (G)$	Přirozený přetvárný odpor v kalibračním očku	[MPa]
$\sigma_r (S)$	Radiální napětí dle Siebela	[MPa]
$\sigma_{rI} (D)$	Radiální napětí v oblasti I dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{rI} (G)$	Radiální napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{rII} (D)$	Radiální napětí v oblasti II dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{rIIs} (D)$	Střední radiální napětí v oblasti II dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{rIII} (G)$	Radiální napětí v kalibračním očku dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_z (S)$	Osové napětí dle Siebela	[MPa]
$\sigma_{zI} (G)$	Osové napětí v oblasti I dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{zI} (D)$	Osové napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{zII} (D)$	Osové napětí v oblasti II dle Dippera	[MPa]
$\sigma_{zIII} (G)$	Osové napětí v kalibračním očku dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{zI\max} (G)$	Maximální osové napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{pII\max} (G)$	Osové napětí na největším průměru redukčního kužele dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{pII\min} (G)$	Osové napětí na nejmenším průměru redukčního kužele dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{pII} (G)$	Osové napětí v redukčním kuželu dle Gubkina	[MPa]
$\sigma_{\varphi II} (G)$	Napětí na stěně redukčního kužele dle Gubkina	[MPa]
φ_c	celková logaritmická deformace	[-]
φ_i	logaritmická deformace dílčí části	[-]
$\varphi_{p\check{e}ch}$	logaritmická deformace při pēchování	[-]
φ_{Dprotl}	logaritmická deformace při dopředném protlačování	[-]
φ_{Zprotl}	logaritmická deformace při zpětném protlačování	[-]
$\varphi_I (D)$	Logaritmická deformace v oblasti I dle Dippera	[-]
$\varphi_{II} (D)$	Logaritmická deformace v oblasti II dle Dippera	[-]
$\varphi_{III} (D)$	Logaritmická deformace v oblasti III dle Dippera	[-]
$\varphi_I (G)$	Logaritmická deformace ve vstupním kontejneru	[-]
$\varphi_{III} (G)$	Logaritmická deformace v kalibračním očku	[-]
$\tau_f (S)$	Smykové napětí dle Siebela	[MPa]
$\tau_{fI} (D)$	Smykové napětí v oblasti I dle Dippera	[MPa]
$\tau_{fI} (G)$	Smykové napětí ve vstupním kontejneru dle Gubkina	[MPa]
$\tau_{fII} (D)$	Smykové napětí v oblasti II dle Dippera	[MPa]
$\tau_{fII} (G)$	Smykové napětí v redukčním kuželu dle Gubkina	[MPa]
$\tau_{fIII} (G)$	Smykové napětí v kalibračním očku dle Gubkina	[MPa]

Speciální znaky		
Označení	Legenda	Jednotka
$\hat{\alpha}$	Oblouková míra redukčního úhlu průtlačnice	[grad]
$\dot{\Phi}_r$ (DP)	rychlost deformace v radiálním směru u dopředného protlačování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_r$ (pěch)	Rychlost deformace v radiálním směru u pěchování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_r$ (ZP)	rychlost deformace v radiálním směru u zpětného protlačování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_t$ (DP)	rychlost deformace v tečném směru u dopředného protlačování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_t$ (pěch)	rychlost deformace v tečném směru u pěchování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_t$ (ZP)	rychlost deformace v tečném směru u zpětného protlačování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_z$ (DP)	rychlost deformace v osovém směru u dopředného protlačování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_z$ (pěch)	rychlost deformace v osovém směru u pěchování	[s ⁻¹]
$\dot{\Phi}_z$ (ZP)	rychlost deformace v osovém směru u zpětného protlačování	[s ⁻¹]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Příklady součástí vyrobených objemovým tvářením [2].....	9
Obr. 2: Výkres zadané součásti.....	10
Obr. 3: Množství odpadu při technologii obrábění.....	11
Obr. 4: Vlákná ve tvářeném a v obráběném materiálu	11
Obr. 5: Tahový diagram se smluvní mezí kluzu [11]	12
Obr. 6: Způsoby pýchování [15]	13
Obr. 7: Hlavní způsoby dopředného protlačování [15]	13
Obr. 8: Dopředné protlačování [15].....	14
Obr. 9: Sdružené protlačování [15].....	14
Obr. 10: Radiální protlačování [15].....	14
Obr. 11: Polotovar špalíku.....	15
Obr. 12: Polotovar prstence	15
Obr. 13: Příklad vhodných a nevhodných tvarů součástí [25].....	16
Obr. 14: Součásti typu kalíšek [6]	17
Obr. 15: Součásti typu čep [6]	17
Obr. 16: Rotační symetrické součásti s otvorem [6].....	17
Obr. 17: Nesymetrické součásti [6]	17
Obr. 18: Protlačovaná součást z hliníkové slitiny [27].....	18
Obr. 19: Rozdělení tvářených hliníkových slitin [29]	18
Obr. 20: Binární diagram slitiny Al-Mn [16]	19
Obr. 21: Snímek struktury fosfátových povlaků [31].....	20
Obr. 22: Tvary funkčních částí pýchovníku [15].....	21
Obr. 23: Geometrie dutiny pýchovníku [25].....	21
Obr. 24: Konstrukce pýchovacích nástrojů [15]	22
Obr. 25: Tvar průtlačníku pro tvářenění plných součástí [26]	22
Obr. 26: Tvar průtlačníku pro tvářenění dutých součástí [26]	23
Obr. 27: Doporučený tvar průtlačnice pro dopředné protlačování [26]	23
Obr. 28: Dělená průtlačnice pro dopředné protlačování [15]	24
Obr. 29: Dělená průtlačnice s vložkou pro dopředné protlačování [22].....	24
Obr. 30: Průtlačník pro zpětné protlačování [26]	24
Obr. 31: Vliv odlehčení dříku na deformační odpor [25].....	25
Obr. 32: Vliv tvaru čela nástroje na deformační odpor [25].....	25
Obr. 33: Průtlačnice pro zpětné protlačování [26].....	25
Obr. 34: Pracovní diagram beranu mechanického a hydraulického lisu [25].....	27
Obr. 35: Geometrické modely – určení logaritmických deformací	28
Obr. 36: Model zpevnění materiálu [5]	29
Obr. 37: Geometrický model pýchování dle Siebela [5], [25].....	30
Obr. 38: Model dopředného protlačování [5]	30
Obr. 39: Geometrický model kalibračního očka [5], [13]	31
Obr. 40: Geometrický model redukčního kužele [5], [13]	32
Obr. 41: Geometrický model vstupního válce (kontejneru) [5], [13].....	33
Obr. 42: Model zpětného protlačování [5].....	34
Obr. 43: Geometrický model zpětného protlačování dle Dippera [5], [25].....	34
Obr. 44: Model zpevnění materiálu [5]	35
Obr. 45: Geometrické modely pro určení rychlosti deformace [38].....	37

Obr. 46: Způsob upevnění podlah.....	38
Obr. 47: Součást se zadanými rozměry	38
Obr. 48: Výrobní postup – varianta A	39
Obr. 49: Nejvhodnější průměr polotovaru – metoda A	39
Obr. 50: Výrobní postup – varianta B.....	40
Obr. 51: Nejvhodnější průměr polotovaru – metoda B	40
Obr. 52: Výrobní postup – varianta C.....	41
Obr. 53: Nejvhodnější průměr polotovaru – metoda C	41
Obr. 54: Průběhy celkových logaritmických deformací	42
Obr. 55: Dílčí objemy konečné součásti	43
Obr. 56: Rozměry polotovaru.....	43
Obr. 57: Rozměry polotovaru - I. operace	43
Obr. 58: Výpočet výšky h_3	44
Obr. 59: Rozměry polotovaru – II. operace	44
Obr. 60: Spěchovaná součást v 1. operaci	45
Obr. 61: Průběh radiálního a osového napětí v 1. operaci	46
Obr. 62: Dílčí podoperace kombinovaného protlačování ve II. operaci.....	46
Obr. 63: Dopředné protlačování-části protlačku.....	46
Obr. 64: Dopředné protlačování části B	47
Obr. 65: Geometrický model kalibračního očka.....	47
Obr. 66: Dopředné protlačování části C	48
Obr. 67: Model redukčního kužele	49
Obr. 68: Dopředné protlačování části D	49
Obr. 69: Geometrický model vstupního kontejneru	50
Obr. 70: Rozdělení protlačování otvoru $\varnothing d_1$	51
Obr. 71: Zpětné protlačování otvoru $\varnothing d_1$ do většího průměru $\varnothing D_1$	52
Obr. 72: Zpětné protlačování otvoru $\varnothing d_1$ do menšího průměru $\varnothing D_2$	53
Obr. 73: Rozdělení protlačování otvoru $\varnothing d_2$	53
Obr. 74: Zpětné protlačování otvoru $\varnothing d_2$ do většího průměru $\varnothing D_1$	53
Obr. 75: Zpětné protlačování otvoru $\varnothing d_2$ do menšího průměru $\varnothing D_2$	54
Obr. 76: Průběh napětí u zpětného protlačování průřezu mezikruží dle Dippera.....	56
Obr. 77: Třetí operace – výsledná součást.....	57
Obr. 78: Průběh radiálního a osového napětí při pěchování ve 3. operaci	58
Obr. 79: Postupový automat TPM 8-A [36]	59
Obr. 80: Sestava postupového nástroje.....	60
Obr. 81: Tvar lisovnice ve II. operaci	61
Obr. 82: Detail složeného lisovníku	61
Obr. 83: Parametry pro výpočet rychlosti deformace v 1. operaci	62
Obr. 84: Parametry pro výpočet rychlosti deformace – dopředné protlačování ve 2 operaci ..	62
Obr. 85: Parametry pro výpočet rychlosti deformace – zpětné protlačování $\varnothing d_1$	63
Obr. 86: Parametry pro výpočet rychlosti deformace – zpětné protlačování $\varnothing d_2$	63
Obr. 87: Parametry pro výpočet rychlosti deformace v 1. operaci	64
Obr. 88: Závislost nákladů na počtu vyrobených kusů.....	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Chemické složení AlMn1 [8]	10
Tab. 2: Materiálové vlastnosti slitiny AlMn1 [8]	10
Tab. 3: Vliv legujících prvků a příměsí na vlastnosti hliníku [28]	19
Tab. 4: Doporučená geometrie dutiny pýchovníku [26]	21
Tab. 5: Optimální rozměry průtláčnice [26]	23
Tab. 6: Doporučená geometrie zpětného průtláčníku [26]	24
Tab. 7: Materiály vhodné pro protlačovací nástroje [34]	26
Tab. 8: Přehled slinutých karbidů používaných při tváření [6]	26
Tab. 9: Hodnoty celkové logaritmické deformace – metoda A	39
Tab. 10: Hodnoty celkové logaritmické deformace – metoda B	40
Tab. 11: Hodnoty celkové logaritmické deformace – metoda C	41
Tab. 12: Hodnoty objemů	44
Tab. 13: Výsledky výpočtů zpětného protlačování části F	53
Tab. 14: Výsledky výpočtů zpětného protlačování části G	53
Tab. 15: Hodnoty deformace ve 3. operaci	57
Tab. 16: Technické parametry postupového automatu TPM 8-A [36]	59
Tab. 17: Základní rozdělení nákladů [33]	65

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Katalog přetvárných odporů pro hliníkovou slitinu AlMn1
Příloha 2 Odvození vztahů pro pěchování dle Siebela
Příloha 3 Odvození vztahů pro dopřední protlačování dle Gubkina
Příloha 4 Odvození vztahů pro zpětné protlačování dle Dippera
Příloha 5 Výpočet vztahů pro zpětné protlačování ve druhé operaci dle Siebela (části G a F)
Příloha 6 Zástavbový výkres nástrojové sestavy pro stroj TPM 8-A
Příloha 7 Odvození vztahů pro rychlosti deformace pro jednotlivé tvářecí procesy

SEZNAM VÝKRESŮ

VÝKRES SOUČÁSTI	A4-DP-2019-001
VÝKRES SESTAVY	A2-DP-2019-002
PĚCHOVNICE 1	A4-DP-2019-003
PĚCHOVNÍK 1	A4-DP-2019-004
PRŮTLAČNICE 1	A4-DP-2019-005
PRŮTLAČNÍK 1	A4-DP-2019-006
PRŮTLAČNÍK 2	A3-DP-2019-007
PRŮTLAČNICE 2	A4-DP-2019-008
PRŮTLAČNÍK 3	A4-DP-2019-009
PĚCHOVNÍK 2	A3-DP-2019-010

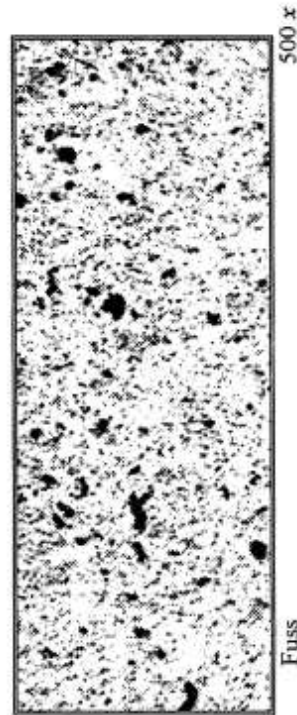
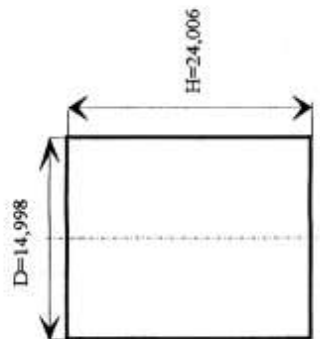
Katalog přetvárných odporů pro hliníkovou slitinu AlMn1 [35]

Grantová agentura

Materiál ČSN 42 44 32 . 21

MECHANICKÉ VLASTNOSTI	
Pevnost v tahu R_m [MPa]	-
Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa]	-
Tažnost A_1 [%]	-
Kontrakce Z [%]	-
Tvrdość HB 1/10K	39,6

CHEMICKÉ SLOŽENÍ V %				
Mn	Si	Mg	Fe	Al
1.08	0.20	0.02	0.34	do 100 %



Hodnoty dosažených a kritických logaritmických stupňů přetvoření pro měřené teploty						
teplota	21°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
φ_{loc}	2,06	1,86	1,98	1,87	2,04	2,03
φ_{lim}	-	-	-	-	2,04	-

- 87 -

ČSN 42 44 32.21

projekt 101-94-0556

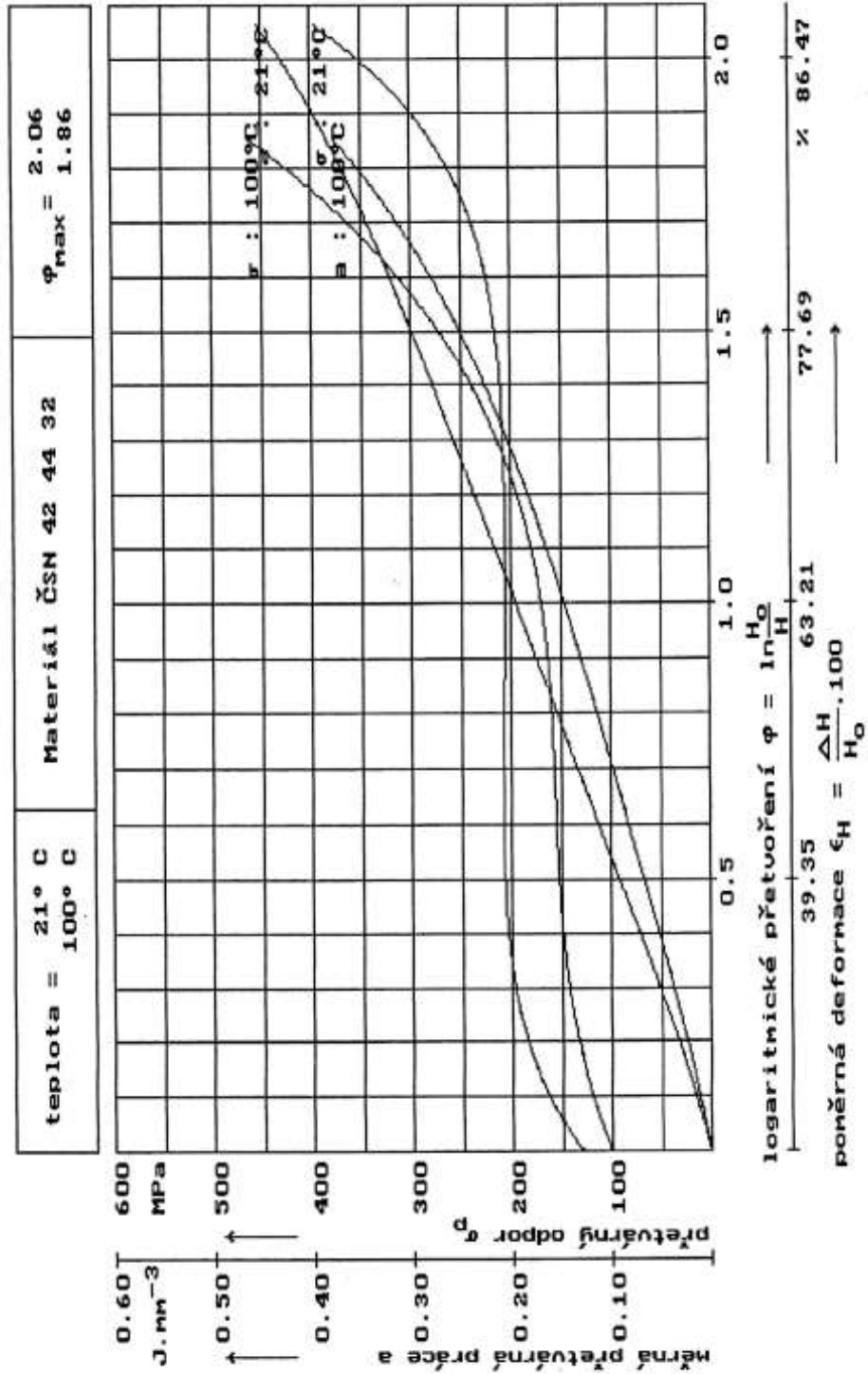
Materiál 42 44 32.21				teplota t = 21 °C			$\dot{\varphi}_{st} = 0,11 \text{ sec}^{-1}$	
	deformace	síla	min. D	max. D	čas	přetv. odpor	práce	
b_0	0.070	17.436	15.318	15.125	0.249	128.512	0.000	
b_1	23.001	228.866	4.235	7.031	12.812	417.840	0.129	
b_2	-9.388	-719.536	4.127	3.044	-0.337	-860.852	0.209	
b_3	1.534	1137.911	0.000	0.000	-33.812	872.687	-0.287	
b_4	0.000	-736.031	0.000	0.000	37.698	-445.322	0.218	
b_5	0.000	175.821	0.000	0.000	-9.799	92.950	-0.089	
b_6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	
rezid. součet čtverců	0.037	2797.729	2.520	0.741	19.067	6662.673	-	
rozptyl	0.001	121.640	0.097	0.028	0.829	289.681	-	
koefficient korelace	1.000	0.998	0.999	1.000	0.998	0.960	-	
stupeň polynomu	3	5	2	2	5	5	6	

Materiál 42 44 32.21				teplota t = 100 °C			$\dot{\varphi}_{st} = 0,11 \text{ sec}^{-1}$	
	deformace	síla	min. D	max. D	čas	přetv. odpor	práce	
b_0	0.392	21.743	14.986	15.329	0.586	99.587	0.000	
b_1	19.813	-50.038	2.142	7.594	0.161	220.975	0.100	
b_2	-5.005	335.952	5.522	2.787	69.599	-312.169	0.110	
b_3	0.000	-415.016	0.000	0.000	-159.000	160.981	-0.104	
b_4	0.000	188.779	0.000	0.000	124.919	0.000	0.040	
b_5	0.000	0.000	0.000	0.000	-30.094	0.000	0.000	
b_6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
rezid. součet čtverců	0.973	423.631	0.137	0.826	11.892	366.497	-	
rozptyl	0.065	32.587	0.009	0.055	0.991	26.178	-	
koefficient korelace	0.999	1.000	1.000	1.000	0.998	0.999	-	
stupeň polynomu	2	4	2	2	5	3	4	

ČSN 42 44 32.21

- 88 -

Grantová agentura

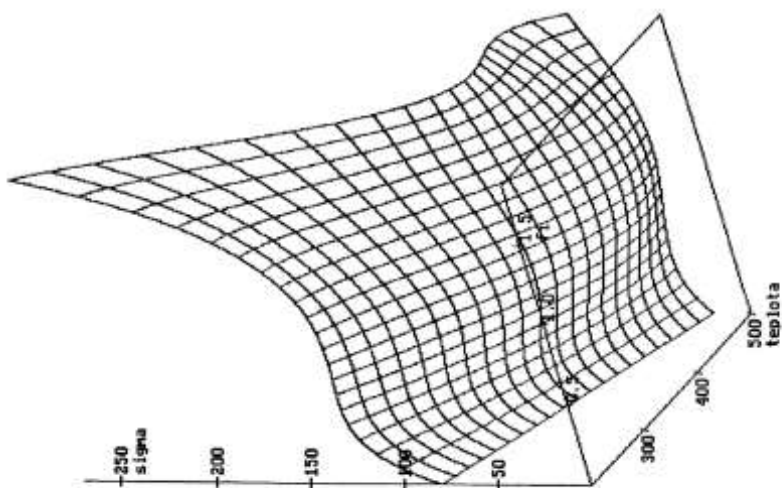


Grantová agentura

ČSN 424432
200-500 °C

sigma

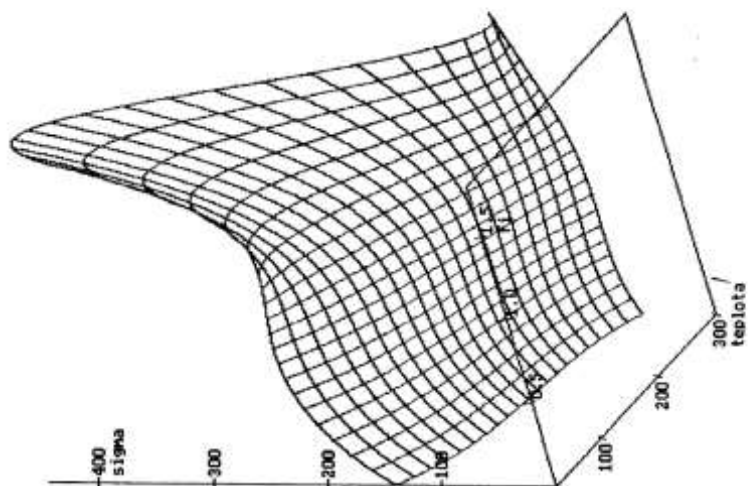
X: <0,1,870>
Y: <200,500>
Z: <0,256,799>



ČSN 424432
21-300 °C

sigma

X: <0,1,800>
Y: <21,300>
Z: <0,422,092>



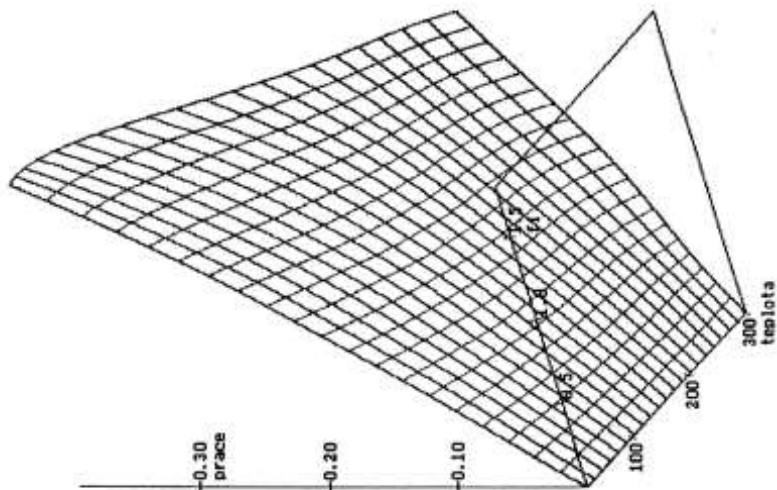
ČSN 42 44 32.21

- 95 -

Grantová agentura

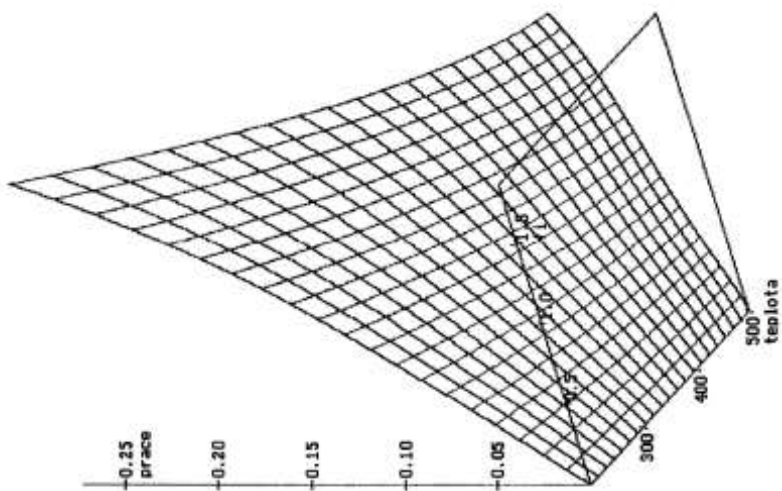
ČSN 424432
21-300 °C
práce

X: <0,1,800>
Y: <21,300>
Z: <0,0,374>



ČSN 424432
200-500 °C
práce

X: <0,1,870>
Y: <200,500>
Z: <0,0,259>



ČSN 42 44 32.21

- 97 -

Výpočet koeficientů pro rovnici přirozeného přetvárného odporu a měrné přetvárné práce:

- Přirozený přetvárný odpor σ_p :

$$\begin{aligned}\sigma_p &= \sum_{i=1}^k b_i \cdot T^{r_i} \cdot \varphi_i^{s_i} = \\ &= 8,7655619957 \cdot 10^{-1} \cdot 21^1 \cdot \varphi^4 + 1,5710191596 \cdot 10^2 \cdot 21^0 \cdot \varphi^0 + \\ &\quad + 2,1561507381 \cdot 10^2 \cdot 21^0 \cdot \varphi^1 - 1,5790726576 \cdot 10^2 \cdot 21^0 \cdot \varphi^2 + \\ &\quad + 3,9832311010 \cdot 10^{-6} \cdot 21^3 \cdot \varphi^5 - 4,7091852781 \cdot 10^{-1} \cdot 21^1 \cdot \varphi^1 - \\ &\quad - 3,3077123741 \cdot 10^{-3} \cdot 21^2 \cdot \varphi^4 - 8,9009672953 \cdot 10^{-1} \cdot 21^1 \cdot \varphi^0 - \\ &\quad - 1,2304862558 \cdot 10^{-3} \cdot 21^2 \cdot \varphi^5 + 5,1456025859 \cdot 10^0 \cdot 21^0 \cdot \varphi^5 + \\ &\quad + 5,0142096795 \cdot 10^{-6} \cdot 21^3 \cdot \varphi^3 + 4,4772667978 \cdot 10^{-3} \cdot 21^2 \cdot \varphi^0 - \\ &\quad - 8,4496431129 \cdot 10^{-6} \cdot 21^3 \cdot \varphi^0 = \\ &= 18,2187 \cdot \varphi^4 + 157,1019 \cdot \varphi^0 + 215,6151 \cdot \varphi^1 - 157,9073 \cdot \varphi^2 + \\ &\quad + 0,0369 \cdot \varphi^5 - 9,8893 \cdot \varphi^1 - 1,4587 \cdot \varphi^4 - 18,6920 \cdot \varphi^0 - 0,5426 \cdot \varphi^5 + \\ &\quad + 5,1456 \cdot \varphi^5 + 0,0464 \cdot \varphi^3 + 1,9745 \cdot \varphi^0 - 0,0783 \cdot \varphi^0 = \\ &= \mathbf{4,64 \cdot \varphi^5 + 16,76 \cdot \varphi^4 + 0,05 \cdot \varphi^3 - 157,91 \cdot \varphi^2 + 205,73 \cdot \varphi + 140,31} \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

kde: σ_p [MPa] – přirozený přetvárný odpor
 T [°C] – teplota materiálu
 φ_i [-] – logaritmická deformace jednotky
 k [-] – je optimální počet členů pro konkrétní materiál a teplotní zónu
 b_i, r_i, s_i [-] – exponenty, vybrané statistickým rozbohem tak, aby každý člen v aproximaci byl významný se spolehlivostí 95%

- Měrná přetvárná práce A_j

$$\begin{aligned}A_j &= \sum_{i=1}^k b_i \cdot T^{r_i} \cdot \varphi_i^{s_i} = 0,0063 \cdot \varphi^4 - 0,0056 \cdot \varphi^3 + 0,0006 \cdot \varphi^2 + 0,19 \cdot \varphi \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-3}\text{]} \\ &= 2,0317294209 \cdot 10^{-1} \cdot 21^0 \cdot \varphi^1 - 6,7995044959 \cdot 10^{-4} \cdot 21^1 \cdot \varphi^1 - \\ &\quad - 1,2946403269 \cdot 10^{-6} \cdot 21^2 \cdot \varphi^4 + 6,2835159930 \cdot 10^{-14} \cdot 21^5 \cdot \varphi^3 + \\ &\quad + 3,2795891924 \cdot 10^{-4} \cdot 21^1 \cdot \varphi^4 - 2,7849406558 \cdot 10^{-16} \cdot 21^6 \cdot \varphi^2 + \\ &\quad + 3,7597558251 \cdot 10^{-9} \cdot 21^3 \cdot \varphi^1 + 1,3575062562 \cdot 10^{-6} \cdot 21^2 \cdot \varphi^2 - \\ &\quad - 2,6603927676 \cdot 10^{-4} \cdot 21^1 \cdot \varphi^3 = \\ &= 0,2032 \cdot \varphi^1 - 0,0143 \cdot \varphi^1 - 0,0006 \cdot \varphi^4 + 2,5663 \cdot 10^{-7} \cdot \varphi^3 + 0,0069 \cdot \varphi^4 - \\ &\quad - 2,3885 \cdot 10^{-8} \cdot \varphi^2 + 3,4819 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi^1 + 0,0006 \cdot \varphi^2 - 0,0056 \cdot \varphi^3 = \\ &= \mathbf{0,0063 \cdot \varphi^4 - 0,0056 \cdot \varphi^3 + 0,0006 \cdot \varphi^2 + 0,19 \cdot \varphi} \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-3}\text{]}\end{aligned}$$

kde: A_j [J.mm⁻³] – měrná přetvárná práce
 T [°C] – teplota materiálu
 φ_i [-] – logaritmická deformace jednotky
 k [-] – je optimální počet členů pro konkrétní materiál a teplotní zónu
 b_i, r_i, s_i [-] – exponenty, vybrané statistickým rozbohem tak, aby každý člen v aproximaci byl významný se spolehlivostí 95%

Odvození vztahů pro pěchování dle Siebela [5], [15], [25]

Podmínky rovinné úlohy ve válc. souřadnicích:

$$\frac{d\sigma_z(s)}{dz} = 0; \frac{d\sigma_r(s)}{dz} = 0; \frac{d\sigma_\varphi(s)}{dz} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_z(s)}{d\varphi} = 0 \quad (2)$$

$$\tau_{r\varphi}(s) = \tau_{z\varphi}(s) = 0 \quad (3)$$

Podmínka pro průměr:

$$\varnothing D_{(s)} \gg h \quad (4)$$

Podmínky rotačně symetrické úlohy:

$$d\varepsilon_\varphi = d\varepsilon_r \quad (5)$$

$$\sigma_r(s) = \sigma_t(s) \quad (6)$$

Podmínka plasticity τ_{\max} (7)

$$\sigma_r(s) - \sigma_z(s) = \sigma_p \quad (7)$$

Podmínka rovnováhy sil v radiálním směru:

$$\sum F = 0 \quad (8)$$

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

Rovnici (8) se dále upraví roznásobením vztahem $1/(h \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr)$. Vznikne tak rovnice:

$$-\frac{\sigma_r(s)}{dr} + \frac{(\sigma_r(s) + d\sigma_r(s)) \cdot (r + dr)}{r \cdot dr} - \frac{2 \cdot \sigma_t(s) \cdot \sin \frac{d\varphi}{2}}{r \cdot d\varphi} + \frac{2 \cdot \tau_f(s)}{h(s)} = 0 \quad (9)$$

Pro malé úhly můžeme zavést následující vztah:

$$\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2} \quad (10)$$

Úpravou rovnice (9) roznásobením a přepisem malého úhlu podle vztahu (10) lze získat:

$$-\frac{\sigma_r(s)}{dr} + \frac{\sigma_r(s) \cdot r + \sigma_r(s) \cdot dr + d\sigma_r(s) \cdot r + d\sigma_r(s) \cdot dr}{r \cdot dr} - \frac{2 \cdot \sigma_t(s) \cdot \frac{d\varphi}{2}}{r \cdot d\varphi} + \frac{2 \cdot \tau_f(s)}{h(s)} = 0 \quad (11)$$

Další úpravou rovnice (11) a zanedbáním elementu $d\sigma_r \cdot dr$ byla obdržena diferenciální rovnice:

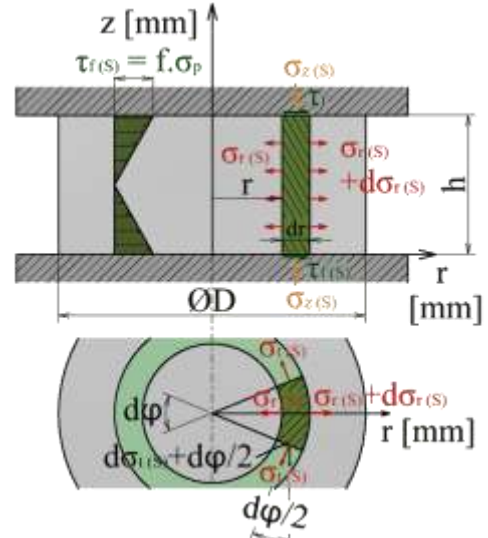
$$\frac{d\sigma_r(s)}{dr} + \frac{\sigma_r(s) - \sigma_t(s)}{r} + \frac{2 \cdot \tau_f(s)}{h} = 0 \quad (12)$$

S využitím podmínky (6) lze vztah (12) zjednodušit na:

$$\boxed{\frac{d\sigma_r(s)}{dr} + \frac{2 \cdot \tau_f(s)}{h} = 0} \quad (13)$$

Alternativní rovnici se zaměněnými proměnnými lze získat derivací podmínky τ_{\max} z rovnice (7) podle poloměru r:

$$\boxed{\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2 \cdot \tau_f}{h} = 0} \quad (14)$$



Obr. P2.1: Geometrický model pěchování dle Siebela [5], [25]

Řešení dle Siebela pro plný špalík:

Siebel při odvozování vychází z integrace rovnice (14) za předpokladu, že osově napětí $\sigma_{z(s)}$ je konstantní po celé výšce pěchovaného vzorku.

Pro smykové napětí $\tau_f(s)$ platí tzv Coulombův zákon (15):

$$\tau_f(s) = f \cdot \sigma_{z(s)} = -f \cdot \sigma_p \text{ [MPa]} \quad (15)$$

Integrací rovnice (14) s využitím vztahu (15):

$$\int d\sigma_{z(s)} = \int \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_p}{h} \cdot dr \rightarrow \sigma_{z(s)} = \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \sigma_p \cdot r + C \quad (16)$$

Úpravou rovnice (16) s dosazením okrajových podmínek $r=D/2$ a $\sigma_{z(s)}=\sigma_p$ byla vyjádřena konstanta C:

$$-\sigma_p = \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \sigma_p \cdot \frac{D}{2} + C \rightarrow C = -\sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \frac{D}{2} \right] \quad (17)$$

Dosazením konstanty C z rovnice (17) do rovnice (16) vznikl vztah pro osově napětí $\sigma_{z(s)}$:

$$\sigma_{z(s)} = \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \sigma_p \cdot r - \sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \frac{D}{2} \right] \quad (18)$$

Osově napětí σ_z dle Siebela pro plný špalík:

Konečnou úpravou rovnice (18):

$$\sigma_{z(s)} = -\sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \left(\frac{D}{2} - r \right) \right] \text{ [MPa]} \quad (19)$$

Radiální napětí σ_r dle Siebela pro plný špalík:

Vyjádřením σ_r z podmínky τ_{\max} : byl získán vztah pro radiální napětí $\sigma_{r(s)}$

$$\sigma_{r(s)} = \sigma_{z(s)} + \sigma_p \quad (20)$$

$$\sigma_{r(s)} = -\sigma_p \cdot \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \left(\frac{D}{2} - r \right) \text{ [MPa]} \quad (21)$$

Deformační odpor $\sigma_{d(s)}$ dle Siebela pro plný špalík:

Deformační odpor je dán vztahem:

$$\sigma_{d(s)} = -\sigma_{z, \text{stř}(s)} = \frac{1}{S} \cdot \int_S \sigma_{z(s)} \cdot ds \text{ [MPa]} \quad (22)$$

Úpravou vztahu (22) vznikne rozvedený plošný integrál:

$$\sigma_{d(s)} = -\frac{4}{\pi \cdot D^2} \cdot \int_0^{\frac{D}{2}} \sigma_{z(s)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$$

Dosazením vztahu (19) do tohoto integrálu:

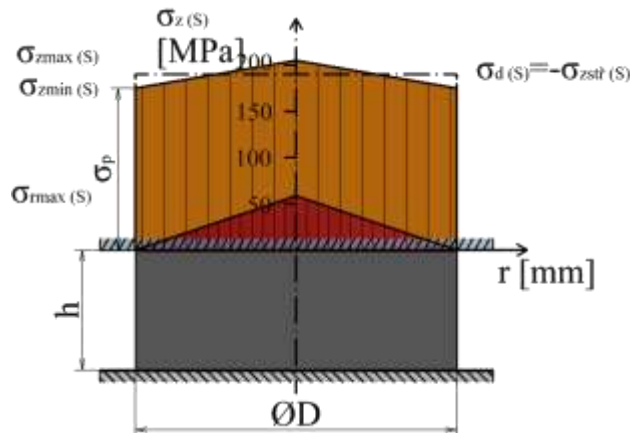
$$\sigma_{d(s)} = -\frac{8}{D^2} \cdot \int_0^{\frac{D}{2}} -\sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot \left(\frac{D}{2} - r \right) \right] \cdot r \cdot dr = \frac{8 \cdot \sigma_p}{D^2} \cdot \int_0^{\frac{D}{2}} \left(r + \frac{f \cdot D \cdot r}{h} - \frac{2 \cdot f \cdot r^2}{h} \right) dr$$

Dosazením mezi integrály a úpravou vznikne konečný vztah:

$$\sigma_{d(s)} = \frac{8 \cdot \sigma_p}{D^2} \cdot \left(\frac{D^2}{8} + \frac{f \cdot D^3}{8 \cdot h} - \frac{2 \cdot f \cdot D^3}{24 \cdot h} \right) = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{f \cdot D}{h} - \frac{2 \cdot f \cdot D}{3h} \right)$$

$$\sigma_{d(s)} = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D}{h} \right) \text{ [MPa]} \quad (23)$$

Průběh radiálního napětí $\sigma_r(s)$ a osového napětí $\sigma_z(s)$ je znázorněno na obrázku P2.2.



Obr. P2.2: Průběh osového a radiálního napětí dle Siebela [5], [25]

Deformační odpor $\sigma_{d(s)}$ dle Siebela pro prstenc:

Pro odvození vztahů je potřeba zavést příčinná označení průměrů. Proto bylo zavedeno pro průměr otvoru mezikruží (menší průměr) označení d a pro větší průměr prstence označení D .

Všechny vztahy pro radiální a osová napětí a napětí třecí se určují pro mezikruží stejně jako pro plný průřez. Pouze se při dosazování do okrajových podmínek pro obecný poloměr r dosadí namísto nuly nejmenší rozměr průřezu – tedy $d/2$.

Při odvozování deformačního odporu bylo počítáno s rozdílem dvou integrálů s jinými mezemi:

Úpravou vztahu (22) vznikl rozvedený plošný integrál:

$$\sigma_{d(s)} = -\frac{4}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \cdot \left(\int_0^{\frac{D}{2}} \sigma_z(s) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr - \int_0^{\frac{d}{2}} \sigma_z(s) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \right)$$

Dosazením vztahu (19) do tohoto integrálu:

$$\sigma_{d(s)} = -\frac{8}{D^2 - d^2} \left\{ \int_0^{\frac{D}{2}} -\sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \left(\frac{D}{2} - r \right) \right] r \cdot dr - \int_0^{\frac{d}{2}} -\sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \left(\frac{d}{2} - r \right) \right] r \cdot dr \right\}$$

$$\sigma_{d(s)} = \frac{8 \cdot \sigma_p}{D^2 - d^2} \cdot \left\{ \int_0^{\frac{D}{2}} \left(r + \frac{f \cdot D \cdot r}{h} - \frac{2 \cdot f \cdot r^2}{h} \right) dr - \int_0^{\frac{d}{2}} \left(r + \frac{f \cdot d \cdot r}{h} - \frac{2 \cdot f \cdot r^2}{h} \right) dr \right\}$$

Dosazením mezí integrálu a úpravou byl odvozen konečný vztah:

$$\sigma_{d(s)} = \frac{8 \cdot \sigma_p}{D^2 - d^2} \cdot \left[\left(\frac{D^2}{8} + \frac{f \cdot D^3}{8 \cdot h} - \frac{2 \cdot f \cdot D^3}{24 \cdot h} \right) - \left(\frac{d^2}{8} + \frac{f \cdot d^3}{8 \cdot h} - \frac{2 \cdot f \cdot d^3}{24 \cdot h} \right) \right]$$

$$\sigma_{d(s)} = \sigma_p \cdot \left[1 + \frac{f \cdot (D^2 - d^2)}{h} - \frac{2 \cdot f \cdot (D - d)}{3h} \right]$$

$$\sigma_{d(s)} = \sigma_p \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot (D - d)}{h} \right] \text{ [MPa]}$$

(24)

Odvození vztahů pro dopředné protlačování dle Gubkina [5], [13]

Výpočtový model vychází z rotačně symetrického geometrického modelu (viz obr P3.1) pro podmínky rovinné úlohy a vychází z analytického řešení průchodu materiálu kuželovou průtláčnicí. Model je nutné rozdělit na tři části – na zásobník (1), na průtláčnici (2) a na kalibrační očko (3).

Řešení pro kalibrační očko:

Podmínka rovnováhy sil podle geometrického modelu (viz obr P3.2) v radiálním směru:

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_{zIII(G)} \cdot \frac{\pi \cdot D_{III(G)}^2}{4} - (\sigma_{zIII(G)} + d\sigma_{zIII(G)}) \cdot \frac{\pi \cdot D_{III(G)}^2}{4} + \tau_{fIII(G)} \cdot \pi \cdot D_{III(G)} \cdot dz = 0$$

Úpravami vznikne vztah:

$$d\sigma_{zIII(G)} \cdot \frac{\pi \cdot D_{III(G)}^2}{4} - \tau_{fIII(G)} \cdot \pi \cdot D_{III(G)} \cdot dz = 0$$

Po roznásobení členem $-4/\pi \cdot D_{III(G)}^2 \cdot dz$ byla získána diferenciální rovnice:

$$\frac{d\sigma_{zIII(G)}}{dz} - \frac{4 \cdot \tau_{fIII(G)}}{D_{III(G)}} = 0 \quad (2)$$

Materiál působí v kalibračním očku na stěnu radiálním tlakem, který je rovný nejvýše $\sigma_{pIII(G)}$. Proto smykové napětí τ_{fIII} platí dle Coulombova vztahu podmínka:

$$\tau_{fIII(G)} = f_3 \cdot \sigma_{rIII(G)} = -f_3 \cdot \sigma_{pIII(G)} \quad [MPa] \quad (3)$$

Integrací (2) vznikne následující diferenciální rovnice se separovanými proměnnými:

$$\int d\sigma_{zIII(G)} = \int \frac{4 \cdot f_3 \cdot \sigma_{pIII(G)}}{D_{III(G)}} \cdot dz$$

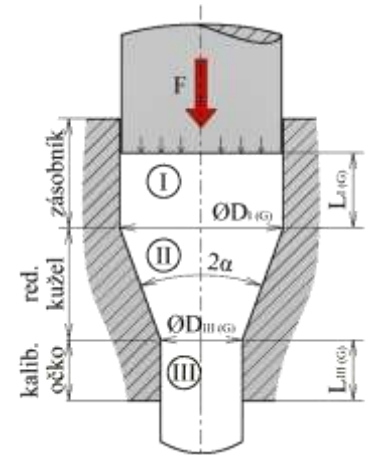
$$\sigma_{zIII(G)} = \frac{4 \cdot f_3 \cdot \sigma_{pIII(G)}}{D_{III(G)}} \cdot z + C \quad (4)$$

Dosazením okrajových podmínek $z_{(G)}=0, \sigma_{zIII(G)}=0$ do (4) je určena konstanta $C=0$.

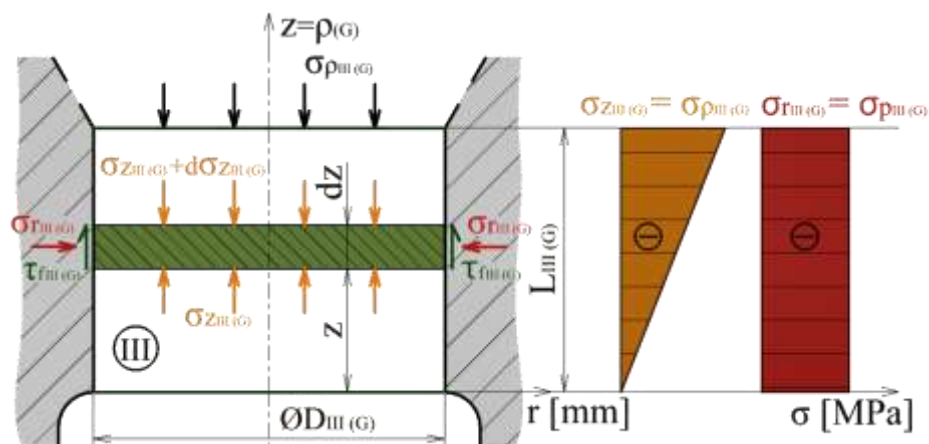
Osově napětí $\sigma_{zIII(G)}$ na výstupu z redukčního kužele:

Pro okamžitou výšku "z" vznikne obecná rovnice pro osově napětí v kalibračním očku:

$$\sigma_{zIII(G)} = \sigma_{pIImin(G)} = \sigma_{pIII(G)} \cdot \frac{4 \cdot f_3}{D_{III(G)}} \cdot z \quad [MPa] \quad (5)$$



Obr. P3.1: Model dopředného protlačování [5]



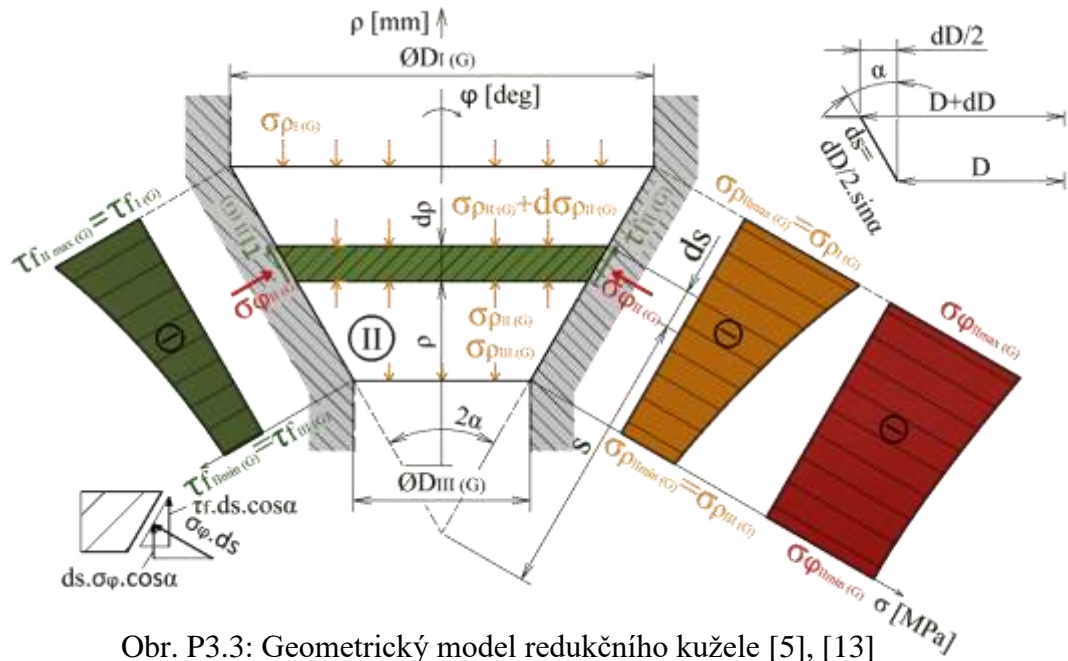
Obr. P3.2: Geometrický model kalibračního očka [5], [13]

Řešení pro redukční kužel:

Při průchodu kuželovou průtlačnicí vytváří materiál v ohnisku přetvoření vrstvy přibližně ve tvaru kulových vrchlíků. Ty jsou pro menší úhly do 30° zjednodušeny na deskové vrstvy. Podmínka rovnováhy sil podle geometrického modelu (viz obr P3.3) v radiálním směru:

$$\sum F = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sigma_{\rho II(G)} - \frac{\pi}{4} \cdot (D + dD)^2 \cdot (\sigma_{\rho II(G)} + d\sigma_{\rho II(G)}) + \frac{\pi}{2} \cdot (2D + dD) \cdot ds \cdot \tau_{fII(G)} \cdot \cos\alpha + \frac{\pi}{2} \cdot (2D + dD) \cdot ds \cdot \sigma_{\varphi II(G)} \cdot \sin\alpha = 0$$



Obr. P3.3: Geometrický model redukčního kužele [5], [13]

Roznásobením členem $4/\pi \cdot D^2 \cdot dD$ a upravením nabude rovnice tvaru:

$$\begin{aligned} & -\frac{2 \cdot \sigma_{\rho II(G)}}{D} - \frac{\sigma_{\rho II(G)} \cdot dD}{D^2} - \frac{d\sigma_{\rho II(G)}}{dD} - \frac{2 \cdot d\sigma_{\rho II(G)}}{D} - \frac{d\sigma_{\rho II(G)} \cdot dD}{D^2} + \frac{4 \cdot d_s \cdot \tau_{fII(G)} \cdot \cos\alpha}{D \cdot dD} \\ & + \frac{2 \cdot d_s \cdot \tau_{fII(G)} \cdot \cos\alpha}{D^2} + \frac{4 \cdot d_s \cdot \sigma_{\varphi II(G)} \cdot \sin\alpha}{D \cdot dD} + \frac{2 \cdot d_s \cdot \sigma_{\varphi II(G)} \cdot \sin\alpha}{D^2} = 0 \end{aligned}$$

Podle obrázku P3.3 lze vyjádřit element ds pomocí goniometrických funkcí z trojúhelníku:

$$ds = \frac{dD}{2 \cdot \sin\alpha} \quad (7)$$

Dosazením (7) do upravené podmínky rovnováhy sil:

$$\begin{aligned} & -\frac{2 \cdot \sigma_{\rho II(G)}}{D} - \frac{\sigma_{\rho II(G)} \cdot dD}{D^2} - \frac{d\sigma_{\rho II(G)}}{dD} - \frac{2 \cdot d\sigma_{\rho II(G)}}{D} - \frac{d\sigma_{\rho II(G)} \cdot dD}{D^2} + \frac{2 \cdot \tau_{fII(G)} \cdot \cos\alpha}{D \cdot \sin\alpha} \\ & + \frac{dD \cdot \tau_{fII(G)} \cdot \cos\alpha}{D^2 \cdot \sin\alpha} + \frac{2 \cdot \sigma_{\varphi II(G)}}{D} + \frac{\sigma_{\varphi II(G)} \cdot dD}{D^2} = 0 \end{aligned}$$

Zanedbáním součinů diferenciálů a diferenciálů vyšších řádů je obdržena diferenciální rovnice:

$$\frac{d\sigma_{\rho II(G)}}{dD} - \frac{2 \cdot \tau_{fII(G)}}{D \cdot \operatorname{tg}\alpha} - \frac{2 \cdot (\sigma_{\varphi II(G)} - \sigma_{\rho II(G)})}{D} = 0 \quad (8)$$

Pro další výpočty bylo využito podmínky plasticity τ_{\max} (9) a Coulombova vztahu pro smykové napětí od tření v redukčním očku $\tau_{fII(G)}$ (10):

$$\sigma_{\varphi II(G)} - \sigma_{\rho II(G)} = \sigma_{pII(G)} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

$$\tau_{fII(G)} = f_2 \cdot \sigma_{\varphi II(G)} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Dosazením Coulombova vztahu (10) a podmínky plasticity (9) do rovnice (8), vznikne:

$$\frac{d\sigma_{\rho II(G)}}{dD} - \frac{2 \cdot f_2}{D \cdot \operatorname{tg}\alpha} \cdot \sigma_{\rho II(G)} - \frac{2}{D} \cdot \left(1 + \frac{f_2}{\operatorname{tg}\alpha}\right) \cdot \sigma_{pII(G)} = 0 \quad (11)$$

Homogenní rovnici (11) je řešena metodou variace konstant:

Celá rovnice se roznásobí vztahem $\operatorname{tg}\alpha/2f_2$:

$$\frac{d\sigma_{\rho II(G)}}{dD} \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{2 \cdot f_2} - \frac{\sigma_{\rho II(G)}}{D} \cdot -\frac{1}{D} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} + 1\right) \cdot \sigma_{pII(G)} = 0$$

Vytknutím výrazu $1/D$ vznikne úprava:

$$\frac{d\sigma_{\rho II(G)}}{dD} \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha}{2 \cdot f_2} = \frac{1}{D} \cdot \left(\sigma_{pII(G)} \cdot \left[\frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} + 1\right] + \sigma_{\rho II(G)}\right)$$

Osamostatněním výrazu $1/D$ na pravé straně je umožněna integrace rovnice:

$$\int \frac{\operatorname{tg}\alpha}{2 \cdot f_2 \cdot \left(\sigma_{pII(G)} \cdot \left[\frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} + 1\right] + \sigma_{\rho II(G)}\right)} \cdot d\sigma_{\rho II(G)} = \int \frac{1}{D} \cdot dD$$

Substitucí $u = \sigma_{pII(G)} \cdot \left[\frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} + 1\right] + \sigma_{\rho II(G)}$ se pak řeší jednoduchý integrál:

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha}{2 \cdot f_2} \cdot \int \frac{1}{u} du = \int \frac{1}{D} dD \rightarrow \frac{\operatorname{tg}\alpha}{2 \cdot f_2} \cdot \ln|u| = \ln|D| + \ln|C|$$

Zpětnou substitucí:

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha}{2 \cdot f_2} \cdot \ln \left| \sigma_{pII(G)} \cdot \left[\frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} + 1\right] + \sigma_{\rho II(G)} \right| = \ln|D| + \ln|C|$$

$$\ln \left| \sigma_{pII(G)} \cdot \left[\frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} + 1\right] + \sigma_{\rho II(G)} \right| = \ln \left| C \cdot D^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg}\alpha}} \right|$$

Odlogaritmováním a vyjádřením $\sigma_{\rho II(G)}$ bylo získáno obecné řešení:

$$\sigma_{\rho II(G)} = -\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2}\right) \cdot \sigma_{pII(G)} + C \cdot D^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg}\alpha}} \quad (12)$$

Doplněním okrajových podmínek na vstupu do očka, kdy $D=D_{III(G)}$ a $\sigma_{\rho II(G)}=\sigma_{\rho III(G)}$ (viz rovnice (5)), byla vyjádřena integrační konstanta C:

$$\sigma_{pIII(G)} \cdot \frac{4 \cdot f_3}{D_{III(G)}} \cdot L_{III(G)} = -\left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2}\right) \cdot \sigma_{pII(G)} + C \cdot D_{III(G)}^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg}\alpha}}$$

$$C = \frac{\sigma_{pIII(G)} \cdot \frac{4 \cdot f_3}{D_{III(G)}} \cdot L_{III(G)} + \left(1 + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2}\right) \cdot \sigma_{pII(G)}}{D_{III(G)}^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg}\alpha}}}$$

Po dosažení konstanty zpět do rovnice (12) je obdržena obecná rovnice pro napětí $\sigma_{\rho II(G)}$ v kuželové části průtláčnice, které je závislé na okamžitém průměru kužele D a na přirozeném přetvárném odporu $\sigma_{p II(G)}$, který se mění v závislosti na logaritmickém přetvoření $\varphi_{II(G)} = \ln \frac{D^2}{D_{I(G)}^2}$.

$$\sigma_{\rho II(G)} = \sigma_{p II(G)} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_{III(G)}}{D_{III(G)}} \cdot \frac{\sigma_{p III(G)}}{\sigma_{p II(G)}} + \frac{\text{tg} \alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D}{D_{III(G)}} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\text{tg} \alpha}} - \frac{\text{tg} \alpha}{f_2} - 1 \right] \text{ [MPa]} \quad (13)$$

V případě řešení oblasti vstupu do redukčního kužele, kdy $D=D_{I(G)}$ lze vyjádřit napětí $\sigma_{\rho II \text{ max}}$. Za přirozený přetvárný odpor $\sigma_{p II(G)}$ se ovšem musí dosadit jeho střední hodnota ze vztahu

$$\sigma_{p II(G)} = \sigma_{p S(G)} = \frac{1}{\varphi_{III(G)} - \varphi_{I(G)}} \cdot \int_{\varphi_{I(G)}}^{\varphi_{III(G)}} \sigma_p \cdot d\varphi = A_{III-I(G)} \cdot \frac{1000}{\varphi_{III(G)} - \varphi_{I(G)}} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

Z podmínky plasticity (9) následně lze určit napětí $\sigma_{\varphi II(G)}$:

$$\sigma_{\varphi II(G)} = \sigma_{\rho II(G)} + \sigma_{p II(G)} \text{ [MPa]} \quad (15)$$

Neboli

$$\sigma_{\varphi II(G)} = \sigma_{p II(G)} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_{III(G)}}{D_{III(G)}} \cdot \frac{\sigma_{p III(G)}}{\sigma_{p II(G)}} + \frac{\text{tg} \alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D}{D_{III(G)}} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\text{tg} \alpha}} - \frac{\text{tg} \alpha}{f_2} \right] \text{ [MPa]} \quad (16)$$

Řešení pro vstupní kontejner (zásobník):

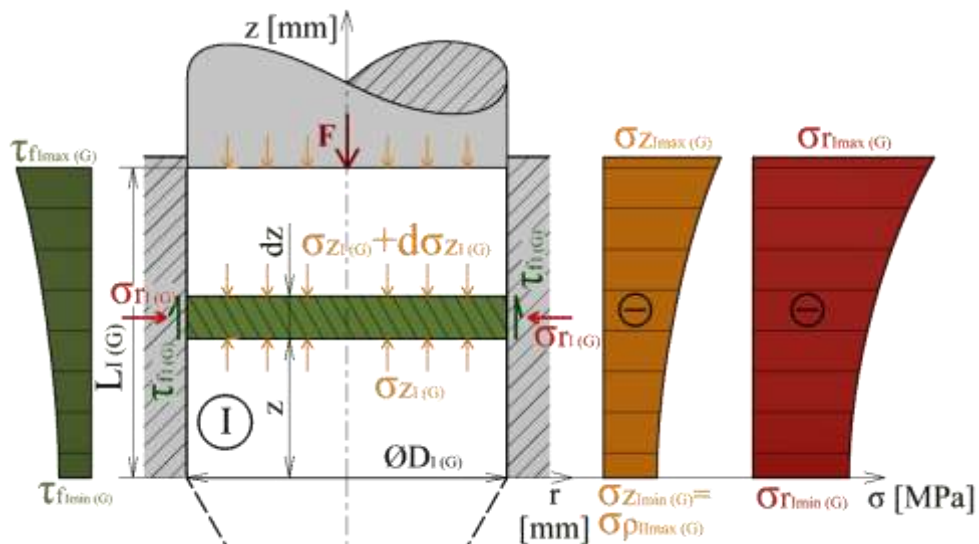
Na deskovém, rotačně symetrickém elementu se radiální a úhlová napětí rovnají: $\sigma_{\varphi} = \sigma_r$.

Po dosednutí materiálu je uvažováno, že je dále pružný. Pro všechny 3 složky deformací platí:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \varepsilon_z = 0 \quad (17)$$

Podmínka rovnováhy sil podle geometrického modelu podle obrázku P3.4 v osovém směru:

$$\sum F = 0 \rightarrow \sigma_{zI(G)} \cdot \frac{\pi \cdot D_{I(G)}^2}{4} - (\sigma_{zI(G)} + d\sigma_{zI(G)}) \cdot \frac{\pi \cdot D_{I(G)}^2}{4} + \tau_{\varphi I(G)} \cdot \pi \cdot D_{I(G)} \cdot dz = 0$$



Obr. P3.4: Geometrický model vstupního válce (kontejneru) [5], [13]

Vynásobením rovnice vztahem $4/\pi \cdot D_{I(G)}^2 \cdot dz$ byla obdržena homogenní rovnice rovnováhy:

$$\boxed{-\frac{d\sigma_{zI(G)}}{dz} + \frac{4 \cdot \tau_{fI(G)}}{D_{I(G)}} = 0} \quad (18)$$

Aplikací fyzikální rovnice pro radiální napětí na podmínku (17) byl získán vztah:

$$\varepsilon_{rI} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_{rI(G)} - \mu \cdot (\sigma_{zI(G)} + \sigma_{\varphi I(G)})] = 0 \quad (19)$$

Pokud v rotačně symetrické úloze platí $\sigma_{rI(G)} = \sigma_{\varphi I(G)}$, pak ze vztahu (19) plyne:

$$\boxed{\sigma_{rI(G)} = \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \sigma_{zI(G)} \text{ [MPa]}} \quad (20)$$

Pro další výpočty bylo využito Coulombova vztahu pro smykové třecí napětí $\tau_{fI(G)}$

$$\boxed{\tau_{fI(G)} = f_1 \cdot \sigma_{rI(G)} \text{ [MPa]}} \quad (21)$$

Dosazením podmínek (20) a (21) do rovnice rovnováhy (18) vznikne upravená rovnice:

$$-\frac{d\sigma_{zI(G)}}{dz} + \frac{4 \cdot f_1}{D_{I(G)}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \sigma_{zI(G)} = 0$$

Po separaci proměnných:

$$\int \frac{d\sigma_{zI(G)}}{\sigma_{zI(G)}} = \frac{4 \cdot f_1}{D_{I(G)}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \int dz$$

Integrací předešlé rovnice nabude odvození tvaru:

$$\ln|\sigma_{zI(G)}| = \frac{4 \cdot f_1}{D_{I(G)}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot z + \ln C$$

Odlogaritmováním vznikne:

$$\ln|\sigma_{zI(G)}| = \ln \left| C \cdot e^{z \cdot \frac{4 \cdot f_1}{D_{I(G)}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu}} \right|$$

$$\sigma_{zI(G)} = C \cdot e^{z \cdot \frac{4 \cdot f_1}{D_{I(G)}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu}} \quad (22)$$

Dosazením okrajových podmínek (23) do (22) byla získána hodnota konstanty C

$$\text{OP: } \sigma_{zI(G)} = \sigma_{\rho II \max(G)}; z = 0 \quad (23)$$

$$C = \sigma_{\rho II \max(G)}$$

Zpětným dosazením konstanty C do (22) vznikl vztah pro osové napětí ve vstupním kontejneru:

$$\boxed{\sigma_{zI(G)} = \sigma_{\rho II \max(G)} \cdot e^{z \cdot \frac{4 \cdot f_1}{D_{I(G)}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu}} \text{ [MPa]}} \quad (24)$$

Dosazením (24) do vztahu (20) za $\sigma_{zI(G)}$ byl vyjádřen vztah pro radiální napětí:

$$\boxed{\sigma_{rI(G)} = \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \sigma_{\rho II \max(G)} \cdot e^{z \cdot \frac{4 \cdot f_1}{D_{I(G)}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu}} = \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \sigma_{zI(G)} \text{ [MPa]}} \quad (25)$$

Řešení pro celou průtláčnici:

Po dosazení za $\sigma_{pII(G)}$ z rovnice (13) do vztahu (24) pro $z = L_{I(G)}$ vznikl výsledný vztah pro deformační odpor při běžném, dobře mazaném protlačování.

$$\sigma_{d(G)} \equiv \sigma_{zI\max(G)} = \sigma_{pS(G)} \cdot e^{\frac{\mu}{1-\mu} \cdot 4 \cdot f_1 \cdot \frac{L_{I(G)}}{D_{I(G)}}} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_{III(G)}}{D_{III(G)}} \cdot \frac{\sigma_{pIII(G)}}{\sigma_{pS(G)}} + \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D_{I(G)}}{D_{III(G)}} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\operatorname{tg}\alpha}} - \frac{\operatorname{tg}\alpha}{f_2} - 1 \right] \text{ [MPa]} \quad (26)$$

Lze také využít vztah pro deformační odpor dle Feldmanna, který je doplněn o vliv tření v očku a v zásobníku:

$$\sigma_{d(F)} = \sigma_{pS(G)} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\hat{\alpha}} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_{I(G)}}{D_{III(G)}} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \hat{\alpha} \right] + 4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_{III(G)}}{D_{III(G)}} \cdot \sigma_{pIII(G)} + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{L_{I(G)}}{D_{I(G)}} \cdot \sigma_{pI(G)} \text{ [MPa]} \quad (27)$$

Následuje řešení obecné diferenciální rovnice separací proměnných:

$$\int d\sigma_{zII(D)} = -\frac{4 \cdot f_{2s} \cdot \sigma_{pII(D)}}{(D_i - d_i)} \cdot \int dz$$

$$\sigma_{zII(D)} = -\frac{4 \cdot f_{2s} \cdot \sigma_{pII(D)}}{(D_i - d_i)} \cdot z + C \quad (3)$$

Dosazením okrajových podmínek $z=b$ a $\sigma_{zII(D)}=0$ do (3) a vyjádřením konstanty C :

$$C = +\frac{4 \cdot f_{2s} \cdot \sigma_{pII(D)}}{(D_i - d_i)} \cdot b$$

Zpětným dosazením konstanty do (3) byl vyjádřen vztah (4) pro osové napětí $\sigma_{zII(D)}$:

$$\sigma_{zII(D)} = \frac{4 \cdot f_{2s} \cdot \sigma_{pII(D)}}{(D_i - d_i)} \cdot (b - z) \quad (4)$$

Z podmínky plasticity (5) byl odvozen vztah pro radiální napětí

$$\sigma_{rII(D)} - \sigma_{zII(D)} = \sigma_{pII(D)} \rightarrow$$

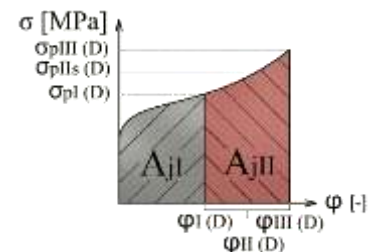
$$\sigma_{rII(D)} = \sigma_{zII(D)} + \sigma_{pII(D)} \quad (5)$$

$$\sigma_{rII(D)} = \left[\frac{4 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot (b - z) + 1 \right] \cdot \sigma_{pII(D)} \quad (6)$$

V rovnicích (5) a (6) je využíván model materiálu, vyjádřený křivkou zpevnění (viz. obr. P4.3) za předpokladu:

$$z = 0 \rightarrow \sigma_{pII(D)} = \sigma_{pI(D)}$$

$$z = b \rightarrow \sigma_{pII(D)} = \sigma_{pIII(D)} = \sigma_{rII(D)}$$



Obr. P4.3: Model zpevnění materiálu [5]

Odvození vztahů pro oblast I – plný průřez:

Podmínka rovnováhy sil podle geometrického modelu (viz obr. P4.2) na objemovém, rotačně symetrickém elementu $2 \cdot \pi \cdot r \cdot b \cdot dr$ v radiálním směru v oblasti přechování (oblast I):

$$\sum F = 0 \rightarrow$$

$$\sigma_{rI(D)} \cdot r \cdot b \cdot d\varphi - (\sigma_{rI(D)} + d\sigma_{rI(D)}) \cdot (r + dr) \cdot b \cdot d\varphi - 2 \cdot \sigma_{t(D)} \cdot b \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} - 2 \cdot \tau_{fI(D)} \cdot dr \cdot r \cdot d\varphi = 0$$

Pro malé úhly lze zavést následující vztah:

$$\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2} \quad (7)$$

V případě rotačně symetrické úlohy je zavedena podmínka rovnosti radiálního a tečného napětí

$$\sigma_t(D) = \sigma_{rI(D)} \quad (8)$$

Úpravou rovnice rovnováhy roznásobením členem $1/b$ a s využitím podmínek (7) a (8):

$$-d\sigma_{rI(D)} \cdot r \cdot d\varphi - d\sigma_{rI(D)} \cdot dr \cdot d\varphi - 2 \cdot \frac{\tau_{fI(D)}}{b} \cdot dr \cdot r \cdot d\varphi = 0$$

Zanedbáním součinu diferenciálů a roznásobením rovnice členem $1/r \cdot dr$:

$$-d\sigma_{rI(D)} - 2 \cdot \frac{\tau_{fl(D)}}{b} \cdot dr = 0$$

Pro smykové třecí napětí dle Coulomba v pěchovací oblasti I platí:

$$\tau_{fl(D)} = f_1 \cdot \sigma_{pI(D)} \quad (9)$$

Po úpravě a využití Coulombova zákona (9) vznikne homogenní difer. rovnice rovnováhy

$$\frac{d\sigma_{rI(D)}}{dr} + \frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \sigma_{pI(D)} = 0 \quad (10)$$

Rovnice se dále řeší separací proměnných:

$$\int d\sigma_{rI(D)} = -\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \sigma_{pI(D)} \cdot \int dr$$

$$\sigma_{rI(D)} = -\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \sigma_{pI(D)} \cdot r + C \quad (11)$$

Dosazením okrajových podmínek (12) do obecného řešení (11) lze zjistit konstantu C

$$OP: r = \frac{d_i}{2}; \sigma_{rI(D)} = \sigma_{rIIs(D)} \quad (12)$$

$$C = \sigma_{rIIs(D)} + \frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \frac{d_i}{2} \cdot \sigma_{pI}$$

Zpětným dosazením konstanty do (11) se odvodí vztah (13) pro radiální napětí $\sigma_{rI(D)}$:

$$\sigma_{rI(D)} = -\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \sigma_{pI(D)} \cdot r + \sigma_{rIIs(D)} + \frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \frac{d_i}{2} \cdot \sigma_{pI(D)}$$

$$\sigma_{rI(D)} = \sigma_{rIIs(D)} + \sigma_{pI(D)} \cdot \frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) \quad (13)$$

Dosazením do (13) za $\sigma_{rIIs(D)}$ ze vztahu (6), kde $\sigma_{pII(D)} = \sigma_{p2s}$ a $z=b/2$ vznikne vztah pro radiální napětí $\sigma_{rI(D)}$ v oblasti I:

$$\sigma_{rI(D)} = \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} + \sigma_{pI(D)} \cdot \frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) \quad (14)$$

Využitím podmínky plasticity (15) se určí vztah (16) pro osově napětí $\sigma_{zI(D)}$ v oblasti I

$$\sigma_{zI(D)} - \sigma_{rI(D)} = \sigma_{pI(D)} \rightarrow \sigma_{zI(D)} = \sigma_{rI(D)} + \sigma_{pI(D)} \quad (15)$$

$$\sigma_{zI(D)} = \sigma_{rIIs(D)} + \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) + 1 \right] \quad (16)$$

Konečně pak dosazením za $\sigma_{rIIs(D)}$ z (6), použitím podmínek $\sigma_p = \sigma_{pIIs(D)}$ a $z=b/2$ vznikne vztah pro popis rozložení osového napětí průtláčnicku v kontaktní ploše v úseku I:

$$\sigma_{zI(D)} = \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} + \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) + 1 \right] \quad (17)$$

Odvození deformačního odporu pro plný průřez:

Deformační odpor se určí integrací vztahu pro střední napětí σ_{zls} ($z=b/2$) po celé ploše průtláčnicku:

$$\sigma_{d(D)} = |p_0| = \frac{1}{S} \cdot \int_{(S)} \sigma_{zI(D)} \cdot dS \quad (18)$$

Dosazením do σ_{zI} z rovnice (17):

$$\sigma_{d(D)} = \frac{4}{\pi \cdot d_i^2} \cdot \int_{(S)} \sigma_{zI(D)} \left(z = \frac{b}{2} \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$$

$$\sigma_{d(D)} = \frac{8}{d_i^2} \cdot \int_0^{d_i/2} \left\{ \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) + 1 \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \right\} \cdot r \cdot dr$$

Provedením integrace:

$$\sigma_{d(D)} = \frac{8}{d_i^2} \cdot \left\{ \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i^3}{16} - \frac{d_i^3}{24} \right) + \frac{d_i^2}{8} \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \cdot \frac{d_i^2}{8} \right\}$$

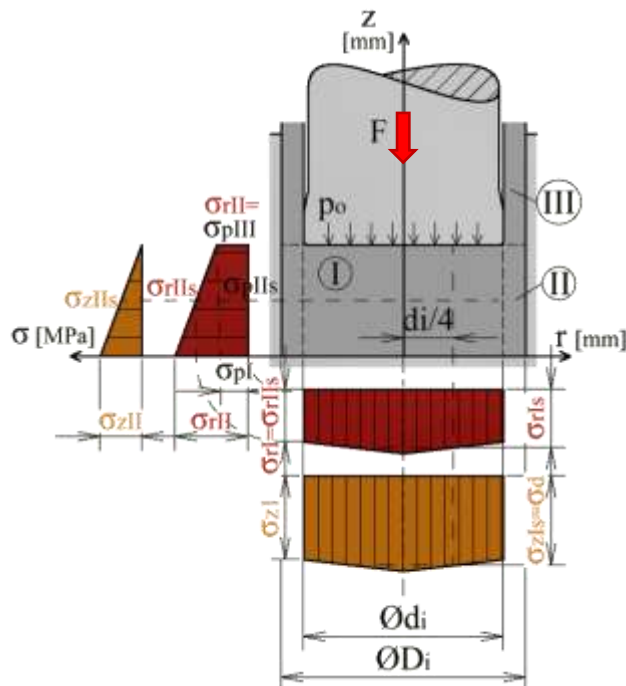
Vytknutím členu $d^2/8$ z předchozí úpravy vyjde následující tvar:

$$\sigma_{d(D)} = \frac{8}{d_i^2} \cdot \left\{ \sigma_{pI(D)} \cdot \frac{d_i^2}{8} \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \frac{d_i^2}{6} + 1 \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \cdot \frac{d_i^2}{8} \right\}$$

Konečnou úpravou se vyjádří požadovaný vztah pro deformační odpor:

$$\sigma_{d(D)} = \sigma_{pI(D)} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot f_1 \cdot \frac{d_i}{b} \right] + \left[1 + \frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \quad (19)$$

Průběh radiálních a osových napětí pro plný průřez je znázorněn na obrázku P4.4.



Obr. P4.4: Průběh napětí u zpětného protlačování plného průřezu dle Dippera [5], [25]

Odvození deformačního odporu pro průřez tvaru mezikruží:

Pro odvození vztahů je potřeba zavést patřičná označení průměrů. Proto byl zaveden pro průměr průtláčnicku (větší průměr) označení d_i a pro průměr otvoru mezikruží (menší průměr) označení d_{ii} .

Všechny vztahy pro radiální a osová napětí se určují pro mezikruží stejně jako pro plný průřez. Pouze se při dosazování do okrajových podmínek pro obecný poloměr r dosadí namísto nuly nejmenší rozměr průřezu – tedy $d_{ii}/2$.

Při odvozování deformačního odporu je počítán rozdíl dvou rozdílných integrálů s jinými mezemi:

Dosazením za σ_{z1} z rovnice (17) do rovnice (18):

$$\sigma_d(D) = \frac{8}{d_i^2 - d_{ii}^2} \cdot \left\{ \int_0^{\frac{d_i}{2}} \left\{ \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i}{2} - r \right) + 1 \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \right\} \cdot r \cdot dr - \int_0^{\frac{d_{ii}}{2}} \left\{ \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_{ii}}{2} - r \right) + 1 \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \right\} \cdot r \cdot dr \right\}$$

Provedením integrace:

$$\sigma_d(D) = \frac{8}{d_i^2 - d_{ii}^2} \cdot \left\{ \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_i^3}{16} - \frac{d_i^3}{24} \right) + \frac{d_i^2}{8} \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \cdot \frac{d_i^2}{8} - \sigma_{pI(D)} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \left(\frac{d_{ii}^3}{16} - \frac{d_{ii}^3}{24} \right) + \frac{d_{ii}^2}{8} \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s}}{(D_i - d_i)} \cdot b + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \cdot \frac{d_{ii}^2}{8} \right\}$$

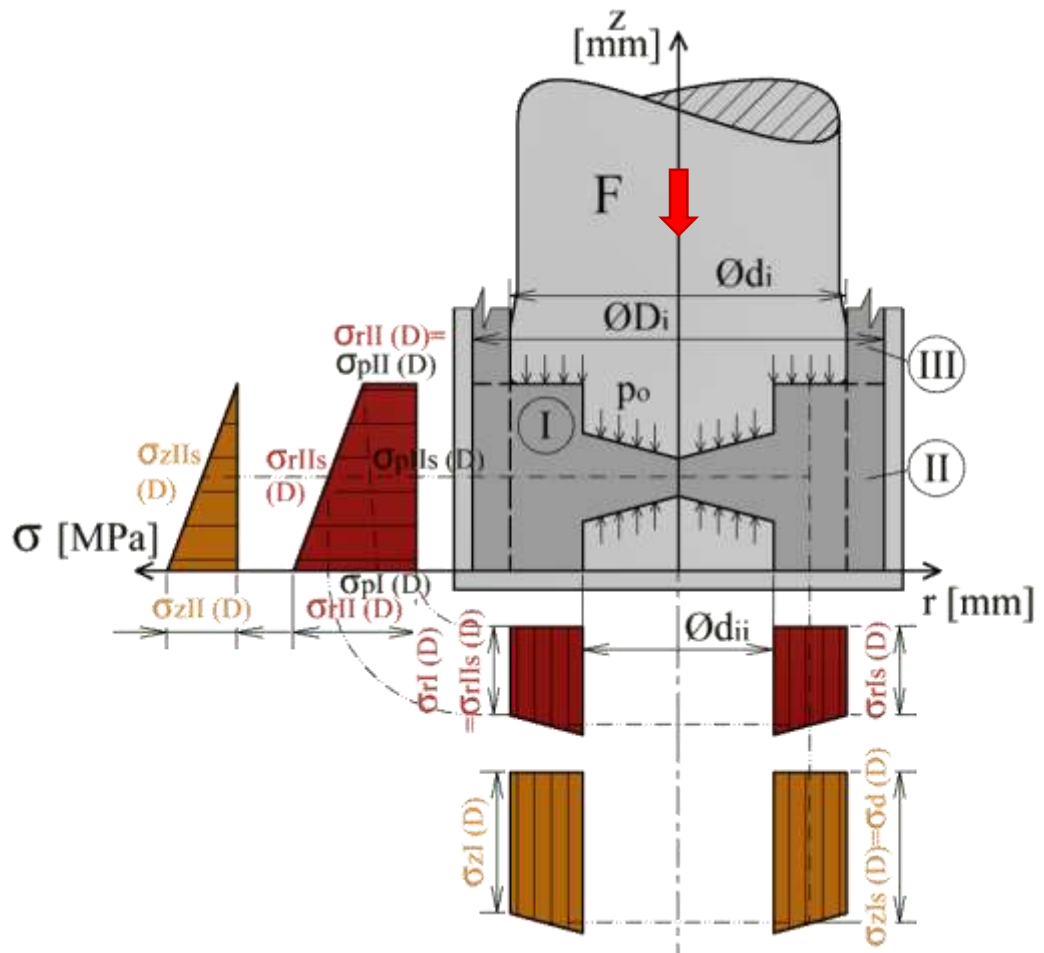
Vytknutím členu $(d_i^2 - d_{ii}^2)/8$ z předchozí úpravy vyjde následující tvar:

$$\sigma_d(D) = \frac{8}{d_i^2 - d_{ii}^2} \cdot \left\{ \sigma_{pI(D)} \cdot \frac{d_i^2 - d_{ii}^2}{8} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_1}{b} \cdot \frac{D_i - d_{ii}}{6} + 1 \right] + \left[\frac{2 \cdot f_{2s} \cdot b}{(D_i - d_i)} + 1 \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \cdot \frac{d_i^2 - d_{ii}^2}{8} \right\}$$

Konečnou úpravou se vyjádří požadovaný vztah pro deformační odpor:

$$\sigma_d(D) = \sigma_{pI(D)} \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot f_1 \cdot \frac{d_i - d_{ii}}{b} \right] + \left[1 + \frac{2 \cdot f_{2s}}{D_i - d_i} \cdot b \right] \cdot \sigma_{pIIs(D)} \quad (20)$$

Průběh radiálních a osových napětí pro plný průřez je znázorněn na obrázku P4.5 na následující straně



Obr. P4.5: Průběh napětí u zpětného protlačování průřezu mezikruží dle Dippera [5], [25]

Výpočet vztahů pro zpětné protlačování ve druhé operaci dle Siebela (části F a G)

• Zpětné protlačování $\varnothing d_1$ do menšího průměru $\varnothing D_2$:

V rámci této podoperace (viz obr. P5.1) se protlačují dva stejné otvory $\varnothing d_1$ do válcové části II o průměru $\varnothing D_2$, konkrétně shora pomocí průtlačníku a zespoda pomocí vyhazovače, který plní funkci průtlačníku. Výběr vhodného způsobu výpočtu byl určen z podmínek pro využití vztahů, určených jejichmi autory.

Podmínka využití vztahu dle Dippera:

Dosazením do podmínky ze vztahu () za $D_i=D_2$; $d_i=d_1$:

$$\frac{d_1^2}{D_2^2} = \frac{5,1^2}{10,9^2} = 0,22 \rightarrow 0,5 \sim 0,6 \rightarrow \text{nevyhovuje} \quad (1)$$

Podmínka využití vztahu dle Siebela:

Dosazením do podmínky ze vztahu () za $s=(D_2-d_1)/2$; $d_i=d_1$:

$$\frac{D_2 - d_1}{2} > 0,1 \cdot d_1 \rightarrow \frac{10,9 - 5,1}{2} > 0,1 \cdot 5,1$$

$$\rightarrow 2,9 > 0,51 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (2)$$

Logaritmická deformace :

$$\varphi_F = |\varphi_B| + \left| \ln \frac{D_2^2 - d_1^2}{D_2^2} \right| = 0,515 + \left| \ln \frac{10,9^2 - 5,1^2}{10,9^2} \right| = \underline{\underline{0,762}} \quad (3)$$

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice (2.)

$$\begin{aligned} \sigma_{p,F} &= 4,64 \cdot \varphi_F^5 + 16,76 \cdot \varphi_F^4 + 0,05 \cdot \varphi_F^3 - 157,91 \cdot \varphi_F^2 + 205,73 \cdot \varphi_F + 140,31 = \\ &= 4,64 \cdot 0,762^5 + 16,76 \cdot 0,762^4 + 0,05 \cdot 0,762^3 - 157,91 \cdot 0,762^2 + \\ &\quad + 205,73 \cdot 0,762 + 140,31 = \underline{\underline{212,25 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (4)$$

Měrná přetvárná práce: viz vztah (2.)

$$\begin{aligned} A_{j,F} &= 0,0063 \cdot \varphi_F^4 - 0,0056 \cdot \varphi_F^3 + 0,0006 \cdot \varphi_F^2 + 0,19 \cdot \varphi_F = \\ &= 0,0063 \cdot 0,762^4 - 0,0056 \cdot 0,762^3 + 0,0006 \cdot 0,762^2 + 0,19 \cdot 0,762 = \\ &= \underline{\underline{0,145 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \end{aligned} \quad (5)$$

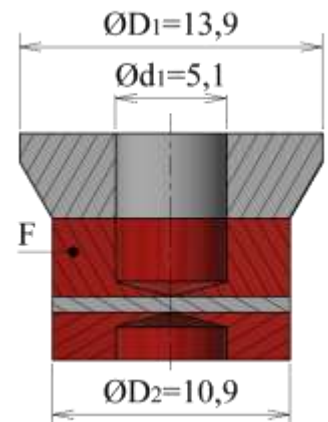
Deformační odpor $\sigma_{d,E}$ dle Siebela:

Dosazením za $\sigma_p=\sigma_{p,F}$; $D_i=D_2$; $d_i=d_1$ do vztahu ():

$$\begin{aligned} \sigma_{d,E} &= 1,152 \cdot \sigma_{p,E} \cdot \frac{D_2^2}{d_1^2} \cdot \left(\log \frac{D_2^2}{D_2^2 - d_1^2} + \frac{D_2^2}{D_2^2 - d_1^2} \cdot \log \frac{D_2^2}{d_1^2} + \log \frac{d_1^2}{D_2^2 - d_1^2} \right) = \\ &= 1,152 \cdot 212,25 \cdot \frac{10,9^2}{5,1^2} \cdot \left(\log \frac{10,9^2}{10,9^2 - 5,1^2} + \frac{10,9^2}{10,9^2 - 5,1^2} \cdot \log \frac{10,9^2}{5,1^2} + \right. \\ &\quad \left. + \log \frac{5,1^2}{10,9^2 - 5,1^2} \right) = \underline{\underline{446,22 \text{ MPa}}} \end{aligned} \quad (6)$$

Tvářecí síla:

$$F_E = \sigma_{d,E} \cdot S_E = \sigma_{d,E} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 446,22 \cdot \frac{\pi \cdot 5,1^2}{4} = \underline{\underline{9,11 \text{ kN}}} \quad (7)$$



Obr. P5.1: Zpětné protlačování otvoru $\varnothing d_1$ do menšího průměru $\varnothing D_2$

• **Zpětné protlačování $\text{Ø}d_1$ do většího průměru $\text{Ø}D_1$:**

V rámci této podoperace (viz obr. P5.2) se protlačuje otvor $\text{Ø}d_2$ do vrchní části G o průměru $\text{Ø}D_2$ s menším otvorem $\text{Ø}d_1$, vyhotoveným v předchozí podoperaci. V praxi jsou však oba otvory vytvořeny jedním nástrojem v téže operaci.

Výběr vhodného způsobu výpočtu byl určen z podmínek pro využití vztahů, určených jejichmi autory.

Podmínka využití vztahu dle Dippera:

Dosažením do podmínky ze vztahu () za $D_i=D_1$; $d_i=d_2$:

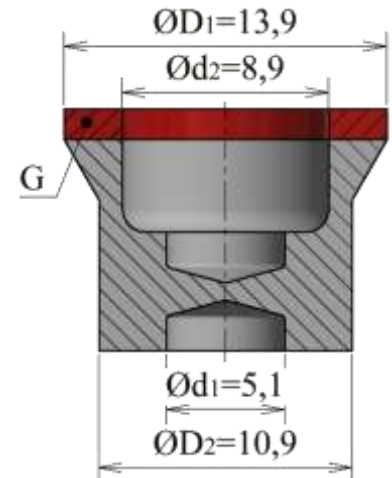
$$\frac{d_2^2}{D_1^2} = \frac{8,9^2}{13,9^2} = 0,41 \rightarrow 0,5 \sim 0,6 \rightarrow \text{nevyhovuje} \quad (8)$$

Podmínka využití vztahu dle Siebela:

Dosažením do podmínky ze vztahu () za $s=(D_1-d_2)/2$; $d_i=d_2$:

$$\frac{D_1 - d_2}{2} > 0,1 \cdot d_2 \rightarrow \frac{13,9 - 8,9}{2} > 0,1 \cdot 8,9$$

$$\rightarrow 2,5 > 0,89 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (9)$$



Obr. P5.2: Zpětné protlačování otvoru $\text{Ø}d_2$ do většího průměru $\text{Ø}D_1$

Logaritmická deformace :

$$\varphi_G = |\varphi_E| + \left| \ln \frac{D_1^2 - d_2^2}{D_1^2 - d_1^2} \right| = 0,174 + \left| \ln \frac{13,9^2 - 8,9^2}{10,9^2 - 5,1^2} \right| = \underline{\underline{0,557}} \quad (10)$$

Přirozený přetvárný odpor: viz rovnice (2.)

$$\sigma_{p,G} = 4,64 \cdot \varphi_G^5 + 16,76 \cdot \varphi_G^4 + 0,05 \cdot \varphi_G^3 - 157,91 \cdot \varphi_G^2 + 205,73 \cdot \varphi_G + 140,31 =$$

$$= 4,64 \cdot 0,557^5 + 16,76 \cdot 0,557^4 + 0,05 \cdot 0,557^3 - 157,91 \cdot 0,557^2 +$$

$$+ 205,73 \cdot 0,557 + 140,31 = \underline{\underline{207,76 \text{ MPa}}} \quad (11)$$

Měrná přetvárná práce: viz vztah (2.)

$$A_{j,G} = 0,0063 \cdot \varphi_G^4 - 0,0056 \cdot \varphi_G^3 + 0,0006 \cdot \varphi_G^2 + 0,19 \cdot \varphi_G =$$

$$= 0,0063 \cdot 0,557^4 - 0,0056 \cdot 0,557^3 + 0,0006 \cdot 0,557^2 + 0,19 \cdot 0,557 =$$

$$= \underline{\underline{0,106 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}}} \quad (12)$$

Deformační odpor $\sigma_{d,E}$ dle Siebela:

Dosažením za $\sigma_p = \sigma_{p,G}$; $D_i=D_2$; $d_i=d_1$ do vztahu ():

$$\sigma_{d,G} = 1,152 \cdot \sigma_{p,G} \cdot \frac{D_1^2}{d_2^2} \cdot \left(\log \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_2^2} + \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_2^2} \cdot \log \frac{D_1^2}{d_2^2} + \log \frac{d_2^2}{D_1^2 - d_2^2} \right) =$$

$$= 1,152 \cdot 207,76 \cdot \frac{13,9^2}{8,9^2} \cdot \left(\log \frac{13,9^2}{13,9^2 - 8,9^2} + \frac{13,9^2}{13,9^2 - 8,9^2} \cdot \log \frac{13,9^2}{8,9^2} + \right.$$

$$\left. + \log \frac{8,9^2}{13,9^2 - 8,9^2} \right) = \underline{\underline{424,61 \text{ MPa}}} \quad (13)$$

Tvářecí síla:

$$F_G = \sigma_{d,G} \cdot S_G = \sigma_{d,G} \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 424,61 \cdot \frac{\pi \cdot 8,9^2}{4} = \underline{\underline{26,42 \text{ kN}}} \quad (14)$$

Odvození vztahů pro rychlosti deformace pro jednotlivé tvářecí procesy [37], [38]**Vztahy pro určení rychlosti deformace**

Rychlost deformace je z fyzikálního hlediska derivací logaritmického přetvoření dle času, viz (9).

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} [s^{-1}] \quad (1)$$

kde: $d\varphi$ [-] – diferenciální změna logaritmické deformace

Pokud o aktuální výšce tělesa h , bude platit rovnice (2), pak obecný vztah pro rychlost přetvoření lze uvést ve tvaru (3).

$$d\varphi = \pm \frac{dh}{h} [-] \quad (2)$$

kde: h [mm] – okamžitá výška
 dh [mm] – diferenciální změna výšky

$$\dot{\varphi} = \frac{1000 \cdot v_0}{h} [s^{-1}] \quad (3)$$

kde: $\dot{\varphi}$ [s^{-1}] – rychlost logaritmického přetvoření
 v_0 [ms^{-1}] – rychlost chodu nástroje

Řešení rychlosti deformace pro pěchovanou součást:

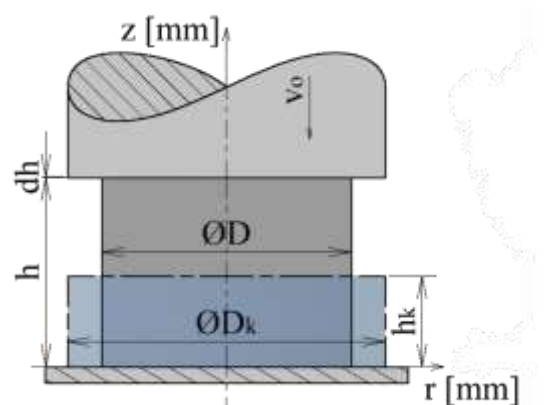
Ze zákona zachování objemu (4) a z předpokladu (5) pro rotační symetrii platí vztah(3) (6) pro určení rychlosti přetvoření v radiálním a tečném směru.

$$\dot{\varphi}_z + \dot{\varphi}_r + \dot{\varphi}_t = 0 \quad (4)$$

kde: $\dot{\varphi}_z$ [s^{-1}] – rychlost logaritmického přetvoření v osovém směru

$\dot{\varphi}_r$ [s^{-1}] – rychlost logaritmického přetvoření v radiálním směru

$\dot{\varphi}_t$ [s^{-1}] – rychlost logaritmického přetvoření v tečném směru



Obr. P7.1: Geometrický model pro výpočet rychlosti deformace pro pěchování [38]

$$\text{div}(v) = \text{tr}(\varphi) = 0 \quad (5)$$

kde: φ [-] – velikost logaritmického přetvoření

$$\dot{\varphi}_{r \text{ pěch}} = \dot{\varphi}_t(s) = -\frac{1}{2} \cdot \dot{\varphi}_z(s) \quad (6)$$

Dosazením vztahu (3) pro osový směr do vztahu (6) vznikne konečný obecný vztah pro určení rychlosti přetvoření v radiálním a osovém směru (7) a vztah pro rychlost přetvoření v axiálním směru.

$$\dot{\varphi}_{r \text{ (pěch)}} = \dot{\varphi}_t \text{ (pěch)} = \frac{v_0 \cdot 1000}{2 \cdot h} [s^{-1}] \quad (7)$$

$$\dot{\varphi}_z \text{ (pěch)} = -2 \cdot \dot{\varphi}_t \text{ (pěch)} = -2 \cdot \dot{\varphi}_r \text{ (pěch)} = -\frac{v_0 \cdot 1000}{h} [s^{-1}] \quad (8)$$

Řešení rychlosti deformace pro součást vyrobenou dopředným protlačováním:

Při výpočtech se vychází z předpokladu, že objemový tok materiálu je stejný jak v oblasti ohniska, tak i v oblasti zásobníku.

Rovnost je vyjádřena vztahem (9).

$$v_0 \cdot r_{I(DP)}^2 \cdot 10^3 = v_{z(DP)} \cdot r^2 \cdot 10^3 \quad (9)$$

kde: r [mm] – okamžitý poloměr
 $r_{I(DP)}$ [mm] – poloměr vstupního kontejneru
 $v_{z(DP)}$ [ms^{-1}] – rychlost toku materiálu v osovém směru u dopředného protlačování

Za předpokladu, že $z = (r_{I(DP)} - r) / \text{tg}(\alpha)$ platí po úpravě rovnice (9) vztah (10).

$$v_{z(DP)} = v_0 \cdot \frac{r_{I(DP)}^2}{r^2} = \frac{v_0 \cdot r_{I(G)}^2}{[r_{I(DP)} - z \cdot \text{tg}(\alpha)]^2} [\text{ms}^{-1}] \quad (10)$$

kde: α [°] – redukční úhel průtlačnice
 z [mm] – okamžitá výška

Pro radiální směr v místě stěny kužele platí vztah (11):

$$v_{r(DP)} = v_{z(DP)} \cdot \text{tg}(\alpha) = v_0 \cdot \frac{r_{I(DP)}^2}{r^2} \cdot \text{tg}(\alpha) [\text{ms}^{-1}] \quad (11)$$

kde: $v_{r(DP)}$ [ms^{-1}] – rychlost toku v radiálním směru u dopředného protlačování
 $v_{z(DP)}$ [ms^{-1}] – rychlost toku v osovém směru u dopředného protlačování

Za předpokladu rotačně symetrické úlohy, kdy platí předpoklad (6), lze rychlost přetvoření v radiálním a tečném směru uvést vztahem (12):

$$\dot{\varphi}_r(DP) = \dot{\varphi}_t(DP) = \frac{d\varphi_r(DP)}{dt} = \frac{dr}{dt} = -\frac{v_{r(DP)} \cdot 10^3}{r} = -v_0 \cdot \frac{r_{I(DP)}^2 \cdot 10^3}{r^3} \cdot \text{tg}(\alpha) [\text{s}^{-1}] \quad (12)$$

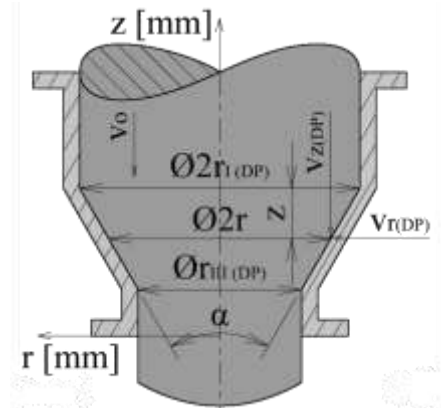
kde: $\dot{\varphi}_r(DP)$ [s^{-1}] – rychlost deformace v radiálním směru u dopředného protlačování
 $\dot{\varphi}_t(DP)$ [s^{-1}] – rychlost deformace v tečném směru u dopředného protlačování

Ze zákona zachování objemu (4) lze pomocí rovnice (12) odvodit vztah (13) pro okamžitou osovou rychlost přetvoření v obecném místě redukčního kužele o obecném poloměru R :

$$\dot{\varphi}_z(DP) = -\dot{\varphi}_r(DP) - \dot{\varphi}_t(DP) = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{r_{I(DP)}^2 \cdot 10^3}{r^3} \cdot \text{tg}(\alpha) [\text{s}^{-1}] \quad (13)$$

kde: $\dot{\varphi}_z(DP)$ [s^{-1}] – rychlost deformace v osovém směru u dopředného protlačování

Největších rychlostí deformace je dosaženo na vstupu do kalibračního oka neboli koncovém poloměru redukčního kužele $r=r_{III(DP)}$.



Obr. P7.2: Geometrický model pro výpočet rychlosti deformace pro dopředné protlačování [38]

Řešení rychlosti deformace pro součást vyrobenou zpětným protlačováním:

Z geometrie pod průtláčnickem (viz obr. P7.3) plyne pro okamžitý poloměr r a výšku dna b vztah:

$$b = r \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + b_{\min} \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

kde: β $[\circ]$ – úhel průtláčnicku pro zpětné protlačování

b_{\min} $[\text{mm}]$ – nejnižší výška dna

b $[\text{mm}]$ – okamžitá výška dna

Z rovnosti materiálových toků skrze průřez pod průtláčnickem $\pi \cdot r^2$ a skrze plášť o povrchové ploše $2 \cdot \pi \cdot r \cdot b$ pro obecnou výšku dna b a poloměr r platí rovnice kontinuity (15):

$$v_0 \cdot \pi \cdot r^2 = v_r(\text{ZP}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot b \quad (15)$$

kde: $v_r(\text{ZP})$ $[\text{ms}^{-1}]$ – rychlost toku v radiálním směru u zpětného protlačování

Doplněním vztahu (14) do rovnice (15) vznikne upravený vztah (16) pro radiální rychlost toku $v_r(\text{ZP})$ skrze plášť o obecném průměru r :

$$v_r(\text{ZP}) = v_0 \cdot \frac{r}{2 \cdot b} = \frac{v_0 \cdot r}{2 \cdot (r \cdot \operatorname{tg}(\beta) + b_{\min})} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (16)$$

Obdobně jako ve vztahu (12) pro dopředné protlačování platí pro radiální a tečnou rychlost přetvoření rovnost a s uvažováním rovnice (16) lze získat vztah (17):

$$\dot{\varphi}_r(\text{ZP}) = \dot{\varphi}_t(\text{ZP}) = \frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{dr}{dt} = \frac{v_r \cdot 10^3}{r} = \frac{v_0 \cdot 10^3}{2 \cdot (r \cdot \operatorname{tg}(\beta) + b_{\min})} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (17)$$

kde: $v_r(\text{ZP})$ $[\text{ms}^{-1}]$ – rychlost toku v radiálním směru u zpětného protlačování

$\dot{\varphi}_r(\text{ZP})$ $[\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v radiálním směru u zpětného protlačování

$\dot{\varphi}_t(\text{ZP})$ $[\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v tečném směru u zpětného protlačování

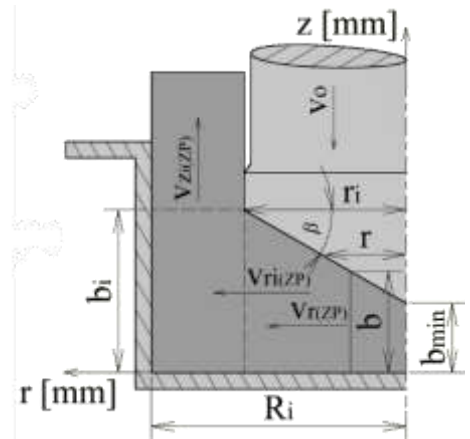
Užitím podmínky rotační symetrie dle (6) vznikne odvození (18) pro rychlost přetvoření v osovém směru

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_z(\text{ZP}) &= -\dot{\varphi}_r(\text{ZP}) - \dot{\varphi}_t(\text{ZP}) = -2 \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} = -2 \cdot \frac{dr}{dt} \\ &= -\frac{v_r(\text{ZP}) \cdot 10^3}{r} = -\frac{v_0 \cdot 10^3}{r \cdot \operatorname{tg}(\beta) + b_{\min}} \quad [\text{s}^{-1}] \end{aligned} \quad (18)$$

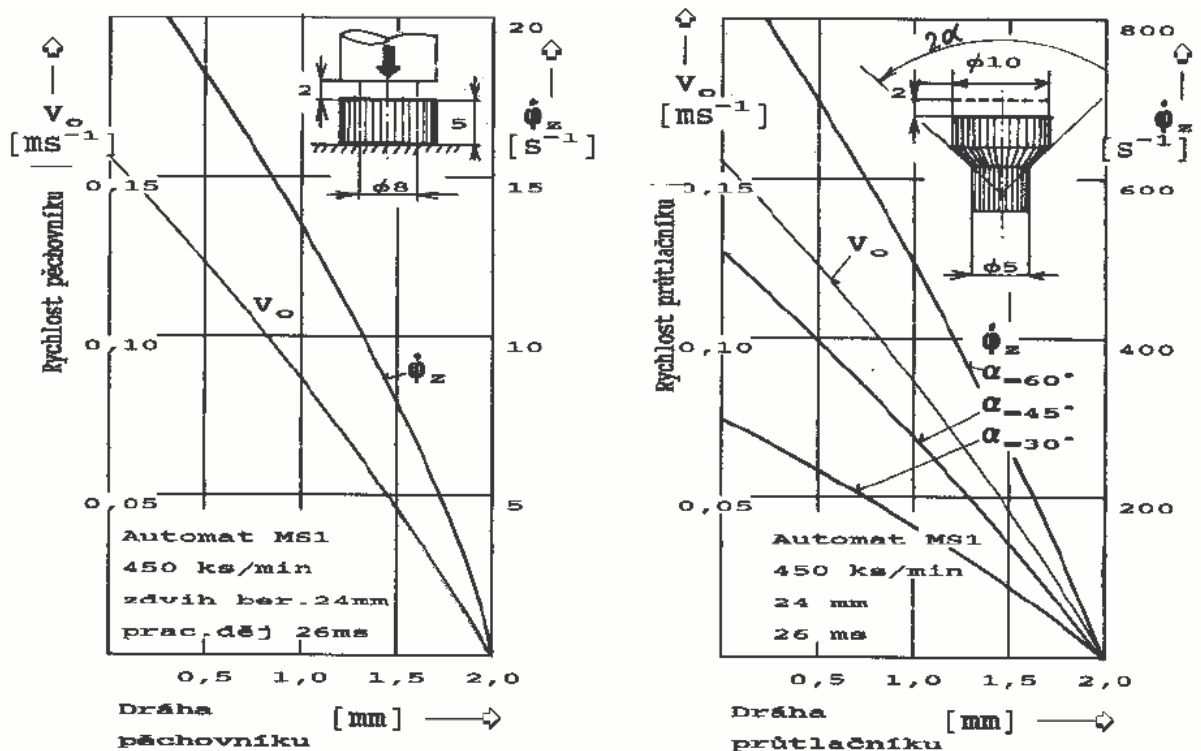
kde: $\dot{\varphi}_z(\text{ZP})$ $[\text{s}^{-1}]$ – rychlost deformace v osovém směru u zpětného protlačování

Z rovnice kontinuity poté plyne vztah (19) pro rychlost výstupu materiálu mezikružím

$$v_{z3} = v_0 \cdot \frac{r_i^2}{R_i^2 - r_i^2} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (19)$$



Obr. P7.3: Geometrický model pro výpočet rychlosti deformace pro pěchování [38]



Obr. P7.4: diagramy určení rychlosti deformace pro pěchování a dopředné protlačování [38]

Tabulka P7.1: Rozdělení zkoušek dle zařízení [38]

Druh zatížení	Rychlost deformace $\dot{\varphi}$ [s ⁻¹]	Testovací metoda	Tvářecí technologie/zařízení	Dynamické podmínky	Zanedbání setrvačných sil
Dynamické	10 ⁵ až 10 ⁷	Kolmý dopad na desku	Impulzní metody. Laser v pulzním režimu	Šíření rázové vlny	Nelze zanedbat
Dynamické	10 ³ až 10 ⁴	Taylorův test Hopkinsonův test, Expandující kroužek	Vysokorychlostní pneumatické buchary Tvářecí automaty	Šíření elastické a plastické vlny	Nelze zanedbat
Dynamické	10 ¹ až 10 ³	Vysokorychlostní zkušební stroje	Tvářecí automaty, buchary	Mechanická rezonance vzorku a stroje	Nelze zanedbat
Kvazistatické	10 ⁰ až 10 ¹	Hydraulické a servohydraulické stroje	Lisy klikové, vřetenové a hydraulické	Konstantní/proměnná rychlost deformace	Lze zanedbat
Kvazistatické	10 ⁻⁵ až 10 ⁻³	Konvenční testovací stroje, Creepové testy	Hydraulické lisy, superplastické tváření	Viskoplastická odezva kovu	Lze zanedbat